САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II

unesco
Центр
под эгидой ЮНЕСКО

Международный центр компетенций
в горнотехническом образовании
под эгидой ЮНЕСКО

НЕДРА
Общественно-профессиональное
сообщество вузов России
КОНСОРЦИУМ НЕДРА

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС
ПРОЕКТОВ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ»

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ТОМ 2

06-10
АПРЕЛЯ
2026
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС ПРОЕКТОВ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

06–10 апреля 2026 г.

Тезисы докладов

Том 2

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

УДК 00 (622+55+665.6/7+620.9+621+669)
ББК 2 (65.304.11+33.36+31+34.3)
А 437

Представлены тезисы докладов молодых исследователей, участников XXI Всероссийской конференции-конкурса проектов студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 6-10 апреля 2026 г.). Тезисы представляют интерес для широкого круга исследователей, ученых, педагогов, специалистов, руководителей промышленных предприятий и предпринимателей, работающих в области поиска, разведки, добычи и переработки полезных ископаемых.

Редакционная коллегия: *Петраков Д.Г.* (председатель), *Прищепа О.М., Борзенков В.Т., Мартемьянова А.Н., Степук Е.И., Зимин Р.Ю.*

ISBN 978-5-00253-035-9
ISBN 978-5-00253-037-3 (Том 2)

© Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, 2026

Содержание

Секция 7. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ 11

Диалло А. Оптимальное размещение датчиков для диагностики неисправностей технологических процессов с помощью генетического алгоритма 11

Домахина Ю.А., Солодов С.В. Многоуровневая модель проектируемой логистической системы горно-химического предприятия в условиях неопределенности 13

Иванов Ф.А. Проектирование и реализация архитектуры автоматизированной системы управления движением пневматического манипулятора с использованием ПЛМК 16

Калинин А.В. Применение виртуальных анализаторов в технологическом процессе осушки природного газа 19

Кобец А.А. Совершенствование математических моделей и алгоритмической базы современных систем машинного обучения 22

Кужин А.Г. Комплексная система связи и позиционирования БПЛА в подземных горных выработках 25

Лейнсоо А.А. Нейросетевая диагностическая модель для выявления нарушений в работе содорегенерационного котлоагрегата 27

Малыгин Г.О. Необходимость создания цифрового двойника для моделирования мозга для помощи в реабилитации опухоли головного мозга 30

Мелещенко Н.В. Концепция актуализации рабочих программ дисциплин с учётом требований предприятий на основе интеллектуальной обработки текста 32

Мусурина А.С., Шашкин В.С. Управление рисками информационной безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса в социальных сетях 35

Новожилов М.О. Разработка инфокоммуникационной системы хранения изменений кода и состояния моделей машинного обучения в геологическом моделировании 38

Олькова Н.С., Нефедова Д.С. Влияние разрешения и частоты кадров видеопотока на качество детекции движений в системах видеоконтроля персонала на объектах недропользования 40

Прылипко Е.С. Оперативное управление содорегенерационным котлоагрегатом во внештатных ситуациях 42

Ремизов В.К. Универсальная процессная модель как интерфейс сведения разнородных диаграмм к IDEF0 44

Ромашин Д.В. Повышение эффективности сепарации природного газа в условиях нестабильного газового потока 46

Сидоров Н.Э. Моделирование гидродинамики центробежно-пульсационных мешалок 48

Солнцев А.Ю. Разработка, внедрение и модернизация систем видеонаблюдения на объектах добывающих и перерабатывающих производств 51

Стальмаков С.В. Поиск перспектив автоматизации технологического процесса нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи с применением цифровых моделей 52

Стальнов А.Д. Исследование методов адаптации нейронных сетей 55

Степанищев В.А. Моделирование процесса вторичной ректификации бензиновых фракций 58

Суханов А.А. Метрическая оценка качества распознавания людей на основе генерации видеопотока изображений лиц 61

Таах М.Д. Использование поточных хроматографов и программно-управляемых датчиков на установке разделения пропан пропиленовой фракции 64

Тарасенко А.А. Многомодельная схема вибродиагностики технического состояния оборудования по одному потоку акселерометрических данных 66

Туляков И.А. Применение нейронной сети YOLOv8 для контроля повреждений и износа зубьев карьерных экскаваторов 69

Хатрусов А.С. Автоматизированный мониторинг вакансий системных аналитиков для задач кадрового обеспечения цифровой трансформации минерально-сырьевого комплекса 72

Худяков С.Д. Моделирование распределения электрической мощности в системе переменного тока с несколькими погруженными электродами 74

Шемет Д.Д. Моделирование систем управления процессом разделения изопентан-пентановой фракции 76

Секция 8. ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ, ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МЕТАЛЛУРГИЯ 79

Анакина Д.А. Коррозионностойкое защитное покрытие для труб горячего водоснабжения 79

Балашов А.О. Интенсификация процесса грохочения на основе DEM-анализа вибрационной сегрегации потока руды 81

Балашов А.О., Шарапова М.О. Механизмы вибрационной сегрегации сыпучих материалов как инструмент интенсификации процесса грохочения 84

Богоприимцева М.А., Сырков А.Г., Кокрицкий М.Э., Никулина А.А. Развитие работ по получению наноструктурированных металлов и материалов от П.П. Веймарна до наших дней 86

Гаврилова А.Е. Флотируемость тонковкрапленных золотосульфидных руд 90

Гапеева А.Е. Исследование обогатимости железной руды с высоким содержанием серы 92

Гатиатуллин Б.Л. Оценка параметров аэрации при флотации: большая роль маленьких пузырьков 95

Глумова А.Д., Костина Е.М. Перспективы применения гиперспектральной визуализации для экспресс-оценки качества апатит-нефелинового минерального сырья 97

Гонцуков А.С. Адаптивный синтез компактных изделий из диборида титана 99

Гришанов К.В. Интеркалирование и терморасширение природного графита с созданием на его основе композитных электродов 101

Гришанов К.В. Разработка способов интеркалирования и терморасширения природного графита.....105

Дурнева Д.А. Исследования дообжиговых свойств и возможности применения отходов нефтедобывающей отрасли в технологии производства тонкой керамики.....109

Ильин Е.С. Экструдер «От пыли к брикету».....111

Красильникова Е.И. Особенности модифицированных микроструктур титановых сплавов.....113

Кульчицкий А.А. Применение технологии селективного лазерного плавления для изготовления лопаток турбин газотурбинных двигателей.....116

Курдашов В.М. Влияние оксидов цинка и магния на коррозионную стойкость стеклоэмалевых покрытий для стальных трубопроводов.....118

Кухтина А.А. Интенсификация процесса измельчения комплексных медных руд с применением ультразвукового воздействия.....121

Кухтина П.А. Повышение извлечения ценных компонентов из сырья различного состава с применением высокоградиентной магнитной сепарации.....123

Лазаренко Н.К. Методы улучшения качества слитков из жаропрочного сплава марки ХН62ВМЮТ-ВД.....125

Лебедева Е.М. Применение отработанных кернов в декоративно-прикладном искусстве.....128

Лушина Е.А. Влияние ионного состава оборотных вод различной минерализации на характеристики пенного слоя и флотационную активность пенообразователей разных классов.....131

Люблянова В.А. Повышение эффективности переработки окисленных медных руд с применением метода «выщелачивание-цементация-флотация».....132

Максимова Р.И. Определение молекулярного состава гидрокарбоалюмината кальция при использовании растворов глинозёмного производства.....135

Масленников А.А., Сырков А.Г., Семенов И.С., Анурова Д.В. Влияние дисперсионной среды на свойства металлических материалов, полученных методом ТГС, и научное наследие П.П. Веймарна.....137

Масленников В.С. К вопросу о разработке алгоритма управления процессом магнитно-гравитационной сепарации.....142

Масленников Н.А. Влияние магнетизирующего обжига в водороде на кинетику сухого измельчения гематитовой руды.....144

Никитина Т.Ю. Сорбционное извлечение платины из синтетического хлоридно-сульфатного раствора.....146

Парфенов К.В. Исследование антикоррозионных свойств порошковых материалов на основе квазикристаллов системы Al-Cu-Fe для защиты НКТ.....149

Петровичева В.А., Макарова П.О. Степень влияния свойств горных пород на эффективность их обогащения.....151

Пличко С.С., Шипунов Л.В. Селективность концентрирования диоксида титана из золы-уноса ТЭЦ на концентрационном столе РП-4.....154

Савула Е.А. Комплексная химико-термическая обработка стальных изделий.....156

Сагинашвили А.Р. Утилизация бурового шлама в производстве керамических масс для мелкой пластики и декоративных изделий 158

Сидорович А.С., Киселёва А.В. Подавление флотации слоистых силикатов при переработке золото-медно-магнетитовых руд 160

Слободин В.А., Пахомов Р.А., Бажин В.Ю. Пирометаллургическая переработка отработанных автомобильных катализаторов с использованием пиритного коллектора 163

Смирнова М.Р., Хузнахметов Р.М. Оценка коррозионной стойкости поверхности стали 12х18н10т после лазерной обработки 166

Соколов М.В. Совершенствование технологии рудоподготовки железистых кварцитов для применения грубозернистой флотации 168

Сомкина П.Д. Исследование повреждений стоек компенсирующей группы и определение механизмов инициации и развития эксплуатационных дефектов 170

Степанов Д.В. Применение ВГМС для извлечения слабомагнитных минералов из хвостов обогащения медно-никелевых руд 172

Струк Г.В., Евтушок В.А. Современные подходы к оперативному управлению процессами рудоподготовки комплексных медных руд 174

Ткаченко В.Д. Модификация состава стеклоэмалевого покрытия для внутреннего покрытия стальных бойлеров с целью оптимизации ТКЛР 176

Шерстнева Э.А., Сизякова Е.В., Федоров А.Т. Исследование плотности концентрированных натрий-калиевых алюминатных растворов при повышенных температурах 179

Янусова А.Г., Хузнахметов Р.М. Оценка коррозионной стойкости образцов с маркировкой, выполненной лазером 182

Секция 9. ЭНЕРГЕТИКА, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, МЕТРОЛОГИЯ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ 184

Аббасов Г.А., Бойкова И.С. Параметрическая оптимизация шунтирующего активного фильтра гармоник для промышленных сетей с различной жёсткостью на основе имитационной модели 184

Бабырь В.В. Анализ условий обеспечения электробезопасности на предприятиях горной промышленности 187

Воробьева В.А. Оценка вклада потребителей в результирующую несимметрию напряжений в системах электроснабжения с множеством источников искажений 191

Горбачева В.Н., Говкелевич К.Ю. Экспериментальное подтверждение прецизионности модернизированного метода оценки микроструктуры нефтяных и пековых коксов для актуализации ГОСТ 26132-84 194

Григоров А.М., Королев А.А. Определение очередности перевода распределительных сетей 6-10 кВ на режим резистивного заземления нейтрали 196

Калин К.В. Исследование методов расчёта зон защиты ОРУ стержневыми молниеотводами 199

Кучерук А.С., Старшая В.В. Анализ динамики развития российских фотоэлектрических панелей 201

Лобанова Е.А. Источник бесперебойного питания с компенсацией искажений в питающей сети 204

Малышев М.А. Повышение эффективности ядерной установки малой мощности путем использования теплового аккумулирования 207

Манукян Д.Д. Разработка приоритетного графика ремонтов электроагрегатов электростанций собственных нужд с использованием интегральных показателей технического состояния 210

Садулаев А.А-В. Разработка системы автоматизированного контроля и управления теплотехническими параметрами геотермальной энергоустановки на органическом цикле Ренкина 212

Скворцов И.В., Шклярский Я.Э. Подход к мониторингу технического состояния автономного инвертора напряжения ПЧ в электроприводах переменного тока 214

Скворцова Ю.Е. Управление работой электротехнического комплекса с частотно-регулируемым электроприводом при провалах напряжения 216

Складчиков М.В. Разработка системы идентификации неисправностей асинхронного двигателя с применением сверточных нейронных сетей 219

Смирнов В.А., Сандов А.М. Беспроводная система сбора технологических параметров бурения для оперативного контроля состояния скважины 222

Устин Ю.А. Использование турбулизаторов для повышения эффективности тепломассообмена в котлах 224

Филатов В.М. Применение ультразвуковой пробоподготовки для повышения достоверности интерпретации данных ИК-спектроскопии высоковязких нефтей 226

Филимошина Д.Е. Инженерная методика определения нормативного потребления электроэнергии аппаратами воздушного охлаждения 228

Секция 10. ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО И НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ 231

Аксенов И.И. Комплексная оценка энергетического потенциала торфяных месторождений 231

Анашкин Н.В. Ультрамикроскопия как высокочувствительный метод определения порога агрегации асфальтенов 234

Артюшевский Д.И. Получение перспективных носителей катализаторов из гидроксидов алюминия нитратно-аммиачного и карбонатного осаждений 236

Братилов П.С. Влияние природы растворителя на эффективность ионообменной очистки фенольной смолы 238

Галиуллина Л.И. Разделение концентрата редкоземельных металлов легкой группы при карбонатном выщелачивании 240

Говкелевич К.Ю., Габдулхаков Р.Р. Получение высокопрочных изотропных коксов путем коксования полимермодифицированного остаточного углеводородного сырья 243

Гринвальд Д.Е. Поиск путей повышения эффективности работы узла переработки фенольной смолы кумольного производства на базе компьютерного моделирования и анализа компонентного состава потоков 245

Зайцев И.В. Эффективность обработки спека, образующегося в ходе высокотемпературного спекания ФГ с сернистым коксом, соляной кислотой 248

Здрецов И.М. Ключевые задачи и перспективные методологические подходы для моделирования кинетики кристаллизации цеолитов 251

Кузьмин К.А. Фазообразование в нефтяном и биодизельном топливе с депрессорно-диспергирующими присадками 254

Мищенко А.В. Повышение эффективности технологии очистки кварцевого концентрата 256

Поплавский А.В., Чистяков А.В., Есипович А.Л. Переработка биомассы различного происхождения, стимулированная микроволновым излучением 258

Стебляк В.А. Определение замещенных тиофенов в нефтепродуктах и физико-химическое моделирование их свойств 261

Степанов А.Д. Повышение ресурса электрохимических систем очистки попутных вод за счет применения модифицированных анодных материалов 264

Титова М.Е. Синтез низкомодульных цеолитов типа А и Х из жидкого стекла на основе промышленного кремнегеля 267

Чудов М.А. Получение полимерно-битумных композиций для достижения целей устойчивого развития 269

Секция 11. МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ 271

Багиров Т.Р. Концептуальный подход к распределению водителей по маршрутам в целях повышения безопасности пассажирских перевозок 271

Бодров И.Д. Состояние изученности вопроса в области профилирования рабочей камеры конусной эксцентриковой дробилки крупного дробления 273

Гайнутдинова А.И. Методика построения автоматизированной системы определения тарифов пассажирского транспорта 276

Гильвитинов М.О. Оптимизация технологических параметров селективного лазерного плавления для изготовления экструзионных матриц из стали 40Х13 278

Голец Е.А., Турчина В.С. Способы модернизации режущего инструмента для наружной обработки 280

Гришин К.А. Выбор и обоснование комплексного показателя работы конусной дробилки крупного дробления для целей последующей многопараметрической оптимизации 283

Грушихин Д.П. Опыт применения нейросетевых технологий для автоматизации процедур визуального осмотра контейнерного парка 286

Должанская С.А. Обеспечение бесперебойности функционирования системы оплаты проезда на общественном транспорте в условиях радиоэлектронных помех ..289

Епифанова А.А. Исследование влияния легирующих элементов Zn и Ca на процесс селективного лазерного плавления алюминиевых сплавов 291

Иванова Е.С. Совершенствование систем смазки дробильно-размольного оборудования за счет оптимизации конструкции масляных баков 294

Колпаков В.О. Влияние работоспособности элементов систем АЦСС на ремонтные простои электрических карьерных экскаваторов 297

Мельников М.М. Выбор рациональной структуры и характеристик датчиков износа футеровок горнотранспортных и горно-перерабатывающих машин на базе морфологического анализ 301

Мусихин Д.В., Чиркова А.А. Повышение эффективности очистки оборотной воды для систем поддержания пластового давления нефтяных промыслов 304

Овсянников Д.А. Варьирование значений магнитной индукции при непрерывной магнитно-абразивной обработке поверхностей из алюминиевого сплава АМц 306

Речкин С.Е. Моделирование процесса разрушения угольного массива рабочим инструментом горных машин 309

Силаков Д.П., Парфенов В.А. Анализ работы однороторной молотковой дробилки типа EV 200x200-1-125 311

Синюков М.С. Оценка влияния магнитно-абразивной обработки оребрения на тепловые характеристики плоскоовальных оребренных труб 313

Сушков В.С. К обоснованию параметров наклонного скипового подъема с учетом подъемной системы и способа загрузки скипов 316

Терентьева В.И. Оптимизация распределения разномарочного подвижного состава по маршрутной сети города 319

Тимофеев М.К., Рябцева А.С. Разработка программного комплекса автоматизированного построения схем биений осесимметричных деталей для задач технологической подготовки производства в машиностроении 321

Туманова А.О. Экологичные решения в оптимизации ГЭС 324

Фаляхов Р.Ф. Систематизация и сравнительный анализ межотраслевых подходов к реверс-инжинирингу 326

Хохлов А.В. Методы обеспечения функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств в процессе эксплуатации 330

Хохлов Д.О., Никулин В.В. Разработка межкамерной перегородки трубной шаровой мельницы 3,2x15 м 333

Чудашкин М.Е. Управление операционной эффективностью транспортно-экспедиционных компаний: переход на новый формат работы с контрагентами 336

Шаврина В.С. Автоматизация выбора перевозчиков в цепях поставок с применением многокритериальных моделей и модуля принятия решений в структуре TMS 339

Эйжвертина В.Д. Подбор рациональных режимов механической обработки с применением нейронной сети 342

Секция 12. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ГУМАНИТАРНЫЕ АСПЕКТЫ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ 345

Артеева Т.Д., Зимина М.Е. Демографическая и кадровая проблема Сахалина как результат образа-мифа острова (по материалам очерка А.П. Чехова «Остров Сахалин») 345

Беркетова Е.В. Стратегическое развитие российской черной металлургии в условиях новых вызовов: государственные приоритеты и корпоративные стратегии 348

Валицкая А.М., Фетисова А.О. Прессинг-вопросы и ответные тактики нейтрализации в англоязычном журналистском интервью: типология коммуникативных сценариев 350

Габитов М.И. Оценка факторов и результатов сделок M&A в секторе золотодобычи 353

Гайфуллина И.И., Гимранова А.М. Цифровая трансформация управления нефтеперерабатывающим предприятием на основе AI-платформы предиктивной аналитики «ПУЛЬС» 356

Дейнега А.А. Формирование концепции управления процессом воспроизводства основных фондов промышленных предприятий ДНР 358

Кильдюшева А.С. Особенности перевода специализированной лексики в сфере автоматизации с помощью нейросетей....361

Коломоец А.А. Проблема комплексного решения задач Арктических моногородов: правовые и социально-экономические механизмы развития Воркуты 363

Леонтьева Е.Г. Потенциал производства родия: баланс глобального предложения и промышленного спроса....366

Манушин А.И. Экономический парадокс производства цветных и редких металлов 368

Миронова В.В. Коммуникативные стратегии конструирования экологического имиджа в корпоративном дискурсе (на материале ПАО «Северсталь» и компании «Яндекс»)....370

Рогов Р.Г., Никитина Е.А. Влияние стиля руководства на реализацию коммуникационной стратегии вуза через проектный подход (сравнительный анализ НИУ «МЭИ» и КГТУ им. И. Раззакова)....373

Семенова Д.Е. Совершенствование подхода к формированию инвестиционного портфеля нефтегазовых активов с применением интегральной оценки 375

Сопина Ю.Д. Инструментальное хозяйство как объект бережливого производства: резервы снижения потерь при внедрении режущей керамики....378

Спиваков К.А. Потенциал производства глинозема из золошлаковых отходов в России....381

Стрельченко К.А. Потенциал восстановления слюдяной отрасли через электромобильный транспорт 383

Терекулов М.А., Василевская Ю.Н. Актуальные проблемы экологически ориентированного недропользования при реализации газотранспортных проектов....385

Ушпик И.В., Краева В.А. Разработка цифровой образовательной платформы «Основы декарбонизации нефтегазового комплекса» 389

Секция 7. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Диалло А.
аспирант, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра автоматизации процессов химической и промышленности, Санкт-Петербург, Россия, amdiallo95@gmail.com

Научный руководитель: Русинов Л.А.
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Автоматизации процессов химической промышленности ученая степень, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Безопасность эксплуатации и экономическая эффективность сложных химических процессов зависят от надежных систем обнаружения и диагностики неисправностей (FDD). Однако внедрение всеобъемлющей сети датчиков часто ограничивается непомерными затратами на инвестиции и техническое обслуживание. Предлагается методология оптимизации размещения датчиков с использованием многоцелевого генетического алгоритма. Основная инновация заключается в гибридном критерии изолируемости, сочетающем в себе расстояния Хэмминга и евклидово расстояние. Примененный к нелинейной модели CSTR, подверженной 14 сценариям дефектов и имеющей 10 мест для размещения датчиков, результаты показывают, что оптимальная конфигурация (выбор 6 датчиков из 10) гарантирует полную (100%) наблюдаемость дефектов и коэффициент изолируемости 91,21%, при этом сокращая общую стоимость оборудования на 76,86%.

Ключевые слова: оптимальное размещение датчиков, CSTR, диагностика дефектов, генетический алгоритм, гибридный критерий, расстояние Хэмминга, расстояние Евклида.

Современные промышленные химические процессы подвергаются всё более строгим требованиям в отношении безопасности, качества продукции и экономической эффективности. В связи с этим внедрение систем обнаружения и диагностики неисправностей аппаратуры, нарушений в ходе процесса (FDD – Fault Detection and Diagnosis) стало необходимым условием для предотвращения отклонений и внеплановых остановок и снижения риска аварий [1]. Однако эффективность любой диагностической системы неразрывно зависит от качества и количества информации, поступающей от установленных на процессе датчиков.

В литературе проектирование таких систем в основном опирается на анализ матрицы сигнатур неисправностей (FSM – Fault Signature Matrix), где изолируемость (различимость между двумя неисправностями) традиционно оценивается по расстоянию Хэмминга [2]. Хотя этот метод обеспечивает структурную изолируемость неисправностей, он страдает значительной потерей информации на этапе бинаризации. Чтобы преодолеть это ограничение, в других работах использовались непрерывные критерии, такие как евклидово расстояние [3]. Однако этим методам часто не хватает бинарной логической структуры, гарантирующей строгую наблюдаемость при минимальных вычислительных затратах.

В связи с этим представляется целесообразным объединить оба критерия, а для оптимизации состава и положения датчиков на контролируемом процессе применить генетический алгоритм. В этом случае две неисправности считаются изолируемыми только, если их бинарные сигнатуры различаются (Hamming ≥ 1); затем изолируемость уточняется по среднему евклидовому расстоянию между ними.

Эффективность предложенного метода была проверена на нелинейном экзотермическом реакторе CSTR [4]. Полученные результаты показывают, что можно разработать высокоэффективную сеть датчиков, соблюдая при этом строгие бюджетные ограничения. Выявленная оптимальная конфигурация (6 датчиков из 10) гарантирует безошибочное обнаружение дефектов (100%) и позволяет изолировать более 91% пар дефектов, при этом сокращая затраты на оборудование в четыре раза (сокращение на 76,86%).

Сравнение с чисто хаммингговским критерием показало прирост приспособленности, что демонстрирует вклад евклидовой компоненты в улучшение дискриминации.

Таким образом, этот метод обеспечивает оптимальный компромисс между диагностической эффективностью, устойчивостью к нелинейной динамике и экономической целесообразностью. Было бы целесообразно распространить этот гибридный подход на на более сложные процессы (Tennessee Eastman) и интеграцию шума измерения.

Список литературы

1. Tang S., Yuan S., Zhu Y. Deep Learning-Based Intelligent Fault Diagnosis Methods Toward Rotating Machinery // IEEE Access. 2020. Т. 8. С. 9335–9346.
2. Abdel Karim A.K. Wired embedded communication networks monitoring: a transferometry-based approach: Theses. Université de Lille, 2022. № 2022ULILB029.
3. Xu J. и др. A label information vector generative zero-shot model for the diagnosis of compound faults // Expert Systems with Applications. 2023. Т. 233. С. 120875.
4. Seborg D.E. и др. Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, 2016. 512 с. Разд. 2.4.6.

УДК 658.7:622

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРНО-ХИМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Домахина Ю.А.*, Солодов С.В.
НИТУ МИСИС, Москва, Россия,
** domaxina@yandex.ru*

Научный руководитель: Солодов С.В.
к.т.н., доцент, директор института ИТКН,
НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация. Предложена многоуровневая модель проектируемой логистической системы горно-химического предприятия, ориентированная на раннюю стадию проектирования, когда эксплуатационные данные отсутствуют, а структура логистических связей еще не закреплена. Модель объединяет топологический, сценарный и оценочный уровни описания объекта и позволяет формализовать альтернативные конфигурации логистической сети, сопоставлять их по критериям затрат, устойчивости и реализуемости, а также выбирать предпочтительное решение в условиях неопределенности внешней среды. Практическая значимость подхода состоит в возможности его применения для предпроектного анализа новых промышленных объектов.

Ключевые слова: логистическая система, горно-химическое предприятие, проектирование, неопределенность, сценарное моделирование, графовая модель, многоуровневая модель.

Введение. Логистические системы горно-химических предприятий характеризуются высокой зависимостью от транспортной инфраструктуры, пространственной распределенностью звеньев, ограниченностью внешних каналов поставки и существенным влиянием логистических затрат на итоговую экономику проекта [1-2]. Для проектируемых предприятий данная задача приобретает особую сложность, поскольку решения о конфигурации логистической системы должны приниматься до начала промышленной эксплуатации, при отсутствии накопленной статистики фактических перевозок и устойчивых схем реализации продукции [3-4].

Существующие исследования в основном сосредоточены либо на оптимизации уже функционирующих цепей поставок, либо на решении частных транспортных задач. В результате остается недостаточно проработанным вопрос формализации логистической системы нового промышленного объекта на предпроизводственной стадии, когда требуется не совершенствовать существующую схему, а проектировать ее в условиях неопределенности.

Целью исследования является разработка многоуровневой модели проектируемой логистической системы горно-химического предприятия, позволяющей сравнивать альтернативные конфигурации логистической сети и выбирать более устойчивые решения на ранней стадии проектирования.

Методы. Описание Методологическую основу исследования составляют методы системного анализа, графового моделирования, сценарного анализа и сравнительной оценки альтернатив. На топологическом уровне логистическая система представляется в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют ключевым узлам, а дуги – допустимым направлениям перемещения потоков. Это позволяет формализовать структуру системы и задать набор возможных конфигураций логистической сети.

На сценарном уровне учитываются альтернативные состояния внешней среды, связанные с изменением параметров спроса, затрат и доступности инфраструктуры [5-6]. Для каждого сценария рассчитывается значение целевой функции:

$$Z_s = \sum_{i=1}^{n} c_i^{(s)} x_i, \quad (1)$$

где Z_s – интегральная оценка конфигурации в сценарии s, $c_i^{(s)}$ – параметр затрат или ограничений для i-го элемента конфигурации в сценарии s, x_i – переменная, характеризующая использование соответствующего элемента логистической структуры.

Выбор предпочтительного решения осуществляется по критерию устойчивости:

$$Z^* = \min \max Z_s \text{, где } x \in X, s \in S \quad (2)$$

где X – множество допустимых конфигураций логистической системы, S – множество рассматриваемых сценариев внешней среды. Такая постановка позволяет выделять решения, наименее чувствительные к неблагоприятным изменениям условий функционирования.

Результаты. В результате исследования предложена трехуровневая модель проектируемой логистической системы горно-химического предприятия. Первый уровень – топологический – описывает структуру сети и взаимосвязь основных логистических узлов. Второй уровень – сценарный – отражает изменение внешних условий функционирования системы. Третий уровень – оценочный – позволяет сопоставлять альтернативные конфигурации сети по интегральным критериям затрат и устойчивости.

Показано, что такая модель обеспечивает переход от описательного анализа к формализованному сравнению вариантов логистической архитектуры на ранней стадии проектирования. Предварительная апробация подхода свидетельствует о возможности выделения конфигураций, обладающих большей устойчивостью по сравнению с решениями, основанными только на минимизации затрат в одном фиксированном сценарии.

Обсуждение. Предлагаемый подход отличается от традиционных моделей оптимизации перевозок тем, что ориентирован на проектируемый промышленный объект, для которого логистическая система еще не сформирована фактически [7-8]. Научная новизна исследования заключается в объединении топологического, сценарного и оценочного уровней в рамках единой модели предпроектного анализа. Это позволяет рассматривать логистическую систему не только как сеть потоков, но и как объект инженерного проектирования, для которого одновременно значимы затраты, устойчивость и реализуемость принимаемого решения.

Практическая значимость подхода состоит в том, что он может использоваться при предпроектном обосновании логистической архитектуры новых горно-химических предприятий, в том числе в условиях ограниченной инфраструктуры и отсутствия эксплуатационных данных [9-10].

Заключение. Предложена многоуровневая модель проектируемой логистической системы горно-химического предприятия в условиях неопределенности, объединяющая топологический, сценарный и оценочный уровни описания. Модель позволяет формализовать альтернативные конфигурации логистической сети, сравнивать их по критериям затрат и устойчивости и выбирать предпочтительные решения на предпроизводственной стадии.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования предложенного подхода для предпроектного анализа новых промышленных объектов. Дальнейшее

развитие исследования связано с математической конкретизацией модели, разработкой алгоритмов выбора рациональной конфигурации и включением прогнозных параметров в процедуру оценки альтернатив.

Список литературы

1. Коптев В.Ю., Коптева А.В. Анализ предпосылок создания транспортных систем «умного» горнодобывающего предприятия // Горная промышленность. 2025. № S1.
2. Rykov A.S. System analysis: models and methods of decision-making and search optimization. Moscow: MISIS Publishing House, 2009. 608 p.
3. Trofimov V.B., Temkin I.O., Solodov S.V. Application of case-based reasoning in hazard evaluation in complex process flow control // Eurasian Mining. 2023. No. 2. P. 41–46.
4. Zaichenko I.M., Yakovleva M.A. Предиктивная аналитика в управлении цепями поставок // Научный вестник ЮИМ. 2019. № 2.
5. Menezes G.C., Corrêa J. dos S., Almeida F.A. Mathematical modeling and algorithm to optimize the mining supply chain // CILAMCE. 2019.
6. Liu W. A robust optimization modeling for mine supply chain planning under Big Data // Journal of Healthcare Engineering. 2021.
7. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. М.: СИНТЕГ, 2007. 668 с.
8. Рахмангулов А.Н., Копылова О.А. Обзор методов и алгоритмов Big Data для решения задач прогнозирования параметров транспортных потоков // Недропользование и транспортные системы. 2024. Т. 14. № 2. С. 4–13.
9. Башина О.Э., Матраева Л.В. Возможности применения глобальных технологий Big Data для повышения эффективности логистических процессов // Знание. Понимание. Умение. 2017. № 3.
10. Серикбекулы А., Кормачева О.В. Подходы к построению предсказательных моделей логистических процессов // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Т. 10. № 4. С. 1297–1314.

УДК 681.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛМК

Иванов Ф.А.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия, ivannov.fadya@gmail.com

Научный руководитель: Ратасеп М.А.
к.т.н, доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлено проектирование архитектуры автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) движения пневматического манипулятора на базе программируемого логического микроконтроллера (ПЛМК). Описаны ключевые этапы от постановки задачи до создания прототипа системы, который в настоящее время готов и ожидает проведения пусконаладочных работ. Акцент сделан на достигнутых результатах и планах по дальнейшей реализации проекта.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), пневматический манипулятор, программируемый логический микроконтроллер (ПЛМК), точность позиционирования, датчики положения и давления, пусконаладочные работы.

Актуальность исследования обусловлена широким применением пневматических манипуляторов в промышленности – от сборочных линий до опасных производств. Их преимущества (пожаробезопасность, простота обслуживания, высокая надёжность) делают их востребованными, однако традиционные системы управления не всегда обеспечивают требуемую точность и адаптивность. В условиях роста требований к автоматизации и цифровизации производства возникает необходимость в разработке новых решений на базе современных ПЛМК. Существующие проблемы включают недостаточную точность позиционирования, высокую чувствительность к изменениям нагрузки и давления, ограниченную гибкость настройки и сложность интеграции с цифровыми платформами. Как отмечают исследователи, «эффективное управление манипуляционными системами требует комплексного подхода к выбору архитектуры и алгоритмов» [3]. Цель работы – разработать архитектуру АСУ движением пневматического манипулятора на основе ПЛМК, обеспечивающую точное позиционирование, гибкость настройки и работу в неблагоприятных условиях (запылённость, влажность, электромагнитные помехи). Задачи включают постановку задачи, анализ требований и выбор компонентов, проектирование аппаратной и программной частей АСУ, разработку алгоритмов управления движением, создание модели, разработку программного кода, сборку прототипа и подготовку к пусконаладочным работам.

Проектирование архитектуры АСУ ТП проводилось поэтапно в соответствии с общепринятой методологией, включающей 10 последовательных шагов: от постановки задачи до мониторинга готовой системы. На текущий момент успешно реализованы первые 7 этапов:

На этапе постановки задачи определены функциональные требования к системе, условия эксплуатации и целевые показатели (точность позиционирования, время цикла, устойчивость к внешним воздействиям). В ходе анализа требований и выбора компонентов изучены характеристики пневматических цилиндров, датчиков положения и давления,

ПЛМК. Проектирование аппаратной части включало разработку схемы подключения исполнительных устройств и датчиков к ПЛМК, выбор модулей ввода-вывода и источников питания. При проектировании программной части определены структура ПО, используемые языки программирования (основная логика Arduino реализована на C++).

Разработка алгоритмов управления предусматривала расчёт траекторий движения, реализацию ПИД-регулирования давления/расхода для точного позиционирования, обработку сигналов датчиков и защиту от ошибок (аварийный стоп, контроль давления). Как подчёркивают Булгаков и Воробьёв, «выбор компонентов должен учитывать условия эксплуатации и требования к надёжности» [1]. Для обеспечения устойчивости к внешним воздействиям применены методы управления, описанные в работах Егупова [5].

На этапе создания математической и имитационной модели разработана модель пневматического манипулятора в среде MATLAB/Simulink. Модель учитывает динамику пневматических цилиндров (уравнения расхода воздуха, давления и силы), кинематику звеньев манипулятора, а также влияние внешних факторов. С её помощью проведена предварительная проверка устойчивости системы и оптимизация параметров ПИД-регуляторов.

Завершающим реализованным этапом стала сборка прототипа установки. Физический прототип включает: механическую часть (два звена с шарнирным соединением, пневматические цилиндры двойного действия, захватное устройство), пневматическую систему (компрессор, фильтры-регуляторы, распределители с электроуправлением, дроссели для регулировки скорости), электронную часть (ПЛМК – ардуино UNO, модули ввода-вывода, индуктивные датчики положения, датчики давления, блок питания DC). Прототип собран с учётом требований промышленной эксплуатации: обеспечена защита от пыли и влаги, выполнено экранирование кабелей для устойчивости к электромагнитным помехам. Программный код, разработанный на языке C++, загружен в ПЛМК и готов к тестированию в реальных условиях.

Следующие этапы (пусконаладочные работы, испытания и мониторинг) запланированы на ближайшую стадию проекта.

На текущем этапе достигнуты следующие результаты:

- сформированы функциональные и технические требования к АСУ;
- выбраны компоненты системы (ПЛМК, датчики положения, модули ввода-вывода, пневматические распределители);
- спроектирована аппаратная архитектура с учётом условий эксплуатации (защита, экранирование кабелей);
- разработаны алгоритмы управления движением, включая ПИД-регулирование и логику работы в режимах полуавтоматического и автоматического управления;
- создана имитационная модель манипулятора в MATLAB/Simulink, подтвердившая устойчивость системы при различных нагрузках;
- написан программный код для ПЛМК на языке C++;
- собран физический прототип установки, включающий механическую, пневматическую и электронную части, а также интерфейс оператора.

Достигнутые результаты позволяют перейти к следующим этапам проекта – пусконаладочным работам и испытаниям системы. Разработанная архитектура обеспечивает основу для создания надёжной и точной системы управления пневматическим манипулятором. Преимущества предложенного подхода включают модульность (возможность замены компонентов без перепрограммирования всей системы), энергоэффективность (оптимизация расхода сжатого воздуха за счёт ПИД-регулирования) и гибкость настройки под различные задачи.

По точности система потенциально превосходит традиционные пневматические схемы без обратной связи (±2-3 мм) и может достичь показателей (±0,5 мм), близких к характеристикам электрогидравлических аналогов (±0,1 мм). По стоимости

и ремонтопригодности она превосходит системы на базе промышленных роботов. Ограничения связаны с максимальной нагрузкой, ограниченной возможностями пневматических цилиндров, и необходимостью гибридной схемы (пневмо-электропривод) для сверхточных задач.

Перспективы развития включают внедрение машинного обучения для адаптации к изменениям нагрузки, интеграцию с IoT-платформами для удалённого мониторинга и расширение функционала за счёт добавления камер технического зрения. Как отмечают Юревич и Попов, «будущее робототехники – в интеграции интеллектуальных алгоритмов и адаптивных систем управления» [6].

Разработанная архитектура АСУ на базе ПЛМК демонстрирует высокий потенциал для управления пневматическим манипулятором. На текущем этапе успешно выполнены этапы от постановки задачи до сборки прототипа, что позволило верифицировать теоретические расчёты на имитационной модели и подготовить систему к пусконаладочным работам. Созданная архитектура обеспечивает модульность, энергоэффективность и гибкость настройки, что делает её перспективной для применения в сложных промышленных средах.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение пусконаладочных работ, испытаний системы в реальных условиях и мониторинг её работы. Планируется достижение целевых показателей точности (±0,5 мм), повторяемости (99 % при 1000 циклах) и экономичности (снижение стоимости на 20-25% по сравнению с аналогами). Предложенное решение открывает новые возможности для автоматизации промышленных процессов с использованием пневматических манипуляторов.

Список литературы

1. Булгаков, А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Серия «Библиотека инженера» / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьёв. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 488 с.
2. Егоров, И.Н. Позиционно силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами : монография // И.Н. Егоров; Владим. гос. ун т. – Владимир: Изд во Владим. гос. ун та, 2010. – 192 с.
3. Зенкевич, С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2004. – 408 с.
4. Крутько, П.Д. Управление исполнительными системами роботов / П.Д. Крутько, Е.П. Попов. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит. – 1991. – 336 с.
5. Методы робастного, нейро нечёткого и адаптивного управления. Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – 744 с.
6. Юревич, Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич.

УДК 622.279.8

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Калинин А.В.
студент гр. САТП-24,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, s242638@stud.spmi.ru

Научный руководитель Белоглазов И.И.
доц. каф. АТПП,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены возможности применения виртуальных анализаторов в технологическом процессе осушки природного газа триэтиленгликолем. Актуальность темы определяется тем, что качество осушки напрямую влияет на надежность промыслового сбора и транспорта газа, предупреждение гидратообразования и соблюдение требований к качеству товарной продукции. Показано, что виртуальный анализатор представляет собой программно-математическую модель, позволяющую по данным штатных средств измерения в реальном времени оценивать трудноизмеряемые показатели, прежде всего температуру точки росы по воде и остаточное влагосодержание осушенного газа. В работе предложена структура виртуального анализатора для включения в контур автоматизированного мониторинга установки осушки. Сделан вывод о перспективности применения таких решений на объектах подготовки газа при наличии развитой системы сбора данных, процедур верификации модели и регулярной адаптации алгоритма к изменяющимся условиям эксплуатации.

Ключевые слова: природный газ, осушка газа, триэтиленгликоль, виртуальный анализатор, точка росы, влагосодержание, цифровой двойник, автоматизация.

Введение. Осушка природного газа триэтиленгликолем (TEG) применяется для предупреждения гидратообразования, коррозии и нарушений при транспорте газа. Для этого процесса ключевыми показателями являются температура точки росы по воде и остаточное влагосодержание, определяющие безопасность транспорта и соответствие газа требованиям.

В гликолевой осушке важны также параметры потока регенерированного абсорбента, от которых зависят глубина осушки и устойчивость режима [1-2]. Прямой контроль указанных показателей ограничен стоимостью и инерционностью анализаторов, а онлайн-анализаторы требуют регулярного обслуживания [3, 4]. Поэтому для узла TEG-осушки актуально применение виртуальных анализаторов как расчетных моделей качества газа.

Методы. В работе виртуальный анализатор рассматривается как программно-математическая модель, функционирующая на основе данных автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и вычисляющая показатели качества газа по стандартно измеряемым параметрам узла осушки. На вход модели подаются давление, температура и расход газа, а также расход, температура и концентрация регенерированного ТЭГ; на выходе формируются расчетные значения температуры точки росы по воде и влагосодержания газа.

Методическую основу составили публикации по моделям виртуальных анализаторов для TEG-осушки: нейросетевые модели для прогнозирования температуры точки росы [5], модели на основе гауссовского процесса для отбора информативных параметров и прогнозирования точки росы [6], нечеткие нейронные сети для оценки чистоты триэтиленгликоля [7-8], а также работы, посвященные виртуальным измерениям и цифровым двойникам [3, 4]. Структура анализатора сформирована на основе модели узла осушки

в Aspen HYSYS с последующей обработкой режимных данных в Python. На технологической схеме узла осушки виртуальный анализатор расположен после абсорбера и использует сигналы штатных датчиков по газовому потоку и регенерированному ТЭГ для расчетной оценки качества осушенного газа.

Результаты. Сформирована структура виртуального анализатора для узла абсорбционной осушки, ориентированная на включение в контур цифрового мониторинга. Параметры регенерированного ТЭГ в данной постановке рассматриваются как граничные условия, без детального моделирования блока регенерации.

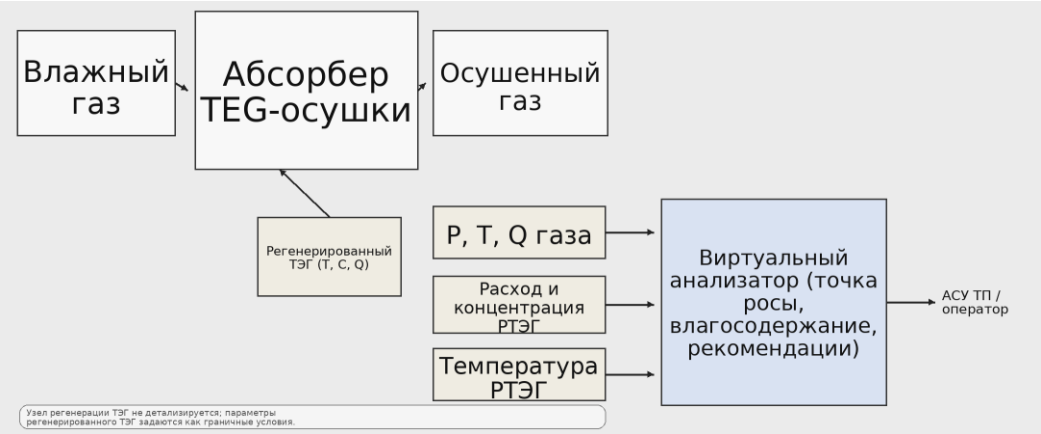


Рис. 1. Структура виртуального анализатора для узла TEG-осушки природного газа

Предложена последовательность разработки виртуального анализатора на основе связки Aspen HYSYS и Python: формирование набора режимных состояний узла осушки, предобработка и отбор признаков, обучение и валидация модели, подготовка алгоритма к интеграции в контур мониторинга. Использование Python обеспечивает предобработку и анализ режимных данных, построение расчетной модели виртуального анализатора и получение алгоритма, пригодного для непрерывного расчета температуры точки росы по воде и влагосодержания газа в контуре мониторинга. Такая постановка соответствует прикладным работам по TEG-осушке, где модель используется для оценки качества газа без установки дополнительных анализаторов [1–3].

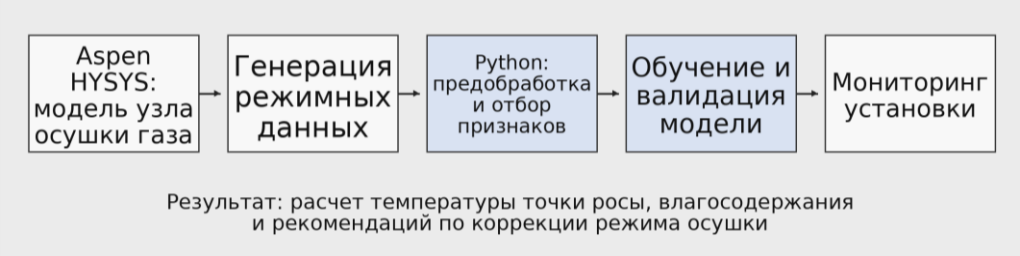


Рис. 2. Последовательность разработки виртуального анализатора на основе модели узла TEG-осушки в Aspen HYSYS и Python [*составлено авторами*]

Полученные результаты показывают, что предложенная схема позволяет перейти от периодического контроля к непрерывной расчетной оценке качества осушки и раньше выявлять отклонения режима. Для промысловых объектов это создает основу для корректировки расхода ТЭГ и параметров подготовки газа, а также для последующей оптимизации энергозатрат и эксплуатационных расходов [5–7, 9].

Обсуждение. В отличие от общего описания цифровизации, предложенный подход предметно ориентирован на TEG-осушку и учитывает параметры регенерированного абсорбента как ключевой фактор качества осушки. Интеграция виртуального анализатора

с цифровым двойником повышает достоверность расчетов, облегчает валидацию модели и позволяет контролировать дрейф данных при изменении режима работы установки [3, 4].

Практическое значение предложенного подхода состоит в том, что он повышает информативность технологического контроля без расширения номенклатуры полевых измерений и может быть использован на удаленных промысловых объектах, где обслуживание специализированных анализаторов затруднено. При этом оптимизация режима TEG-осушки и контроль качества регенерированного абсорбента связаны со снижением эксплуатационных затрат и более устойчивым соблюдением требований по точке росы [9-11].

Заключение. Применение виртуальных анализаторов в узле TEG-осушки природного газа является практически реализуемым направлением цифровизации промысловой подготовки газа. Использование Aspen HYSYS для генерации режимных данных и Python для построения виртуального анализатора позволяет обосновать структуру модели, ориентированной на расчет температуры точки росы и влагосодержания без расширения номенклатуры полевых измерений.

Список литературы

1. Goh B.Z.H., Elyas R., Hamid A., Foo D.C.Y. Artificial neural network modelling of natural gas dehydration process // Discover Chemical Engineering. 2024. Vol. 4. Article 10. DOI: 10.1007/s43938-024-00047-8. URL: https://doi.org/10.1007/s43938-024-00047-8 (дата обращения: 18.03.2026).
2. Ren H., Yin A., Dai Z., Liu X., Tan Z., Zhang B. Parameter screening and optimized Gaussian process for water dew point prediction of natural gas dehydration unit // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 170. P. 259–266. DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.019. URL: https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.019 (дата обращения: 18.03.2026).
3. Ren H., Dai Z., Chen J., Yin A., Wu S., Wang K., Li X., Chen Z. Natural Gas Triethylene Glycol Dehydration Equipment Digital Twin and Condition Evaluation Application // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2024. Vol. 20. P. 12147–12156. DOI: 10.1109/TII.2024.3414473. URL: https://doi.org/10.1109/TII.2024.3414473 (дата обращения: 18.03.2026).
4. Dreyfus P.-A., Psarommatis F., May G., Kiritsis D. Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework // International Journal of Production Research. 2022. Vol. 60. No. 2. P. 742–765. DOI: 10.1080/00207543.2021.1976433. URL: https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1976433 (дата обращения: 18.03.2026).
5. Chong D.J.S., Foo D.C.Y., Putra Z.A.A reduced order model for triethylene glycol natural gas dehydration system // South African Journal of Chemical Engineering. 2023. Vol. 44. P. 51–67. DOI: 10.1016/j.sajce.2023.01.001. URL: https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.01.001 (дата обращения: 18.03.2026).
6. Al Ani Z., Gujarathi A.M., Vakili-Nezhaad G.R. Simultaneous energy and environment-based optimization and retrofit of TEG dehydration process: An industrial case study // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 147. P. 972–984. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.018. URL: https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.018 (дата обращения: 18.03.2026).
7. Chebbi R., Qasim M., Jabbar N.A. Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas // Energy Reports. 2019. Vol. 5. P. 723–732. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.06.014. URL: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.014 (дата обращения: 18.03.2026).
8. Ghiasi M.M., Bahadori A., Zendehboudi S. Estimation of triethylene glycol (TEG) purity in natural gas dehydration units using fuzzy neural network // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2014. Vol. 17. P. 26–32. DOI: 10.1016/j.jngse.2013.12.008. URL: https://doi.org/10.1016/j.jngse.2013.12.008 (дата обращения: 18.03.2026).
9. Neagu M., Cursaru D.L. Technical and economic evaluations of the triethylene glycol regeneration processes in natural gas dehydration plants // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 37. P. 327–340. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.11.052. URL: https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.052 (дата обращения: 18.03.2026).
10. Kong Z.Y., Mahmoud A., Liu S., Sunarso J. Revamping existing glycol technologies in natural gas dehydration to improve the purity and absorption efficiency: Available methods and recent developments // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 56. P. 486–503. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.06.008. URL: https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.06.008 (дата обращения: 18.03.2026).
11. Белоглазов И.И., Курбанов Б.Х. Автоматизация процессов нефтепереработки с использованием современных средств разработки / Деловой журнал Neftegaz.ru, № 2, 2016. С 34 – 37 EDN: VLFTJT.

УДК 004.89

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Кобец А.А.
аспирант, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Россия, kobetc.rey@yandex.ru

Научный руководитель: Павлыш В.Н.
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и искусственный интеллект», ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Россия

Аннотация. Рост сложности нейросетевых моделей порождает фундаментальную проблему интерпретируемости, критичную в областях, требовательных к прозрачности используемых алгоритмических решений. Перспективные направления объяснимого ИИ – сети Колмогорова–Арнольда (KAN) и нечёткие логические системы – каждое в отдельности сопровождается существенными ограничениями: взрывом числа правил и семантической деградацией у нечётких систем, вычислительной нестабильностью и потерей интерпретируемости при масштабировании у KAN. В работе предложена гибридная архитектура, в которой оба компонента взаимно компенсируют недостатки друг друга, и формализованы условия их совместного обучения посредством единого алгоритма, совместимого с методом обратного распространения ошибки.

Ключевые слова: сети Колмогорова-Арнольда, системы нечётко-логического вывода, машинное обучение, объяснимый искусственный интеллект, символьная регрессия, интерпретируемость.

Введение. Нейронные сети сегодня достигают выдающейся точности в широком спектре прикладных задач, однако по мере роста их сложности возникает фундаментальная проблема: модели превращаются в «чёрные ящики», чьё поведение непрозрачно и с трудом поддаётся интерпретации. Это ограничение особенно критично в высокорисковых областях – медицинской диагностике, промышленном управлении, горной инженерии, – где ошибочное решение несёт прямые экономические и техногенные последствия. Регуляторный контекст усугубляет проблему: GDPR, AI Act Европейского союза и национальные нормативные акты ряда государств формируют юридические обязательства по прозрачности алгоритмических решений, делая неинтерпритируемые модели дефакто неприемлемыми в регулируемых сферах. В этом контексте два направления объяснимого ИИ (XAI) привлекают особое внимание: сети Колмогорова–Арнольда (KAN) [1], предложенные в 2024 году, и нечёткие логические системы [2], имеющие многолетнюю историю применения. Каждое из них предлагает собственный механизм интерпретируемости и обладает уникальными достоинствами, однако сопровождается существенными ограничениями, которые сдерживают широкое практическое применение. Цель настоящего исследования – разработка гибридной Fuzzy-KAN архитектуры, в которой оба компонента взаимно компенсируют недостатки друг друга, и исследование условий их совместного обучения посредством единого градиентного алгоритма, совместимого с механизмом обратного распространения ошибки.

Методы. В основе исследования лежит сравнительный анализ ограничений каждого из подходов. Нечёткие системы страдают от экспоненциального взрыва числа правил [3]: при пяти входных переменных и пяти лингвистических термах на каждое потенциальное число правил составляет 3125, что разрушает интерпретируемость – главное достоинство этого подхода. Дополнительную проблему создаёт субъективность проектирования функций принадлежности и их семантическая деградация после градиентного

обучения, когда лингвистические термы утрачивают содержательную привязку [4]. Сети KAN, в свою очередь, обучаются примерно в десять раз медленнее стандартных многослойных перцептронов, демонстрируют нестабильность ландшафта оптимизации при работе с B-сплайновыми параметрами, а их интерпретируемость – подтверждённая ключевая ниша архитектуры – сохраняется лишь в режиме малых разреженных сетей, с ростом которых она деградирует [1]. В качестве базовой гибридной архитектуры рассматривается ANFIS-подобная система [5], в которой антецеденты формируются дифференцируемыми функциями принадлежности, а консеквентная часть каждого нечёткого правила реализована посредством KAN. Центральным методологическим вопросом является исследование условий, при которых вся система остаётся дифференцируемой сквозным образом: в частности, анализируется применимость дифференцируемых аппроксимаций нечётких операторов – замены операций min и max на произведение и вероятностную сумму – как средства обеспечения совместимости с autograd-фреймворками без полной потери семантики нечёткой логики [6].

Результаты. Анализ показал, что нечёткие антецеденты создают структурную разреженность вычислительного графа: каждое правило активируется лишь в некоторой области входного пространства, ограниченной его функциями принадлежности. Это фактически означает неполную связность сети при конкретном входном векторе, что снижает эффективное число одновременно задействованных параметров KAN и адресует проблему вычислительной нагрузки. В обратном направлении одномерные сплайн-функции KAN в консеквентной части позволяют аппроксимировать сложные нелинейные зависимости внутри каждой нечёткой области без необходимости дробить её на дополнительные подобласти через новые правила, что непосредственно сокращает число требуемых правил и противодействует взрыву их количества. Установлено также, что применение дифференцируемых аппроксимаций нечётких операторов в сочетании с B-сплайновой параметризацией функций принадлежности обеспечивает дифференцируемость всей системы от входа до выхода, открывая возможность оптимизации параметров обоих компонентов – нечётких и KAN – в рамках единого цикла обратного распространения ошибки. Важным частным результатом является анализ инициализации KAN-компонент через механизм компиляции знания [7]: известные экспертные формулы могут быть интегрированы в начальную структуру KAN, что снижает потребность в обучающих данных и ускоряет сходимость в условиях малых выборок.

Обсуждение. Полученные результаты вписываются в более широкий контекст нейро-нечётких и нейро-символьных исследований, однако занимают в нём специфическую нишу. Существующие нейро-нечёткие системы типа ANFIS ограничивают консеквентную часть правил линейными параметрами [5]; KAN-ансамблевые подходы, напротив, не предусматривают лингвистической интерпретации областей входного пространства. Предлагаемая архитектура объединяет оба измерения: лингвистическую прозрачность антецедентов и нелинейную выразительность KAN-консеквентов при сохранении end-to-end дифференцируемости. Прямых аналогов подобной конструкции с совместным обучением в открытом доступе практически не обнаружено, что подтверждает научную новизну направления. Вместе с тем необходимо учитывать, что справедливый сравнительный анализ подтверждает: KAN превосходят MLP только в задачах символьного представления формул, а во всех прочих – MLP в среднем эффективнее [8]. Это означает, что ставка гибридной архитектуры именно на задачи символьной идентификации и интерпретируемости является методологически обоснованной. При этом необходимо учитывать следующее: при совместном обучении двух компонент предлагаемой системы. возникают вызовы, связанные с природой исходных моделей. Традиционные методы оптимизации нечётких систем – генетические алгоритмы и эволюционные методы – способны к структурной оптимизации, но существенно уступают градиентным по скорости сходимости. Градиентные методы, напротив, являются естественной средой для KAN.

Для нечётких систем картина сложнее: классические операторы min и max не дифференцируемы, что делает прямое применение обратного распространения ошибки невозможным без замены на дифференцируемые аппроксимации – что, в свою очередь, изменяет семантику нечёткой логики [6]. Кроме того, их совместное обучение требует тщательной настройки регуляризации: при доминировании нечёткой части возникает риск семантической деградации функций принадлежности, характерной для ANFIS; при доминировании KAN – риск потери разреженности и интерпретируемости. Этот баланс является ключевым открытым вопросом, ответ на который определит диапазон допустимых архитектурных вариаций.

Заключение. Основным результатом текущего этапа исследования является формализация условий backpropagation-совместимости гибридной Fuzzy-KAN системы и теоретическое обоснование механизма взаимной компенсации ограничений двух компонентов. Практическая значимость разрабатываемой архитектуры наиболее высока в областях, сочетающих ограниченные объёмы данных, наличие формализуемых экспертных знаний и жёсткие требования к верификации моделей – таких как горная промышленность и геомеханика. Следующим этапом работы является экспериментальная проверка алгоритма совместного обучения на модельных и реальных данных с последующим переходом к исследованию архитектурных вариаций гибридной системы.

Список литературы

1. Liu Z., Wang Y., Vaidya S. и др. KAN: Kolmogorov-Arnold Networks // Proc. 13th International Conference on Learning Representations (ICLR 2025). Singapore, 2025. URL: https://openreview.net/forum?id=Ozo7qJ5vZi (дата обращения: 03.03.2026).
2. Júnior J.S.S., Mendes J., Souza F. и др. Survey on Deep Fuzzy Systems in Regression Applications: A View on Interpretability // International Journal of Fuzzy Systems. 2023. Vol. 25. P. 2568–2589. DOI: 10.1007/s40815-023-01544-8
3. Cao J., Zhou T., Zhi S. и др. Fuzzy inference system with interpretable fuzzy rules: Advancing explainable artificial intelligence for disease diagnosis – A comprehensive review // Information Sciences. 2024. Т. 662. Ст. 120212. DOI: 10.1016/j.ins.2024.120212.
4. Khaled Q., Kaymak U., Genga L. Alternating bi-objective optimization for explainable neuro-fuzzy systems (X-ANFIS) [Электронный ресурс]// arXiv. 2026. URL: https://arxiv.org/abs/2602.19253 (дата обращения: 10.03.2026)
5. Talpur N., Abdulkadir S.J., Alhussian H. и др. Deep neuro-fuzzy system application trends, challenges, and future perspectives: A systematic survey // Artificial Intelligence Review. 2023. Т. 56. № 2. С. 865–913. DOI: 10.1007/s10462-022-10188-3.
6. van Krieken E., Acar E., van Harmelen F. Analyzing differentiable fuzzy logic operators // Artificial Intelligence. 2022. Т. 302. Ст. 103602. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103602.
7. Liu Z., Tegmark M., Ma P., Matusik W., Wang Y. Kolmogorov-Arnold networks meet science // Physical Review X. 2025. Т. 15. № 4. Ст. 041051. DOI: 10.1103/4t7t-v19l.
8. Yu R., Yu W., Wang X. Kan or MLP: A fairer comparison // arXiv. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2407.16674

УДК 621.391.8:004.932:622.8

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Кужин А.Г.
главный менеджер, Управление цифровой трансформации горного производства, ПАО «ГМК «Норильский Никель»», Норильск, Россия, KuzhinAG@nornik.ru

Научный руководитель: Иванов В.В.
кандидат технических наук, УУНиТ, Уфа, Россия

Аннотация. Рассматривается комплексная задача автономного применения беспилотных летательных аппаратов в подземных горных выработках: одновременное обеспечение надёжной передачи видеоданных и высокоточного позиционирования в условиях отсутствия глобальных навигационных спутниковых систем. Предложены и исследованы методы адаптивного управления радиоканалом с межуровневым управлением скоростью передачи данных видеокодека и гибридная навигационная схема на основе оптимизации по факторному графу с применением лидарной одновременной локализации и картографирования совместно с радиочастотным дальнометрированием. Моделирование подтвердило снижение задержки видеопередачи на 20–40% и точность позиционирования со среднеквадратичной погрешностью 0,851 м.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, подземные горные выработки, лидарная одновременная локализация и картографирование, адаптивная модуляция и кодирование, адаптивное управление радиоканалом, навигация без глобальных навигационных спутниковых систем, радиоканал тоннеля, факторный граф, условия отсутствия прямой видимости, горная промышленность.

Введение. Цифровизация горнодобывающей промышленности требует создания интеллектуальных мобильных робототехнических платформ для мониторинга подземных выработок, однако специфика подземной среды – полное отсутствие сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), многолучевое замирание радиосигнала, запылённость и задымлённость атмосферы – исключает применение стандартных методов навигации и связи. Существующие решения позиционирования – радиочастотные методы (радиочастотная идентификация, Wi-Fi, сверхширокополосная связь), инерциальная навигация и лидарная одновременная локализация и картографирование (лидар-ОЛК) – имеют существенные ограничения при изолированном применении: радиочастотные методы страдают от ошибок в условиях отсутствия прямой видимости, а лидар-ОЛК накапливает дрейф при деградации датчиков [1–4]. Настоящая работа впервые рассматривает совместное решение задач субметрового позиционирования и низкозадержной видеопередачи для воздушных БПЛА в единой системной концепции, ориентированной на применение в горной промышленности.

Методы. Временновариантный подземный радиоканал описывается многолучевой импульсной характеристикой; потери на трассе задаются лог-нормальной моделью с поправкой на частотно-зависимое поглощение стен (показатель затухания $n = 2{,}5$ для условий прямой видимости и $n = 4{,}0$ для условий отсутствия прямой видимости). Схема адаптивной модуляции и кодирования (АМК) выбирает режим из набора {квадратурная фазовая манипуляция (КФМ-4), 16-позиционная квадратурная амплитудная модуляция (16-КАМ), 64-КАМ} на основе оценки текущего отношения сигнал/шум (ОСШ), минимизируя сквозную задержку при ограничениях на качество видео и коэффициент блочных ошибок (КБО). Межуровневое управление скоростью передачи данных видеокодека реализует прогнозирующее управление, согласующее скорость кодирования со скоростью радиоканала с учётом гарантированного резерва пропускной способности.

Состояние БПЛА описывается вектором позиции, скорости и курса; динамика моделируется стохастическим уравнением перехода состояния с гауссовским шумом процесса. Лидарная одометрия и радиочастотные измерения от редко размещённых опорных узлов объединяются в схеме оптимизации по факторному графу, в которой функция Хьюбера обеспечивает устойчивость к выбросам в условиях отсутствия прямой видимости. Адаптивное взвешивание каналов позволяет поддерживать точность позиционирования при деградации любого из сенсоров.

Результаты. Моделирование адаптивного управления радиоканалом для сценариев прямой (100 м) и непрямой (50 м) видимости на частоте 2,4 ГГц показало снижение 95-го процентиля задержки на 30% по сравнению с фиксированной схемой модуляции при сохранении пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ) выше 38 дБ и КБО ниже 10^{-3}; предложенный метод совместного управления обеспечивает снижение сквозной задержки видеопотока на 20–40%. Для задачи позиционирования среднеквадратичная погрешность (СКП) гибридного метода составила 0,851 м – в 1,36 раза лучше чистой лидар-ОЛК (1,154 м) и в 5,75 раза лучше чистой радиочастотной трилатерации (4,898 м).

Обсуждение. Полученные результаты согласуются с тенденциями в области навигации в подземных условиях: слияние лидарных и радиочастотных измерений через факторный граф позволяет преодолеть ограничения каждого метода в отдельности, а задержка вычислений алгоритма позиционирования менее 50 мс подтверждает пригодность метода для управления БПЛА в реальном времени. Научная новизна работы состоит в совместном рассмотрении задач позиционирования и видеопередачи: на практике единый радиоканал должен одновременно обеспечивать телеметрию и видеопоток, тогда как в большинстве публикаций эти задачи решаются независимо.

Заключение. Предложены и исследованы два взаимосвязанных метода для автономного применения БПЛА в подземных горных выработках: адаптивное управление радиоканалом с межуровневым управлением скоростью передачи данных видеокодека и гибридная навигация на основе слияния лидар-ОЛК и радиочастотного дальнометрирования через факторный граф. Практическая значимость определяется применимостью для цифровизации горнодобывающих предприятий: автоматизированный мониторинг выработок, поисково-спасательные операции, дистанционное обследование опасных зон. Направлением будущих исследований являются натурные испытания в реальных шахтах и расширение системы на многоагентные сценарии.

Список литературы

1 CM-LIUW-odometry: Robust and high-precision LiDAR-inertial-UWB-wheel odometry for extreme degradation coal mine tunnels [Текст] / K. Hu, M. Li, Z. Jin, C. Tang, E. Hu, G. Zhou // 2025 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)IEEE, 2025. – С. 7139–7146.

2 Tightly Coupled LIDAR/IMU/UWB Fusion via Resilient Factor Graph for Quadruped Robot Positioning [Text] / Y. Kuang, T. Hu, M. Ouyang, Y. Yang, X. Zhang // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, № 22. – P. 4171.

3 A review of positioning technologies for personnel and equipment in underground mines [Text] / H. Liu, Z. Zhang, J. Dong, J. Benndorf, X. Jia, X. Wang, X. Wu, G. Chen // International Journal of Digital Earth. – 2025. – Vol. 18, № 1. – P. 2506493.

4 TDoA Positioning with Data-Driven LoS Inference in mmWave MIMO Communications [Text] / M. Huang, F. Meng, S. Liu, C. Zhang, Y. Huang, Z. Lu // Proceedings of the First ACM Workshop on mmWave Sensing Systems and Applications. – Istanbul Turkiye: ACM, 2023. – P. 1–7.

УДК 681.51: 676.05: 004.891.3

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ В РАБОТЕ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА

Лейнсоо А.А.
аспирант, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД), Санкт-Петербург, Россия, albertleinsoo@mail.ru

Научный руководитель: Ковалёв Д.А.
к.т.н., доцент, зав. кафедрой АТПиП, ВШТЭ СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматривается задача раннего выявления нештатных ситуаций в процессе регенерации зелёного щёлока на содорегенерационном котлоагрегате. Актуальность обусловлена высокой сложностью, нелинейностью и потенциальной опасностью технологического процесса, а также ограниченностью традиционных методов диагностики. Предложена нейросетевая диагностическая модель на основе рекуррентной архитектуры LSTM, использующая данные промышленного мониторинга. Проведены анализ и предобработка исходных данных, разработана структура модели и выполнено её тестирование. Результаты показали высокую точность выявления нарушений и способность модели к раннему обнаружению отклонений, что подтверждает перспективность применения методов машинного обучения в задачах промышленной диагностики.

Ключевые слова: содорегенерационный котлоагрегат, нейронные сети, диагностические модели, LSTM, технологический процесс, зелёный щёлок.

Современные технологические процессы химической промышленности, в том числе производство сульфатной целлюлозы, характеризуются высокой степенью автоматизации, сложной структурой и наличием значительных рисков возникновения аварийных ситуаций. Одним из ключевых элементов данного производства является содорегенерационный котлоагрегат (СРК), обеспечивающий регенерацию химикатов и выработку тепловой энергии [1]. Нарушения в работе СРК могут приводить к серьёзным технологическим и экономическим последствиям.

Классические методы диагностики, основанные на пороговом контроле параметров и физических моделях, не всегда позволяют своевременно выявлять скрытые и комплексные нарушения. В условиях недостаточной формализуемости процесса особую актуальность приобретают методы, основанные на анализе данных. Целью работы является разработка нейросетевой диагностической модели, способной выявлять и классифицировать нештатные ситуации на ранних стадиях их развития [2].

В качестве исходной информации использовались данные промышленного мониторинга технологических параметров СРК, представленные в виде многомерных временных рядов. Набор данных включал 17 параметров, характеризующих состояние процесса (температуры, давления, расходы, уровни, pH и др.), и содержал десятки тысяч наблюдений.

На первом этапе выполнен исследовательский анализ данных, позволивший выявить пропуски, выбросы и особенности распределения параметров. Для повышения качества обучения проведена предобработка данных, включающая интерполяцию пропусков, нормализацию и приведение типов данных к единому формату.

В качестве метода диагностики выбрана рекуррентная нейронная сеть с архитектурой LSTM, обладающая способностью учитывать временные зависимости между наблюдениями [3]. Архитектура модели включает:

– этап снижения размерности входных данных;

– двунаправленный LSTM-слой для анализа временных зависимостей;

– полносвязные слои для формирования признаков;

– многоветвевую структуру для выявления различных типов нарушений.

Обучение модели осуществлялось с использованием функции потерь бинарной кросс-энтропии и оптимизатора Adam. Для оценки качества применялась метрика accuracy.

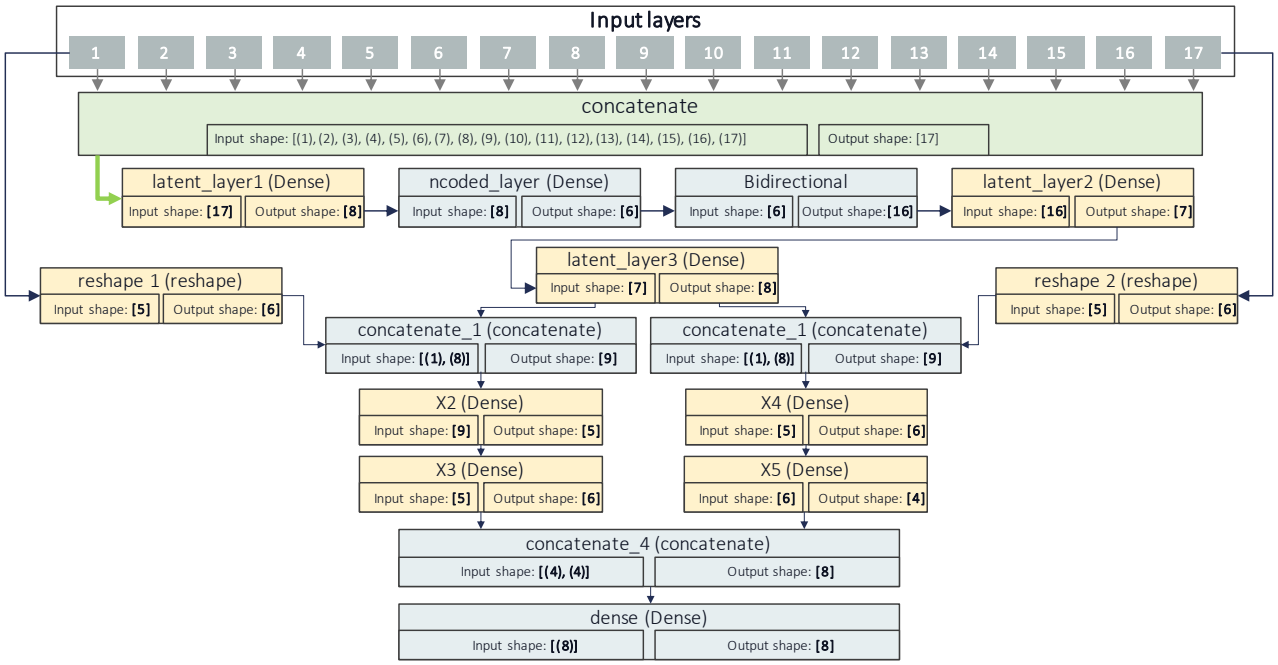


Рис. 1. Детализированная структура LSTM-блока

В результате обучения на исходных данных модель продемонстрировала высокую точность классификации состояний технологического процесса. Было показано, что нейросетевая модель способна эффективно различать нормальные и нештатные режимы работы СРК.

Для проверки обобщающей способности модели проведено тестирование на контрольных выборках, а также на модифицированных данных, имитирующих различные нарушения технологического процесса. Рассматривались такие отклонения, как изменение плотности зелёного щёлока, превышение температурных режимов, нарушения расходных характеристик и др.

Результаты показали, что модель успешно выявляет как явные, так и скрытые отклонения параметров. При этом она демонстрирует высокую чувствительность к ранним признакам нарушений, что особенно важно для задач предиктивной диагностики. Также отмечена устойчивость модели к шуму и частичным пропускам данных.

Результаты исследования подтверждают эффективность применения нейросетевых методов для диагностики плохо формализуемых технологических процессов. В отличие от классических моделей, предложенный подход не требует точного математического описания процесса и способен выявлять сложные нелинейные зависимости.

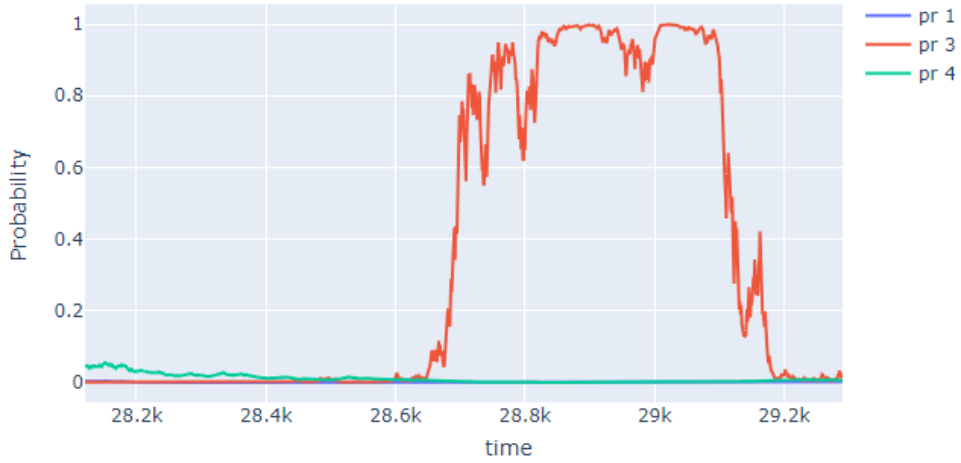


Рис. 2. График вероятности нарушения по причине 3

Использование LSTM-архитектуры позволяет учитывать динамику изменения параметров, что особенно важно для предиктивной диагностики. В то же время модель требует достаточного объёма качественных данных и может быть чувствительна к их структуре, что следует учитывать при промышленной реализации.

Разработана нейросетевая диагностическая модель для выявления нарушений в работе содорегенерационного котлоагрегата. Показано, что использование LSTM-сетей позволяет эффективно анализировать временные ряды технологических параметров и выявлять нештатные ситуации на ранних стадиях.

Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции модели в системы промышленного мониторинга для повышения безопасности и надёжности эксплуатации оборудования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на повышение интерпретируемости модели и её адаптацию к различным промышленным объектам.

Список литературы

1. Ковалёв, Д.А. Декомпозиция содорегенерационного котлоагрегата как сложного объекта управления // Известия ТулГУ. Технические науки. 2025. №2. – С. 566-577. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-566-567.

2. Русинов, Л.А. Мониторинг и диагностика состояния технологических процессов / Л.А Русинов, И.В. Рудакова, В.В. Куркина // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2010. №7. – С. 80-87.

3. Hochreiter S. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter; J. Schmidhuber // Neural Computation. 1997. – V.9, Issue 8. – P. 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

НЕОБХОДИМОСТЬ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОЗГА ДЛЯ ПОМОЩИ В РЕАБИЛИТАЦИИ ОПУХОЛИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Малыгин Г.О.
студент, СПБГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, Россия,
george.malygin@gmail.com

Научный руководитель: Ремизова О.А.
кандидат технических наук, доцент, СПБГТИ (ТУ),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена разработке цифровой модели головного мозга с целью прогнозирования влияния внешних воздействий. В связи со сложностью изучения нелинейных процессов, протекающих в коре головного мозга, особенно в условиях онкопатологии возникает необходимость создания цифрового двойника. Результатом применения такого подхода становится повышение точности прогнозирования эффективности терапии и минимизация побочных эффектов.

Ключевые слова: цифровой двойник, опухоль головного мозга, математическое моделирование, персонализированная медицина, лазерная терапия, прогнозирование эффективности лечения.

Современная медицина сталкивается с рядом ограничений при изучении процессов, проходящих в головном мозге человека, особенно в условиях развития опухолевых заболеваний. Головной мозг – это чрезвычайно сложная биологическая система, характеризующаяся высокой степенью нелинейности и чувствительностью к внешним воздействиям. Наличие опухоли дополнительно усложняет картину, поскольку изменяются как структурные, так и функциональные характеристики ткани, а также ее реакция на терапевтические вмешательства.

Высокая стоимость клинических испытаний, а также риски для здоровья пациента существенно сокращают возможность полноценных экспериментов на человеке. Также в физическом мире много внешних воздействий, которые могут влиять на результат экспериментов. Более того, каждый клинический случай уникален, что затрудняет воспроизводимость результатов и их обобщение. [1]

В связи с этим возникает необходимость создания цифрового двойника – виртуального представления сложного физического объекта в цифровом пространстве с целью точной характеристики функционирования исходного физического процесса или системы. [2] Создание такой цифровой копии позволит без риска для пациента варьировать параметры терапии, прогнозировать ее эффективность и оценивать потенциальные побочные эффекты.

Примером использования цифрового двойника может послужить применение математической модели для исследования влияния лазерной терапией, задача которого точечно уничтожать зараженные клетки. Для достижения этой цели цифровой двойник по снимкам МРТ определяет области зараженных клеток, далее рассчитывает мощность лазера, которая будет необходима для выполнения задачи и не повредит здоровые клетки, проверяет на своей модели и после эксперт выдает рекомендации.

Создание модели мозга позволяет учитывать анатомические и функциональные особенности; модель опухоли, в свою очередь, должна описывать ее рост, гетерогенность и реакцию на различные типы лечения. Интеграция этих моделей дает возможность анализировать динамику взаимодействий здоровых и зараженных клеток в различных сценариях.

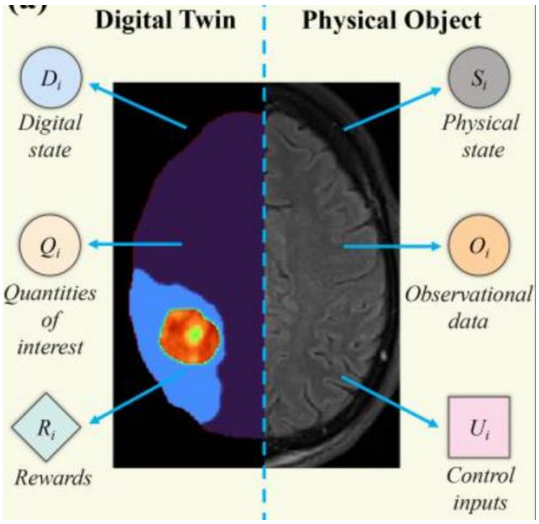


Рис. 1. Структура цифрового двойника и связанного с ним физического объекта для примера применения в раке мозга

Таким образом, создание цифрового двойника является необходимым этапом развития современных методов диагностики и лечения опухолей головного мозга. Он позволяет преодолеть ограничения экспериментов на биологических объектах, повысить точность прогнозирования и обеспечить более безопасную и эффективную разработку терапевтических стратегий. Такой подход открывает возможности для персонализированной медицины, где лечение подбирается с учетом индивидуальных характеристик конкретного пациента.

Список литературы

1. Лазарев А.В., Калининская А.А. ЦИФРОВОЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ (СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР) // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2024. №3. – С. 318-324. DOI: 10.32687/0869-866X-2024-32-3-318-324.

2. Wu, Chengyue et al. “Integrating mechanism-based modeling with biomedical imaging to build practical digital twins for clinical oncology.” Biophysics reviews. 2022. – DOI: 10.1063/5.0086789.

УДК 004.822

КОНЦЕПЦИЯ АКТУАЛИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОГРАММ ДИСЦИПЛИН С УЧЁТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТА

Мелещенко Н.В.
аспирант, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Россия, meleshenko.nikolay@mail.ru

Научный руководитель: Федяев О.И.
к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Россия

Аннотация. Предложена концепция актуализации рабочих программ дисциплин с учётом требований рынка труда на основе интеллектуального анализа текстов. Проведен системный анализ процесса формирования рабочих программ дисциплин, в ходе которого выделены смысловые связи между элементами документов, задействованных в этом процессе. Разработана концептуальная схема процесса обновления рабочих программ дисциплин с учётом требований предприятий. Обоснована иерархия процесса создания и обновления рабочих программ дисциплин. Формализовано содержания документов образовательной и профессиональной сферы в виде орграфов, отражающих связи между структурными элементами этих документов.

Ключевые слова: рабочая программа дисциплины, образовательная программа, требования предприятий, профессиональный стандарт, компетентностный подход, интеллектуальная обработка текстов.

Введение. Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью качественной подготовки молодых специалистов с учётом требований рынка труда.

Целью работы является разработка методов и средств актуализации рабочих программ дисциплин (РПД) с учётом требований предприятий (ТП) на основе интеллектуальной обработки текста для инновации образовательного процесса и его адаптации к изменениям рынка труда.

Суть решаемой проблемы состоит в том, что изучаемые в образовательной программе (ОП) методы, подходы, алгоритмы, технические средства не всегда соответствуют актуальным требованиям предприятий.

В текущих подходах к решению данной задачи анализируются документы ОП [1, 2, 3], РПД [4, 5, 6], профессиональные стандарты (ПС) [1, 4, 7] и вакансии [3, 8, 9]. Формализация документов осуществляется при помощи графовых моделей [4, 5, 7], онтологий [9, 1], ключевых слов [10], кластеров [2], тем [8] и визуальной «карты навыков» [11]. Тексты сравниваются по смыслу [4, 2, 3] и по ключевым словам [10, 9], кластеризуются [2], делятся на темы [8]. Оценка качества ОП проводится численно [7], наглядно [11] и при помощи экспертов [4]. Учитываются интересы обучающихся для построения индивидуальных образовательных траекторий [12].

Материалы и методы. Предметная область исследования ограничена направлением подготовки высшего образования в сфере информационных технологий:

1) укрупнённая группа специальностей 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника», а именно 09.03.XX (бакалавры) и 09.04.XX (магистры);

2) соответствующие направлениям подготовки профессиональные стандарты (группа 06 «Связь, информационные и коммуникационные технологии»);

3) соответствующие ИТ-вакансии, полученные при помощи API агрегатора вакансий HH.ru.

Для анализа процесса актуализации РПД с учётом ТП проведен системный анализ. Иерархическое содержание текстовых документов формализовано при помощи графовых моделей. Обработка документов осуществляется методами обработки естественного языка: токенизация, лемматизация, лексический анализ, синтаксический анализ, семантический анализ, векторизация. Для оценки смыслового подобия используется косинусная мера. Термины выделяются в виде именных групп при помощи правил и контекстно-свободных грамматик. Предложение анализируется в виде дерева составляющих и дерева зависимостей. Нормализация извлеченных терминов осуществляется при помощи морфологического анализа, а обработка конъюнкций – при помощи формальной грамматики. Эффективность оценивается при помощи экспертов, численных метрик и сравнения с эталоном.

Результаты. В результате выполнения работы проведен системный анализ процесса создания и обновления РПД с учётом ТП, который выявил смысловые связи между составными элементами ключевых документов, участвующих в этом процессе. Формализовано содержания текстовых документов образовательной и профессиональной областей в виде иерархической структуры на основе графов. Разработаны алгоритмы извлечения именных групп из текстов при помощи дерева составляющих и дерева зависимостей. Также разработан алгоритм для поиска схожих по смыслу фрагментов РПД под актуальные требования рынка труда.

Обсуждение. Разрабатываемая система может стать эффективным инструментом для выпускающей кафедры университета при инновации образовательных программ, что играет ключевую роль в улучшении подготовки студентов.

Программная реализация позволит преподавателю оперативно обновлять свои рабочие программы исходя из поступающих рекомендаций предприятий, делая образовательный процесс адаптируемым к современным требованиям рынка труда, что в итоге способствует усилению конкурентоспособности выпускников.

Заключение. В современных исследованиях недостаточно внимание уделено формализации задачи обновления РПД с учётом требований рынка труда. Преобладают экспертные оценки соответствия РПД актуальным требованиям рынка труда, а численные критерии качества только находят свое применение. Сравнение содержания РПД и требований предприятий не отражает четкую иерархию элементов данных документов. Для решения выявленных проблем проведен системный анализ процесса создания и обновления РПД при помощи компетентностного подхода. Формализовано содержание документов образовательной и профессиональной сферы. Разработаны алгоритмы анализа терминов документов ПС, РПД и ТП, которые учитывают смысловые взаимосвязи и иерархию составных элементов данных документов.

Список литературы

1. Кунц Е.Ю. Методика выработки управленческих решений по модификации образовательного контента в вузе / Е.Ю. Кунц, А.Н. Полетайкин // Высшее и среднее профессиональное образование в современной России: опыт и перспективы развития : Материалы LXV Межвузовской научно-методической конференции, Новосибирск, 08–09 февраля 2024 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. – С. 137-144. – EDN XGUOGQ.
2. Деев М.В. Архитектура системы интеллектуального анализа компетенций для актуализации образовательных программ вуза / М.В. Деев // Информатика и образование. – 2024. – Т. 39, № 3. – С. 29-43. – DOI 10.32517/0234-0453-2024-39-3-29-43. – EDN RFSOLJ.
3. Исследование актуальности образовательных компетенций на рынке труда с использованием методов обработки естественного языка / С.Д. Белов, А.В. Ильина, В.В. Кореньков [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2024. – Т. 55, № 3. – С. 691-697. – EDN BAOEUL.
4. Ботов Д.С. Интеллектуальная поддержка формирования образовательных программ на основе нейросетевых моделей языка с учётом требований рынка труда / Д.С. Ботов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5-19. – DOI 10.14529/ctcr190101. – EDN VTUUUE.

5. Лутошкина Н.В. Конструирование курсов на основе семантической сети научных понятий учебной дисциплины для интерактивных обучающих систем / Н.В. Лутошкина // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 3. – С. 35. – DOI 10.17513/spno.30820. – EDN FJPOVM.

6. Кондратов Р.Ю. Отдельные вопросы разработки теоретической модели интеллектуальной системы цифрового мониторинга знаний / Р.Ю. Кондратов // Актуальные вопросы гуманитарных и социальных наук: от теории к практике : материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Чебоксары, 05 июня 2023 года. – Чебоксары: Издательский дом «Среда», 2023. – С. 98-102. – DOI 10.31483/r-107192. – EDN CMTUDJ.

7. Сергеева Д.В. Анализ математических подходов к моделированию ОП для кадрового обеспечения цифровой трансформации транспорта / Д.В. Сергеева, Д.И. Баталов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – № 3(43). – С. 68-76. – DOI 10.20295/2413-2527-2025-343-68-76. – EDN AUDEMG.

8. Минаев Д.В. Подходы к проектированию и актуализации компетентностных моделей образовательных программ на основе интеллектуального анализа вакансий работодателей / Д.В. Минаев // Управленческое консультирование. – 2023. – № 10(178). – С. 45-68. – DOI 10.22394/1726-1139-2023-10-45-68. – EDN QXMAGP.

9. Методика анализа соответствия образовательной программы состоянию рынка труда / А.Н. Полетайкин, С.Г. Синица, Л.Ф. Данилова, И.В. Черногорова // Современное образование: повышение конкурентоспособности университетов : Материалы международной научно-методической конференции, Томск, 28–29 января 2021 года. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2021. – Ч. 1. – С. 102-108. – EDN QSRDHB.

10. Бугакова Т.Ю. Концепция системы проектирования компетентностной модели выпускников вуза / Т.Ю. Бугакова, Е.В. Шевчук, А.Д. Шишкин // Всероссийский научно-практический журнал социальных и гуманитарных исследований. – 2024. – № 2(13). – С. 9-17. – DOI 10.46741/sgjournal.2024.13.2.001. – EDN GBNEMH.

11. Кожевников И.С. Методика оценки соответствия содержания образовательных программ требованиям рынка труда / И.С. Кожевников // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – Т. 13, № 4(51). – DOI 10.26102/2310-6018/2025.51.4.020. – EDN ALMYUB.

12. Интеллектуальные технологии построения и реализации индивидуальной образовательной траектории / Л.Ф. Данилова, Н.В. Казначеева, Е.Ю. Кунц, А.Н. Полетайкин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2023. – № 4. – С. 73-91. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2023/4/73-91. – EDN THRRXW.

УДК 004.9

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Мусурина А.С.[1], Шашкин В.С.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.проф. М.А.Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия, anna.musurina@mail.ru
[2] соискатель, ассистент кафедры ЗСС, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.проф. М.А.Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия, vlad_shash@mail.ru

Научный руководитель: Сахаров Д.В.
к.т.н, доцент, доцент кафедры ЗСС, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.проф. М.А.Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке методики выявления деструктивного контента для предприятий минерально-сырьевого комплекса. Актуальность обусловлена цифровизацией бизнес-процессов, ростом репутационных угроз за счет распространения деструктивного контента в медиапростанстве и цифровой среде, влияющего на общественное мнение и конкурентную борьбу. Рассмотрена проблема управления рисками информационной безопасности на примере социальных сетей. На основе адаптированной модели Вестли-Маклина разработана методика мониторинга социальных сетей и выявления в них деструктивного контента. Внедрение разработки позволит оперативно реагировать на возникающие репутационные риски предприятий отрасли и снизить потери.

Ключевые слова: медиапространство, медиаполе, цифровая среда, социальные сети, деструктивный контент, репутационные риски, минерально-сырьевой комплекс, модель Вестли-Маклина, информационная безопасность, управление рисками информационной безопасности.

Введение. Цифровая трансформация предприятий горной промышленности, являющихся субъектами критической информационной инфраструктуры РФ, повышает их уязвимость перед информационными угрозами в глобальной сети [1-3]. Деструктивный контент в социальных медиа способен инициировать социальные конфликты в отрасли, сгенерировать репутационные риски предприятиям и нанести непоправимый экономический ущерб [4,5]. Целью исследования является адаптация классической коммуникативной модели Вестли-Маклина для задач выявления деструктивного контента в цифровой среде. Интеграция данной модели в информационную систему позволяет идентифицировать негативную лексику и структурные искажения информации на этапах передачи сообщения [6-8].

Методы. В качестве методологической основы выбрана модель Вестли-Маклина, описывающая потоки информации между источником, каналом и получателем. Модель адаптирована под социальные сети и произведена ее модификация путем введения аналитического блока для оценки контента на основе ключевых маркеров деструктивности. Такой контент часто маскируется под информационный шум или распространяется через посредников, искажая первоначальный смысл события [9-11].

Модель коммуникации приведена на рисунке 1. Она строится вокруг события (X), которое может наблюдаться источником (A), аудиторией (B) или посредником (C). Источник (A) кодирует информацию, но перед передачей аудитории (B) сообщение (XAC) фильтруется и видоизменяется посредником (C): из множества возможных аспектов события выбирается то, что будет передано дальше. При необходимости возможна доработка сообщения через обратную связь с источником (fCA).

Аудитория получает готовый медиапродукт (XCB), однако интерпретирует его субъективно, опираясь на личный опыт. Если у получателя есть прямой доступ к событию (XB), он способен критически сопоставить реальность с медийной картинкой. Реакция аудитории (эмоциональная, поведенческая или когнитивная) запускает цикл обратной связи, который замыкается на всех участниках: на посреднике (fBC) и на источнике (fBA), отражая итоговый эффект воздействия [12].

Отдельную угрозу представляет вредоносный источник нарушителя (A’), который создает искаженную версию реальности (псевдособытие X’). Посредник может невольно усилить этот сигнал, ориентируясь на вовлеченность, а аудитория, лишенная возможности проверить факты (отсутствие XB), становится уязвимой для манипуляции. В такой системе обратная связь работает как ловушка: высокие охваты поощряют деструктивные тактики, запуская каскадное распространение контента (рисунок 1).

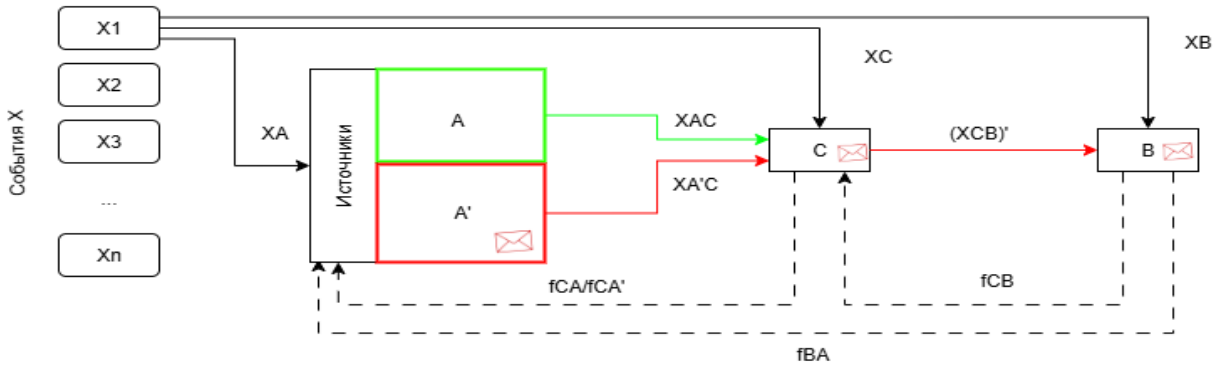


Рис. 1. Модель коммуникации с внедрением вредоносной информации

Чтобы учесть все факторы – от вредоносности источника до степени критичности восприятия аудитории – и вывести единый критерий обнаружения угрозы, предлагается интегральная формула:

$$DI(m,t) = a_1 \cdot D_s(A) + a_2 \cdot D_c(m) + a_3 \cdot D_d(t)$$

где m – сообщение в момент времени t, $D_s(A)$ – детектор вредоносности источника на основе его характеристик (возраст аккаунта, верификация, количество жалоб, активность, заполненность профиля, соотношение подписок и подписчиков), $D_c(m)$ – детектор деструктивности контента на основе семантического и прагматического анализа, $D_d(t)$ – детектор аномальной динамики распространения, α_1, α_2, α_3 – весовые коэффициенты.

Результаты. В ходе исследования была разработана методика выявления деструктивного контента в социальных сетях для предприятий минерально-сырьевого комплекса. Выделены ключевые индикаторы деструктивной активности, влияющие на репутацию компаний. Предложен алгоритм оценки информационных потоков, позволяющий повысить эффективность раннего реагирования на негативные публикации. Система способна идентифицировать «информационных посредников», намеренно искажающих смысл исходных сообщений предприятия, что критически важно для предотвращения социальных конфликтов в отрасли.

Обсуждение. Полученные результаты исследования показывают, что интеграция адаптированной модели Вестли-Маклина в систему управления предприятием повышает устойчивость к внешним угрозам. Предложенный подход позволяет формализовать процесс работы с общественным мнением в цифровой среде. Адаптация модели Вестли-Маклина позволила сместить фокус с фиксации факта негатива на анализ процесса коммуникации и выявить нарушителя ИБ в медиасфере.

Заключение. Разработана методика выявления деструктивного контента для предприятий минерально-сырьевого комплекса на основе адаптированной модели Вестли-Маклина. Практическая значимость состоит в снижении репутационных потерь и минимизации рисков, связанных с конкурентной борьбой и социальными конфликтами. Внедрение подхода в систему мониторинга медиаполя позволит предприятиям отрасли оперативно реагировать на кризисные ситуации, корректировать стратегию и обеспечивать устойчивость бизнеса в условиях цифровизации.

Дальнейшие исследования на основе [13,14] будут направлены на создание системы противодействия распространению деструктивной информации в социальных

сетях для управления рисками ИБ предприятий минерально-сырьевого комплекса, сравнение сходимости предложенной модели с моделью SCWIEHR [15,16]. Перспективы дальнейших исследований связаны с автоматизацией методики, использованием технологий искусственного интеллекта, машинного обучения, обработки больших данных в реальном времени, расширением перечня маркеров деструктивности с учетом региональной специфики деятельности предприятий.

Благодарности. *Исследование выполнено при поддержке Ведущей научно-педагогической школы: «Обеспечение информационной безопасности гибридных и перспективных сетей связи, в том числе субъектов критической информационной инфраструктуры РФ» (включена в Реестр Комитета по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга).*

Список литературы

1. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022.(5-2):31-47.
2. Виткова Л.А., Потехин И.Ю., Сахаров Д.В. Проблема выявления информационно-психологического воздействия в информационной инфраструктуре Российской Федерации // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2017). Сборник научных статей VI Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2017. С. 166-170.
3. Тавокин Е.П. Массовая коммуникация в современном мире // Вестник Российской академии наук. 2011. Т. 81. № 11. С. 986-993.
4. Виткова Л.А., Лагутина С.В., Сахаров Д.В. Обнаружение информационных фейков: изменения и вызовы в пост-2022 период // В сборнике: Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024). Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. В 2-х томах. Санкт-Петербург, 2025. С. 334-336.
5. Борисов С.В. Модель угроз информационной безопасности пользователя социальной сети // В книге: Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025). Материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2025. С. 334-335.
6. Саенко И.Б. Интеллектуальная обработка цифрового сетевого контента для эффективного обнаружения и противодействия нежелательной, сомнительной и вредоносной информации // Отчет о НИР № 18-11-00302. Российский научный фонд. 2020.
7. Харитонов А.А., Сахаров Д.В., Борисов С.В. Противодействие продвижению нежелательной информации в медиапространстве // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2025. Т. 15. № 1. С. 53-58.
8. Mihaela BUCUR, Andreea BAN Study on the Westley Maclean Model and the Co-Orientation Model and their Exemplification in an Industrial Enterprise // Acta Marisiensis. Seria Technologica Vol. 16 (XXXIII) no. 2, 2019. С. 25-28.
9. Каримов Р.Н. От линейных моделей коммуникаций к сетевым – эволюция и синтез // Журнал: Гуманитарные ведомости ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2018, № 1.
10. Виткова Л.А., Сахаров Д.В., Голузина Д.Р. Модель вредоносной информации и ее распространителя в социальных сетях // Защита информации. Инсайд. 2020. № 3 (93). С. 66-72.
11. Гамидов Т.О., Десницкий В.А., Дудкина О.С., Сахаров Д.В. Методы и методики анализа нежелательной информации в социальных сетях // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019). VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. 2019. С. 317-320.
12. Dajani Nabil The widespread embrace of social media: revisiting communication models // International Journal of Arts, Humanities and Social Sciences Volume 06; Issue no 08: August 2025 DOI: 10.56734/ijahss.v6n8a2
13. Сахаров Д.В., Шашкин В.С. Система противодействия распространению вредоносной информации в социальных сетях // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2020 С. 783-787.
14. Виткова Л.А., Чечулин А.А., Сахаров Д.В. Выбор мер противодействия вредоносной информации в социальных сетях // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2020. № 3. С. 20-29.
15. Борисов С.В. Распространение фейковой информации в социальных сетях на основе расширенной модели SCWIEHR // В книге: Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025). Материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2025. С. 333-334.
16. Егорова П.Ю., Борисов С.В., Сахаров Д.В. Распространение слухов в социальных сетях на основе расширенной модели SCWIEHR // Защита информации. Инсайд. 2026. № 2 (128). С. 4-14.

РАЗРАБОТКА ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КОДА И СОСТОЯНИЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Новожилов М.О.
студент группы ИКТК-22 СПбГУТ,
Санкт-Петербург, Россия, mishqa.akd@gmail.com

Научный руководитель: Михайлов В.Д.
ассистент кафедры ИКС СПбГУТ, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается архитектура инфокоммуникационной системы, обеспечивающей совместное версионирование исходного кода, наборов данных и состояний моделей машинного обучения. Обоснована актуальность задачи применительно к геологическому моделированию в горнодобывающей промышленности. Предложен протокол интеллектуальной синхронизации артефактов с учётом топологии сети (LAN/WAN), обеспечивающий воспроизводимость экспериментов в условиях распределённой вычислительной инфраструктуры.объемом от 50 до 100 слов.

Ключевые слова: версионирование моделей машинного обучения, инфокоммуникационные системы, content-addressable storage, воспроизводимость экспериментов, геологическое моделирование, горнодобывающая промышленность, дедупликация данных, MLOps, распределённые системы, синхронизация данных

Введение. Краткий обзор изученности проблемы в мире, цели и задачи исследования, постановка проблемы. Разработка программного обеспечения в области искусственного интеллекта имеет известную проблему воспроизводимости: в отличие от классической разработки, где достаточно версионировать код с помощью Git, в проектах машинного обучения появляются новые сущности – наборы данных и файлы обученных моделей объёмом от сотен мегабайт до десятков гигабайт. Особую сложность представляют задачи горнодобывающей промышленности: модели оценки содержания полезного компонента, геомеханического моделирования и прогнозирования техногенной сейсмичности жёстко привязаны к конкретной версии геологических данных. Существующие решения не обеспечивают полной интеграции версий кода, данных и модели, требуя при этом значительных ресурсов на настройку [1, 2, 3].

Методы. Предложена клиент-серверная архитектура с элементами распределённого кэширования. Хранение артефактов основано на принципе content-addressable storage: имя файла совпадает с его криптографическим хешем, что обеспечивает автоматическую дедупликацию [4, 5]. Сервис метаданных фиксирует связку: хеш коммита Git – хеш датасета – хеш файла модели – значения метрик. Разработан протокол синхронизации, при котором клиент запрашивает манифест состояния у сервера, проводит локальную инвентаризацию кэша и загружает только отсутствующие артефакты. Для минимизации сетевого трафика реализован P2P-механизм обнаружения пиров в локальной сети посредством UDP multicast [6].

Результаты. Разработана итеративная реализация системы, включающая четыре этапа. На первом этапе реализованы базовые операции (init, push, pull) с использованием Python/FastAPI для серверной части и Click для CLI-клиента [7]. На втором этапе обеспечена интеграция с Git: каждый запуск обучения автоматически логирует параметры конфигурации и создаёт объект Run, связывающий версии кода, данных и модели. На третьем этапе внедрён протокол P2P-синхронизации. На четвёртом – разработан веб-интерфейс для визуализации графа зависимостей «Код → Данные → Модель» и сравнения экспериментов [8].

Обсуждение. Предложенный подход устраняет ключевое ограничение существующих решений – отсутствие единого пространства для трекинга экспериментов, хранения крупных бинарных артефактов и версионирования кода. В отличие от DVC, система не требует наличия постоянного сетевого доступа к удалённому хранилищу благодаря LAN-приоритизации [2, 9]. Применительно к горнодобывающей отрасли данный подход позволяет обеспечить воспроизводимость геологических ML-моделей при итеративном обновлении блочных моделей месторождения – добавлении новых скважин и уточнении координатных сеток опробования, что имеет непосредственное значение для достоверности оценки запасов [10].

Заключение. Предложенная архитектура инфокоммуникационной системы обеспечивает воспроизводимость ML-экспериментов за счёт content-addressable storage и интеллектуального протокола синхронизации с топологической осведомлённостью (LAN/WAN). Практическая значимость подтверждается применимостью системы в задачах горнодобывающей отрасли, где геологические датасеты обновляются итеративно в течение всего жизненного цикла месторождения. Перспективы развития – интеграция с оркестраторами контейнеров (Kubernetes) и реализация автоматического выбора версии модели для развёртывания на основе зафиксированных метрик.

Список литературы

1. Sculley D., Holt G., Golovin D. et al. Hidden technical debt in machine learning systems // Advances in Neural Information Processing Systems. 2015. Vol. 28. P. 2503–2511.
2. DVC: Data Version Control – официальная документация. URL: https://dvc.org/ (дата обращения: 16.03.2026).
3. Zaharia M., Chen A., Davidson A. et al. Accelerating the machine learning lifecycle with MLflow // Data Engineering Bulletin. 2018. Vol. 41. No. 4. P. 39–45.
4. Руфанов И.В. Архитектурные паттерны MLOps: систематизация подходов к управлению жизненным циклом моделей // Информационные технологии. 2022. № 3. С. 14–23.
5. Amershi S., Begel A., Bird C. et al. Software engineering for machine learning: a case study // Proc. 41st Int. Conf. on Software Engineering: Software Engineering in Practice (SEIP). 2019. P. 291–300. DOI: 10.1109/ICSE-SEIP.2019.00042.
6. Грачёв О.А., Потапов В.Я. Применение методов машинного обучения в геомеханическом моделировании устойчивости горных выработок // Горный журнал. 2021. № 7. С. 48–55.
7. Зубков В.П., Лазаренко С.Н. Геостатистические методы оценки запасов рудных месторождений с применением нейронных сетей // ГИАБ (горный информационно-аналитический бюллетень). 2022. № 2. С. 112–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-2-0-112-124.
8. Sculley D., Holt G., Golovin D. et al. Machine learning: the high interest credit card of technical debt // Proc. SE4ML Workshop. 2014. P. 1–9.
9. Koppe V.C., Costa J.F.C.L. Machine learning applied to mining: a review // REM – International Engineering Journal. 2021. Vol. 74. No. 3. P. 315-324. DOI: 10.1590/0370-44672020740091.
10. Paleyes A., Urma R.-G., Lawrence N.D. Challenges in deploying machine learning: a survey of case studies // ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 55. No. 6. P. 1–29. DOI: 10.1145/3533378.

УДК 621.391.8:004.932:622.8

ВЛИЯНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ И ЧАСТОТЫ КАДРОВ ВИДЕОПОТОКА НА КАЧЕСТВО ДЕТЕКЦИИ ДВИЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ВИДЕОКОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА НА ОБЪЕКТАХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Олькова Н.С.*, Нефедова Д.С.
студенты, ФГБОУ ВО УУНиТ, Уфа, Россия
** natalaolkova5@gmail.com*

Научный руководитель: Иванов В.В.
кандидат технических наук, УУНиТ, Уфа, Россия

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу влияния разрешения (480p и 720p) и частоты кадров (25 и 30 к/с) видеопотока на качество детекции ключевых точек тела человека алгоритмом MediaPipe Pose. Результаты ориентированы на выбор оптимальных параметров кодирования для систем видеоконтроля и дистанционного мониторинга эргономики персонала горнодобывающих и горнотехнических предприятий.

Ключевые слова: детекция ключевых точек, разрешение видео, частота кадров, видеоконтроль, недропользование, MediaPipe Pose, PSNR, OKS, эргономика труда, промышленная безопасность.

Введение. Системы видеонаблюдения и видеоаналитики активно применяются на горнодобывающих предприятиях для мониторинга соблюдения правил безопасности, оценки производительности труда и обнаружения нештатных ситуаций [1]. Интеграция алгоритмов автоматической детекции поз позволяет перейти от пассивного видеонаблюдения к интеллектуальному анализу эргономики движений персонала в режиме реального времени [2]. При проектировании таких систем критически важен выбор параметров кодирования видеопотока: разрешение и частота кадров определяют качество детекции и одновременно влияют на требования к пропускной способности сети и вычислительной нагрузке.

Цель работы – оценка влияния разрешения (480p / 720p) и частоты кадров (25 / 30 к/с) видеопотока на точность детекции 17 ключевых точек тела алгоритмом MediaPipe Pose и выработка рекомендаций для систем видеоконтроля персонала на объектах недропользования.

Материалы и методы. Исследование проведено на наборе данных WLU Rehabilitation Posture Dataset (задача Sit-to-Stand), который включает 10 видеозаписей (4 конфигурации: 480p/25 к/с, 480p/30 к/с, 720p/25 к/с, 720p/30 к/с), закодированных в формате H.264 при битрейте 2000 кбит/с. Для каждого кадра алгоритмом MediaPipe Pose детектировалось 17 ключевых точек скелетной модели COCO-17. Вычисления выполнялись на CPU без аппаратного ускорения.

Оценивались: PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) – объективная мера качества сжатого кадра относительно оригинала [3]; OKS (Object Keypoint Similarity) – точность позиционирования ключевых точек по стандарту COCO [4]; Confidence – уверенность алгоритма при детекции отдельных точек (порог 0,5); inference latency – время обработки одного кадра.

Результаты и обсуждение. Сводные результаты по четырём конфигурациям приведены в таблице 1. Переход с разрешения 480p на 720p обеспечивает прирост PSNR на ~3,4 дБ, OKS – на 8,8%, Confidence – на 14,6%. При этом разница между 25 и 30 к/с находится в пределах статистической погрешности: $\Delta PSNR < 0{,}1$ дБ, $\Delta OKS < 0{,}003$. Время обработки при 720p составляет ~32,5 мс (≈31 FPS), что обеспечивает работу в режиме реального времени.

Таблица 1

Показатели качества детекции при различных параметрах видеопотока

Конфигурация	PSNR, дБ	OKS	Confidence	Latency, мс
480p / 25 к/с	35,2 ± 1,8	0,782 ± 0,045	0,845 ± 0,003	18,3 ± 2,1
480p / 30 к/с	35,1 ± 1,7	0,785 ± 0,043	0,848 ± 0,031	18,1 ± 2,0
720p / 25 к/с	38,6 ± 1,5	0,852 ± 0,038	0,891 ± 0,028	32,7 ± 3,2
720p / 30 к/с	38,5 ± 1,6	0,854 ± 0,037	0,893 ± 0,027	32,4 ± 3,1

Полученные данные позволяют сформулировать практические рекомендации для систем видеоконтроля персонала на горнодобывающих объектах. При наличии широкополосного канала (корпоративная WAN-сеть, высококачественная спутниковая связь) рекомендуется конфигурация 720p / 25 к/с как обеспечивающая наилучшую точность при экономии пропускной способности по сравнению с 30 к/с. В условиях ограниченного канала (мобильная сеть 3G/4G на удалённых месторождениях) оптимальна конфигурация 480p / 30 к/с, которая требует вдвое меньшей пропускной способности при незначительном снижении точности детекции [5].

Заключение. Установлено, что разрешение видеопотока является доминирующим параметром кодирования, определяющим качество детекции ключевых точек тела: повышение с 480p до 720p увеличивает OKS на 8,8% и Confidence на 14,6%. Частота кадров (25–30 к/с) не оказывает статистически значимого влияния на точность детекции. Для систем видеоконтроля персонала объектов недропользования рекомендуется применять конфигурацию 720p / 25 к/с при достаточной пропускной способности канала и 480p / 30 к/с в условиях ограниченного соединения. Перспективным направлением является разработка систем динамического переключения параметров в зависимости от состояния сети.

Список литературы

1. Многофункциональная система безопасности угольных шахт: визуализация событий горно-технических процессов // Mining Media. 2026. URL: https://mining-media.ru (дата обращения: 22.03.2026).
2. Liu H., Liu W., Chi Z. et al. Fast human pose estimation in compressed videos // IEEE Transactions on Multimedia. 2022. Vol. 25. P. 1390–1400.
3. Huynh-Thu Q., Ghanbari M. The accuracy of PSNR in predicting video quality // Telecommunication Systems. 2012. Vol. 49, № 1. P. 35–48.
4. Lin T.-Y. et al. Microsoft COCO: Common Objects in Context // ECCV 2014. LNCS. Vol. 8693. Cham: Springer, 2014. P. 740–755.
5. Нефедова, Д.С. Исследование влияния параметров кодирования видеопотоков на качество детекции ключевых точек в телекоммуникационных системах / Д.С. Нефедова, Н.С. Олькова // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях : материалы XXVII и XXIII Международных научно-технических конференций, Уфа, 05–07 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 651-652.

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫМ КОТЛОАГРЕГАТОМ ВО ВНЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Прылипко Е.С.
аспирант кафедры автоматизации процессов химической промышленности, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия, naukaegorp@gmail.com

Научный руководитель: Русинов Л.О.
д.т.н, профессор, заведующий кафедрой автоматизации процессов химической промышленности, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматривается подход к оперативному управлению содорегенерационным котлоагрегатом во внештатных ситуациях на основе двухуровневой интеллектуальной системы. На первом уровне для мониторинга текущего состояния используется автоэнкодер, обученный на данных штатной эксплуатации и позволяющий выявлять момент начала выхода технологического процесса из нормального режима по росту ошибки реконструкции многомерного вектора параметров. На втором уровне применяется экспертная система на основе нечеткой логики, предназначенная для диагностики вероятных причин выявленного отклонения и формирования интерпретируемых рекомендаций оператору. Предлагаемый подход ориентирован на работу в условиях шумности SCADA-данных, неполной наблюдаемости процесса и ограниченного объема размеченных данных о внештатных режимах. Его применение позволяет повысить своевременность обнаружения нарушений и обоснованность принимаемых оператором решений.

Ключевые слова: содорегенерационный котлоагрегат, черный щелок, автоэнкодер, нечеткая логика, мониторинг состояния, диагностика, внештатная ситуация.

Введение. Содорегенерационный котлоагрегат является ключевым объектом технологической схемы регенерации химикатов в сульфат-целлюлозном производстве. Процесс сжигания черного щелока характеризуется многопараметричностью, сильной взаимосвязью технологических переменных, шумностью измерений и ограниченной наблюдаемостью ряда критически важных состояний, что затрудняет раннее выявление развивающихся нарушений по классическим пороговым уставкам.

Методы. Для решения задачи предлагается двухуровневая структура интеллектуальной поддержки оперативного управления. На первом уровне используется автоэнкодер, обучаемый на архивных данных штатной эксплуатации; критерием начала выхода из нормального состояния служит увеличение ошибки восстановления входного вектора технологических параметров. На втором уровне применяется экспертная система на основе нечеткой логики, которая по совокупности информативных признаков выполняет интерпретируемую диагностику причин отклонения, учитывая неопределенность, неполноту и лингвистический характер части диагностических знаний.

Результаты. Предлагаемая архитектура позволяет перейти от контроля отдельных параметров к анализу общего состояния технологического режима. Использование автоэнкодера делает возможным выявление слабовыраженных аномалий на ранней стадии, когда значения параметров еще могут не выходить за допустимые границы, но их совместная динамика уже отличается от нормальной. Нечеткая экспертная система, получая сигнал о нарушении, позволяет связать выявленное отклонение с вероятными причинами, такими как изменение свойств черного щелока, нарушение распыла, отклонения в подаче воздуха, нестабильность работы форсунок или изменения теплового режима топки.

Обсуждение. Преимуществом предложенного подхода является сочетание чувствительности методов машинного обучения к скрытым отклонениям и интерпретируемости экспертной диагностики. Это особенно важно для содорегенерационных котлоагрегатов,

где внештатные ситуации развиваются в условиях сложной физико-химической динамики, а оператору требуется не только сигнал о нарушении, но и понятное объяснение вероятной причины. Интеграция такой системы в SCADA-контур создает основу для перехода от пассивного мониторинга к интеллектуальной поддержке принятия решений в реальном времени.

Заключение. Разработанный подход к оперативному управлению содорегенерационным котлоагрегатом во внештатных ситуациях основан на последовательном решении двух задач: раннего обнаружения выхода процесса из нормального состояния и последующей диагностики причин нарушения. Применение автоэнкодерного мониторинга совместно с экспертной системой на основе нечеткой логики позволяет повысить оперативность реакции на отклонения, снизить вероятность пропуска развивающихся нарушений и улучшить качество информационной поддержки оператора. Дальнейшее развитие работы связано с апробацией подхода на промышленных временных рядах и уточнением базы нечетких правил для различных типов внештатных ситуаций.

Список литературы

1. Горьковой Е.В. Диагностика состояния содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения эффективности его работы: автореф. дис. … канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 24 с.
2. Романова Л.В., Полозов А.В. Факторы, влияющие на безопасную эксплуатацию содорегенерационного котлоагрегата при сжигании сульфатных черных щелоков // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. 2020. № 4. С. 271–278.
3. Frantsi A., Bjork M., Hupa M. Advanced control of the recovery boiler operation // Journal of Process Control. 2005. Vol. 15. No. 5. P. 527–536.
4. Damasceno A., Carneiro L., Andrade N., Vasconcelos S., Brito R., Brito K. Simultaneous prediction of steam production and recovery efficiency in pulp and paper process boilers // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 275. Article 124103.
5. Yu J., Zhang Y. Challenges and opportunities of deep learning-based process fault detection and diagnosis: a review // Neural Computing and Applications. 2023. Vol. 35. P. 211–252.
6. Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И. Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование. Екатеринбург, 2015. 141 с.
7. Laitinen A., Laurila E., Keskinen K., Vuorinen V. Large-Eddy Simulation of two secondary air supply strategies in kraft recovery boilers // Applied Thermal Engineering. 2022. Vol. 216. Article 119035.
8. da Silva P.S.P., Engblom M., Brink A., Hupa L. Fuel and thermal NO formation during black liquor droplet pyrolysis with envelope flame // Fuel. 2020. Vol. 271. Article 117512.
9. Belisario A.B., Edberg A., Björk M., Almeida G.M., Vakkilainen E.K. On the diagnosis of a fouling condition in a kraft recovery boiler: combining process knowledge and data-based insights // TAPPI Journal. 2023. Vol. 22. No. 3. P. 162–171.
10. Анискин С.С., Куров В.В. Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства // Известия вузов. Лесной журнал. 2024. № 1. С. 182–194.

УДК 004.94

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПРОЦЕССНАЯ МОДЕЛЬ КАК ИНТЕРФЕЙС СВЕДЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ДИАГРАММ К IDEF0

Ремизов В.К.
магистрант, ДонНТУ, Донецк, ДНР, Россия, v.remizov02@yandex.ru

Научный руководитель: Григорьев А.В.
к.т.н., доцент, ДонНТУ, Донецк, ДНР, Россия.

Аннотация. Рассматривается проблема унификации процессных диаграмм, представленных в различных нотациях, для последующей оценки их когнитивной сложности. Предлагается универсальная процессная модель, выступающая промежуточным представлением между исходной нотацией и IDEF0. Такой подход позволяет сохранять инвариантные характеристики процесса при трансляции и применять единый механизм анализа сложности к разнородным моделям. Практическая значимость состоит в возможности использования подхода в многонотационных программных средствах анализа и структурного упрощения диаграмм.

Ключевые слова: процессные диаграммы, когнитивная сложность, универсальная процессная модель, IDEF0, промежуточное представление.

Введение. Преобразование процессных моделей между различными нотациями является устойчивым направлением исследований и рассматривается в рамках метамоделей [1-2] и средств межнотационной трансляции [3-4]. Однако задача унифицированного представления моделей для последующего снижения когнитивной перегруженности [5-7] остается открытой. Ранее авторами была разработана подсистема оценки и ограничения когнитивной сложности IDEF0-диаграмм [8] и предложена методика эмпирической калибровки параметров такой оценки [9]. Цель настоящей работы состоит в разработке универсальной процессной модели как интерфейсного слоя сведения разнородных процессных диаграмм к IDEF0 для последующей унифицированной оценки и автоматизированного ограничения их когнитивной сложности.

Методы. Использован интерфейсный подход [10], основанный на введении промежуточного представления между исходной нотацией и IDEF0. Универсальная процессная модель включает активности, потоки управления и данных, ресурсы, правила и узлы ветвления/синхронизации, что позволяет выделять инвариантные сущности процесса независимо от конкретного языка описания. На этой основе задаются правила преобразования «нотация → универсальная процессная модель → IDEF0» с сохранением достижимости, структурных зависимостей и логики ветвления.

Результаты. Сформирована универсальная процессная модель как промежуточный слой сведения разнородных процессных диаграмм к IDEF0. Показано, что такое представление позволяет сохранять ключевые инварианты процесса при трансляции и применять к различным нотациям единый механизм оценки когнитивной сложности. Дополнительные элементы, возникающие при сведении, интерпретируются не как искажение, а как формальное раскрытие логической структуры исходной модели.

Обсуждение. Предложенный подход развивает исследования по межнотационному сопоставлению моделей, дополняя их возможностью количественного анализа понятности диаграмм. Введение промежуточного слоя делает сопоставимыми различные способы задания ветвлений, синхронизаций и зависимостей, что позволяет использовать единые критерии оценки сложности для широкого класса представлений. Тем самым создается основа для переноса эмпирически калибруемых параметров сложности на разнородные процессные модели.

Заключение. Универсальная процессная модель может рассматриваться как средство унифицированного сведения разнородных процессных диаграмм к IDEF0 и как основа единого механизма оценки и ограничения их когнитивной сложности. Практическая значимость подхода состоит в возможности его интеграции в программные средства, поддерживающие несколько нотаций при общей процедуре анализа и нормализации сложности. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением набора трансляторов, программной реализацией подхода и эмпирической проверкой корректности и воспринимаемости предложенной модели.

Список литературы

1. Adamo G., Ghidini C., Di Francescomarino C. What is a process model composed of? A systematic literature review of meta-models in BPM // Software and Systems Modeling. – 2021. – Vol. 20. – P. 1215-1243. – DOI: 10.1007/s10270-020-00847-w.
2. Delgado A., Calegari D., García F., Weber B. Model-driven management of BPMN-based business process families // Software and Systems Modeling. – 2022. – Vol. 21. – P. 2517-2553. – DOI: 10.1007/s10270-022-00985-3.
3. Зимовец О.А., Малкуш Е.В., Маторин С.И., Жихарев А.Г. Преобразование диаграммы BPMN в УФО-диаграмму // Экономика. Информатика. – 2025. – Т. 52, № 3. – С. 642–653. – DOI: 10.52575/2687-0932-2025-52-3-642-653.
4. Rahmoune Y., Chaoui A. Automatic bridge between BPMN models and UML activity diagrams based on graph transformation // Computer Science. – 2022. – Vol. 23, № 3. – DOI: 10.7494/csci.2022.23.3.4356.5.
5. Gonçales L.J., Farias K., da Silva B.C. Measuring the cognitive load of software developers: An extended systematic mapping study // Information and Software Technology. – 2021. – Vol. 136
6. Polančič G., Kous K. High-Level Process Modeling—An Experimental Investigation of the Cognitive Effectiveness of Process Landscape Diagrams // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 9. – Art. 1376. – DOI: 10.3390/math12091376.
7. Горбунова А.Ю. Теория когнитивной нагрузки: оптимизация обучения с помощью алгоритмов решения задач и последовательности обучения // Мир психологии. – 2024. – № 2. – С. 237–253. – DOI: 0.51944/20738528_2024_2_237.
8. Ремизов В.К., Григорьев А.В. Разработка программных модулей подсистемы ограничения когнитивной сложности IDEF0-диаграмм // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2024) : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. в рамках X Междунар. науч. форума Донецкой Народной Республики (Донецк, 29–30 мая 2024 г.). – Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2024. – Т. 2. – С. 1146–1155.
9. Григорьев А.В. Методика тестирования для определения когнитивной сложности моделей различных предметных областей. // Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия: Информатика, кибернетика и вычислительная техника, выпуск 6 (ИКВТ-99): – Донецк: ДонГТУ, 1999. – С. 246-251.
10. Григорьев А.В., Морозова О.В. Способы создания интерфейса «языки формальных спецификаций – проблемно-ориентированные языки» // Моделирование и компьютерная графика : материалы междунар. науч.-техн. конф. – 2011.

УДК 005

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

Ромашин Д.В.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Daniil.V-Romashin@yandex.ru

Научный руководитель: Мартиросян А.В.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Традиционные пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы не обеспечивают требуемого качества сепарации природного газа при флуктуациях давления, температуры и расхода входного потока. Статичность настроек приводит к росту содержания жидких и механических примесей, тем самым увеличивает нагрузку оборудования и перерасходу энергии. В работе предложена концепция адаптивного управления на основе гибридной нейросетевой модели, прогнозирующей динамику входных параметров и корректирующей уставки регуляторов в реальном времени. Методологический подход позволяет компенсировать колебания давления и температуры входного газового потока, обеспечивая стабильное качество сепарации и снижение эксплуатационных затрат. Сделан вывод о перспективности применения гибридных интеллектуальных систем для повышения надежности и энергоэффективности газоподготовки.

Ключевые слова: сепарация газа, очистка природного газа, адаптивное управление, PID-регулятор, нейронные сети, нечеткая логика, машинное обучение, оптимизация процессов.

Введение. Несмотря на высокий уровень технологического развития оборудования для подготовки природного газа, существующие системы автоматического управления часто базируются на устаревших алгоритмах. Традиционные пропорционально-интегрально-дифференциальные (PID) регуляторы эффективны только при стабильных режимах работы. Однако в реальных условиях давление, температура и объем подачи газа постоянно изменяется. Статичные настройки PID-контроллеров, которые пересчитываются лишь несколько раз в год из-за дороговизны остановок производства, приводят к снижению качества очистки, росту концентрации примесей и повышенному расходу энергии на последующих стадиях. Целью данной работы является формирование концепции адаптивной системы управления, способной в режиме реального времени компенсировать внутренние и внешние возмущения технологического процесса [1].

Методы. В основе исследования лежит системный анализ литературных данных и производственных кейсов за период 2015–2024 гг. Проведена сравнительная оценка классических и интеллектуальных методов управления по критериям адаптивности, сложности внедрения и эффективности [2]. На основе синтеза выявленных закономерностей предложена методологическая концепция адаптивной системы управления. Она включает два контура: (1) внутренняя адаптация, где классический PID-контур получает корректирующие сигналы от интеллектуальной надстройки, и (2) внешняя адаптация, основанная на прогнозировании изменений состава сырья и режимов работы оборудования с помощью нейросетевых моделей [3].

Результаты. Анализ показал, что внедрение гибридных подходов позволяет снизить интегральную ошибку регулирования (IME) на 40–60% по сравнению с базовым PID-регулятором и расширить диапазон устойчивой работы оборудования без необходимости его физической перенастройки. Применение нейросетевых контроллеров, обученных на массивах ретроспективных данных по давлению, температуре, уровню и расходу газа, позволяет с высокой точностью прогнозировать момент проскока примесей в адсорберах [4-5]. Это обеспечивает своевременную корректировку длительности циклов регенерации, исключая прорыв неочищенного газа в магистраль и снижая риск аварийных остановок оборудования. Ключевым результатом является синтез структуры управления, где искусственный интеллект используется не для полной замены классической автоматики, а для предиктивной

настройки её параметров [6-7]. В ходе исследований была разработана программа, которая на основе исторических данных может спрогнозировать параметры.

Обсуждение. В отличие от существующих решений, ориентированных на оптимизацию отдельных узлов (например, только блока осушки или сероочистки), предложенная концепция рассматривает газоподготовку как единую систему [8]. Также на рассматриваемом объекте часто выходит из строя клапан в сепарационной колонне, что сказывается на большом расходе газа. Это позволяет не только реагировать на уже произошедшие отклонения, но и предотвращать их, управляя режимом сепарации на основе прогноза свойств входного потока [9-10]. Основной сложностью внедрения остается высокая зависимость от качества и полноты ретроспективных данных, а также необходимость интерпретируемости решений «черного ящика» для технологического персонала, что требует разработки гибридных объяснимых моделей (XAI) [11].

Заключение. Проведенное исследование подтверждает, что перспективным направлением развития систем управления газопереработкой является интеграция классических PID-алгоритмов с методами машинного обучения и нечеткой логики. Предложенная концепция создает методологическую основу для создания высокоэффективных, энергосберегающих и отказоустойчивых производств. Практическая значимость работы заключается в возможности снижения затрат на реагенты и энергию за счет повышения качества первичной сепарации. Дальнейшие исследования будут направлены на имитационное моделирование предложенной системы с использованием реальных промышленных данных для количественной оценки экономического эффекта.

Благодарности: *автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность кандидату технических наук, доценту Мартиросяну Александру Витальевичу за научное руководство и формирование идеи исследования.*

Список литературы

1. Martirosyan A.V., Romashin D.V. Investigation of the Control Strategies for Enhancing the Efficiency of Natural Gas Separation and Purification Processes. Processes. 2026; 14(4):700. https://doi.org/10.3390/pr14040700.
2. Litvinenko, V. (2020). The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas. Resources, 9(5), Article 5. https://doi.org/10.3390/resources9050059.
3. Zemenkova, M. Y., Chizhevskaya, E. L., & Zemenkov, Y. D. (2022). Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies. Journal of Mining Institute, 258, 933-944. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.105.
4. Tian, J., Hu, Y., Lv, J., Feng, Z., & Song, W. (2023). Modelling and performance analysis of power system in gas engine-driven heat pump. Applied Thermal Engineering, 223. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120015.
5. Yang, Z., Li, X., Xiang, Q., He, Q., Faber, M. H., Zio, E., Su, H., & Zhang, J. (2023). A resilience evaluation method of natural gas pipeline system based on uncertainty analysis. Process Safety and Environmental Protection, 177. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.058.
6. Qiu, M., Ji, Z., & Ma, L. (2022). An energy-efficiency evaluation method for high-sulfur natural gas purification system using artificial neural networks and particle swarm optimization. International Journal of Energy Research, 46(3). https://doi.org/10.1002/er.7376.
7. Nikolaev, A.V., & Kychkin, A.V. (2025). Development and integration of an underground mining enterprise ventilation process simulations into the demand response. Journal of Mining Institute, 275, 18-29. Retrieved from https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16568.
8. Kazantseva, V.V., Ozhigin, D.S., Kosarev, N.S., Satbergenova, A.K., & Ozhigina, S.B. (2025). Development of complex system of geotechnical monitoring of technogenic objects based on geospatial data. Journal of Mining Institute, 276(1), 142-156. Retrieved from https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16590.
9. Boronko, E.A., & Novozhilov, I.M. (2024). Designing an Information System for Monitoring the Electromagnetic Field of a Power Plant. 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), 331-334. https://doi.org/10.1109/ElCon61730.2024.10468204.
10. Ilyushin, Y.V., & Boronko, E.A. (2026). Development of a Mathematical Model of the Electromagnetic Field Formation Process Based on System Analysis Methods. Mathematics, 14(3), 399. https://doi.org/10.3390/math14030399.
11 Nazarychev, A., Iliev, I., Manukian, D., Beloev, H., Suslov, K., & Beloev, I. (2025). Review of Operating Conditions, Diagnostic Methods, and Technical Condition Assessment to Improve Reliability and Develop a Maintenance Strategy for Electrical Equipment. Energies, 18(21), 5832. https://doi.org/10.3390/en18215832.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЦЕНТРОБЕЖНО-ПУЛЬСАЦИОННЫХ МЕШАЛОК

Сидоров Н.Э.
аспирант, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия, Nikita.E.Sidorov@gmail.com

Научный руководитель: Абиев Р.Ш.
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительной оценки численного моделирования гидродинамических характеристик, таких как распределения профилей скорости и удельной диссипации энергии, модификаций центробежно-пульсационных мешалок (ЦПМ) в аппарате смешения, выполненной в модуле вычислительной гидродинамики Comsol Multiphysics 6.2. Результаты продемонстрировали, что расположение дополнительных отверстий в полотне мешалок значительно увеличивает локальную турбулентность в зоне над и под мешалками за счет направленного движения дополнительных циркуляционных потоков, что, в свою очередь, способствует более равномерному распределению скорости и удельной диссипации энергии по аппарату.

Ключевые слова: перемешивание, центробежно-пульсационные мешалки, вычислительная гидродинамика, computational fluid dynamics, Comsol mixing module 6.2.

Введение. Энергоэффективные процессы перемешивания широко востребованы в большинстве отраслей промышленности. Эффективное перемешивание способствует, в первую очередь, интенсификации процессов массопереноса, теплообмена и проведения химических реакций. В подавляющем большинстве эти процессы подразумевают ввод дополнительной энергии в аппарат посредством вращающихся на валу перемешивающих устройств. Численное моделирование гидродинамической обстановки в аппаратах с мешалками является важной частью оптимизации технологических процессов, поскольку позволяет прогнозировать распределение энергии, выявлять застойные зоны и подбирать конструктивное исполнение внутренних устройств без трудозатратных опытно-промышленных испытаний. Перемешивание в аппаратах с мешалками, являясь одной из самых распространенных технологических операций, представляет собой одну из самых сложных задач для численного моделирования по причине крайне сложной структуры потоков, возникающих при перемешивании, в том числе при распаде турбулентных вихрей. Однако, современные подходы позволяют учесть сложную природу многокомпонентных потоков и добиться высокой точности при моделировании основных гидродинамических параметров в реакторах смешения [1-3].

Методы. Моделирование реакторов с мешалками в турбулентном режиме требует точного выбора физической модели, а также корректного задания начальных и граничных условий. В работе осуществлялось моделирование процессов на базе модуля вычислительной гидродинамики (CFD) программного продукта Comsol Multiphysics, модуль mixing 6.2. Корректно подобранные CFD модели позволяют с высокой точностью изучать основные характеристики процессов перемешивания [4-8]. Принимая во внимание рассматриваемый в работе турбулентный режим перемешивания, а также пульсации скорости и давления, присущие ЦПМ, для моделирования была выбрана модель k-ε RANS, которая, являясь универсальным решением подобных

задач, эффективно описывает усреднённые характеристики турбулентных потоков, сохраняя баланс между вычислительной сложностью и точностью, которая не требует значительных вычислительных мощностей [9-11].

Целью работы является исследование распределения профилей скорости и удельной диссипации энергии в рассматриваемых модификациях базовой мешалки ЦПМ, представляющих расположение отверстий в полотне мешалок. Данные гидродинамические характеристики являются ключевыми для интенсификации процессов перемешивания: удельная диссипация энергии определяет скорость процессов эмульгирования и диспергирования, в то время как равномерность распределения скорости в аппарате является важным фактором, определяющим процессы суспендирования.

Результаты. По результатам моделирования модификаций ЦПМ проведен анализ эффективности их перемешивания по ключевым осредненным плоскостям. Результаты демонстрируют, что наличие отверстий в полотне мешалок приводит к улучшению гидродинамической обстановки в аппарате в целом и по ключевым плоскостям в частности. Это выражается в более высоких средних значениях распределения скорости движения жидкости в аппарате и скорости удельной диссипации энергии. Наблюдаемая тенденция связана с дополнительной локальной циркуляцией жидкости, осуществляемой через отверстия в полотне мешалок, и подчеркивает целесообразность расположения отверстий в ЦПМ для интенсификации процессов перемешивания. Экспериментальные исследования газосодержания, плотности распределения пузырьков и саутеровского диаметра при перемешивании гетерогенной среды газ-жидкость продемонстрировали удовлетворительную сходимость с результатами численного моделирования.

Обсуждение. Отверстия в ЦПМ оказали существенное влияние на распределение основных гидродинамических характеристик по аппарату. Новые конфигурации ЦПМ продемонстрировали увеличенные значения профиля средней скорости и удельной скорости диссипации энергии в зонах под и над мешалками за счет перенаправления дополнительных циркуляционных потоков жидкости. В данной работе авторами предложен коэффициент эффективности преобразования вводимой в аппарат энергии в формирование межфазной поверхности, являющейся ключевой характеристикой процессов массопереноса. Коэффициент $\eta_{ГЖ}$ оказался выше для всех конфигураций ЦПМ в сравнении с турбинной мешалкой, что свидетельствует о том, что ЦПМ более рационально перераспределяет вводимую энергию в аппарат за счет локальных дополнительных пульсационных воздействий на перемешиваемую среду.

Заключение. Результаты численного моделирования подтвердили перспективность сдвоенных центробежно-пульсационных мешалок как энергоэффективного класса быстроходных перемешивающих устройств. Наиболее перспективной для дальнейших исследований является конфигурация ЦПМ-ПМ-6-20 с отверстиями в обеих мешалках и противофазном положении мешалок, обеспечивающая более равномерное распределение энергии в аппарате и улучшение ключевых характеристик газожидкостного диспергирования, газосодержания и удельной межфазной поверхности.

Список литературы

1. Абиев Р.Ш., Сидоров Н.Э., Экспериментальное исследование мощности одиночной и двойных центробежно-пульсационных мешалок. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института. 2025. Номер 75(101), страницы 56-61.

2. Sadino-Riquelme, M., Rivas, J., Jeison, D., Donoso-Bravo, A., Hayes R., Computational modelling of mixing tanks for bioprocesses: Developing a comprehensive workflow, Canada. J. Chem. Eng. 100 (2022) 3210–3226. https://doi.org/10.1002/cjce.24220.

3. Wu, C., Sun, F., Zhang, Y., Xie, C., Zhao, X., Che, Y., Numerical simulation of fluid flow characteristics and ultrasonic cavitation performance in novel-designed stirred tank sonoreactor, Chem. Eng. Process. Process Intensif. 205 (2024) 110026. https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110026.

4. Liu, Q., Zhang, X., Xiong, X., Wang, F., Li, G., Liu, S., Shen, Q., Zhang, Z., Qin, Y., Zhu, B., Wang, Z., CFD simulation of power characteristics and flow field distribution of different spiral stirring paddles, Chem. Eng. Process. Process Intensif. 205 (2024) 110033. https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110033.

5. Montes Serrano, I., Daniel, P.K., Dürauer, A. A modelling approach for volumetric power input in the microscale and its utilization for the scale up of solid liquid mixing systems, Chem. Eng. Process. Process Intensif. 184 (2023) 109303. https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109303.

6. Hassan, H., Roberts, M., An integrated CFD methodology for tracking fluid interfaces and solid distributions in a vortexing stirred tank, Canada. J. Chem. Eng. 101 (2023) 1854–1873. https://doi.org/10.1002/cjce.24645.

7. Zhu, X., Wu, Y., CFD modeling of gas liquid hydrodynamics in stirred tank reactors, Int. J. Chem. React. Eng. 21 (2023) 179–193. https://doi.org/10.1515/ijcre-2022-0082.

8. Jones, T., Clark, P., CFD simulations of stirred tank reactors using OpenFOAM, Chem. Eng. Trans. 90 (2022) 211–225. https://doi.org/10.3303/CET2290036.

9. Cortada-Garcia, M., Weheliye, W., Dore, V., Mazzei, L., Angeli, P., Computational fluid dynamic studies of mixers for highly viscous shear thinning fluids and PIV validation, Chem. Eng. Sci. (2018). https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.01.010.

10. Gebousky O., R., Haidl, J., Bilek, V., Pivokansky, M., Dynamic mixing protocol for mixing enhancement in unbaffled bioreactor with eccentric bottom-mounted impeller, Chem. Eng. Sci. (2025).

11. Paul, E.L., Atiemo Obeng, V.A., Kresta, S.M., Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice, Vol. 1, Wiley Interscience, 2004, 1433 p.

РАЗРАБОТКА, ВНЕДРЕНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ДОБЫВАЮЩИХ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Солнцев А.Ю.
младший системный администратор, АО «КРОНОС СПб», Санкт-Петербург, Россия, alexwork.creative@gmail.com

Научный руководитель: Ратасеп М.А.
кандидат технических наук, доцент, СПбГТИ, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Внедрение систем видеонаблюдения на производствах позволяет повысить безопасность и управляемость производством, осуществить анализ производственных процессов. Цифровые системы видеонаблюдения позволяют использовать программные средства, включая элементы ИИ, для анализа изображений и видеопотока и могут быть интегрированы в общую систему управлением предприятием. Положительным примером в реализации подобных систем может служить опыт лакокрасочного предприятия АО «КРОНОС СПб».

Ключевые слова: видеонаблюдение, IP-камера, статический IP, POE-коммутатор, удаленный доступ.

Введение. Цифровые системы видеонаблюдения используются на производственных объектах для обеспечения безопасности и контроля автоматизированных технологических процессов. В отличие от аналоговых систем, цифровые системы конвертируют видеосигналы в цифровой формат, что упрощает хранение, обработку и анализ видеоданных.

Для расширения возможностей операторов и дежурного персонала важным условием является обеспечение непрерывного визуального мониторинга труднодоступных мест производственных линий, зон обслуживания, сигнальных систем оборудования, участков повышенной опасности, вроде зон хранения горючих, токсичных материалов и продукции.

Методы. На лакокрасочном предприятии в цеху диспергирования была произведена замена аналогового видеонаблюдения на цифровое с использованием современной технологии POE (Power over Ethetnet)-коммутаторов и IP (Interner Protocol)-камер HIKvision, за каждой из которых закреплен статический IP локальной сети предприятия. Подключение осуществлялось посредством уличной FTP (Foiled Twisted Pair) витой пары и стандартных разъемов RJ45(Registered Jack), что позволило унифицировать коммуникации.

Результаты. Закрепление за камерой статического IP позволило обезопасить доступ к корпоративным ресурсам, но и реализовать их удаленную настройку, мониторинг в режиме онлайн как с ПК, так и с мобильного устройства посредством авторизации через приложение.

Используя технологию POE мы добились уменьшения метража кабелей в два раза, что удешевило конечный результат и упростило подключение.

Также нельзя не упомянуть возможность удаленного контроля и управления оператором и дежурным смены режимами работы диссольверов, насосной станции и сигнальных индикаторов по месту, благодаря высокому качеству и четкости изображения.

Настройка ИИ (Искуственный интелект)-распознавания штрихкода готовой продукции упростила курирование складской службы и сборку заказов.

Обсуждение. Конечно, соответствующий переход требует больших денежных затрат на промежуточное оборудование, по сравнению с имеющимся, специалистов по их сетевой настройке, дополнительного обучения персонала, что в носит свои коррективы в темп такой модернизации, однако мы обязаны идти в ногу со временем, ища точки взаимной заинтересованности науки и бизнеса для общего процветания.

Заключение. Внедрение и модернизация систем видеонаблюдения позволили выйти на новый уровень управления не только технологическим процессом, но и предприятием в целом, повысить качество готовой продукции, снизить риски нештатных, аварийных ситуаций, создать новый подход к безопасности трудящихся. В будущем мы бы хотели масштабировать систему с отдельных цехов до всего производства и поделится нашим опытом с другими.

ПОИСК ПЕРСПЕКТИВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ В ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Стальмаков С.В.
студент группы САТП-24, 2 курс,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, ser.stalmakoff@gmail.com

Научный руководитель Белоглазов И.И.
доц. каф. АТПП,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается влияние и важность моделирования процесса переработки нефти для улучшения энергоэффективности переработки нефти. Модель показывает процесс нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи, её параметры, при которых достигается наиболее энергоэффективное использование сырья.

Ключевые слова: трубчатая печь, нефть, переработка нефти, моделирование, автоматизация, энергоэффективность, углеводородное сырье, компьютерная модель.

Введение. Современная нефтеперерабатывающая промышленность сталкивается с вызовами, требующими пересмотра традиционных подходов к управлению технологическими процессами. Одним из ключевых этапов переработки углеводородного сырья является его нагрев в трубчатых печах, который обеспечивает необходимые температурные условия для последующих технологических процессов. Однако даже в высокотехнологичных отраслях автоматизация таких процессов часто остается фрагментарной, что приводит к потерям энергии, неоптимальному использованию ресурсов и росту эксплуатационных расходов. Именно это делает исследования в области систем управления (АСУ) по нагреву углеводородного сырья не только актуальными, но и очень важными для развития отрасли. Это реально важно. Также хочется отметить, что актуальность исследования определяется несколькими важными факторами. Эти факторы становятся всё более важными в условиях современного развития энергетики и технологий нефтепереработки. Первый фактор – растущий спрос на энергоресурсы. Растущий спрос на энергоресурсы требует новых подходов к производству энергоресурсов и использованию энергоресурсов. По данным Международного энергетического агентства (IEA), глобальное потребление энергии продолжает расти, и к 2050 году потребление энергии может увеличиться на 40-50 % [1]. Однако большая часть мирового энергетического баланса всё ещё обеспечивается ископаемыми источниками энергии. Ископаемые источники энергии создают серьёзные экологические проблемы и угрожают долгосрочной устойчивости энергетических систем [2]. Второй фактор – нам нужен поиск дешевых решений, чтобы экономить энергию и сократить расходы в нефтяной отрасли. По-моему, хотя нагревательные системы уже продвинулись, нагревательные системы всё ещё дают проблемы: сырье нагревается неравномерно, тратится слишком много энергии и трудно держать нужную температуру, когда состав углеводородов меняется [3]. Такой поиск важен. Эти проблемы заставляют нас искать новые решения, и такой поиск нужен, чтобы отрасль могла расти дальше.

Научные достижения в области автоматизации нагрева углеводородного сырья. Новые системы управления температурным режимом в трубчатых печах для нагрева нефти и другого углеводородного сырья стали важным элементом перемен в нефтяной отрасли. По моему мнению, учёные за последние годы создали совместные решения,

которые дают точный контроль, экономию энергии и безопасность. Новые системы управления температурным режимом в трубчатых печах снижают ошибки людей, потому что работают автоматически. Эти системы также поддерживают долгосрочное развитие производства, потому что экономят ресурсы и уменьшают вред природе. Эти такие новые системы управления температурным режимом в трубчатых печах действительно меняют работу в отрасли. Современные автоматические системы построены на SCADA-системах (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA-система, например WinCC, показывает картинку, собирает цифры и управляет процессом прямо сейчас [4]. Заметно, как SCADA-система работает вместе с программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), например Siemens SIMATIC S7-1200. SCADA-система и ПЛК формируют гибкую схему управления. ПЛК автоматически регулируют важные параметры – температуру, давление и расход топлива – почти точно до долей процента. Эта интеграция даёт операторам возможность быстро менять режимы печи. Операторы могут смотреть старые данные, чтобы потом улучшать работу. Данное решение помогает им быстрее реагировать и делает печь более эффективной. Большой шаг в автоматизации – новые интеллектуальные датчики, такие как Rosemount 3051 и Метран-288. Хочется отметить, как интеллектуальные датчики работают в реальных условиях. Интеллектуальные датчики измеряют точно даже в тяжёлых условиях. Интеллектуальные датчики отправляют данные в облачные платформы. Облачные платформы собирают данные и складывают их в одну сеть. Сеть работает по принципу Интернета вещей (IoT). На удалённых нефтеперерабатывающих объектах IoT помогает централизованно контролировать сотни параметров. IoT помогает прогнозировать отклонения и управлять оборудованием через один интерфейс. Именно интеллектуальные датчики ускоряют время реакции на аварийные ситуации. На самом деле IoT упрощает масштабировать системы.Алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения революционизируют подход к управлению температурными режимами. Нейросети анализируют исторические данные, прогнозируя оптимальные условия нагрева для различных типов нефтяного сырья. Например, алгоритмы могут определить, что при повышенной вязкости сырья требуется ступенчатый нагрев с паузами, что снижает риск коксования труб. Машинное обучение также применяется для предиктивной аналитики: системы заранее выявляют износ оборудования или риски аварий, что сокращает простои и затраты на ремонт.

Современные системы ориентированы на снижение энергопотребления. Рекуперативные теплообменники утилизируют тепло отходящих газов, используя его для предварительного подогрева нефти, что экономит до 20% энергии [5]. Автоматизированные алгоритмы регулируют подачу топлива (газа или мазута) в зависимости от текущей нагрузки, исключая перерасход. Дополнительно внедряются системы динамического управления тепловыми потоками, которые адаптируются к изменению состава сырья, обеспечивая стабильность процесса при минимальных затратах.

Системы безопасности отключают печь, когда температура поднимается выше 400°C или давление скачет. Газоанализатор Siemens Ultramat 23 следит за выбросами и не даёт загрязнять воздух. При утечке или пожаре включаются локальные системы тушения, а данные сразу идут в экстренные службы. Системы защиты персонала и соблюдение экологических требований работают вместе. Акцент на таких системах действительно спасает людей и помогает природе. Системы управления температурой сейчас соединяют с ERP-платформами, например SAP и 1С. Такое соединение позволяет синхронизировать технологические процессы и бизнес-процессы. Данные о расходе топлива сразу попадают в модуль учёта ресурсов, а прогнозы нагрузки помогают планировать закупки [6]. Сокращаются административные издержки, повышается прозрачность управления предприятием. Именно акой подход реально упрощает работу. На таких предприятиях, как ООО «Александровский НПЗ» и АО «Энерготранс», автоматические системы снизили

расход энергии на 15-25 %. Автоматические системы сделали печи эффективнее на 10-18 % и сократили количество аварийных остановок на 30 % [7]. Вот такие цифры показывают, что технологии – не просто мода, а то, что действительно нужно, чтобы компании оставались способными конкурировать, когда требования к экологии растут и экономика шатается. Мне кажется, без технологий сегодня трудно держаться в игре.

Заключение. Провели анализ автоматизации нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи. Анализ показал, что перед современной нефтепереработкой стоит сразу несколько технических, технологических и организационных проблем. Технические проблемы, технологические проблемы, организационные проблемы - всё это мешает работе. Хотя уже достигли многого в внедрении умных систем управления, многие вопросы всё ещё без ответа. Требуются новые идеи, нужны решения, которые объединяют разные науки.

Традиционные способы контроля температуры и управления энергией уже почти не работают. Особенно на старом оборудовании и когда сырье меняется. Держать нужную температуру в диапазоне 350-450 °C реально трудно. Тяжёлая нефть склонна к коксообразованию, давление в системе часто скачет. Даже новые PID-регуляторы не справляются, им не хватает гибкости в таких условиях. Контроль температуры падает, контроль энергии тоже падает. Энергия просто утекает, нет точного контроля. Вот почему операторы часто вынуждены вмешиваться вручную, и в итоге падает общая производительность. Таким образом без изменения подходов всё будет только хуже.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 N 1523-р | Энергетическая стратегия России до 2035 года. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=8087 (дата обращения 15.04.2026).
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.04.2018 № 703-р | «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» на период до 2035 года. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201804240019 (дата обращения 15.04.2026).
3. Программа газификации регионов России 2021–2025. URL: https://asprogaz.ru/activity/projects/programma-gazifikatsii-regionov-rossii-2021-2025/ (дата обращения 15.04.2026).
4. Белоглазов И.И., Курбанов Б.Х. Автоматизация процессов нефтепереработки с использованием современных средств разработки / Деловой журнал Neftegaz.ru, № 2, 2016. С 34 – 37 EDN: VLFTJT.
5. Анализ эффективности охлаждения углеводородного топлива с использованием жидкого азота и комбинации рекуперативных теплообменников / А.А. Александров, И.В. Бармин, А.В. Золин, В.В. Чугунков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 3(99). – С. 4. – DOI 10.18698/2308-6033-2020-3-1965. – EDN ENMRXW.
6. Вячина, И.Н. Интеграция SCADA-систем и ERP-платформ: влияние на экономическую эффективность управления производственными процессами / И.Н. Вячина, Е.Ю. Самышева // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 8, № 5(158). – С. 54-64. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.05.08.006. – EDN OJMEZH.
7. Домников, А.Ю. Управление развитием региональных систем когенерации энергии / А.Ю. Домников, Л.В. Домникова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Российский фонд фундаментальных исследований. – Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2020. – 375 с. – ISBN 978-5-8295-0664-9. – EDN CZIEYZ.

УДК 004.825

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АДАПТАЦИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Стальнов А.Д.
аспирант каф. ПИ, ДонНТУ, Донецк, Россия, anton.stalnov2000@mail.ru

Научный руководитель: Григорьев А.В.
к.т.н., доцент каф. ПИ, ДонНТУ, Донецк, Россия

Аннотация. Обоснование предлагаемого онтологического подхода к адаптации искусственных нейросетевых моделей под пользовательские задачи. Определены основные классы, свойства, отношения и правила, которые представят знания в онтологии и спроектированы основные подсистемы, необходимые для реализации предлагаемого подхода к адаптации.

Ключевые слова: Онтология, нейросеть, адаптация, И-ИЛИ-дерево, метод логического вывода, архитектура, прототип.

Зачастую пользователь не разбирается в особенностях выбранного программного продукта и, опирается лишь на общие сведения (назначение сети), в то время как остальные характеристики остаются без внимания. Выбранное решение может оказаться неподходящим под поставленные задачи, а процесс поиска занять значительно больше времени. Возникает необходимость в разработке системы, позволяющей пользователю с меньшей трудоемкостью и пониженными требованиями к квалификации в области нейронных сетей (НС), определиться с выбором архитектуры нейронной сети под поставленную задачу.

Для достижения поставленной цели используются технологические мощности онтологий (в том числе продукции) – формальных модели знаний предметной области, т.е. общих понятий и отношений, позволяющих построить формализованное описание объектов или процессов. Продукционные базы знаний используют условно-действенные конструкции, которые позволяют описывать различные ситуации и реакции на них [1].

В ходе анализа предметной области [2-4] были рассмотрены разнообразные популярные архитектуры [5, 6] и сформирован ряд критериев, который позволит охарактеризовать архитектуру нейросетей: вид слоя, вид связи, вид функции активации, вид функции потерь, вид обучения, вид оптимизации, вид регуляризации. Перечисленные критерии оформляются экспертами, как модули знаний и составляются продукции. Модуль знаний фактически представляет собой полное И-ИЛИ-дерево всех возможных структур (архитектур) НС для заданной предметной области. Отдельный ИЛИ-узел характеризует некоторую структурную (функциональную) особенность целевой НС. Построить И-ИЛИ-дерево означает задание множества И-ИЛИ-узлов. В рамках модулей знаний прописаны отношения несовместимости между ИЛИ-узлами, которые представляют собой инструмент отсечения конфликтных, ошибочных, не адекватных решений. Также имеется ряд стандартных продукций, срабатываемых по итогам процесса ввода параметров (особенностей желаемой архитектуры НС), составляющих в совокупности техническое задание (ТЗ), функции которых состоят в отсечении некорректного решения среди множества (выборки) возможных вариантов, соответствующих ТЗ. Используется принцип «ПОС над ЦПС»; целевое пространство систем (ЦПС) – это множество имеющихся прототипов; пространство обликов систем (ПОС) – как набор параметров, используемых для поиска решений в ЦПС (ТЗ); «ПОС над ЦПС» означает, что признаками являются только структурные особенности прототипов, без возможности задать смысловые или функциональные особенности искомого решения в ЦПС.

Таким образом, за счёт накопленных знаний и логики вывода можно сформировать множество рекомендаций. Процесс взаимодействия пользователя с предлагаемой системой выглядит следующим образом: пользователь подаёт на вход набор данных, который в той или иной мере описывает целевое решение, после чего система, в соответствии с накопленными в онтологии понятиями, пропускает данные через наборы продукций с целью избавиться от неподходящих знаний и, на основе оставшихся знаний, формирует ряд оптимальных решений.

К примеру, пользователь желает создать сеть распознавания растений, но её нет в базе готовых решений. Однако в базе есть частичные решения: распознавание цветков, грибов, кустов и т.д. Пользователь подаёт на вход ТЗ текстовое описание классов растений, которые должны опознаваться и, опционально, желаемые характеристики архитектуры, после чего система отсекает решения, которые не удовлетворяют условиям пользователя (ТЗ) и склеивает оставшиеся решения, формируя ряд альтернатив. Данные альтернативы проходят приоритезацию, различные проверки на возможность существования и т.п. этапы подготовки оптимального решения. Таким образом, эффективность разрабатываемой системы будет зависеть напрямую от мощности и качества накопленных знаний.

В рамках предлагаемого подхода выделены 2 класса пользователей:

1. Инженер по знаниям, который может строить онтологию и сохранять ее в форме модуля знаний, ориентированного на ту или иную предметную область.

2. Конечный пользователь, способный применять тот или иной существующий модуль знаний для синтеза желаемой архитектуры НС некоторого назначения;

Предложенный программный комплекс способен обеспечить работу указанных классов пользователей. Для экспертов, которые будут формировать знания внутри системы подготовлен удобный интерфейс, через который в текущей реализации можно как расширить, так и создать новые модули знаний, а также задать зависимости между значениями в этих модулях. Для обработки модулей знаний написан синтаксический анализатор, позволяющий работать с XML-документами. Для конечных пользователей разработан интуитивно понятный интерфейс, в котором можно задать ТЗ – т.е. словесное описание задачи и её назначение, подобрать параметры, предоставляемые системой, установить определённые запреты критериев и т.п. возможности. Система адаптируется под действия пользователя (расширяется набор доступных форм в зависимости от выбранных параметров). Для фиксации изменений в файлах предусмотрен механизм расчёта MD5 хэш-сумм. Для обеспечения оптимальности синтезируемой выборки предусмотрен механизм проверки корректности синтезируемых значений (продукционные правила). Внутри онтологий помимо данных предметной области описаны зависимости, например введён параметр visualMod, который принимает значения radio (параметры несовместимы между собой) и checkbox (параметры совместимы между собой). Поиск по хранилищу готовых решений происходит не через сопоставления слов, а через сопоставление стемм слов (основы слова, т.е. той части, которая передаёт его лексическое значение: лесной – лес, походный – поход, и т.п.). При расширении списка запретов, выборка не синтезируется заново, а оптимизируется за счёт каскадного удаления отброшенных решений. Интерфейс рассчитан на дальнейшее расширение, для добавление новых форм достаточно создать корректный файл в соответствующем каталоге. Реализовано несколько методов логического вывода, что позволяет организовать:

1. Вывод с учётом фильтрации конфликтов.

2. Вывод с без фильтрации конфликтов.

3. Вывод решения из хранилища (все данные в режиме «Только чтение», а формы настроек и кнопки действий скрыты).

4. Вывод решения при синтезе (набор критериев в режиме «Только чтение», а формы настроек и кнопки действий доступны).

5. Вывод решения при обновлении баз (все данные можно корректировать, а формы настроек и кнопки действий доступны).

Большая часть необходимых данных предоставляется пользователю на основании заранее заготовленных внутри системы знаний. В конце синтеза происходит расчёт приоритета готовых решений в соответствии с ТЗ.

Дальнейшая поддержка будет направлена на реализацию подсистем экспорта в популярные фреймворки обучения, расширение библиотеки модулей знаний и интеграцию с внешними веб-сервисами для создания полноценной экосистемы проектирования нейросетевых архитектур.

Предложенный подход, основанный на применении онтологий и продукционных правил к задаче выбора структуры нейронных сетей, демонстрирует значительную универсальность. Выбор нейросетей в качестве объекта формализации обусловлен их сложной, но структурируемой архитектурой. В более широком контексте данная работа представляет собой важный шаг к интеграции методов систем автоматизированного проектирования (САПР) в область технологий искусственного интеллекта. Объединение строгости формальных моделей знаний с гибкостью нейросетевых структур откроет перспективы для решения фундаментальных проблем ИИ, в частности, проблемы «черного ящика», делая процесс принятия решений нейросетью более интерпретируемым за счет прослеживаемой связи с формализованными знаниями предметной области. Этого можно достичь, к примеру интегрировав онтологическую систему в процесс обучения нейросетей, что откроет спектр возможных применений от логирования и интерпретации результатов до точечной корректировки аномалий.

Список литературы

1. Академики Победы. – СПб.: Научное издательство международной биографической энциклопедии «Гуманистика», 2020. – С. 29-31.
2. https://wiki.spbu.ru/Алесковский_Валентин_Борисович – статья с сайта Вики Санкт-Петербургский государственный университет, 2017.
3. Шульгина Алина Онтология для управления контентом // ТРУДЫ СПБГИК. 2013. №. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ontologiya-dlya-upravleniya-kontentom (дата обращения: 17.03.2026).
4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика.– 2-е изд. стереотип. // М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.: ил. – URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/91344/modfolder/content/0/kruglovv_v_borisov_v_v_iskusstvennye_neyronnye_seti_teoriya .pdf.
5. Воронцов К.В. Искусственный интеллект: эволюция идей от Фрэнсиса Бэкона до фундаментальных моделей и ChatGPT, ФИЦ ИУ РАН, 26.04.2023 – URL: https://deep-econom.livejournal.com/1123755.html.
6. Воронцов К.В. Стандартизация разметки текста и оценивания предсказательных моделей в задачах понимания естественного языка. 12.10.2022 – URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/c3/Voron-2022-10-12.pdf.
7. А.Д. Стальнов, А.В. Григорьев. Проблематика адаптивности системы поддержки принятия решений в области нейросетевых технологий // ПИИВС-2022. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, г. Донецк, 29-30.11.2022, – С. 205-213 – URL: https://pi.conf.donntu.ru/collection/seics2022.pdf.
8. The neural network zoo by Fjodor Van Veen, september 14, 2016 – URL: https://www.asimov-institute.org/neural-network-zoo.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВТОРИЧНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ

Степанищев В.А.
студент группы АПН-23, 3 курс,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, v.stepanischev2006@yandex.ru

Научный руководитель Белоглазов И.И.
доц. каф. АТПП,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В представленной работе была разработана технологическая модель колонны вторичной ректификации бензиновых фракций. Для разработки использовался программный продукт Aspen HYSYS. Процесс был смоделирован согласно технологическому регламенту установки, произведена оценка адекватности полученной модели. Выполнен параметрический анализ чувствительности модели, учитывающий влияние расхода и температуры питающего потока на состав кубового остатка по н-гептану. Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной модели, а также возможность оптимизации технологических режимов на установке, с учетом минимизации энергопотребления и последующей интеграции в систему усовершенствованного управления.

Ключевые слова: вторичная ректификация, бензиновые фракции, технологическое моделирование, переработка нефти, система управления.

Введение. Автоматизация технологических процессов в нефтеперерабатывающем секторе является приоритетной задачей современной экономики в условиях энергетического кризиса, а также существующих ограничений вызванных санкциями недружественных стран. Рассмотренные в данной работе процессы вторичной ректификации бензиновых фракций играют ключевую роль в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, так как они используются для разделения многокомпонентных смесей на их составляющие. Режимы работы ректификационной колонны будут существенным образом влиять на качество продукции, и вносить существенный вклад в экономическую эффективность и безопасность всего производства. Процессы ректификации оказывают влияние на подготовку углеводородного сырья для установок каталитического риформинга и изомеризации, где минимальные отклонения в химическом составе кубовой фракции влекут за собой снижение выхода целевых продуктов производства и рост текущих расходов.

Оптимизация процессов ректификации обладает высоким потенциалом, что доказывает необходимость и важность внедрения в производство методов цифрового анализа, охватывающего комплекс экономических, технологических, экологических и управленческих факторов [1, 2].

Для решения задач усовершенствования и модернизации производства сейчас не обойтись без применения компьютерного моделирования [3]. Современные точные математические и цифровые модели возможно создавать при помощи различных программных комплексов, что доказывается в исследованиях Л.Г. Тугашевой и А.А. Гапонцева [4]. Вопросы автоматизации, а также задач построения математических моделей процессов нефтегазопереработки рассматриваются в статье Белоглазова И.И. [5].

Методы. Для моделирования процесса вторичной ректификации бензиновых фракций была выбрана программная среда Aspen HYSYS. В данном продукте есть возможность создания термодинамических моделей, которые основаны на фундаментальных законах физики и химии, что позволяет имитировать работу настоящих технологических объектов в режиме реального времени.

В рамках исследования на основе технологического регламента установки моторных топлив была создана модель ректификационной модели. В качестве термодинамической модели было выбрано уравнение состояния Пенга-Робинсона, которое наиболее адекватно и точно описывает поведение легких углеводородных систем при повышенном давлении. На этапе настройки были подобраны номинальные параметры для стабильной работы симуляции, что позволило провести оценку адекватности модели.

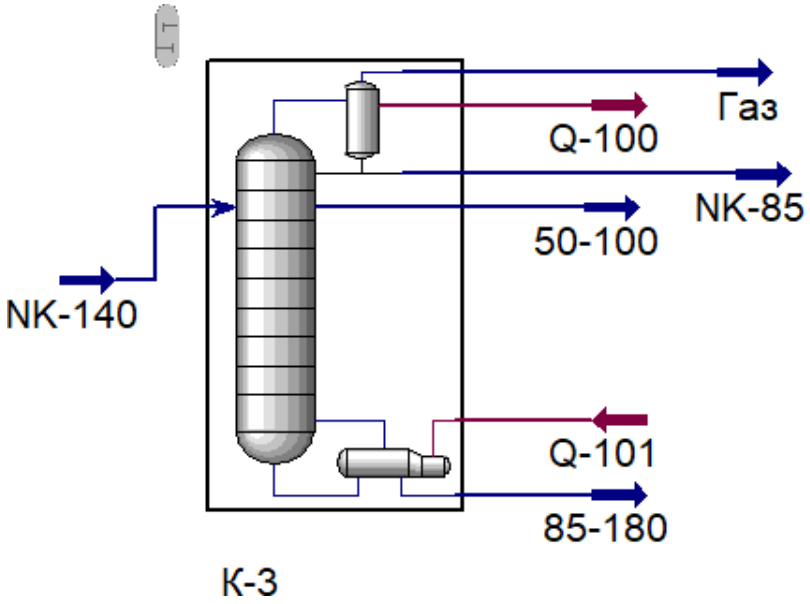


Рис. 1. Модель колонны вторичной ректификации [*составлено авторами*]

Результаты. В ходе проведения экспериментов разработанная модель колонны вторичной ректификации продемонстрировала высокую устойчивость и быструю сходимость итерационных расчетов. Это подтверждает надежность «цифрового двойника» и возможность его использования для поиска оптимальных режимов работы установки вторичной ректификации.

Первым опытом стало исследование анализа чувствительности модели к изменению количественных характеристик питания. Было выявлено, что массовое концентрация целевого компонента (н-гептана) в нижнем продукте возрастает при повышении расхода сырья (фракции НК-140) на 10% (с 52 410 до 57 651 кг/ч). Это произошло из-за изменения гидродинамических условий на тарелках и внутренним перераспределением тепловых потоков (табл. 1).

Таблица 1

Изменение параметров модели при увеличении расхода сырья [*составлено авторами*]

Параметры	Исходное состояние	Управляющее воздействие (+10%)	Изменение
Расход питания, кг/ч	52 410	57 651	+5 241
Массовая доля n-Heptane в кубе	0,0837	0,0841	+0,0004
Температура в кубе колонны, °C	185,2	185,3	+0,1

Второй опыт заключался в оценке влияния текущей температуры на качество разделения частиц на выходе. Когда температура на входе повысилась на 11°C (со 110,1°C до 121,1°C) произошёл рост испарения легких компонентов, что помогает стать нижнему продукту чище. Анализ полученных графиков позволяет определить рабочее состояние аппарата, а также предсказывать состояние системы в случае отклонения от регламента и номинальных значений.

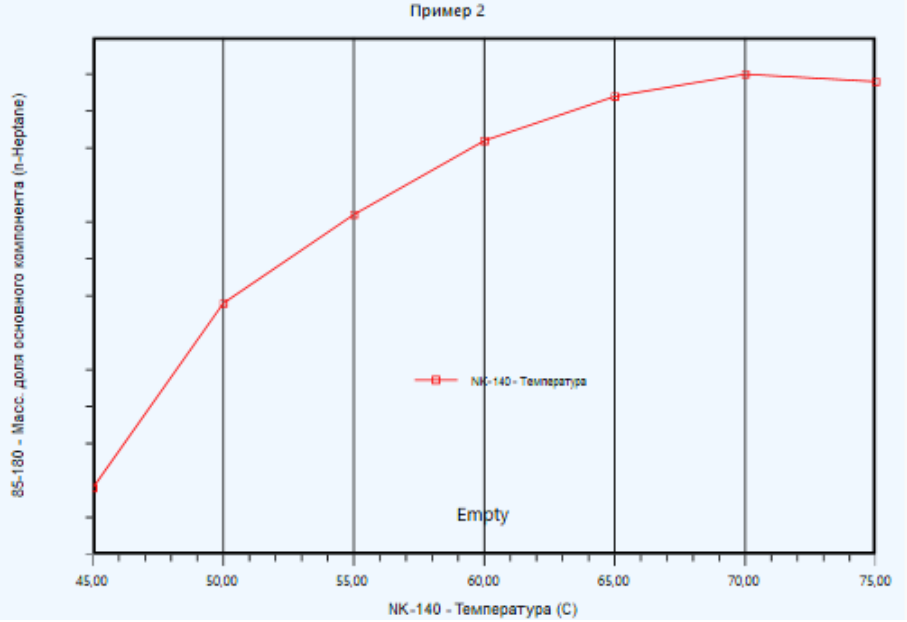


Рис. 2. График зависимости содержания гептана (С7) от изменения температурного режима [*составлено авторами*]

Третьим исследованием управляющих контуров заключалась в проверке работоспособности этой модели при изменении давления в системе. Полученные результаты наглядно демонстрируют, что давления входного потока, а именно в диапазоне 0,33–0,36 МПа, почти никак не влияет на изменение фракционного состава выходящих компонентов.

Обсуждение. Программный продукт Aspen HYSYS является высокоэффективным и достоверным инструментом для моделирования процессов вторичной переработки углеводородов, это доказывает результат работы и проведенные исследования. Наблюдаемые изменения в составе кубового остатка, вызванные изменением входного (управляющего) воздействия на построенную модель, согласуются с общепринятыми фундаментальными законами из физики и химии, которые описывают термодинамические процессы. Подтверждение адекватности, точности и возможности использования построенной модели – важный момент в ходе исследования. Полученные значения имеют незначительные различия с номинальными (регламентными) данными, что подтверждает основания для применения компьютерной модели для анализа режимов протекания технологических процессов в объекте, при этом, не используя настоящее оборудование и исключая аварии и остановки из-за неправильных данных опыта, а также говорит о том, что разработанная модель – адекватная.

Заключение. В работе выполнено настройка системы управления и разработана модель вторичной ректификации бензиновых фракций. Процесс смоделирован согласно технологическому регламенту установки и была выполнена оценка адекватности. Дальнейшее направление возможных исследований – разработка и интеграция с системой усовершенствованного управления.

Список литературы

1. Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Stolyarov V.E. Digital transformation of gas production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 700. Iss. 1. P. 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/700/1/012052.

2. Линник Ю.Н., Кирюхин М.А. Цифровые технологии в нефтегазовом комплексе // Вестник университета. 2019. Т. 1. № 7. С. 37-40. DOI: 10.26425/1816-4277-2019-7-37-40.

3. Minh V.T. Modeling and Control of Distillation Column in a Petroleum Process / V.T. Minh, A.M.A. Rani // Mathematical Problems in Engineering. – 2009. – 14 с. – DOI: 10.1155/2009/404702.

4. Тугашова Л.Г., Гапонцев А.Д. Применение программ технологического моделирования в задачах управления процессами подготовки нефти // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2023. № 2. – С. 36-44. EDN: FIGZKY.

5. Белоглазов И.И., Курбанов Б.Х. Автоматизация процессов нефтепереработки с использованием современных средств разработки / Деловой журнал Neftegaz.ru, № 2, 2016. С 34–37. EDN: VLFTJT.

МЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛЮДЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАЦИИ ВИДЕОПОТОКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ

Суханов А.А.
аспирант, Донецкий национальный технический университет, ДНР, Донецк, Россия, studysukhanov@mail.ru

Научный руководитель: Федяев О.И.
к.т.н., доцент, Донецкий национальный технический университет, ДНР, Донецк, Россия

Аннотация. В статье исследуется возможность применения сверточной нейронной сети VGGFace16 для задачи видеоидентификации студентов в учебной аудитории. Описана функциональная схема системы и условия проведения экспериментов. Для имитации реального процесса был создан стенд на базе двух компьютеров и датасета из 1680 цветных фотографий. Анализируется, как динамика поступления лиц в видеопотоке и объем базы данных лиц влияют на точность распознавания. Выводы об эффективности алгоритмов сделаны на основе сравнительного анализа при помощи метрик качества.

Ключевые слова: свёрточная нейронная сеть, идентификация лиц, компьютерное зрение, видеорегистрация студентов, видеопоток, VGGFace16.

Введение. Автоматизация контроля посещаемости студентов с помощью компьютерного зрения позволяет исключить временные затраты преподавателя на ручную регистрацию присутствия студентов в аудитории. Распознавание лиц в реальном времени осложняется высокой динамикой видеопотока, вариативностью положения, размера и ракурса лица, нестабильностью освещения, а также наличием помех [1].

Глубокие нейронные сети, в частности свёрточные архитектуры (СНС), развивающие идеи когнитрона и неокогнитрона, показывают наилучшие результаты по точности и скорости распознавания объектов. Свёрточные нейронные сети способны работать в реальном времени даже на ограниченном оборудовании [2].

Ключевым условием успешной идентификации личности является корректный выбор архитектуры СНС, обеспечивающей необходимое быстродействие при работе на типовом оборудовании. В работе [3] описана архитектура LeNet, но в ней отсутствуют данные о структуре датасетов и времени обучения в реальных условиях, а синтез сети носит эвристический характер. Исследование [4] использует черты лица для оценки вовлечённости студентов (Viola-Jones, Sobel Edge), но ориентировано только на онлайн-занятия. Метод Eigenface [5] прост в реализации, однако чувствителен к освещению и обладает слабой различительной способностью между классами.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка эффективности выбранной нейросетевой архитектуры во взаимодействии с другими компонентами системы в условиях, приближённых к реальной эксплуатации. В рамках работы изучается влияние на качество распознавания следующих факторов:

- скорость смены изображений лиц в видеопотоке (разная скорость движения человека перед камерой);
- объём базы данных (количество распознаваемых людей);
- количество эталонных фотографий на одного человека.

Функциональная схема системы распознавания. Разработанная система включает следующие этапы работы: захват видеопотока происходит с использованием библиотеки OpenCV [6]; детектирование лиц осуществляется методом Виолы-Джонса; извлечение признаков происходит при помощи свёрточной нейронной сети VGGFace16; сравнение с эталонами лиц из базы данных основывается на методе вычисления косинусного сходства вектора признаков распознаваемого лица, с каждым вектором-эталоном из базы данных; фиксация результата происходит в интерфейсе преподавателя с указанием времени прибытия и статуса студента.

База данных распознаваемых студентов формируется заранее: для каждого студента загружаются эталонные изображения и вычисляются их векторные представления. Интерфейс системы позволяет преподавателю визуально наблюдать за процессом видеорегистрации и управлять информацией о студентах.

Нейросетевая реализация. В качестве ядра распознавания используется сверточная нейронная сеть VGGFace16, разработанная учёными Оксфордского университета специально для распознавания лиц [7]. Архитектура состоит из чередующихся свёрточных и субдискретизирующих слоёв, что позволяет выделять иерархические признаки лица. Сеть применяется в режиме извлечения признаков без дообучения, что обеспечивает быструю перенастройку системы на новый список распознаваемых лиц.

Моделирования видеопотока изображений лиц из базы данных и оценка качества распознавания на основе метрик. Для проведения экспериментов, приближённых к реальным условиям, создан стенд на базе двух компьютеров:

- ПК с системой распознавания – подключённая веб-камера (1280×720, 30 кадров/с), процессор Intel Core i5-9400F, ОЗУ 16 ГБ, видеокарта NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti.
- ПК-генератор видеопотока – воспроизводит презентацию с изображениями лиц, сменяемость которых задаётся в диапазоне от 0,1 до 3 секунд.

Использован датасет лаборатории компьютерного зрения Массачусетского университета, содержащий цветные фотографии 1680 человек (от 2 до 50 изображений на человека) [8]. Это позволило получить статистически обоснованные оценки.

Оценка эффективности проводилась по стандартным метрикам классификации [9]:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \ (1), Precision = \frac{TP}{TP + FP} \ (2),$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \ (3), F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \ (4)$$

где: TP (True Positive) – верно распознанные «свои»; TN (True Negative) – верно отвергнутые «чужие»; FP (False Positive) – «чужие», ошибочно принятые за «своих»; FN (False Negative) – «свои», ошибочно отвергнутые.

Исследование влияния размера базы данных и количества эталонов. В первом эксперименте оценивалось влияние объёма базы и числа эталонов фотографий на человека. Использовались «однозначные» датасеты (1 фото на человека) размером от 25 до 100 человек, а также «двузначные» датасеты (2 фото на человека) Результаты для «однозначной» базы данных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения метрик качества распознавания при использовании «однозначных» баз данных

Количество людей: есть в БД / нет в БД	Исходы распознавания				Значения метрик			
	TP	TN	FP	FN	Acc	Prec	Rec	F1
25/5	21	4	1	4	0,833	0,955	0,840	0,894
50/10	41	7	3	9	0,800	0,932	0,820	0,872
75/15	64	10	5	11	0,822	0,928	0,853	0,889
100/20	87	11	9	13	0,817	0,906	0,870	0,887

При переходе на двузначные базы F1-мера достигла 98 %, что свидетельствует о значительном повышении надёжности идентификации. Увеличение числа людей в базе от 25 до 100 не приводило к заметному ухудшению качества, что подтверждает устойчивость выбранной архитектуры к росту объёма эталонов.

Исследование влияния динамики видеопотока на качество распознавания. Во втором эксперименте изучалась зависимость полноты (Recall) от интервала смены изображений на генераторе (от 0,1 до 3 секунд). Использовались двузначные базы данных.

Установлено, что при интервалах менее 1 секунды система не успевает завершить полный цикл обработки кадра, что приводит к пропуску лиц. При интервале 1 секунда и более распознавание выполняется стабильно, без потери кадров.

Полученная зависимость позволяет сформулировать требование к организации реального видеоконтроля: каждый человек должен находиться в зоне видимости камеры не менее 1 секунды. Это достижимо при соответствующем размещении камеры и организации входа.

Заключение. Выполнена формальная постановка задачи распознавания лиц на основе предобученной нейронной сети, что упрощает перенастройку системы под новый список студентов.

Предложена функциональная схема видеорегистрации, реализованная на базе Python, OpenCV, Keras и SQLite, позволяющая фиксировать время прихода и статус студента в реальном времени.

Экспериментально подтверждено, что увеличение объёма базы (до 100 человек) не оказывает существенного влияния на точность распознавания. Использование минимум двух эталонных изображений на человека повышает сбалансированную метрику F1 до 98 %.

Минимальное время нахождения лица в кадре для корректной работы системы составляет 1 секунду, что необходимо учитывать при использовании данной системы в реальных условиях проведения видеоконтроля.

Список литературы

1. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville: Deep learning. – MIT Press, 2016. – C. 802.
2. Gulli, S. Pal.: Deep Learning with Keras: Implement neural networks with Keras on Theano and TensorFlow. – Packt Publishing, 2017. – C. 318.
3. Golikov, O.Y. Methods of the development of the architecture of the neural networks for identification and authentication of individuals / O.Y. Golikov, M.A. Ramos // Physical Sciences and Technology. – 2020. – Vol. 7, No. 3-4.
4. Ong, J.W. The application of image processing for monitoring student's attention level during online class / J.W. Ong, W.J. Chew, S.K. Phang // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2120, No. 1.
5. Puthea, Kh. The Attendance Marking System based on Eigenface Recognition using OpenCV and Python / Kh. Puthea, R. Hartanto, R. Hidayat // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1551, No.
6. https://docs.opencv.org/2.4/modules/highgui/doc/reading_and_writing_images_and_video.html Reading and Writing Images and Video – OpenCV 2.4.13.7 documentation (дата обращения 14.03.2026).
7. https://arxiv.org/abs/1409.1556 Cornell University. Computer vision and Pattern Recognition. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. Karen Simonyan, Andrew Zisserman (дата обращения 14.03.2026).
8. https://www.kaggle.com/datasets/stoicstatic/face-recognition-dataset/data Face Recognition Dataset – Oneshot Learning // Kaggle (дата обращения 14.03.2026).
9. https://www.educative.io/blog/evaluation-metrics-ml-models Khawaja Muhammad Fahd. Comparison of Evaluation Metrics used in Machine Learning Models (дата обращения 14.03.2026).

УДК 004.94

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОТОЧНЫХ ХРОМАТОГРАФОВ И ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ ДАТЧИКОВ НА УСТАНОВКЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОПАН-ПРОПИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ

Таах М.Д.
студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, moya28102004@mail.ru

Научный руководитель: Федорова Э.Р.
кандидат технических наук, доцент каф. АТПП,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа направлена анализу применимости поточных хроматографов и программно-управляемых датчиков для контроля концентраций компонентов на стадиях разделения пропан-пропиленовой фракции в ректификационной колонне. Моделирование колонны производилась в среде Aspen HYSYS. Проведено сравнение по критериям точности, оперативности, стоимости и интеграции в АСУ ТП. Обосновано оптимальное решение для обеспечения качества сырья.

Ключевые слова: программно-управляемый датчик, ректификация, Aspen HYSYS, поточный хроматограф, пропилен.

Введение. Для технологии полимеризации пропилена «Spheripol» (LyondellBasell Industries [1]) требуется сырьё с объёмным содержанием пропилена не менее 99,3%. Обеспечение такой чистоты достигается в ректификационной колонне с 228 тарелками. Эффективность процесса напрямую зависит от точности и скорости контроля состава потоков на выходе. В настоящее время для этих целей применяются два основных подхода: использование поточных хроматографов, обеспечивающих высокую точность анализа, и программно-управляемых датчиков, интегрированных в АСУ ТП для оперативного управления [2].

Методы. Исследование базируется на сравнительном анализе двух типов контрольно-измерительных приборов:

1) Поточный хроматограф: метод основан на периодическом или непрерывном отборе пробы из технологического потока с последующим анализом ее компонентного состава методом газовой хроматографии.

2) Программно-управляемый датчик: метод основан на измерении физических параметров процесса (температура, давление, расход) в пределах технологического узла. Значения этих параметров используются для расчета концентрации компонентов с использованием математической модели, реализованной в среде Aspen HYSYS.

Сравнение проводилось по следующим параметрам: точность измерения состава, оперативность получения данных (инерционность), стоимость внедрения и обслуживания, а также возможность интеграции в контур автоматического регулирования.

Результаты. В ходе анализа были получены следующие сравнительные характеристики:

Точность: Поточный хроматограф обеспечивает высокую точность определения концентрации компонентов в смеси, сопоставимую с лабораторными методами. Программно-управляемые датчики используют косвенные данные, точность которых критически зависит от адекватности математической модели. Дополнительно, модель может не учитывать внешние возмущения, например, изменения состава сырья.

Оперативность: Хроматографы обладают значительной инерционностью из-за времени транспортировки и анализа пробы (задержка сигнала от нескольких минут). Датчики обеспечивают измерение в режиме реального времени с минимальной задержкой.

Стоимость и обслуживание: Стоимость приобретения и эксплуатации хроматографов значительно выше, они требуют регулярного сложного обслуживания (калибровка, замена расходных материалов). Программно-управляемые датчики являются более дешевым решением с минимальными требованиями к обслуживанию.

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют основные достоинства и недостатки двух методов контроля. Поточный хроматограф является инструментом, применяемым для точного определения состава, но непригодным для управления из-за высокой инерционности. Однако, его можно использовать для корректировки значений в программном анализаторе. Программно-управляемые датчики подходят для регулирования в установившемся режиме для создания оптимальных условий процесса.

Заключение. На основании проведенного исследования можно заключить, что наиболее рациональным решением является комбинированное использование обоих методов контроля. Поточные хроматографы необходимо применять для контроля и проверки адекватности модели, а также дополнительной настройке программно-управляемого датчика в момент его работы. Использования программно-управляемого датчика является приоритетным для регуляторов-оптимизаторов, управляющих процессом после наступления устойчивого режима. А при использовании поточного хроматографа для корректировки расчетов, его можно использовать в контурах управления.

Список литературы

1. Эффективная практика глубокой переработки газового сырья в химическую продукцию на предприятиях ОАО «СИБУР Холдинг» и используемые технологические процессы / Под ред. Э.А. Майера. Томск: ИД ТГУ, 2014. 476 с.

2. Автоматизация ректификационной колонны [Электронный ресурс], – Режим доступа: https://studentu24.ru/list/handbooks/avtomatizaciya-rektifikacionnoy-kolonny---1860 (дата обращения: 20.03.2026).

МНОГОМОДЕЛЬНАЯ СХЕМА ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПО ОДНОМУ ПОТОКУ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Тарасенко А.А.
обучающийся, студент, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Новокузнецк, Россия, gamenk987@gmail.com

Научный руководитель: Прокопенко Е.В.
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Россия.

Аннотация. В работе предложена многомодельная схема вибродиагностики роторного оборудования. В её основе лежит один акселерометрический сигнал. Из него выделяются временные, спектральные и огибающие признаки. Такой разбор позволяет выявлять локальный дефект раньше, чем это делает один интегральный показатель. Это особенно важно для подшипникового узла. На ранней стадии общий уровень вибрации ещё растёт слабо. Но в огибающей уже появляются ударные серии на кинематических частотах дефекта [3, 8]. Открытые стендовые данные подтверждают такую постановку. В наборе XJTU-SY один съём содержит 32768 отсчётов при частоте 25,6 кГц, то есть 1,28 с сигнала; при 2100, 2250 и 2400 об/мин это соответствует 44,8; 48,0 и 51,2 оборота в одном окне, а шаг по частоте составляет 0,78125 Гц [11]. В CWRU доступны записи 12 и 48 кГц с точек DE и FE [12]. В Paderborn на каждый режим записывают 20 реализаций по 4 с и синхронно измеряют вибрацию и ток двигателя [13]. Поэтому предложенная схема пригодна для подшипниковых узлов, насосов, вентиляторов и редукторов. При необходимости её расширяют до многоканального мониторинга.

Ключевые слова: вибродиагностика, акселерометрический сигнал, диагностические признаки, спектральный анализ, огибающая, скрытые состояния, показатель износа, кинематические частоты, виброакустический мониторинг.

Введение. Вибрационный контроль остаётся одним из основных средств оценки состояния роторного оборудования. Его применяют к подшипниковым узлам, насосным агрегатам, редукторам и вентиляторам. Подшипниковые дефекты, разбалансировка, несоосность и износ меняют колебательный процесс [1, 2]. Эти изменения входят в акселерометрический сигнал. Одного показателя обычно недостаточно. Среднеквадратическое значение показывает общий уровень вибрации, но ранний дефект часто пропускает. Причина ясна. На ранней стадии энергия сигнала перераспределяется по полосам частот. При этом в огибающей и на кинематических частотах уже возникают повторяющиеся ударные серии [3, 5, 8]. Это подтверждают и открытые стендовые данные. В XJTU-SY вибрацию снимают двумя акселерометрами, установленными под углом 90° к корпусу подшипника; частота дискретизации равна 25,6 кГц, запись ведут раз в минуту, а один файл содержит 32768 отсчётов, то есть 1,28 с сигнала [11]. Для режима 2100 об/мин такое окно охватывает около 44,8 оборота и даёт примерно 731 отсчёт на оборот; для 2400 об/мин окно охватывает 51,2 оборота и даёт 640 отсчётов на оборот [11]. Этого достаточно, чтобы оценить гармоники 1X и 2X, а затем построить огибающую. В CWRU доступны записи на 12 и 48 кГц со стороны привода и на 12 кГц со стороны вентилятора; вместе с временным рядом указывается частота вращения [12]. В Paderborn вибрацию измеряют синхронно с током двигателя и дополняют измерениями скорости, момента, радиальной нагрузки и температуры; на каждое состояние приходятся 20 реализаций по 4 с [13]. Недавние испытания гибридного подхода «огибающая + спектральный эксцесс» показали точность свыше

95 % даже при шуме и переменной скорости [8]. Поэтому в работе используется не один показатель, а несколько согласованных моделей. Каждая выделяет свою сторону процесса. Цель работы – построить компактную схему распознавания дефектов по одному акселерометрическому сигналу и объединить частные решения [4–7].

Методы. Датчик измеряет ускорение колебаний. После оцифровки формируется последовательность x_n, n = 0, 1, …, N − 1, где $t_n = n\Delta t$, $\Delta t = 1/f_s$. При двухканальной регистрации используются две последовательности: $x_n^{(1)}$ и $x_n^{(2)}$. Они задают, например, горизонтальную и вертикальную составляющие сигнала. Анализ ведут по окнам длительности T. Каждое окно содержит $N = T f_s$ отсчётов. Такой шаг переводит непрерывный поток в локальный фрагмент нестационарного процесса. Пример прост. При $f_s = 25{,}6$ кГц и T = 1 с окно содержит 25 600 отсчётов. Если вал вращается со скоростью 1800 об/мин, на один оборот приходится примерно 853 отсчёта. Этого достаточно, чтобы оценить гармоники 1X и 2X, а затем построить огибающую. Ниже приведены основные соотношения в более строгой и наглядной записи.

$$Xс.к.з. = [(1/N)\,\Sigma_{n=0}^{N-1} x_n^2]^{1/2},\quad Xmax = \max_{0\le n\le N-1} |x_n|. \tag{1}$$

$$Kпик = Xmax / Xс.к.з.,\quad \gamma_4 = [(1/N)\,\Sigma_{n=0}^{N-1} (x_n - \bar{x})^4] \,/\, \{[(1/N)\,\Sigma_{n=0}^{N-1} (x_n - \bar{x})^2]^2\}. \tag{2}$$

$$X_k = \Sigma_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-2\pi i k n/N),\ k = 0, 1, \ldots, N-1. \tag{3}$$

$$S_k = |X_k|^2,\ f_k = (k/N)\cdot f_s. \tag{4}$$

$$E[f_a, f_\beta] = \Sigma\, |X_k|^2, \text{ если } f_a \le f_k \le f_\beta. \tag{5}$$

$$F_1 = \alpha_1 Xс.к.з. + \alpha_2 Kпик + \alpha_3 \gamma_4. \tag{6}$$

$$F_2 = \max\{АНК, АВК, АТК, АСеп\},\ F_3 = \beta_1 Eогиб,НК + \beta_2 Eогиб,ВК + \beta_3 Eогиб,ТК. \tag{7}$$

$$S_k \in \{S_1, S_2, S_3, S_4\},\ p_{ij} = P(S_{k+1} = S_j \mid S_k = S_i). \tag{8}$$

$$H = \Sigma_{m=1}^{M} c_m z_m,\quad Q = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \lambda_3 F_3 + \lambda_4 H. \tag{9}$$

Здесь $\bar{x} = (1/N)\,\Sigma_{n=0}^{N-1} x_n$ – среднее значение сигнала.

Формулы (1)–(2) задают временные признаки. Они описывают общий уровень вибрации, пиковость и ударный характер сигнала. Формулы (3)–(5) переводят сигнал в частотную область и позволяют вычислить энергию в заданной полосе частот. Формулы (6)–(9) вводят диагностические функционалы, модель стадий состояния и интегральные показатели распознавания.

Результаты. Одна и та же запись сигнала рассматривается в нескольких представлениях: временном, спектральном, огибающем и стадийном. На каждом окне вычисляется вектор признаков $z = (z_1, z_2, \ldots, z_m)$. Затем показатели F_1, F_2, F_3, состояние S_k и величина H формируют частные заключения. В этом состоит основной эффект схемы. Она выявляет ситуацию, когда общий уровень вибрации ещё не достиг порога, но в спектре уже выделились характерные частоты дефекта, а в сигнале усилились ударные составляющие. Для подшипникового узла такая картина обычно соответствует раннему повреждению дорожки качения. Для редуктора – росту импульсности зацепления [1–5, 8].

Результаты. Итоговое решение принимают по совокупности частных показателей. Развивающийся дефект считают достоверным, если выполняются условия $F_1 > C_1$ и $F_3 > C_3$. При этом показатель H должен монотонно расти. Тип дефекта определяют по максимуму спектрального показателя F_2. При необходимости решающее правило уточняют выбором коэффициентов λ_i и порогов C_i [6–10]. Такая оговорка важна при переменной нагрузке и на переходных режимах, когда пороговые признаки ведут себя менее устойчиво [5, 6].

Обсуждение. Схема не требует обязательного увеличения числа датчиков. Уже один акселерометрический канал несёт сведения о среднем уровне вибрации, частотной структуре сигнала и ударных процессах [1–5]. Для первичной диагностики этого, как правило, достаточно. Однако резерв для расширения сохраняется. В систему можно включить тахометрический канал, температуру, ток двигателя или второй вибродатчик. Тогда итоговое заключение строят по совокупности частных свидетельств [1, 7].

Заключение. В работе предложена компактная математическая схема многомодельной вибродиагностики по одному потоку акселерометрических данных. Она объединяет временные, спектральные, огибающие и стадийные признаки. Дополнительно вводится интегральный показатель износа. Такая схема повышает надёжность раннего обнаружения дефектов и не требует обязательного усложнения измерительной системы.

Список литературы

1. Kannan V., Zhang T., Li H. A Review of the Intelligent Condition Monitoring of Rolling Element Bearings // Machines. 2024. Vol. 12. No. 7. Art. 484. DOI: 10.3390/machines12070484.
2. Daga A.P., Garibaldi L. Diagnostics of Rotating Machinery through Vibration Monitoring: Signal Processing and Pattern Analysis // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. No. 20. Art. 9276. DOI: 10.3390/app14209276.
3. Kim S., An D., Choi J.-H. Diagnostics 101: A Tutorial for Fault Diagnostics of Rolling Element Bearing Using Envelope Analysis in MATLAB // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 20. Art. 7302. DOI: 10.3390/app10207302.
4. Yang X., Yang J., Jin Y., Liu Z. A New Method for Bearing Fault Diagnosis across Machines Based on Envelope Spectrum and Conditional Metric Learning // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 9. Art. 2674. DOI: 10.3390/s24092674.
5. Ruiz-Sarrio J.E., Antonino-Daviu J.A., Martis C. Comprehensive Diagnosis of Localized Rolling Bearing Faults during Rotating Machine Start-Up via Vibration Envelope Analysis // Electronics. 2024. Vol. 13. No. 2. Art. 375. DOI: 10.3390/electronics13020375.
6. Yao Q., Cheng L., Naeem M.T. Hidden Markov Models based intelligent health assessment and fault diagnosis of rolling element bearings // PLoS ONE. 2024. Vol. 19. No. 2. e0297513. DOI: 10.1371/journal.pone.0297513.
7. Lin T., Ren Z., Zhu L., Zhu Y., Feng K., Ding W., Yan K., Beer M. A Systematic Review of Multi-Sensor Information Fusion for Equipment Fault Diagnosis // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2025. Vol. 74. Art. 3507848. DOI: 10.1109/TIM.2025.3529577.
8. Rohan A.I., Ridita T.A., Anonto H.Z., Hossain M.I., Shufian A., Mahin M.S.R., Islam M.A. Intelligent Fault Diagnosis in Rolling Element Bearings: Combining Envelope Spectrum and Spectral Kurtosis for Enhanced Detection // Results in Engineering. 2025. Vol. 27. Art. 106899. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106899.
9. Jin X., Ji Y., Li S., Lv K., Xu J., Jiang H., Fu S. Remaining Useful Life Prediction for Rolling Bearings Based on TCN–Transformer Networks Using Vibration Signals // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 11. Art. 3571. DOI: 10.3390/s25113571.
10. Lei W., Dong X., Cui F., Huang G. A Remaining Useful Life Prediction Method for Rolling Bearings Based on Hierarchical Clustering and Transformer–GRU // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 10. Art. 5369. DOI: 10.3390/app15105369.
11. Wang B., Lei Y., Li N., Li N. XJTU-SY Rolling Element Bearing Accelerated Life Test Datasets: A Tutorial // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 55. No. 16. P. 1–6. DOI: 10.3901/JME.2019.16.001.
12. Case Western Reserve University Bearing Data Center. Download a Data File. URL: https://engineering.case.edu/bearingdatacenter/download-data-file (accessed: 16.03.2026).
13. Universität Paderborn. Data Sets and Download – Konstruktions- und Antriebstechnik (KAt). URL: https://mb.uni-paderborn.de/kat/forschung/bearing-datacenter/data-sets-and-download (accessed: 16.03.2026).

УДК 621.879.4:006.9

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLOV8 ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ИЗНОСА ЗУБЬЕВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Туляков И.А.
бакалавр, студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, tulil1802@gmail.com

Научный руководитель: Кульчицкий А.А.
доцент, заведующий кафедрой Автоматизации технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность контроля износа зубьев экскаваторов обусловлена высокими затратами на простои и ремонт горной техники. Цель – исследование возможности применения архитектуры YOLOv8 для оценки степени повреждения и износа зубьев карьерного экскаватора. Модель обучена на датасете изображений ковшей экскаваторов в течение 76 эпох, достигнута mAP50 0.875 (точность 0.829, полнота 0.848). Алгоритм сравнивает соотношение высоты/ширины зубьев с эталонным значением новых зубьев ЭКГ-8. Модель автоматизирует контроль износа, потенциально снижая затраты на обслуживание экскаваторов и исключая субъективный визуальный контроль.

Ключевые слова: техническое зрение, YOLOv8, износ зубьев, экскаваторный ковш, детекция объектов, нейронные сети, геометрическая модель, горная техника.

Введение. Внедрение технологий технического зрения представляет собой перспективное направление развития всей горной промышленности, где успешно применяется для автоматизации контроля гранулометрического состава руды, мониторинга оборудования и повышения безопасности на карьерах и обогатительных фабриках. Преимущества таких систем, заключаются в высокой точности анализа изображений и возможности интеграции в промышленные процессы [1]. В условиях развития технического зрения и нейронных сетей – их применение для совершенствования контроля технологических процессов открывает перспективы автоматизированного контроля износа зубьев ковша карьерных экскаваторов [2]. Такой подход обеспечивает своевременное выявление дефектов, и обеспечит переход от планово-предупредительного обслуживания к контролю по фактическому состоянию, что особенно актуально для экскаваторов, работающих в сложных карьерных условиях [3] [4].

YOLOv8 выбрана за высокую точность и скорость обнаружения объектов в реальном времени. По сравнению с YOLOv5/v7 использует безякорный механизм детекции (автоматически определяет размер объектов) и улучшенные функции потерь, обеспечивая mAP на 3–5% выше при той же скорости.

Обеспечивает до 60 кадров/с и лучше работает с мелкими зубьями благодаря слиянию признаков. YOLOv8 оптимальна для промышленных вычислительных устройств: 1,47 мс, 3,2 млн параметров против 25,3 млн у YOLOv9c[1] [2].

[1] Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. Ultralytics YOLOv8 [Электронный ресурс] // GitHub. – URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (дата обращения: 13.03.2026).

[2] Ultralytics. YOLOv8 Performance Metrics [Электронный ресурс] // Документация Ultralytics YOLO. – URL: https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/#performance-metrics (дата обращения: 13.03.2026).

Хотя новые модели чуть точнее на 1–2% по средней точности обнаружения объектов (например, YOLOv11n – 39,5% против 37,3% у YOLOv8n), YOLOv8 выигрывает в скорости – до 61 кадра в секунду даже на слабом оборудовании. Это важно для мониторинга экскаваторов в пыли и движении, где нельзя тратить лишнюю память или ждать ответа.

YOLOv8 обеспечивает обнаружение ковша экскаватора и локализацию зубьев ограничивающими рамками для расчета процента износа по геометрии (высота/ширина). Система устойчива к пыли, переменному освещению и разным ракурсам карьеров [5].

Функционал: автоматическое обнаружение зубьев в реальном времени, передача координат рамок в алгоритм геометрической оценки износа, расчет точного процента износа и отображение результатов с рекомендациями по замене в интерфейсе оператора.

Методы. Система на базе YOLOv8 обучалась на изображениях ковша экскаватора ЭКГ-8, где зубья были заранее размечены ограничивающими рамками. Таким образом, удалось обучить модель обнаруживать зубья на новых изображениях, с целью дальнейшей оценки их износа. В качестве основных показателей качества системы контролировались: box_loss – ошибка локализации рамок вокруг зубьев, precision – доля правильно распознанных зубьев среди всех найденных моделью объектов, recall – доля обнаруженных зубьев среди всех реально присутствующих на изображении, и mAP50 – Средняя точность распознавания, когда рамка модели перекрывает правильную хотя бы наполовину. Параметр скорости обучения постепенно снижался с 0,002 до 0,001, что позволило уменьшить риск переобучения модели и повысить её устойчивость к условиям реальной съёмки на карьере, когда присутствует влияние пыли, и переменно освещения. После обнаружения зубьев алгоритм сравнивает их текущие размеры с эталонными параметрами нового зуба и рассчитывает процент износа.

Результаты. Обученная модель YOLOv8 достигла максимальной точности обнаружения зубьев на 72-й эпохе. Точность составила 0,829, а полнота 0,848, что свидетельствует о высоком качестве обнаружения объектов. Потери локализации на обучении снизились с 1,409 до 0,600, а на проверке стабилизировались около 1,400, что подтверждает достаточно точное выделение зубьев ограничивающими рамками. После детекции координаты рамок передаются алгоритму геометрической оценки износа [6], [7]. В его основе лежит эталонное соотношение высоты к ширине нового зуба ЭКГ-8, равное 2,25. Для каждого найденного зуба вычисляется текущее соотношение высоты и ширины, после чего определяется степень износа в процентах.

Обсуждение. Использование разработанного алгоритма на базе YOLOv8 позволяет автоматизировать контроль состояния зубьев ковша. Обученная нейронная сеть выполняет обнаружение зубьев ковша на изображениях, полученных в условиях реальной карьерной эксплуатации, после чего алгоритм производит оценку степени износа. По своим возможностям такой подход близок к существующим промышленным решениям[3] [4]. Интеграция разработанного алгоритма осуществит переход к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования, что потенциально снижает непредвиденные простои и затраты за счёт снижения доли внеплановых ремонтных работ по замене

[3] «Всевидящее око» Motion Metrics: ShovelMetrics, LoaderMetrics [Электронный ресурс] // Zolteh.ru. – URL: https://zolteh.ru/technology_equipment/vsevidyashchee_oko_motion_metrics_shovelmetrics_loadermetrics/ (дата обращения: 13.03.2026).

[4] Автоматизация производства с применением компьютерного зрения на ГОК «Карельский окатыш» [Электронный ресурс] // Secuteck.ru. – URL: https://www.secuteck.ru/articles/avtomatizaciya-proizvodstva-s-primeneniem-kompyuternogo-zreniya-na-gok-karelskij-okatysh (дата обращения: 13.03.2026).

зубьев [7] [8]. Подобные решения помогают сделать техническое обслуживание более эффективным и снизить эксплуатационные затраты и простои [9] [10].

Заключение. Разработанный алгоритм на базе нейросетевой архитектуры YOLOv8 позволяет автоматически определять зубья ковшей и оценивать их износ по геометрическим параметрам. Достигнута точность mAP50 более 85%, что подтверждает работоспособность алгоритма в промышленных условиях.

Список литературы

1 Ромашев А.О., Николаева Н.В., Гатиатуллин Б.Л. Формирование адаптивного подхода с применением технологии машинного зрения для определения параметров осаждения продуктов обогащения // Записки Горного института. 2022. Том 256. С. 677-685. DOI: 10.31897/PMI.2022.77.

2. Великанов В.С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 194–202. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.

3. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228–233. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.228.

4. Жабин Д.В., Макеев М.А., Клебанов Д.А. Разработка систем контроля целостности зубьев ковша экскаватора с применением методов компьютерного зрения //Горная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 48-49. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-48-49.

5. Sapkota R., Karkee M. Ultralytics YOLO evolution: An overview of YOLO26, YOLO11, YOLOv8 and YOLOv5 object detectors for computer vision and pattern recognition // DOI: 10.48550/arXiv.2510.09653.

6. Великанов В. и др. О влиянии гранулометрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2024. – Т. 22. – №. 4. – С. 30-43. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43.

7. Йулдашев Ш.Х.У. Теоретические основы восстановления зубьев ковшей экскаваторов // Universum: технические науки. – 2023. – № 11-3 (116). – С. 37-40. DOI: 10.32743/UniTech.2023.116.11.16230.

8. Lu J., Liu Y. A real-time and accurate detection approach for bucket teeth falling off based on improved YOLOX //Mechanical Sciences. – 2022. – Т. 13. – №. 2. – С. 979-990. DOI: 10.5194/ms-13-979-2022.

9. Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Фокин А.С., Звонарев И.Е. Совершенствование стратегии технического сервиса карьерных экскаваторов введением в систему Total Productivity Maintenance // Записки Горного института. – 2014. – Т. 209. – С. 109–115. EDN: SOALCJ.

10. Wang C.Y., Yeh I.H., Mark Liao H.Y. Yolov9: Learning what you want to learn using programmable gradient information // European conference on computer vision. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 1-21. DOI:10.48550/arXiv.2402.13616.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ВАКАНСИЙ СИСТЕМНЫХ АНАЛИТИКОВ ДЛЯ ЗАДАЧ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Хатрусов А.С.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, me@hatrusov.ru

Научный руководитель: Ильюшин Ю.В.
доктор технических наук, декан экономического факультета, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе предложен прототип системы автоматизированного мониторинга вакансий системных аналитиков, ориентированной на задачи кадрового обеспечения цифровой трансформации минерально-сырьевого комплекса. Предложенное решение включает сбор и структурирование вакансий, выделение и нормализацию навыков, сопоставление требований с опытом работы, отраслевую фильтрацию и интерактивную визуализацию результатов. На текущем этапе система апробирована на тестовом наборе данных, что позволило проверить работоспособность архитектуры и аналитических сценариев. Практическая значимость работы состоит в создании инструмента для последующего анализа реального спроса на компетенции в цифровом недропользовании.

Ключевые слова: системный аналитик, минерально-сырьевой комплекс, цифровая трансформация, рынок труда, онлайн-вакансии, навыки, кадровая аналитика, дашборд.

Введение. В последние годы онлайн-вакансии стали важным источником информации о спросе на профессии, компетенции и требования работодателей [1, 2]. Однако такие данные нельзя использовать без предварительной обработки: тексты вакансий содержат дубли, вариативные формулировки навыков и различаются по полноте описания, поэтому требуют очистки и нормализации [3–5]. Для системных аналитиков эта проблема особенно заметна, поскольку состав требований зависит от отрасли, используемых информационных систем и уровня цифровой зрелости организации [6, 7]. Для минерально-сырьевого комплекса (МСК) вопрос особенно актуален, так как цифровизация предприятий МСК связана с интеграцией производственных данных, корпоративных систем, аналитических сервисов и средств промышленного управления [8]. Цель работы – разработка прототипа системы для автоматизированного сбора и анализа вакансий системных аналитиков с представлением результатов в виде дашборда.

Методы. Архитектура системы включает модуль загрузки вакансий, слой структурирования данных, модуль выделения и нормализации навыков, блок сопоставления навыков с требуемым опытом, модуль отнесения вакансий к определенной отрасли и веб-интерфейс для визуальной аналитики. При проектировании учитывались современные подходы к анализу онлайн-вакансий: сегментация объявлений, извлечение требований, нормализация разнообразных формулировок одинаковых навыков [9]. Прототип реализован на Python. На текущем этапе система проверялась на синтетическом наборе данных, моделирующем реальные сценарии работы с вакансиями. После получения доступа к официальному API (Application Programming Interface) планируется переход к реальной выборке и валидация результатов.

Результаты. Разработан прототип дашборда, позволяющий фильтровать вакансии по отрасли работодателя, региону, требуемому опыту, формату занятости, компании и набору навыков. В системе реализована нормализация технологических и инструментальных требований: близкие по смыслу формулировки приводятся к единому виду, что

делает аналитику устойчивее и снижает риск завышения частот отдельных навыков. Проверка на тестовом массиве показала, что программа корректно выполняет загрузку, структурирование и нормализацию данных и формирует дашборд. Для задач МСК это важно, поскольку в дальнейшем позволит выделять вакансии, связанные с промышленной автоматизацией, корпоративными системами и бизнес-аналитикой.

Обсуждение. Полученный результат следует рассматривать как основу для последующего эмпирического исследования, поскольку работа пока ограничена тестовой выборкой и не претендует на количественную оценку реального спроса. Вместе с тем современные исследования показывают, что секторный анализ вакансий позволяет выявлять различия в профиле цифровых навыков, в том числе у системных аналитиков [10]. Для сферы недропользования такой подход полезен тем, что позволяет не просто рассуждать о нужных компетенциях, а анализировать их на основе конкретных данных. В условиях цифровой трансформации горной промышленности этот инструмент может быть полезен не только студентам и соискателям, но и вузам, совершенствующим образовательные программы с учетом потребностей отрасли.

Заключение. Разработан прототип системы автоматизированного мониторинга вакансий системных аналитиков для задач кадрового обеспечения цифровой трансформации минерально-сырьевого комплекса. Система объединяет сбор и структурирование вакансий, анализ навыков, учет требований к опыту и интерактивную визуализацию результатов. После подключения к реальным данным она может использоваться для анализа кадрового спроса в цифровом недропользовании и обоснования изменений в подготовке специалистов. Дальнейшая работа связана с интеграцией реальных вакансий, отраслевой валидацией и уточнением правил интерпретации навыков.

Список литературы

1. Tzimas G., Zotos N., Mourelatos E., Giotopoulos K.C., Zervas P. From Data to Insight: Transforming Online Job Postings into Labor-Market Intelligence // Information. 2024. Vol. 15. No. 8. Art. 496. DOI: 10.3390/info15080496.
2. Rahhal I., Kassou I., Ghogho M. Data Science for Job Market Analysis: A Survey on Applications and Techniques // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 251. Art. 124101. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124101.
3. Lukauskas M., Šarkauskaitė V., Pilinkienė V., Stundžienė A., Grybauskas A., Bruneckienė J. Enhancing Skills Demand Understanding through Job Ad Segmentation Using NLP and Clustering Techniques // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 10. Art. 6119. DOI: 10.3390/app13106119.
4. Walek B., Pektor O. Data Mining of Job Requirements in Online Job Advertisements Using Machine Learning and SDCA Logistic Regression // Mathematics. 2021. Vol. 9. No. 19. Art. 2475. DOI: 10.3390/math9192475.
5. Ao Z., Horváth G., Sheng C., Song Y., Sun Y. Skill Requirements in Job Advertisements: A Comparison of Skill-Categorization Methods Based on Wage Regressions // Information Processing & Management. 2023. Vol. 60. No. 2. Art. 103185. DOI: 10.1016/j.ipm.2022.103185.
6. Charmanas K., Georgiou K., Mittas N., Angelis L. Digital Requirements for Systems Analysts in Europe: A Sectoral Analysis of Online Job Advertisements and ESCO Skills // Information. 2025. Vol. 16. No. 5. Art. 363. DOI: 10.3390/info16050363.
7. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. P. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
8. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020. Vol. 37. No. 5. P. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.
9. Zare D., Fernandez-Sanz L., Pospelova V., López-Baldominos I. NLP and Text Mining for Enriching IT Professional Skills Frameworks // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 17. Art. 9634. DOI: 10.3390/app15179634.
10. Lund E., Pekkari A., Johansson J., Lööw J. Mining 4.0 and Its Effects on Work Environment, Competence, Organisation and Society – a Scoping Review // Mineral Economics. 2024. Vol. 37. No. 4. P. 827–840. DOI: 10.1007/s13563-024-00427-0.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ПОГРУЖЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Худяков С.Д.
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, khudyakovsemen@yandex.ru

Научный руководитель: Масько О.Н.
к.т.н., ассистент кафедры АТПП, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлена численная модель распределения переменного тока в системе с несколькими погруженными электродами (упрощенный вариант руднотермической печи). Модель основана на квазистационарной форме уравнений Максвелла с использованием уравнения непрерывности тока и представления поля через скалярный и векторный потенциалы. Реализация выполнена в среде ANSYS Fluent с применением пользовательских скалярных уравнений, что обеспечивает единое расчетное пространство и возможность сопряжения с уравнениями гидродинамики и теплопереноса. В работе акцент сделан на электродинамической составляющей модели. Получены распределения потенциала, плотности тока и объемного джоулева тепловыделения, формирующие основу для последующего комплексного CFD-моделирования промышленных агрегатов.

Ключевые слова: квазистационарная электродинамика; переменный ток; погруженные электроды; токораспределение; джоулев нагрев; ANSYS Fluent; CFD; руднотермические печи.

Введение. Руднотермические печи (РТП) являются одними из наиболее энергоемких агрегатов электротермии, а распределение электрического поля и плотности тока в объеме ванны непосредственно определяет локальное джоулево тепловыделение, положение реакционной зоны и технико-экономические показатели процесса [1, 2].

Прямое численное моделирование промышленной печи связано с одновременным учетом электромагнитных, тепловых и физико-химических процессов, температурной зависимостью свойств среды и наличием дугового разряда, что приводит к высокой нелинейности задачи и усложняет интерпретацию результатов [3, 4].

В то же время анализ реальных режимов работы РТП невозможен без учета гидродинамики расплава и шлака, тепломассообмена и формирования реакционной зоны, что требует применения CFD-подхода (computational fluid dynamics) как единой платформы для описания сопряженных процессов переноса. Дополнительную методическую сложность при этом представляет корректное включение уравнений Максвелла в CFD-среду и обеспечение их самосогласованного сопряжения с уравнениями гидродинамики в рамках единого расчетного пространства [5, 6].

Методы. Электродинамическая модель основана на системе уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Для условий промышленной частоты переменного тока используется квазистационарное приближение, при котором токи смещения пренебрежимо малы и выполняется уравнение непрерывности тока.

Численная реализация выполнена в ANSYS Fluent с использованием четырех пользовательских скалярных уравнений (UDS): одного для электрического потенциала φ (1) и трех для компонент векторного магнитного потенциала A_x, A_y, A_z (2) [6, 7].

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \ (1), \qquad \frac{1}{\mu\sigma}\nabla^2 A = \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla\varphi \ (2)$$

где φ – скалярный электрический потенциал, В; A – векторный магнитный потенциал, В·с/м; σ – электрическая проводимость среды, См/м; μ – магнитная проницаемость среды, Гн/м.

На верхних торцах электродов задается гармонически изменяющееся во времени фазное напряжение промышленной частоты с фазовым сдвигом 120° между электродами.

Стенки ванны и внешняя граница расчетной области рассматриваются как электрически непроводящие поверхности, что исключает выход тока за пределы модели.

Для векторного магнитного потенциала на внешней границе принимается условие отсутствия магнитного потока [8].

Результаты. Получены трехмерные распределения электрического потенциала, напряженности электрического поля, плотности тока, магнитной индукции и температуры.

Максимальные градиенты потенциала и электрического поля формируются в приэлектродных зонах. Плотность тока концентрируется под электродами с последующим неравномерным растеканием в объеме проводящей среды, что определяет локализацию джоулева тепловыделения.

Температурное поле коррелирует с распределением электрической мощности: наибольший нагрев наблюдается в подэлектродных областях. Распределение магнитной индукции отражает замыкание токов в объеме ванны [9, 10].

Обсуждение. Полученные распределения электрического поля, плотности тока и температуры подтверждают определяющую роль электродинамики в формировании энергетического режима системы с несколькими погруженными электродами. Локализация тока в подэлектродных зонах непосредственно определяет структуру тепловыделения и температурное поле.

Результаты демонстрируют возможность корректной реализации уравнений Максвелла в CFD-среде и их сопряжения с тепловой задачей в едином расчетном пространстве. Предложенный подход может служить основой для дальнейшего моделирования промышленных руднотермических печей.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для анализа распределения электрической мощности в ванне руднотермической печи и интерпретации измеряемых электрических параметров режима. Модель позволяет связать токи фаз, напряжения и эквивалентное сопротивление ванны с пространственным распределением плотности тока и тепловыделения.

Реализация уравнений Максвелла в CFD-среде позволяет рассчитывать согласованные электрические и тепловые поля в едином расчетном пространстве. В дальнейшем планируется верификация модели на физической лабораторной установке и последующий переход к моделированию промышленных агрегатов.

Список литературы

1. Tesfahunegn Y.A., Magnusson T., Tangstad M., Saevarsdottir G.A. Dynamic current distribution in the electrodes of submerged arc furnace using scalar and vector potentials // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 10861. – P. 518–527. – DOI: 10.1007/978-3-319-93701-4_40.
2. Tesfahunegn Y.A., Magnusson T., Tangstad M., Saevarsdottir G.A. Comparative study of AC and DC solvers based on current and power distributions in a submerged arc furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2020. – Vol. 51. – P. 510–518. – DOI: 10.1007/s11663-020-01794-z.
3. Fromreide M., Gómez D., Halvorsen S. A., et al. Induced currents in the lining and steel shell of submerged arc furnaces // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2023. – Vol. 9. – P. 375–385. – DOI: 10.1007/s40831-022-00625-6.
4. Haraldsson H.V., Traustason H., Tangstad M., Saevarsdottir G.A. Modeling and comparison study of industrial AC-arcs // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2024. – Vol. 55. – P. 3750–3760. – DOI: 10.1007/s11663-024-03214-y.
5. Mäkelä I., Aula M., Visuri V.V. A mathematical model for metal–slag reactions in the electric arc furnace in stainless steelmaking // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2025. – Vol. 57. – P. 1237–1258. – DOI: 10.1007/s11663-025-03895-z.
6. Haraldsson H.V., Traustason H., Tangstad M., Saevarsdottir G.A. Modeling of industrial electric arcs using different plasma gas compositions // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2025. – Vol. 56. – P. 1208–1217. – DOI: 10.1007/s11663-024-03397-4.
7. Tesfahunegn Y.A., Magnusson T., Tangstad M., Saevarsdottir G.A. Dynamic current and power distributions in a submerged arc furnace // Materials Processing Fundamentals 2019. – Springer, 2019. – P. 3–14. – DOI: 10.1007/978-3-030-05728-2_1.
8. Liu H., Li M., Guo J., Zhang X., Hung T. Temperature prediction of submerged arc furnace based on residual spatial-temporal convolutional neural network // Energy. – 2024. – Vol. 309. – 133024. – DOI: 10.1016/j.energy.2024.133024.
9. Siriano S., Melchiorri L., Pignatiello S., Tassone A. A multi-region and a multiphase MHD OpenFOAM solver for fusion reactor analysis // Fusion Engineering and Design. – 2024. – Vol. 200. – 114216. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2024.114216.
10. Zielińska M., Yang H., Madej Ł., Malinowski Ł. Development and validation of computational fluid dynamics model of ladle furnace with electromagnetic stirring system // Materials. – 2024. – Vol. 17(4). – 960. – DOI: https://doi.org/10.3390/ma17040960.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОПЕНТАН-ПЕНТАНОВОЙ ФРАКЦИИ

Шемет Д.Д.
студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, shemetdmitrii@yandex.ru

Научный руководитель: Белоглазов И.И.
доц. каф. АТПП,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В исследовании разработаны и сравнительно проанализированы варианты автоматизированной системы управления ректификационной колонной К-5 установки разделения изопентан-пентановой фракции на ООО «ЗапСибНефтеХим». Основная проблема состоит в том, что близкие температуры кипения изопентана и н-пентана требуют исключительно точного и устойчивого поддержания температурного профиля, давления и флегмового числа: любое возмущение по расходу или составу сырья мгновенно снижает концентрацию целевого изопентана ниже 95 %. Актуальность обусловлена необходимостью перехода от статических расчётов к полноценному динамическому моделированию, позволяющему заранее проверить управляемость колонны и исключить дорогостоящие доработки на промышленном объекте. В Aspen HYSYS построена динамическая модель колонны, реализованы и испытаны три структуры регулирования Получены переходные характеристики, рассчитаны показатели качества управления) и проведено сравнение по чистоте изопентана. Установлено, что каскадный вариант с регулированием температуры по температуре верха и ребойлера обеспечивает наиболее устойчивый режим и концентрацию изопентана не ниже 95 % даже при ступенчатых возмущениях ±10 %. Практическая ценность исследования – обоснованная структура САУ и подобранные настройки регуляторов, готовые к прямому внедрению.

Ключевые слова: ректификационная колонна, изопентан-пентановая фракция, динамическое моделирование, Aspen HYSYS, каскадное регулирование, температурная стабилизация, качество изопентана, переходные процессы, автоматизированная система управления, нефтегазопереработка.

Введение. Процесс ректификации является ключевым элементом разделения углеводородных фракций в нефтепереработке. В ходе разделения изопентан-пентана, температура кипения компонентов различаются незначительно. Колебания давления, температуры и расхода приводит к ухудшению качества продукта и нарушает материальный баланс [1].

Целью работы является разработка наиболее оптимальной динамической модели автоматизации колонны разделения К-5, обеспечить устойчивость режима и концентрацию изопентана от 95%.

Методы. Моделирование было проведено с помощью программного обеспечения Aspen HYSYS, включающая в себя конденсатор, ребойлер и рефлюксноую емкость, аналогичные агрегатам с производства. Построены 3 модели: с базовыми контурами управления, с альтернативным регулированием уровня в конденсаторе и каскадный с дополнительными контурами регулирования температуры [2].

Для каждой структуры проведены динамические эксперименты со ступенчатыми возмущениями по расходу и составу сырья (±10 %), рассчитаны переходные характеристики регуляторов и интегральные показатели качества управления. Анализ выполнен по критериям устойчивости, времени установления, перерегулирования и конечной концентрации изопентана в дистилляте [3].

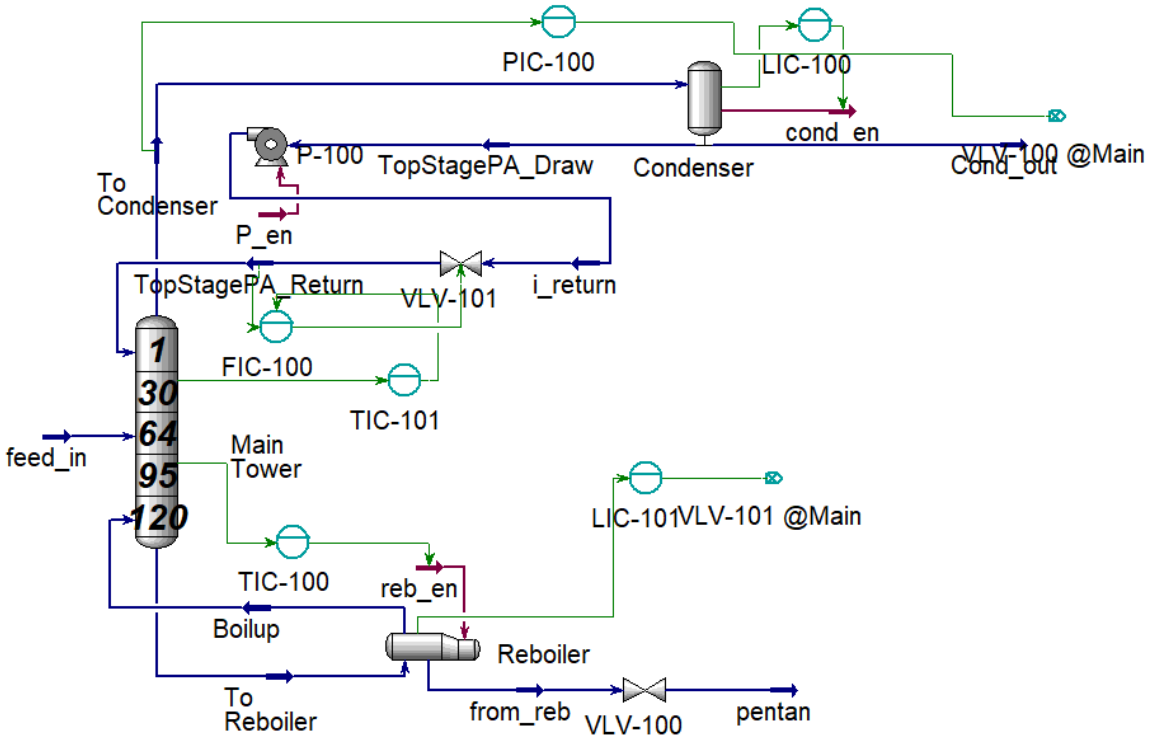


Рис. 1. Динамическая модель ректификационной колонны К-5 в Aspen HYSYS
[*составлено авторами*]

Таблица 1

Компонентный состав [*составлено авторами*]

Компонент	Массовая доля
i-пентан	0,4885
n-пентан	0,4682
n-гексан	0,0307
циклопентан	0,0110
n-бутан	0,0015

Результаты. Вариант 1 обеспечивает приемлемую стабилизацию, но мольная доля изопентана в верхнем продукте составляет около 0,951 при расходе порядка 690 кмоль/ч. Вариант 2 из-за инерционного канала регулирования уровня даёт наиболее колебательные переходные процессы и снижение качества продукта до 0,699 при расходе около 1423 кмоль/ч.

Вариант 3 с каскадным регулированием и температурной стабилизацией показывает наилучшие результаты: мольная доля изопентана достигает 0,9568 при стабилизированном расходе порядка 2163 кмоль/ч, минимальном перерегулировании и быстром внутреннем расходном контуре.

Таблица 2

Сравнение показателей качества управления по вариантам
[*составлено авторами*]

Вариант	Мольная доля изопентана	Расход дистиллята, кмоль/ч
1	0,951	690
2	0,699	1423
3	0,9568	2163

Обсуждение. По результату моделирования, полученные данные свидетельствуют о наибольшей эффективности модели с каскадным регулированием температуры, она хорошо справляется с инерционностью процесса ректификации [4, 5]. Данный подход является актуальным в современных системах контроля и научных работах в области систем управления отделения изопентана [6, 7].

Результаты исследования позволяют на этапе разработки и проектирования исключить неэффективные решения и повысить качество продукта без дополнительных затрат.

Заключение. Оптимальной системой определена каскадная структура управления (вариант 3), обеспечивающая наибольшую устойчивость режима работы установки и концентрацию изопентана более 95% при действии возмущений. Практическая значимость работы выражается в готовности к внедрению конфигурации системы автоматического управления и подобранных настройках регуляторов для колонны К-5.

В дальнейшем планируется интеграция полученной модели с SCADA-системами (Supervisory Control and Data Acquisition).

Благодарности: *Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доценту Белоглазов Илье Ильичу за ценные рекомендации, постоянную поддержку и помощь в постановке задач исследования.*

Список литературы

1. Perry R.H. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook / R.H. Perry, D.W. Green. – 8th ed. – New York : McGraw-Hill, 2008. – Sect. 18: Liquid-Gas Systems.
2. Seader J.D. Separation Process Principles / J.D. Seader, E.J. Henley. – Hoboken : Wiley, 2011. – 784 p.
3. Белоглазов И.И., Курбанов Б.Х. Автоматизация процессов нефтепереработки с использованием современных средств разработки / Деловой журнал Neftegaz.ru, № 2, 2016. С 34 – 37 EDN: VLFTJT.
4. Тугашова, Л.Г. Исследование возможности управления процессом ректификации нефти с применением типовых регуляторов / Л.Г. Тугашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 120-131. – DOI 10.14529/ctcr160313. – EDN WFQDAD.
5. King M. Practical Process Control Part 10: Designing Level Controllers on a Distillation Column : article. – The Chemical Engineer. – 01.02.2024. – URL: https://www.thechemicalengineer.com/features/practical-process-control-part-10-designing-level-controllers-on-a-distillation-column/ (дата обращения: 16.02.2026).
6. Пат. RU 2722132 C1 Российская Федерация, МПК B01D 3/42. Способ управления ректификационной колонной выделения изопентана / А.В. Зуйков, Р.А. Абдурагимов, А.А. Боброва и др. – Заявл. 16.12.2019; опубл. 26.05.2020. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2722132C1/ru (дата обращения: 16.02.2026).
7. Заявка на патент CA 2901972 A1 Канада, МПК B01D 3/14. Separation processes using divided columns / M. Bhargava, C. Nelson. – PCT filing date 14.03.2013; publication date 28.08.2014. – URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/10/46/17/3a3609e69ff6b1/CA2901972A1.pdf (дата обращения: 16.02.2026).

Секция 8. ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ, ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

КОРРОЗИОННОСТОЙКОЕ ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ТРУБ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Анакина Д.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s215104@stud.spmi.ru

Научный руководитель: Пряхин Е.И.
д.т.н., заведующий кафедры МиТХИ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В городах-милионниках системы горячего водоснабжения регулярно выходят из строя из-за коррозионного разрушения. Данное исследование проводилось с целью разработки нового двухкомпонентного полимерного покрытия для стальных труб горячего водоснабжения, применяемого для защиты внешней поверхности трубы под теплоизоляцией и позволяющего повысить фактический срок службы трубы и защитить металл от воздействия агрессивных факторов при бесканальной прокладке. В статье предложена технология получения композитного полимерного покрытия, включающая в себя технологию предварительной подготовки поверхности и формирование самого покрытия.

Ключевые слова: защитные полимерные покрытия, адгезия покрытий, шероховатость поверхности, эпоксидные покрытия, полиуретановые покрытия.

Введение. Срок эксплуатации трубопровода горячего водоснабжения бесканальной прокладки в грунте зависит от его биологической активности, блуждающих токов, температуры и деформирующих нагрузок в трубе. Все они снижают потенциально возможную длительность срока службы труб теплосетей, в основном, за счет их коррозионного разрушения [1, 2, 3].

В сравнении с покрытиями, содержащими металлические компоненты, полимерные покрытия трубопроводов не подвержены постоянному коррозионному разрушению под действием «блуждающих токов», и, в отличии от керамических, обладают достаточной пластичностью, чтобы выдерживать механические воздействия при транспортировке и установке труб [4]. При этом применение полимерных композиций в качестве самостоятельного покрытия часто не является эффективной защитой, поэтому предлагается изучить влияние двухслойного полимерного покрытия на эффективность коррозионной защиты трубопроводов городских теплосетей.

Проблема применения двухслойных полимерных покрытий заключается в получении достаточно прочного соединения между двумя совершенно разными материалами.

Методы. В работе рассматривались вопросы повышения адгезионной прочности покрытия к поверхности металла [5, 6, 7] и получения полимерного покрытия, которое способно повысить срок эксплуатации трубы до 25 лет и более.

Для повышения адгезии образцы дробеструйной, пескоструйной и лазерной обработки [8] оценивались под микроскопом, измерялись профилометром, проводилась твердометрия на шлифах. Таким образом, установлены преимущества лазерной обработки перед другими методами. Итоговая оценка адгезии производилась по ГОСТ методом решетчатого надреза и методом отрыва.

Критерии соответствия или не соответствия требований к покрытиям трубопровода установлены на основе СТО и нормативных документов. Разработанное двухкомпонентное

покрытие на основе полиуретана и эпоксидной эмали подвергалось входным испытаниям, позволяющим установить возможность его применения как защитного коррозионностойкого покрытия для труб теплосетей, а так же стендовым испытаниям, дающим предварительную оценку срока службы предложенного покрытия. Выбор в пользу данных эмалей был сделан на основе анализа различных исследований. [9]

Результаты. В сравнении со струйными методами обработки лазер позволяет сформировать развитую поверхность металла с благоприятной морфологией: без резких максимумов и минимумов, упорядоченную на всей площади обработки, что позволяет снизить количество дефектов покрытия и повысить площадь полезной поверхности и адгезионную прочность в среднем на 20% по сравнению с применяемыми методами.

Двухкомпонентное полимерное покрытие, нанесенное на подготовленную лазером поверхность, подверглось следующим испытаниям: оценку адгезии, сплошности, прочности на удар и изгиб согласно ГОСТ. Покрытие успешно прошло все испытания [10].

Предварительная оценка срока службы предложенного покрытия производилась на основе результатов стендовых испытаний. Покрытие подвергалось длительной выдержке химических средах: кислоте и щелочи, а так же циклу операций смачивания и сушки при рабочей температуре трубы (75-80°C), после чего производились контрольные испытания. Покрытие прошло оценку адгезии, сплошности, прочности на удар и изгиб.

Обсуждение. Разработка эффективных решений для повышения адгезионной прочности покрытий представляет собой многофакторную задачу, охватывающую как выбор материалов, так и оптимизацию технологических параметров процесса нанесения. Введение новых технологий и подходов в области формирования защитных коррозионностойких покрытий для труб горячего водоснабжения позволяет получить перспективные решения, повышающие срок их службы.

Заключение. По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

1. Применение лазерной обработки позволяет сформировать на поверхности развитый рельеф, характеризующийся ячеистой структурой и повышенной шероховатостью. Данная модификация поверхности обеспечивает высокие адгезионные характеристики покрытия даже в отсутствие связующего промежуточного слоя.

2. Комбинированное покрытие из двух эмалей может рассматриваться как перспективное антикоррозионное покрытие для трубопровода трасс теплоснабжения.

Список литературы

1. Акшибарова П.И., Куликова Е.С. Методы защиты магистральных трубопроводов от коррозии изоляционными материалами Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения. 2018. Т. 1. С. 405–409.
2. Громов, Н.А. Анализ надежности городских теплосетей России // Поколение будущего: взгляд молодых ученых – 2021: сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 11–12 ноября 2021 года. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 184-189.
3. Москалёв И.Л. Повреждаемость основных узлов сетей теплоснабжения городов Российской Федерации / И.Л. Москалёв, В.В. Литвак // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2015. – Т. 326, № 7: Инжиниринг георесурсов. – с. 70-80.
4. Poberezhnyi L.Ya. [et al.] Corrosive and Mechanical Degradation of Pipelines in Acid Soils // Strength of Materials. 2017. Vol. 49. No. 4. Pp. 539–549. Doi: 10.1007/s11223-017-9897-x.
5. Барановская Л.П., Берненко Н.О. Зависимость адгезии покрытия от шероховатости // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13. С. 760–762.
6. Старостина И.А. [и др.] Адгезия полимеров: новые подходы к определению поверхностных свойств металлов // Полимерная наука. – 2013. –Т. 6, №1. – С. 1-4.
7. Song, J., Huang, H., Wang, X. et al. Status and prospects of surface texturing: design, manufacturing and applications // Surface Science and Technology. 2023. Vol.1, No. 21. DOI: 10.1007/s44251-023-00022-5.
8. Дожделев А.М. [и др.] Лазерная очистка металлических изделий // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. Т. 75, № 12-2. С. 123-125. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-12-2-123-125.
9. Шутова А.Л. [и др.]. Эпоксидные лакокрасочные материалы для трубопроводов тепловых сетей, 2017. Т. 199, № 2 С. 96–101. EDN: YMANRY
10. Pryakhin E.I., Pribytkova D.A. Development and application of a complex polymer coating to ensure high corrosion resistance of the outer surface of steel pipes of urban heating networks // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 29. – P. 97-101. DOI 10.17580/cisisr.2025.01.17.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ГРОХОЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ DEM-АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННОЙ СЕГРЕГАЦИИ ПОТОКА РУДЫ

Балашов А.О.
аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, zagnibed@mail.ru

Научный руководитель: Ромашев А.О.
кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Стадии разделения по крупности являются неотъемлемым элементом технологических схем переработки минерального сырья и в значительной мере определяют показатели последующих операций измельчения и обогащения. Эффективность грохочения существенно зависит от вероятности попадания мелких частиц к просеивающей поверхности, которая, в свою очередь, ограничивается толщиной обрабатываемого слоя и его внутренней структурой. В практике обогащения толщину слоя на грохоте традиционно ограничивают величиной, превышающей средневзвешенный размер частиц в два – четыре раза, что снижает удельную пропускную способность аппарата.

Альтернативным путём интенсификации процесса является направленное структурирование слоя ещё до его поступления на грохот за счёт вибрационного воздействия на питателе. При корректно подобранных параметрах вибрации мелкие частицы успевают переместиться в нижние горизонты слоя ещё в процессе транспортирования, что обеспечивает их попадание на сетку грохота в первые же моменты просеивания и снижает механический вынос мелочи в надрешётный продукт.

Численное моделирование процесса методом дискретных элементов (DEM) позволяет исследовать кинетику сегрегации и связь её показателей с параметрами вибрационного воздействия в условиях, недоступных для прямого экспериментального наблюдения. Целью настоящей работы является DEM-обоснование рациональных параметров вибрации на лабораторном питателе и оценка развития сегрегации при движении слоя по горизонтали как основы для последующей интенсификации грохочения.

Численное моделирование выполнялось в программном комплексе Rocky DEM. Расчётная область геометрически воспроизводила лабораторный вибрационный питатель в натуральную величину: рабочая поверхность шириной 90 мм и длиной 350 мм с бортами высотой 40 мм. В качестве контактных моделей использовались гистерезисная линейная пружинная модель для нормальной составляющей силы и модель Кулона с предельной упругостью для тангенциальной составляющей; учёт сопротивления качению производился по модели Linear Spring Rolling Limit. Параметры материала (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициенты трения) задавались в соответствии с физико-механическими свойствами исследуемой руды. Частота колебаний во всех опытах принята равной 100 Гц, что соответствует частоте вибрации лабораторного питателя.

Исследование выполнено по двухстадийной схеме. На первой стадии моделировалась вертикальная сегрегация неподвижного объёма материала: горизонтальное транспортирование отсутствовало, всё перераспределение частиц обусловлено исключительно вибрационным воздействием. Серия опытов проведена при варьировании амплитуды колебаний в диапазоне от 0,1 до 0,5 мм с шагом 0,1 мм. Целью этой стадии являлось установление режима вибрации, обеспечивающего максимальную скорость и глубину расслоения слоя по крупности.

С целью корректной интерпретации результатов первая стадия выполнена в две подсерии. В первой подсерии частицы аппроксимированы сферами эквивалентного диаметра. Использование сферической формы преследует две цели. Прежде всего, оно обеспечивает существенное сокращение вычислительных затрат за счёт ускоренного расчёта контактного взаимодействия по сравнению с многогранниками. Не менее важным является методическое соображение: использование сфер позволяет декомпозировать задачу и в чистом виде выделить эффект параметров вибрации от эффекта формы зерна. На сферической форме исключаются вторичные явления, связанные с механическим зацеплением частиц, ориентационными эффектами, что обеспечивает корректную интерпретацию полученных зависимостей и формирование «эталонной» картины кинетики сегрегации в идеализированных условиях.

Во второй подсерии сферы заменялись полигедральными частицами, форма которых соответствует характерной форме зёрен исследуемой руды. Это позволило оценить, в какой мере выявленные на сферах закономерности сохраняются для реального материала, и количественно охарактеризовать вклад фактора формы. Распределения частиц по крупности в обеих подсериях задавались идентичными.

На второй стадии моделировалось движение слоя руды по вибрационному питателю в условиях, приближенных к реальному процессу подачи материала на грохот. Параметры вибрации устанавливались по результатам первой стадии – на режиме, обеспечивающем максимальную скорость сегрегации в неподвижном слое. Источник материала располагался в начале питателя, толщина слоя поддерживалась постоянной за счёт настройки расхода и геометрии бортов. Исследовалось изменение структуры слоя по длине питателя: содержание целевого подрешётного класса в нижних, средних и верхних горизонтах слоя фиксировалось в нескольких сечениях, что позволило восстановить профиль сегрегации по продольной координате питателя.

Для количественной оценки степени расслоения использовался коэффициент сегрегации, рассчитываемый по соотношению средневзвешенных размеров частиц в верхнем и нижнем слоях относительно случаев полностью перемешанного и идеально сегрегированного материала.

Результаты и обсуждение. На первой стадии установлен немонотонный характер влияния амплитуды вибрации на динамику сегрегации в неподвижном объёме материала. При малых амплитудах (0,1–0,2 мм) подведённой энергии оказывается недостаточно для разрыхления слоя и разрушения локальных структур, формируемых межчастичным сцеплением; кинетика расслоения замедленная, предельная степень сегрегации не достигается за разумное время моделирования. В диапазоне средних амплитуд наблюдается выраженный максимум скорости перераспределения классов, при которой достигается оптимальное соотношение между разуплотнением слоя и сохранением направленной нисходящей миграции мелких частиц. При дальнейшем увеличении амплитуды до 0,5 мм режим колебаний приближается к виброкипящему, при котором интенсивные взаимные перемещения частиц всех классов начинают разрушать формирующуюся упорядоченную структуру слоя; скорость сегрегации снижается, а предельно достигаемое значение коэффициента сегрегации уменьшается. На основании проведённой серии в качестве рационального для дальнейших расчётов выбран режим вибрации в средней части исследованного диапазона амплитуд.

Сопоставление результатов, полученных на сферических и полигедральных частицах, показывает, что качественная картина зависимости коэффициента сегрегации от амплитуды сохраняется: положение оптимального режима на оси амплитуд практически не смещается. Вместе с тем для полигедральных частиц характерны замедление кинетики сегрегации в начальный период воздействия и снижение предельно достигаемого значения коэффициента сегрегации. Это объясняется повышенным механическим зацеплением частиц неправильной формы и их способностью образовывать более устойчивые

локальные упаковки, препятствующие свободному перемещению мелких зёрен через слой. Полученное расхождение количественно характеризует «штраф» за идеализацию формы и обосновывает целесообразность поэтапного перехода от сфер к полигедронам в задачах подобного класса.

На второй стадии в условиях горизонтального транспортирования слоя установлено, что в начале питателя слой поступает на рабочую поверхность в исходном, перемешанном состоянии. По мере продвижения слоя вдоль питателя содержание мелкого класса в нижних горизонтах слоя монотонно возрастает, а в верхних – снижается; коэффициент сегрегации по длине питателя растёт от нуля до некоторого предельного значения, после чего стабилизируется. Длина участка, на котором коэффициент сегрегации достигает значений, близких к предельным, может быть охарактеризована как длина переходной зоны и является ключевой геометрической характеристикой питателя с точки зрения подготовки питания грохота. Если фактическая длина питателя меньше длины переходной зоны, на грохот поступает не полностью сегрегированный слой, и потенциал интенсификации реализуется лишь частично; если же длина питателя существенно превосходит длину переходной зоны, дополнительный прирост сегрегации не происходит, и избыточная длина оказывается технологически неоправданной.

Полученные результаты позволяют сформулировать практическую рекомендацию: рациональным является сочетание установленного на первой стадии режима вибрации с длиной питателя, не меньшей, чем длина переходной зоны, определённой по результатам второй стадии. Такое сочетание обеспечивает поступление на грохот слоя со сформированной сегрегированной структурой и создаёт условия для прироста эффективности грохочения за счёт направленной концентрации мелких классов в нижних горизонтах слоя.

Двухстадийная схема DEM-моделирования вибрационной сегрегации потока руды на лабораторном питателе позволила раздельно исследовать влияние параметров вибрационного воздействия и эффект пространственного развития процесса при движении слоя по горизонтали. На первой стадии установлен немонотонный характер зависимости коэффициента сегрегации от амплитуды вибрации, выявлен рациональный режим в средней части исследованного диапазона амплитуд и количественно охарактеризован вклад формы зёрен при переходе от сферической аппроксимации к полигедральной. На второй стадии показано, что при горизонтальном транспортировании слоя сегрегация развивается на конечной длине переходной зоны, после чего достигает стационарной структуры, согласующейся со значениями, полученными в неподвижном слое. Полученные закономерности обосновывают возможность направленного структурирования слоя на питателе как инструмента интенсификации грохочения и формируют основу для расчёта геометрии питателя и параметров его вибрации, согласованных с требуемой эффективностью разделения по крупности.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 26–17-00226.

МЕХАНИЗМЫ ВИБРАЦИОННОЙ СЕГРЕГАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ГРОХОЧЕНИЯ

Балашов А.О.[1], Шарапова М.О.[2]
[1] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, zagnibed@mail.ru
[2] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Ромашев А.О.
кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. Направленное использование вибрационного расслоения зернистой среды открывает возможности для повышения эффективности грохочения. В настоящей работе исследовано влияние длительности колебательного воздействия и высоты обрабатываемого слоя на динамику перераспределения фракций. Задача решалась средствами численного эксперимента в рамках метода дискретных элементов (DEM) с последующей проверкой адекватности модели на лабораторной установке. Полученная цифровая модель позволила установить кинетические закономерности межслоевой миграции частиц различной крупности.

Ключевые слова: вибрационная сегрегация; грохочение; метод дискретных элементов; гранулометрический состав; численное моделирование; коэффициент сегрегации.

Введение. Стадии дробления и измельчения горных пород являются наиболее энергоёмкими во всей технологической цепочке обогащения минерального сырья. В связи с этим совершенствование подготовительных операций, способное сократить общее энергопотребление, представляет значительный практический интерес [1]. Одним из таких направлений выступает оптимизация процесса грохочения, широко применяемого на стадиях рудоподготовки для своевременного вывода готовых классов крупности [2].

При наложении колебаний на слой рудного материала наблюдается его расслоение по крупности, называемое сегрегацией. Как правило, данное явление рассматривается как нежелательное, возникающее при транспортировке и хранении насыпных грузов. Вместе с тем целенаправленное формирование упорядоченной структуры слоя способно существенно улучшить условия прохождения мелких фракций к просеивающей поверхности [3, 4]. Экспериментальное изучение этих процессов сопряжено со значительными трудностями, связанными с необходимостью контроля большого числа переменных. Развитие вычислительных технологий и, в частности, метода дискретных элементов (DEM) позволяет воспроизводить физику взаимодействия частиц в виртуальной среде, существенно сокращая потребность в натурных опытах [5, 6].

Методы. Численное моделирование выполнялось в программном комплексе Rocky DEM, реализующем метод дискретных элементов. DEM-подход получил широкое распространение при виртуальном воспроизведении работы обогатительного оборудования, включая вибрационные грохоты, дробилки и барабанные мельницы [7,8]. В рамках настоящего исследования разработана цифровая модель процесса расслоения слоя пробы руды. Для проверки достоверности результатов моделирования был сконструирован экспериментальный сегрегационный анализатор, геометрические и кинематические параметры которого полностью воспроизводят виртуальную модель.

Результаты и обсуждение. На первом этапе работы исследовалось совместное влияние продолжительности наложения колебаний и высоты обрабатываемого слоя на формирование сегрегированной структуры. Диапазон варьирования времени составлял от 150 до 1200 с, а высота слоя изменялась от 8 до 25 максимальных размеров зерна.

Полноразмерная DEM-модель насчитывала свыше 723 тысяч взаимодействующих частиц при прогнозируемом времени счёта порядка 1500 машино-часов. Для снижения вычислительных затрат расчётная область была уменьшена в 10 раз, что привело к сокращению числа частиц до 6411, а продолжительности вычислений – до 366 часов.

Анализ результатов эксперимента показал, что в первые секунды действия вибрации (интервал 0–3 с) наблюдается интенсивная перегруппировка зёрен, которую можно охарактеризовать как стадию взрывного перераспределения. После этого скорость перемещения частиц между слоями значительно снижается. Установлено, что при длительности обработки свыше 600 с прирост степени расслоения становится пренебрежимо малым, что обусловлено завершением основного перераспределения частиц между слоями [9].

Изучение роли высоты слоя выявило существование порогового значения, при превышении которого дальнейшее увеличение толщины не сопровождается заметным улучшением качественных показателей расслоения. Данный факт объясняется формированием предельного сопротивления перемещению зёрен при заданных параметрах колебаний. Кроме того, полученные данные свидетельствуют о том, что высота слоя оказывает более выраженное нелинейное влияние на степень сегрегированности, чем продолжительность вибрации [10].

Заключение. Проведённое исследование позволило количественно охарактеризовать влияние основных технологических факторов длительности вибрационного воздействия и высоты слоя на степень расслоения зернистого материала. Установлено преобладающее значение высоты слоя в кинетике процесса сегрегации. Сопоставление расчётных и опытных данных подтвердило адекватность построенной DEM-модели и обосновало целесообразность её использования для прогнозирования закономерностей расслоения, а также для проверки рабочих гипотез, связанных с интенсификацией процесса грохочения.

Список литературы

1. Xu N., Wang X., Lin D., Zuo W. Numerical Simulation and Optimization of Screening Process for Vibrating Flip-Flow Screen Based on Discrete Element Method–Finite Element Method–Multi-Body Dynamics Coupling Method // Minerals. 2024. Т. 14. № 3. С. 278. DOI: 10.3390/min14030278.
2. Qiao J., Yang J., Lu J. Particle Behavior and Aperture Optimization of Variable Vibration-Amplitude Screening Based on Discrete Element Method Simulation // ACS Omega. 2023. Т. 8. № 34. С. 30976–30989. DOI: 10.1021/acsomega.3c02511.
3. Zhang H., Zheng X., Jing W. Numerical investigation on dynamic response of the screen mesh in vibrating screening through DEM-FEM co-simulation // Particuology. 2024. Т. 87. С. 205–217. DOI: 10.1016/j.partic.2023.08.013.
4. Yang H., Ma X. Discrete element simulation study on the screening effect of composite vibrating screen for coal particles // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2025. Т. 45. № 1. С. 1–19. DOI: 10.1080/19392699.2024.2316944.
5. Dai S., Zhang S., Gao F., He X., Sheng D. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism // Computers and Geotechnics. 2024. Т. 169. С. 106236. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106236.
6. Nakai F., Yoshii K. Reducing segregation in vibrated binary-sized granular mixtures by excessive small particle introduction // Granular Matter. 2024. Т. 26. С. 107. DOI: 10.1007/s10035-024-01476-6.
7. Zhou J., Zhang L., Liu F., Wang Z., Shen M., Cao L. Study on screening process and segregation mechanism of wet sand and gravel particles based on discrete element method // Granular Matter. 2023. Т. 25. С. 81. DOI: 10.1007/s10035-023-01370-7.
8. Yu C., Geng R., Wang X. A Numerical Study of Separation Performance of Vibrating Flip-Flow Screens for Cohesive Particles // Minerals. 2021. Т. 11. № 6. С. 631. DOI: 10.3390/min11060631.
9. Chen B. et al. Optimization research on screening parameters of elliptical vibrating screen based on DEM theory // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E. 2022. Т. 236. № 5. С. 1992–2000. DOI: 10.1177/09544089221078388.
10. Ogunmodimu O., Govender N., Mainza A., Narayan V. Using the Discrete Element Method (DEM) to Test a Mechanistic Granular Flow Model on Vibrating Screens // Aspects in Mining and Mineral Science. 2024. Т. 12. № 4. DOI: 10.31031/AMMS.2024.12.000784.

УДК 544.72:669

РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО ПОЛУЧЕНИЮ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВ ОТ П.П. ВЕЙМАРНА ДО НАШИХ ДНЕЙ

Богоприимцева М.А., Сырков А.Г., Кокрицкий М.Э., Никулина А. А.
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена анализу исторической преемственности в исследованиях нанодисперсных металлов и материалов, начатых профессором Санкт-Петербургского горного института П.П. Веймарном (1879–1935) – основоположником науки «дисперсоидологии», по своей сути являющейся современной нанотехнологией.Прослеживается связь его работ с исследованиями научной школы академика Н.С. Курнакова и современных научных коллективов Санкт-Петербургского горного университета. Показано, что разработанные П.П. Веймарном методы (включая формальдегидный синтез золей золота) и теоретические положения («закон Веймарна», классификация дисперсных систем) заложили фундамент для современных направлений в нанотехнологии, таких как золь-гель синтез, твердотельный гидридный синтез, плазменные нанотехнологии, а также для создания биосовместимых гидрогелей и высокоэффективных фотокаталитических материалов. Подчеркивается вклад ученых Горного университета в становление и развитие нанотехнологий в России и ихприменение для решения актуальных задач минерально-сырьевого комплекса.

Ключевые слова: Петр Веймарн; дисперсоидология; нанотехнологии; нанодисперсные металлы; коллоидное золото; научные школы; Санкт-Петербургский горный университет; преемственность; наноматериалы.

История нанотехнологий неразрывно связана с именем профессора П.П. Веймарна, создателя «дисперсоидологии» – науки о поверхностях и процессах на них совершающихся, где дисперсоиды являются частицами твердой фазы размером менее 100 нм, что соответствует современному пониманию нанообъектов [24, 27]. Его основополагающие работы 1906–1915 гг., выполненные в Санкт-Петербургском горном институте, и последующие интенсивные исследования в Японии (1922–1930) заложили теоретические и методические основы синтеза, стабилизации и применения нанодисперсных металлов, в первую очередь золота и серебра [28, 29]. Целью данной статьи является анализ непрерывной линии преемственности научных исследований, берущей начало от П.П. Веймарна и его наставников, и прослеживающейся в работах современных научных коллективов Санкт-Петербургского горного университета и других российских исследовательских центров, которые развивают его идеи в контексте передовых направлений нанотехнологии XXI века, включая биомедицину, экологический катализ и нанометаллургию.

Научное наследие П.П. Веймарна и его развитие в XX веке. П.П. Веймарн, будучи учеником академика Н.С. Курнакова, с которым опубликовал свои первые научные работы [15, 22], не только сформулировал основной закон дисперсоидологии (известный как «закон Веймарна») о концентрационных условиях образования золей [24], но и предложил детальную классификацию дисперсных систем, центральным понятием которой был «dispersoide» – частица размером не более 0,1 мкм (100 нм) [26, 30]. Разработанный им формальдегидный метод получения стабильных окрашенных золей нанодисперсного золота [28, 29] стал классическим и не утратил актуальности. Его идея о том, что коллоидное состояние является общим возможным состоянием вещества, предвосхитила современный взгляд на наноматериалы. Эти исследования были высоко оценены современниками, включая нобелевского лауреата В. Оствальда [9, 15]. Многие положения Веймарна, например, о понижении температуры плавления высокодисперсных металлов [25], предвосхитили выводы, сформулированные значительно позднее [3, 19]. Принципы Веймарна, такие как управление размером частиц через концентрацию реагентов

и быстрое охлаждение для стабилизации наночастиц, нашли прямое отражение в более поздних методах, включая золь-гель синтез и молекулярное наслаивание (Atomic Layer Deposition) [4, 11].

Анализ публикационной активности показывает, что за весь период научной деятельности (1902-1935) П.П. Веймарном было опубликовано около 350 статей, причем 49% из них (170 статей) приходится на период после отъезда из Санкт-Петербурга (1916-1935), что свидетельствует о сохранении высокой продуктивности [15]. Более 30% всех работ были выполнены в Японии за период 1922-1930 гг. [7, 8], где он целенаправленно изучал методы получения окрашенных растворов нанодисперсного золота. Наибольшее число публикаций было сделано в немецком журнале *KolloidZeitschrift* – более 200 работ, что способствовало международному признанию его исследований [15].

Современные методы и перспективы, основанные на идеях П.П. Веймарна. Принципы, заложенные Веймарном, активно развиваются и используются в современных исследованиях, в том числе в стенах Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ) и других российских научных центров, находя применение в самых разных областях – от биомедицины до экологии и металлургии.

1. **Развитие золь-гель синтеза и создание функциональных материалов.** Классический формальдегидный метод Веймарна получил развитие в современных золь-гель технологиях. Например, ведутся исследования по получению электрохромных пленок на основе WO_3 с оптимизированной морфологией для энергосберегающих устройств [31] и гибридных материалов типа $AgI\text{-}SiO_2$ с контролируемой пористостью для катализа и сенсорики [5]. Эти работы напрямую используют принцип управления дисперсностью и стабильностью, сформулированный Веймарном. Ярким примером преемственности в биомедицине является создание биосовместимых гидрогелей. В работе [23] решается классическая проблема, знакомая со времен Веймарна, – слабость механических свойств гелей на основе низкомолекулярных гелеобразователей (LMWGs). Авторы, развивая подход Веймарна по управлению золь-гель переходом, усилили цистеин-серебряные гели (cysteine–silverhydrogels, CSG) за счет введения биосовместимых полимеров. Наночастицы серебра (silvernanoparticles, AgNPs) или нанокластеры (silvernanoclusters, AgNCs) в этих системах образуют «ядро» частиц золя, что перекликается с представлениями Веймарна о структуре дисперсных фаз. Полученные нетоксичные для фибробластов человека пористые гидрогели и пленки демонстрируют прямой путь от фундаментальных исследований коллоидных систем к созданию современных материалов для регенеративной медицины.

2. **Твердотельный синтез и новые функциональные материалы.** Идея Петра Петровича Веймарна о влиянии дисперсионной среды на свойства металла нашла продолжение в твердотельном гидридном синтезе [22]. Этот энерго- и ресурсосберегающий метод позволяет получать наноструктурированные металлы и материалы с улучшенными свойствами [10]. Исследуются планарные структуры меди на пористой керамике для электронной эмиссии [17], а также композиты на основе меди, модифицированные фуллеренами [12], для создания материалов с новыми электрофизическими характеристиками [14].

3. **Фотокатализ и экологические приложения.** Веймарн изучал коллоидные системы металлов, а сегодня его идеи находят применение в решении экологических задач. Как показано в работе [4], комбинация золь-гель синтеза и темплатного метода позволяет создавать сферические слоистые структуры $Ag\text{-}SiO_2\text{-}TiO_2/TiO_2\text{-}Ag$. Модификация диоксида титана наночастицами серебра для сдвига края поглощения в видимую область спектра за счет поверхностного плазмонного резонанса – это современное воплощение идей Веймарна об управлении свойствами дисперсных металлов. При этом авторы решают и практическую проблему, актуальную для наследников работ Веймарна: они создают не порошковый, а сферический катализатор (232–653 мкм) с развитой мезопористой структурой, что решает проблему фильтрации, характерную для ультрадисперсных систем, и облегчает его промышленное применение.

4. **Плазменные нанотехнологии и функциональные покрытия.** Современные исследования вышли далеко за рамки химических методов синтеза. Активно развиваются плазменные методы [13]. На кафедре общей и технической физики СПГУ в 2018 г. сделано открытие (Диплом 509) в области получения наноуглеродных структур, включая графен в среде низкотемпературной плазмы [13, 18]. Исследование плазменных нанотехнологи имеет большие перспективы для решения задач энергетики и синтеза новых материалов, в том числе функциональных покрытий и сверхчистого корунда [13, 14, 18]. Эти методы позволяют получать материалы, недоступные во времена П. Веймарна, но решают они ту же фундаментальную задачу – управление дисперсностью и свойствами на уровне наночастиц.

5. **Нанометаллургия и извлечение благородных металлов.** Одним из направлений с высокой практической значимостью, выросших из работ Веймарна по коллоидному золоту, является нанометаллургия. Изучаются проблемы потерь нанодисперсного золота в процессах обогащения упорных руд, где золото присутствует в коллоидной форме [20, 21]. Разрабатываются новые критерии и гравитационные методы для эффективного извлечения тонкого и нанозолота, что имеет большое значение для повышения рентабельности горнометаллургических комбинатов [6]. В частности, в работах под руководством члена-корреспондента РАН Т.Н. Александровой [1, 2] проводится математическое моделирование и обоснование критериев гравитационного обогащения, учитывающих не только плотность минералов, но и крупность частиц, и степень раскрытия сростков. Эти исследования показывают, что для эффективного разделения, особенно при малой разнице в плотностях компонентов, ключевым параметром является скорость их осаждения в суспензии, что демонстрирует прямую связь между фундаментальными основами, заложенными Веймарном, и решением актуальных технологических задач минерально-сырьевого комплекса. Среди других современных направлений следует отметить исследования низкоразмерных металлосодержащих систем, в частности синтез наноструктур металлов (Ag, Cu, Bi) с использованием пористого стекла в качестве матрицы, стабилизирующей размер частиц [16]. В этих работах подтверждается установленное Веймарном положение о снижении температуры плавления металла с увеличением его дисперсности [16, 25].

Заключение. Проведенный анализ демонстрирует непрерывную и плодотворную линию преемственности в исследованиях нанодисперсных систем и материалов в Санкт-Петербургском горном университете и в российской науке в целом на протяжении более чем столетия. От основополагающих работ П.П. Веймарна, через их признание и развитие академическим сообществом России в XXI веке – к современным передовым научным направлениям, университетская школа внесла и продолжает вносить значительный вклад в развитие нанотехнологий. Как показывают современные исследования, от создания биосовместимых гидрогелей и высокоэффективных фотокатализаторов до разработки методов нанометаллургии, фундаментальные идеи Петра Петровича Веймарна о дисперсном состоянии вещества, методах синтеза наночастиц и управлении их свойствами не только подтвердили свою непреходящую актуальность и научную значимость, но и стали основой для инновационных исследований, подтверждающих исторический приоритет в этой области науки.

Список литературы

1. Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2019. 308 pp.
2. Alexandrova, T., Romashev, A., & Potemkin, V. (2020). Justification of evaluation criteria of gold beneficiation ability by gravitational methods. Journal ofApplied Engineering Science, 18(2), 230–237. doi:10.5937/jaes18-26076.
3. Aleskovskiy V.B. The chemistry of supramolecular compounds. St. Petersburg: Izdatelstvo SPbGU, 1996. 256 p.
4. Averkina A.S., Kondrashova N.B., Saenko E.V. el al. Comparative study of texture and rheological properties of AgI-SiO~2~ hybrid powders with different pore structure. Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2023. V. 108 (2). P. 339-351. doi:10.1007/s10971-023-06086-x.

5. Buzaev A.A., Tkachuk V.A., Zakharkiva A.M., Borilo L.P. Synthesis of Spherical and Layered Ag-SiO_2-TiO_2/TiO_2-Ag Structures. Chemistry. 2025. V. 7. P. 1. doi:10.3390/chemistry7010001.

6. Chanturiya V.A., Aleksandrova T.N. Contribution by Russian academy of sciences to the development of minerals concentration and processing technology. Marking the 300th anniversary of the Russian Academy of sciences. Tsvetnye Metally. 2024. No. 1. P. 6-16. doi:10.17580/tsm.2024.01.01.

7. Iwase E. Studies on the coagulation of von Weimarn's Au~F~-sols. Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1929. V. 4. No. 5. P. 120-125.

8. Kashima K. An eminent Russian chemist. Industrial and Engineering Chemist. 1924. V. 16. No. 5. P. 540-541.

9. Khisamutdinova N.V. Chemist Petr P. Weymarn in Russia and Japan. Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk. 2011. No. 5. P. 134-141.

10. Kuznetsov N.T., Novotortsev V.M., Zhabrev V.A., Margolin V.I. Fundamentals of Nanotechnology. Moscow: Publishing House "Binom. Laboratory of Knowledge", 2014. 397 p.

11. Latif W.A., Al-Owaidi M.N. Review article: Sol-gel method, "synthesis and applications". World Journal of Advanced Engineering Technology and Science. 2023. V. 8. No. 2. P. 160-166. doi:10.30574/wjaets.2023.8.2.0071.

12. Letenko D.G., Ivanov A.S., Fitsak V.V. Preparation of fullerenes and their derivatives and their introduction into copper alloys. Tsvetnye Metally. 2023. №8. P. 46-50. doi:10.17580/tsm.2023.08.08.

13. Mustafaev A.S., Grabovskiy A.Y., Sukhomlinov V.S., Shtoda E.V. Technology for Monitoring the Surface Emission Inhomogeneity in Plasma Electronics Devices. Journal of Applied Physics. 2024. No. 20. pp. 1–12. doi:10.1063/5.0233459.

14. Mustafaev A.S., Sukhomlinov V.S., Bazhin V.Yu., Bukovetskiy N.A., Surov A.V. Plasma technology for producing ultrapure corundum. Tsvetnye Metally. 2024. No. 4. pp. 21-29. doi:10.17580/tsm.2024.04.03.

15. Ostwald Wo. P.P. von Weimarn, 1879-1935. KolloidZeitschrift. 1936. Bd. 74. No. 1. P. 1-10. doi:10.1007/BF01593149.

16. Pak V.N., Golov O.V., Grabow V.M., Stozharov V.M., Demidov E.V. Porous glass as a reactor for the synthesis of bismuth nanoparticles. Journal of General Chemistry. 2015. V. 85. No. 10. P. 1600-1604. doi:10.1134/S1070363215100035.

17. Pak V.N., Lapatin N.A., Pronin V.P., Yachmenova L.A. Obtaining and electronic emission of planar structures of metallic copper on a porous ceramic substrate. Tsvetnye Metally. 2021. №5. P. 55-59. doi:10.17580/tsm.2021.05.06.

18. Popova A.N., Klimenkov B.D., Grabovskiy A.Y. Scientific School of Plasma Nanotechnologies and Plasma Power Engineering in Mining University. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2021. Vol. 29, Iss. 2. pp. 317–336. doi:10.18500/0869-6632-2021-29-2-317-336

19. Rambidi N.G., Berezkun A.V. Physical and chemical fundamentals of nanotechnology. Moscow: Fizmatlit, 2009. 456 p.

20. Sanakulov K., Ergashev U.A., Khamroev I.O., Fuzaylov O.U. A new approach to the classification of refractory gold ores: A case study of Kyzylkum deposits. Tsvetnye Metally. 2023. No. 9. P. 22-30. doi:10.17580/tsm.2023.09.02.

21. Sanakulov K.S., Khamroev I.O. Developing refractory gold ore depostits of Central Kyzylkums of Western Uzbekistan. Zolotodobycha. 2022. No. 7. P. 68-73.

22. Syrkov A.G., Makhovikov A.B., Tomaev V.V., Taraban V.V. Priority in the field nanotechnologies of The Mining University in Saint Petersburg – a modern centre for the development of new nanostructured metallic materials. Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. P. 5-13. doi:10.17580/tsm.2023.08.01.

23. Vishnevetskii D.V., Mekhtiev A.R., Averkin D.V., Polyakova E.E. Cysteine-Silver-Polymer Systems for the Preparation of Hydrogels and Films with Potential Applications in Regenerative Medicine. Gels. 2023. V. 9. No. 12. P. 924. doi:10.3390/gels9120924.

24. Weimarn P.P. A new classification of the states matter and the basic low of dispersoilogy. Journal of Mining Institute. 1912. V. 4. P. 128-143.

25. Weimarn P.P. A relationship between the dispersion degree a solid crystal body and its melting point. Journal of Mining Institute. 1911. V. 3. P. 100-102.

26. Weimarn P.P. Kagan I.B. A simple general method to obtain a body in the state of solid kolloidal solutions of any dispersion starting from molecular one. Journal of Mining Institute. 1910. V. 2. P. 398-400.

27. Weimarn P.P. On the numerical data of dispersoidology. Journal of Chemical Education. 1926. V. 3. No. 4. P. 373-381.

28. Weimarn P.P. Studies on the dispersoidal synthesis of gold by means of alkaline formaldehyde solutions. Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1929. V. 4. No. 2. P. 35-47.

29. Weimarn P.P. Studien über dispersoide Synthese des Goldes. Kolloid-Zeitschrift. 1926. V. 39. P. 166-172. doi:10.1007/BF01428158

30. Weimarn P.P. The impotance of colloid chemistry for different branches of natural science: lecture on the colloid chemistry from October 12 of 1910 in Imperial St. Petersburg State University. 1911. V. 3. P. 127-131.

31. Zhabrev V.A., Kalinnikov V.T., Margolin V.I., Nikolaev A.I. etal. Physicochemical processes of synthesis of nanosized objects. St. Petersburg: Elmor, 2012. 328 p.

ФЛОТИРУЕМОСТЬ ТОНКОВКРАПЛЕННЫХ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ РУД

Гаврилова А.Е.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, nastasg02@mail.ru

Научный руководитель: Александрова Т.Н.
доктор технических наук, профессор, зав.каф. Обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты оценки распределения пробы тонковкрапленной золотосульфидной руды по флотируемости при вариации состава собирательной смеси. Приводится анализ актуальности данного исследования в контексте вовлечения в переработку труднообогатимых руд для нахождения эффективного реагентного режима при флотации упорных золотосодержащих руд. Установлена возможность применимости полученных результатов для имитационного моделирования флотационного передела.

Ключевые слова: кинетика флотации, флотируемость, реагентный режим, тонковкрапленные золотосодержащие руды, скорость флотации.

Введение. В настоящее время одной из основных проблем обогатительного процесса является ухудшение качества исходного сырья при неизменных требованиях к конечным продуктам, что обусловлено вовлечением в переработку руд с низким содержанием ценного компонента и его тонкой вкрапленностью [1, 2]. Одним из наиболее распространенных направлений для совершенствования технологий является процесс флотации, как наиболее универсальный метод обогащения сырья. Флотация характеризуется гибкостью и вариативностью применяемых реагентов и времени процесса, благодаря чему может быть применена при обогащении практически любых видов сырья, различных по технологическим свойствам [3, 4]. В общем понимании, процесс флотационного обогащения характеризуется тремя основными параметрами: реагентным режимом, свойствами сырья и техническими параметрами аппарата. Свойства сырья и конструктивные особенности аппаратов для флотации при промышленном производстве являются менее адаптивными параметрами для решения задач по вовлечению в переработку труднообогатимого сырья, в то время как реагентный режим легко может быть скорректирован под параметры сырья. Однако правильное обоснование подобных решений должно быть основано на оценке флотационной способности компонентов сырья [5].

Методы. В качестве объекта исследований выступала проба золотосодержащей руды, основными рудными минералами в которой являлись пирит и арсенопирит. Кинетические исследования флотационного обогащения золотосодержащей сульфидной руды выполнялись на специализированной аппаратуре – JK Batch Flotation Test Cell. В работе использован кинетический подход к определению флотируемости, где она интерпретировалась как распределение материала по узким фракциям с фиксированными значениями констант скорости флотации [2]. Анализ производился при помощи решения системы уравнений кинетики флотации I порядка:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{БФ}}(t) = \varepsilon_{0_{\text{БФ}}}(1 - e^{-k_1 t}) \\ \varepsilon_{\text{СФ}}(t) = \varepsilon_{0_{\text{СФ}}}(1 - e^{-k_2 t}) \\ \varepsilon_{\text{МФ}}(t) = \varepsilon_{0_{\text{МФ}}}(1 - e^{-k_3 t}) \\ \varepsilon(t) = \varepsilon_{\text{БФ}} + \varepsilon_{\text{СФ}} + \varepsilon_{\text{МФ}} + \varepsilon_{\text{НФ}} \end{cases}$$

где $\varepsilon_{\text{БФ}}(t), \varepsilon_{\text{СФ}}(t), \varepsilon_{\text{МФ}}(t), \varepsilon_{\text{НФ}}(t)$ – значение извлечения компонента в конкретный момент времени, соответственно, быстрофлотируемой, среднефлотируемой, медленнофлотируемой и нефлотируемой фракций, %; $\varepsilon_{0_{\text{БФ}}}, \varepsilon_{0_{\text{СФ}}}, \varepsilon_{0_{\text{МФ}}}$ – максимально возможное суммарное

извлечение компонента в концентрат, соответственно, быстрофлотируемой, среднефлотируемой, медленнофлотируемой и нефлотируемой фракций, %; k – значения констант скорости флотации для различных фракций флотируемости, $с^{-1}$.

Результаты. При переработке тонковкрапленных золотосодержащих сульфидных руд важной задачей является максимизация выхода тесно ассоциированных с золотом минералов в виде пирита и арсенопирита в пенный продукт в качестве быстрофлотируемой фракции. При исследовании данного типа руды использовался кинетический подход с исследованием значений констант скорости флотации. На основании экспериментальных результатов кинетики флотации. Были установлены распределения обогащаемого материала по классам флотируемости при применении различных сульфгидрильных собирателей и их смесей на основе комбинаций ксантогенатов и диалкилдитиофосфатов. Установлено, что применение смесей собирателей обеспечивает перераспределение компонентов, ассоциированных с золотом в быстрофлотируемую и среднефлотируемую фракции, что обеспечивает наибольшее извлечение золота. Применение более разветвленных ксантогенатов и дитиокарбаматов в смеси приводит к большему перераспределению мышьяка в концентрат, когда как при применении в смеси аэрофлота происходит большее перераспределение серы в концентрат.

Заключение. Таким образом, кинетический подход к определению флотируемости компонентов тонковкрапленной золотосодержащей руды позволяет оценить распределение материала по фракциям, основываясь на скорости их извлечения в пенный продукт. Это, в свою очередь, является основой для подбора эффективных режимов флотации с применением методов имитационного моделирования для вовлечения в переработку упорных золотосодержащих труднообогатимых руд.

Список литературы

1. В.А. Чантурия, Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья: Материалы международной конференции, Екатеринбург, 29 сентября – 04 2025 года. – Екатеринбург: Форт-Диалог Исеть, 2025. – 525 с. – ISBN 978-5-6047797-5-0. – DOI 10.21440/978-5-6047797-5-0-2025-3-510. – EDN JRICZR.
2. T.N. Aleksandrova, Justification for Criteria for Evaluating Activation and Destruction Processes of Complex Ores / T. Aleksandrova, N. Nikolaeva, A. Afanasova [et al.] // Minerals. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – P. 684. – DOI 10.3390/min13050684. – EDN NSRDPP.
3. Г.В. Митрофанова, Поиск новых комплексообразующих реагентов для флотации медно-никелевых руд / Г.В. Митрофанова, Е.В. Черноусенко, Е.А. Базарова, А.П. Тюкин // Цветные металлы. – 2019. – № 11. – С. 27-33. – DOI 10.17580/tsm.2019.11.02. – EDN TSQLAI.
4. Матвеева, Т.Н. Перспективные реагенты для извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья / Т.Н. Матвеева, Н.К. Громова, Л.Б. Ланцова // Записки Горного института. – 2024. – Т. 269. – С. 757-764. – EDN XAAEGH.
5. Кузнецов, В.В. Развитие методов определения флотируемости тонковкрапленных сульфидных руд с применением комплексного вероятностно-кинетического подхода / В.В. Кузнецов, А.Я. Безверхняя, В.С. Булатова // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы XXVIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXI Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Уральский государственный горный университет ; Горно-металлургическая секция РАЕН; ООО «Таилс КО». – Екатеринбург: ООО «Типография ФортДиалог», 2023. – С. 372-376. – EDN NCYMRI.

УДК 622.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОГАТИМОСТИ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СЕРЫ

Гапеева А.Е.
научный сотрудник, АО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, gapeeva.ae@mekhanobr.com

Научный руководитель: Таранов В.А.
к.т.н., начальник отдела технологических исследований, АО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В докладе представлены результаты исследования обогатимости железной руды с высоким содержанием серы. Приведены результаты опытов по подбору реагентного режима при обратной флотации пирротина, рассмотрено применение и влияние операции оттирки магнитного продукта перед обратной флотацией. Показано, что использование данной операции совместно с реагентом-диспергатором позволяет снизить содержание серы в камерном продукте до 0,3% при извлечении серы в пенный продукт 91,73%.

Ключевые слова: железная руда, магнетит, обратная флотация, флотация пирротина, пирротин, моноклинный пирротин.

Мировой рынок железной руды устойчиво растёт: к 2026 году прогнозируется объём 2,7 млрд тонн за счёт высокого спроса в строительной и автомобильной отраслях[1]. В России усиливается тенденция к импортозамещению и самообеспеченности.

Объект исследований – технологическая проба железной руды магнезиально-железистого скарнового типа массивной текстуры. Вещественный состав определён методами оптического, рентгенофазового (РФА), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), химического и фазового анализов.

Минеральный состав: рудные минералы – 54 % (магнетит – 40,8 %, гематит (мартит) – 3,6 %, гетит – 3,0 %, пирротин – 6,2 %, пирит – 0,4 %); нерудные – 45,7 % (пироксены – 12,2 %, амфиболы – 7,4 %, эпидоты – 5,8 % и др.). По данным рентгеноструктурного анализа пирротин присутствует в двух полиморфных модификациях (моноклинной и гексагональной). Химический состав: $Fe_{общ.}$ – 39,6 %, $S_{общ.}$ – 2,63 %, SiO_2 – 20,1 %.

Исследования проводились по технологии, включающей крупное дробление, трехстадиальное измельчение, стадиальную мокрую магнитную сепарацию и обратную сульфидную флотацию [1-4].

По данным минералогического анализа, концентрат III стадии ММС преимущественно состоит из свободного магнетита (83,1 %, <40 мкм). Пирротин (6,4 %) представлен свободными зёрнами 10–70 мкм, часто с магнетитовой «рубашкой», единичными сростками с пиритом и редкими окисленными зёрнами (20–30 мкм). Сростки магнетита с пирротином и нерудные минералы встречаются редко. Высокое содержание серы (3 %) в магнитном продукте III стадии ММС, обусловленное присутствием магнитного моноклинного пирротина, требует применения обратной флотации [5-9].

Для удаления серы из магнетитовых концентратов применяется флотация пирротина в кислой среде с использованием собирателя (ПАХ), модификатора (Na_2S), активатора ($CuSO_4$) и пенообразователя (Т-92). Так как в проведённых опытах естественный pH не превышал 6, регулятор среды не подавался. Для определения оптимального расхода реагентов проведены серии опытов флотации пирротина из концентрата III стадии ММС (68,0 % $Fe_{общ.}$, 3,20 % $S_{общ.}$).

[1] Отчет зарубежной многопрофильной исследовательской компании «Железная руда – глобальная траектория рынка и аналитика» – Global Industry Analysts, Inc – 2022.

Результаты флотационных опытов при различном расходе реагентов показали:

– с увеличением расхода медного купороса содержание серы в камерном продукте снизилось с 1,86 до 1,37 %, извлечение в пенный продукт возросло с 46,00 до 61,47 %. Принят расход 800 г/т;

– применение Na_2S незначительно снижает содержание серы в камерном продукте (с 1,37 до 1,32 %) при увеличении извлечения менее чем на 1 %. Принят расход 30 г/т;

– увеличение расхода PAX с 800 до 1100 г/т незначительно снижает содержание серы в камерном продукте и повышает её извлечение в пенный продукт. Принят расход 1100 г/т.

Даже при относительно высоком расходе реагентов содержание серы в магнетитовом концентрате снизилось лишь с 3,20 % (питание флотации) до 1,24 % при извлечении серы в пенный продукт 65,82 %. Минералогический анализ камерного продукта по лучшему опыту показал, что основная масса минералов – свободные зёрна магнетита размером 10–80 мкм, а вокруг зёрен пирротина наблюдается «рубашка» из тонких зёрен магнетита толщиной от единиц до 20 мкм. Сделан вывод, что эта «рубашка» препятствует эффективной флотации пирротина.

Для её разрушения проведена серия опытов с диспергатором (жидкое стекло) при сохранении ранее выбранных расходов реагентов. С увеличением его расхода с 200 до 600 г/т содержание серы в камерном продукте снизилось с 1,09 до 0,68 % при извлечении 80,81 %. Микроскопический анализ показал уменьшение толщины магнетитовой оболочки, однако полностью «рубашка» не исчезла. Для решения проблемы рассмотрена операция оттирки, используемая для удаления оксидных пленок [10].

Оттирка в течение 30 минут с добавлением 500 г/т жидкого стекла снизила содержание серы в продукте с 0,68 до 0,37 % при увеличении её извлечения в пенный продукт с 80,81 до 89,85 %. Увеличение времени флотации повышало потери железа без существенного снижения серы в камерном продукте. На основе исследований принято решение незначительно увеличить время флотации и повысить расход реагентов: Na_2S – 50 г/т, PAX – 1300 г/т. Это позволило снизить содержание серы в камерном продукте до 0,30 % и повысить её извлечение до 91,13 % без значительных потерь общего железа.

По данным минералогического анализа, камерный продукт представлен магнетитом (97,1 %), мартитом (1,3 %), пирротином (0,7 %) и незначительным количеством нерудных минералов (0,9 %). Химический состав камерного продукта характеризуется высоким содержанием железа (69,3 % Fe общ., из которых 68 % – Fe магн.). Пустая порода незначительна: SiO_2 – 1,15 %, Al_2O_3 – 0,48 %, MgO – 0,76 %, CaO – 0,45 %. Содержание серы составляет 0,3 %, фосфора – менее 0,1 %. Продукт представляет собой высококачественный магнетитовый концентрат с низким содержанием вредных примесей и шлакообразующих компонентов.

По результатам флотационных опытов сделаны следующие выводы:

1. Минимальное содержания серы в камерном продукте достигнуто с предварительной оттиркой.

2. При флотации после III стадии ММС содержание серы в камерном продукте составило 0,3 %. Реагентный режим:

- оттирка: жидкое стекло – 500 г/т;

- флотация: Na_2S – 50 г/т, $CuSO_4$ – 800 г/т, PAX – 1300 г/т, Т-92 – 150 г/т.

3. Целесообразны дальнейшие опыты по снижению содержания серы в конечном магнетитовом продукте до <0,1 % с двумя операциями флотации (после II и III стадий ММС).

Список литературы

1. Берсенев И.С., Евстюгин С.Н., Подковыркин Е.А., Жуков Ю.С., Щеглов В.Н. Особенности десульфурации железорудных окатышей из высокосернистых концентратов в пересыпающемся слое // Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло: прошлое, современное состояние, будущее: сборник докладов международной научно-практической конференции (27-29 марта 2014 г., г. Екатеринбург). – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – Ч. 1. – С. 78-81.
2. Чантурия Е.Л., Миненко В.Г. Перспективные методы повышения извлечения минералов железа и качества железорудного концентрата // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2020). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – С. 56-60.
3. Arvidson B., Klemetti M., Knuutinen T., Kuusisto M., Man Y.T. & Hughes-Narborough C. Flotation of pyrrhotite to produce magnetite concentrates with a sulphur level below 0.05% w/w // Journal of Minerals Engineering 50-51. 2013. – P. 4-12. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.05.010.
4. Haghmohamadipasan R., Vazifeh Mehrabani J., Pourghahramani P. An Investigation on Removing Sulfur from Hamadan Magnetite Concentrate // Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE). Dec 2020. – Vol. 5(4) – Num. 18 – P. 95-110. DOI: 10.30479/jmre.2020.11636.1321.
5. Armando Correa de Araujo, Matthias R. Flotation of pyrrhotite from magnetite ores – a Kazakh case study // 42nd ABM Ironmaking Seminar. 13rd ABM Iron Ore Symposium. 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (Rio de Janeiro). 2012. – Vol. 6, Num. 6 – P. 1928-1945. DOI: 10.5151/2594-357X-22339.
6. Zhang X., Gu X., Han Y., Parra-Álvarez N., Claremboux V., & Kawatra S. K. Flotation of Iron Ores: A Review // Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2020. – Vol. 42(3) – P. 182-212. https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1689494.
7. Xiaoqin Tang, Ye Chen. A review of flotation and selective separation of pyrrhotite: A perspective from crystal structures // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. – Vol. 32 (4) – P. 847-863. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.06.001.
8. Qinzhi Yuan, Guangjun Mei, Cheng Liu, Qian Cheng, Siyuan Yang. A novel sulfur-containing ionic liquid collector for the reverse flotation separation of pyrrhotite from magnetite // Journal of Separation and Purification Technology. 2022. – Vol. 303 – P. 122189. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122189.
9. Xiaohui Zeng, Xin Hu, Zishuai Liu, Gan Wan. Flotation separation of pyrrhotite from magnetite using sodium fluosilicate (Na2SiF6) as a selective activator // Journal Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2025. – Vol. 61 – Num 4. – P. 207418. DOI: 10.37190/ppmp/207418.
10. Каменева А.А., Рухленко Е.Д. Пути повышения качества магнетитового концентрата ОАО «Ковдорский ГОК» // Обогащение руд. 2002. – №1 – С. 27-31. ISSN: 0202-3776.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АЭРАЦИИ ПРИ ФЛОТАЦИИ: БОЛЬШАЯ РОЛЬ МАЛЕНЬКИХ ПУЗЫРЬКОВ

Гатиатуллин Б.Л.
аспирант каф. обогащения полезных ископаемых,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, s245069@stud.spmi.ru

Научный руководитель: Александрова Т.Н.
д.т.н., профессор, зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена применению нейросетевых технологий для определения параметров аэрации во флотационном обогащении. Использованы нейронные сети для сегментации пузырьков и определения параметров пенного слоя. Предложен критерий оценки селективности пенообразователя, связывающий диаметр пузырьков в пульпе и пене. Определены оптимальные диапазоны размеров пузырьков для пенообразователей МИБК и ОПФ, обеспечивающие максимальную селективность извлечения материала в пенный продукт.

Ключевые слова: флотация, машинное зрение, нейронные сети, аэрация, пенный слой, кинетика флотации.

Введение. Флотационные методы обогащения получили широкое распространение в переработке минерального сырья благодаря своей универсальности и селективности [1]. При этом в качестве направления интенсификации флотационного обогащения, помимо адаптации реагентного режима, являющегося основным механизмом обеспечения эффективности процесса, можно также рассматривать подход, включающий управление режимом аэрации, как инструмент более тонкой настройки. В качестве переменных для количественного описания характеристик газовой фазы во флотационном процессе можно использовать параметр удельной интенсивности аэрации Sb [2], а также высоту пенного слоя [3], которые могут быть успешно использованы в совокупности с существующим моделями. Указанные параметры могут позволить, как уточнить существующие модели, что может быть полезно как на этапе проектирования предприятий, так и на этапе промышленной эксплуатации для управления и мониторинга процесса сепарации.

Методы. Современные промышленные решения для анализа пенного и крупности пузырьков активно используют технологию компьютерного зрения, с опорой на классические алгоритмы, требующие настройки в случае активно меняющихся условий [4,5]. Для устранения указанного недостатка в работе используются нейронные сети архитектуры YOLO-26, для решения задач сегментации, при анализе крупности пузырьков, а также для обнаружения объектов при измерениях высоты пенного слоя. Валидация разработанных моделей производилась путем измерения параметров аэрации с использованием разных реагентов-вспенивателей. Полученные результаты обрабатывались методы анализа данных (SSA), включая алгоритм анализа сингулярных спектров, критерий Колмогорова-Смирнова.

Результаты. Сеть для сегментации пузырьков достигла точности детекции 90%. Сравнительный анализ распределений размеров по критерию Колмогорова–Смирнова не выявил статистически значимых различий между нейросетевыми и ручными измерениями ($p\text{-}value$ = 0,64). Разработанный алгоритм позволил показать, что использование различных вспенивателей при одном и том же режиме работы оборудования дает статистически значимые различия в гранулометрических характеристиках пузырьков. Сеть для детекции пенного слоя показала точность 98%. Алгоритм

SSA позволил выделить трендовые и периодические компоненты во временных рядах значений высоты пенного слоя с вкладом более 98% дисперсии. На основе полученных зависимостей предложен критерий E селективности разделения классов флотируемости, связывающий параметр Sb с извлечением раскрытых и нераскрытых фракций.

Обсуждение. Моделирование на основании разработанного критерия показало, что оптимальный диапазон диаметра пузырька по Соутеру для реагента МИБК составляет 1,058–1,089 мм при отношении радиуса пузырька в пене к диаметру к камере D_{cf} флотомашины от 1,302 до 2,098. Для ОПФ значения находятся в интервале 0,868–1,113 мм, а параметр D_{cf} варьируется от 0,559 до 0,931. ОПФ формирует более мелкодисперсную пену. Это согласуется с известными данными об обратной корреляции между стабильностью пены и размером пузырьков [6, 7].

Заключение. Предложен комплексный подход к определению параметров аэрации на основе нейронных сетей, позволяющий вычислять параметр *Sb* для моделирования флотации. Разработанный критерий селективности позволяет численно сравнивать эффективность пенообразователей и может быть использован для совершенствования систем автоматического управления флотацией. Дальнейшие исследования направлены на установление оптимальных значений параметра D_{cf} для различных видов сырья.

Список литературы

1. Fedotov, P.K.; Senchenko, A.E.; Fedotov, K.V.; Burdonov, A.E. Studies to Assess the Possibility of Joint Processing of Various Types of Ores. Obogashchenie Rud 2022, 2022, 10–162. Zhao L., Zhang Q.A Significant Review of Froth Stability in Mineral Flotation // Chemical Engineering Science. 2025. Vol. 302. P. 120738. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120738.
2. Aleksandrova, T.N.; Kuznetsov, V.V. A New Approach to Determining Aeration Intensity in Flotation. J. Min. Sci. 2022, Vol. 58, P. 812–822. DOI: 10.1134/S106273912205012X.
3. Ostadrahimi, M.; Farrokhpay, S.; Gharibi, K.; Dehghani, A.; Aghajanloo, M. Effects of flotation operational parameters on froth stability and froth recovery. J. S. Afr. Inst. Min. Met. 2021, Vol. 121, P. 11–20. DOI: 10.17159/2411-9717/1272/2021.
4. Zhang, H.; Tang, Z.; Xie, Y.; Gao, X.; Chen, Q. A Watershed Segmentation Algorithm Based on an Optimal Marker for Bubble Size Measurement. Measurement 2019, Vol. 138, P. 182–193. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.02.005.
5. Mesa, D.; Quintanilla, P.; Reyes, F. Bubble Analyser—An Open-Source Software for Bubble Size Measurement Using Image Analysis. Miner. Eng. 2022, Vol. 180, P. 107497. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107497.
6. Mesa, D.; Morrison, A.J.; Brito-Parada, P.R. The Effect of Impeller-Stator Design on Bubble Size: Implications for Froth Stability and Flotation Performance. Miner. Eng. 2020, Vol. 157, P. 106533. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106533.
7. Geldenhuys, S.; McFadzean, B. The Effect of Pulp Bubble Size on the Dynamic Froth Stability Measurement. Miner. Eng. 2019, Vol. 131, P. 164–169. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.013.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Глумова А.Д.[1], Костина Е.М.[2]
[1] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, anastasija.glumova@yandex.ru
[2] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Александрова Т.Н.
доктор технических наук, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Поиск новых технологий неразрушающего контроля за качеством минерального сырья является перспективным направлением исследований в контексте обеспечения бесперебойной работы технологического процесса обогатительных фабрик. В данной работе рассмотрена возможность применения гиперспектральной визуализации в видимом и ближнеинфракрасном диапазоне для оценки качества апатитового сырья. Показаны зависимости между метриками спектральных провалов и содержанием основного рудного минерала Хибинского массива. На основании полученных зависимостей даны рекомендации для дальнейших исследований.

Ключевые слова: апатит-нефелиновые руды, гиперспектральная съемка, видимый и ближнеинфракрасный диапазон, контроль качества.

Введение. В рамках разработки стратегий развития стран и организаций приоритетное значение имеет оценка текущего состояния и прогнозирование траектории развития отечественного минерально-сырьевого сектора. [1]. В условиях постоянного снижения качества вовлекаемых в переработку руд особую актуальность приобретают исследования по поиску экологически чистых и ресурсосберегающих технологий обогащения [2]. Данная ситуация характерна и для Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд, где в последние десятилетия наблюдается тенденция по вовлечению в переработку руд с высокой степенью вариации химического и минералогического состава, что негативно сказывается на эффективности обогатительного передела [3]. Традиционные методы оценки качества минерального сырья, такие как рентгенофлуоресцентный [4] и химический анализ [5] образцов, характеризуются значительными временными затратами и высокой стоимостью. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля качества является гиперспектральная визуализация [6], позволяющая получать детальные цифровые данные о минералогическом составе и физико-химических свойствах материалов. Ранними исследованиями [7] было установлено, что апатит магматического происхождения с изоморфными примесями редкоземельных элементов, в частности неодима Nd^{3+}, имеет характерные спектральные признаки в видимом и ближнеинфракрасном диапазонах (400-1000 нм). Таким образом, целью данной работы является установление корреляционной зависимости между спектральными метриками характерных полос поглощения неодима и содержанием апатита в рудах Хибинского массива.

Методы. Для установления корреляционных зависимостей между спектральными метриками и содержанием апатита был проведен эксперимент с использованием искусственных смесей. Измельченные навески апатита и нефелина класса крупности -0,160+0,071 мм смешивались в пропорциях от 0% до 100% апатита с шагом 10%. Выбор данного класса крупности обусловлен необходимостью минимизации влияния крайне мелких пылевидных фракций, которые могут вызывать избыточное рассеяние [8], и в то же время обеспечения достаточной гомогенности смеси для гиперспектрального пикселя.

В данном исследовании применяется гиперспектральная камера Specim IQ, позволяющая получать спектральные данные в видимом и ближнеинфракрасном диапазоне

(400-1000 нм) по 204 полосам с привязкой к двумерному изображению [9]. Для минимизации помех от внешнего освещения опыты проводились в темном помещении, в качестве источников света использовались две галогеновые лампы, установленные симметрично под углом 45° с двух сторон от камеры для минимизации теней [10].

Результаты. Анализ полученных гиперспектральных данных проводился по трем полосам поглощения неодима – 580 нм, 746 нм и 805 нм, что коррелирует со справочными данными. В данном исследовании для оценки интенсивности спектрального провала используются следующие метрики: относительная глубина провала, острота провала, AUC (area under curve – интегральная площадь под кривой), FWHM (full width half maximum – широта кривой на половине высоты). Обработка результатов исследований показала, что полоса поглощения Nd_1 (580 нм) демонстрирует самую высокую чувствительность при высоких концентрациях апатита (максимальная глубина 6,45% при $\beta_{ap} = 100\%$). Однако эта полоса характеризуется самым высоким порогом обнаружения: при содержании апатита ниже 30% сигнал Nd_1 становится нестабильным. Полосы Nd_2 (746 нм) и Nd_3 (805 нм) являются более информативными, т.к. сохраняют четкую динамику по метрикам AUC и остроте провала во всем диапазоне от 0 до 100%. Наиболее информативной метрикой является AUC. В отличие от точечной глубины провала, AUC интегрирует значения по всей ширине полосы, что нивелирует влияние спектрального шума и случайных флуктуаций в отдельных каналах камеры Specim IQ. Был установлен экспоненциальный характер зависимостей для метрик AUC и острота провала.

Обсуждение. Исследование подтверждает возможность использования микропримесей РЗЭ (в частности, неодима) как спектроскопических меток для макроминералов. Тот факт, что в апатит-нефелиновых рудах именно апатит является практически единственным носителем неодима, позволяет экстраполировать данные о концентрации Nd^{3+} непосредственно на содержание апатита.

Заключение. Результаты проведенных исследований показывают перспективность метода гиперспектральной визуализации для оперативного определения качества апатит-нефелиновых руд. Дальнейшие исследования будут включать переход к кусковому материалу апатит-нефелиновых руд, а также работы по установлению крупности, влажности, текстурных особенностей на результаты съемки.

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Cherepovitsyn A., Stroykov G., Nevolin A. Efficiency of Low-Carbon Technologies Implementation at Non-Ferrous Metallurgy Enterprises under the Conditions of Carbon-Regulation Development in Russia // Sustainability (Switzerland). 2023. № 15(24). DOI: 10.3390/su152416640.
3. Tereshchenko S.V., Shibaeva, D. N. Control of Quality Characteristics of Feed for Concentration Factories // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. №1. С. 130-138. DOI: 10.15372/FTPRPI20220114.
4. Robben C., Wortuba H. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining—Past, Present and Future // Minerals. 2019. №9б 523. DOI: 10.3390/min9090523.
5. Дехканов З.К., Арипов Х.Ш., Умаралиева М.Д. Анализ методов обогащения фосфатного сырья // Universum: технические науки. 2025. №3 (132). DOI: 10.32743/UniTech.2025.132.319649.
6. Ehrenfeld A., Egaña A. HIDSAG: Hyperspectral Image Database for Supervised Analysis in Geometallurgy // Scientific Data. 2023. №1. С. 164. DOI: 10.1038/s41597-023-02061-x.
7. Turner D., Rivard B., Visible and short-wave infrared reflectance spectroscopy of REE phosphate minerals // American Mineralogist. 2016. №10. С 2264-2278. DOI: 10.2138/am-2016-5692.
8. Okhala M. Artificial Intelligence-Based Hyperspectral Classification of Rare Earth Element-Related Heavy Mineral Sand // Minerals 2025, 15(10), 1015; https://doi.org/10.3390/min15101015.
9. Рыбников П.А., Бузина Д.А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №11-1. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_55.
10. Natsuo O., Hiromasa N., Optimizing multi-spectral ore sorting incorporating wavelength selection utilizing neighborhood component analysis for effective arsenic mineral detection // Nature portfolio. 2024/ №14. DOI: 10.1038/s41598-024-62166-0.

АДАПТИВНЫЙ СИНТЕЗ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДИБОРИДА ТИТАНА

Гонцуков А.С.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s235102@stud.spmi.ru

Научный руководитель: Горланов Е.С.
д.т.н., заместитель директора, Научный центр «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье представлены предварительные результаты технологической разработки синтеза компактных изделий на основе диборида титана в режимах обжига углеродных и огнеупорных изделий на электродных и огнеупорных предприятиях. По результатам синтеза получены компактные изделия борида титана TiB_2, а также его композиции с углеродом. В перспективе доработка технологических процедур в лабораторных и пилотных условиях позволит реализовать синтез широкой линейки крупногабаритных индивидуальных и композитных изделий в системе Металл-B-C для различных применений, в том числе для электродов и футеровки руднотермических печей, магниевых и алюминиевых электролизеров.

Ключевые слова: диборид титана, композитный материал, низкотемпературный синтез, оксид бора.

Введение. В процессе развития и совершенствования промышленных технологий к конструкционным материалам и изделиям предъявляются повышенные и, в некоторых случаях, специфические свойства и требования к поведению в экстремальных условиях или в агрессивных средах [1, 2, 3]. Диборид титана обладающий в компактном виде высокой прочностью, теплопроводностью, стойкостью против механического износа, агрессивных сред и нейтронного облучения, применяются в качестве термостойких изделий и покрытий, компонентов брони, а также в узлах трения и в ядерных реакторах [4, 5]. Благодаря этим свойствам, диборид титана имеет большой потенциал для применения в огнеупорной и металлургической промышленностях. Однако сложность высокотемпературного (1500÷2000°C) производства порошков этих материалов обуславливает высокую стоимость от 500 до 3000 $/кг [6, 7, 8]. С другой стороны, компактирование тугоплавких материалов с прочной ковалентной связью, высокими температурами плавления и низкими коэффициентами самодиффузии компонентов также требует реализации очень сложных высокотемпературных процессов уплотнения [9, 10]. Эти техники уплотнения позволяют производить только малогабаритные до 400 мм изделия с чрезвычайно высокой стоимостью и только для ответственных применений.

Целью настоящей работы является разработка основ технологии синтеза индивидуальных соединений и композитных материалов на основе диборида титана непосредственно в компактном виде с адаптацией к существующим процессам стандартного промышленного обжига углеродных и/или огнеупорных изделий при температурах 1000÷1100°C.

Обоснование. Производство продукции на огнеупорных и электродных заводах осуществляется последовательным проведением процедур подготовки исходной шихты, подогрева и смешивания со связующим, прессованием и обжигом в печах при температурах от 1000÷1100°C до 2600÷3000°C. Тем не менее, при нагреве и охлаждении огнеупорные и углеродные изделия подвергаются окислительному воздействию воздушной атмосферой и диоксидом углерода CO_2. В этой связи, адаптация технологии синтеза компактных изделий TiB_2 к существующему электродному или огнеупорному производству подразумевает защиту реакционной смеси при её разогреве до температур синтеза. При синтезе TiB_2 в интервале 1050 – 1100°C наиболее приемлемым соединением для защиты от окисления является оксид бора B_2O_3. Другими условиями адаптации технологии синтеза компактных изделий следует считать умеренные экзотермичность химических реакций и объем выделяющихся газов,

а также соотношение мольных объемов твердых продуктов синтеза (V_{sp}) и исходных компонентов (V_{ip}) реакционной смеси $V_{sp}/V_{ip} < 1$ [11].

Для подготовки образцов TiB_2, а также композитов на основе углерода применяли стандартную процедуру смешивания исходных материалов, их прессования и обжига. После каждой заключительной операции синтеза осуществлялся анализ образцов методами рентгенофазового анализа РФА на Shimadzu XRD-6000 (Cu-Kα излучение, сканирование 10-80° 2θ с шагом 0.02°) и/или электронной микроскопии Vega 3 LMH, TESCAN (Чехия).

Результаты. Были получены диборид титана и композиты диборида титана на углеродной основе в компактном виде. Макроструктура образцов диборида титана состоит в основном из зерен TiB_2 размером около 10 мкм с включениями крупных кристаллов до 100 мкм. Периферия крупных кристаллов подвержена незначительному окислению в течение изотермической выдержки в атмосфере углекислого газа. На поверхности компактных образцов диборида титана в атмосфере монооксида углерода формируется оксикарбоборидный слой $TiC_xB_yO_z$, который будет защищать изделие от агрессивной среды в период его эксплуатации.

Заключение

1. Минуя этап получения порошковых материалов и процедуру их компактирования, обоснована и реализована технология синтеза компактных изделий на основе диборида титана.
2. Условия синтеза компактных образцов TiB_2 в лабораторных условиях адаптированы к температурным и атмосферным условиям промышленного производства электродных изделий.
3. В перспективе представленная технология может быть реализована для синтеза широкой линейки крупногабаритных индивидуальных и композитных изделий в системе Ti-B-C-O для различных применений, в том числе для электродов руднотермических печей, магниевых и алюминиевых электролизеров.

Список литературы

1. Bazhin V.Yu., Glazev M.V. (2022) Refractory materials of metallurgical furnaces with the addition of silicon production waste. Non-ferrous Metals, 32–39. https://doi.org/10.17580/nfm.2022.01.05
2. Gabdulkhakov, R.R., Rudko, V.A., Efimov, I., Spektoruk, A.A. (2022). Quality assessment of needle coke used in the production of graphite electrodes for metallurgical furnaces. Tsvetnye Metally, 2022(7), 46-56. https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.05
3. Popov G.G., Bolobov V.I., Oparina A.O., Shvets A.O. (2025) Effect of Hydrogenation on Hardness of Metallic Materials Used in Oil and Gas Industry. International Journal of Engineering 38:295–303. https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.02b.04
4. Andrievski R.A. (2015) Nanostructured titanium, zirconium and hafnium diborides: the synthesis, properties, size effects and stability. Russ Chem Rev 84:540–554. https://doi.org/10.1070/RCR4469
5. Krutskii Yu.L., Cherkasova N.Yu., Gudyma T.S., et al (2021) Diborides of transition metals: Properties, application and production. Review. Part 1. Titanium and vanadium diborides. Izv vysš učebn zaved, Čern metall 64:149–164. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-149-164
6. Lv X., Yin Z., Yang Z., et al (2024) Review on the Development of Titanium Diboride Ceramics. Recent Prog Mater 06:1–48. https://doi.org/10.21926/rpm.2402009
7. Gudyma T.S., Krutskii Yu.L., Maximovskiy E.A., et al (2023) Synthesis of B4C–TiB2 composition powder mixtures by carbidobor reduction using nanofibrous carbon for ceramic fabrication. Izv VUZ Poroshk Met 17:35–45. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-2-35-45
8. Krutskii Y., Maksimovskii E., Petrov R., et al (2021) Synthesis of titanium carbide and titanium diboride for metal processing and ceramics production. Metal Working and Material Science 23:155–166. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2021-23.4-155-166
9. Murthy T.S.R.Ch., Sonber J.K., Sairam K., et al (2016) Development of Refractory and Rare Earth Metal Borides & Carbides for High Temperature Applications. Materials Today: Proceedings 3:3104–3113. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.09.026
10. Chen H., Zou X. (2020) Intermetallic borides: structures, synthesis and applications in electrocatalysis. Inorg Chem Front 7:2248–2264. https://doi.org/10.1039/D0QI00146E
11. Заявка на изобретение №2025120277 от 23.07.2025 «Способ синтеза материалов, содержащих бориды тугоплавких металлов IV-VIB групп», Горланов Е.С., Попов Г.Г., Гонцуков А.С., Мозулев О.А.

УДК 661.666.232

ИНТЕРКАЛИРОВАНИЕ И ТЕРМОРАСШИРЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГРАФИТА С СОЗДАНИЕМ НА ЕГО ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Гришанов К.В.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, qwertykirill579@yandex.ru

Научный руководитель: Горланов Е.С.
д.т.н., заместитель исполнительного директора по научному обеспечению научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе исследованы технологии интеркалирования и терморасширения природного графит месторождения «Союзное» (Еврейская автономная область) для создания композитных электродных материалов структуры C–TiC/TiB2 на основе двух типов углеродной матрицы – терморасширенного графита (ТРГ) и природного графита с коксом и пеком. Разработан лабораторный регламент получения ТРГ методом химического интеркалирования с последующим термоударом при 850-1050°C. Установлено, что традиционные методы интеркалирования растворами кислот сопряжены с образованием значительных объёмов кислых стоков, что ограничивает их промышленное применение. Показано, что введение борсодержащих компонентов обеспечивает формирование стеклофазной защиты в объёме электрода, повышая стойкость к окислению в 2-4 раза; при этом для образцов на основе ТРГ отмечено снижение скорости окисления до отрицательных значений вследствие образования дополнительных защитных фаз. Экспериментально подтверждено снижение удельного электросопротивления пенографита на порядок по сравнению с исходным графитом.

Ключевые слова: пенографит, терморасширенный графит, интеркаляция, природный графит, терморасширение, композитный электрод.

Введение. Подверженность углеродных материалов межслойному внедрению посторонних атомов и ионов носит двойственный характер: с одной стороны, это явление может протекать стихийно под воздействием агрессивных факторов среды агрегата и вызывать деградацию изделий, с другой – при контролируемом интеркалировании становится средством получения новых углеродных материалов с рекордными свойствами.

Деструктивная природа самопроизвольной интеркаляции была выявлена в алюминиевой промышленности в середине XX века. Углеграфитовые катодные блоки электролизёров выходили из строя, что приводило к аварийным остановкам агрегатов. В фундаментальной работе М.Б. Рапопорта (1967) установлено, что причиной разрушения являлось внедрение ионов и атомов натрия из криолит-глинозёмного расплава в кристаллическую решётку углерода. Образующиеся межслойные соединения натрия с углеродом нестабильны при температурных градиентах: они распадаются с циклическим изменением объёма катодной подины, что приводит к её растрескиванию, образованию в теле катода тугоплавких карбидов алюминия и протекания расплава к блюмсам. Для предотвращения данной проблемы применяется технология управляемой предварительной интеркаляции с последующим терморасширением графита [1, 2]. Полученный терморасширенный графит (ТРГ или пенографит) обладает уникальным комплексом характеристик: развитой удельной поверхностью, химической инертностью в агрессивных средах, низкой насыпной плотностью и устойчивостью к повторному внедрению веществ интеркаляции (Na, K, $FeCl_3$ и др.) [2, 3, 4].

Однако для электродных материалов, эксплуатируемых в руднотермических печах и электролизёрах, ключевой проблемой остаётся высокотемпературное газовое окисление. Потери массы от окисления кислородом воздуха в температурном интервале 600-800°C достигают 40-60% от общего расхода электрода [6]. Существующие методы защиты (нанесение покрытий, пропитка составами) обеспечивают лишь временный

эффект на поверхности и в приповерхностном слое, не предотвращая объёмную деградацию материала в процессе длительной эксплуатации [5].

В связи с этим перспективным направлением является создание композитных электродов с объёмной защитой на основе матрицы из ТРГ с синтезом тугоплавких фаз карбида и диборида титана (C–TiC/TiB_2) [6]. Данные фазы, равномерно распределённые в объёме углеродной матрицы, обеспечивают комплексную и долговременную защиту от окислительной среды и воздействия компонентов внедрения на протяжении всего срока службы электрода в металлургическом агрегате. Синтез композитного катодного материала C–TiC/TiB_2 возможен непосредственно в процессе электролиза, что открывает перспективы для создания композитных электродов без использования дорогостоящего порошка TiB_2 [7].

Методы. Для получения композитных электродов использовали два типа углеродной матрицы. Образцы 1 и 2 формировали на основе терморасширенного графита (ТРГ), полученного из природного графита месторождения «Союзное» (марка ГЛ-2) методом химического интеркалирования с последующим термоударом при 850-1050°С [8]. При этом ТРГ для образца 1 синтезировали в системе «графит – H_2SO_4 – HNO_3», а для образца 2 – в той же системе, но с добавлением $K_2Cr_2O_7$. Образцы 3 и 4 готовили на основе природного графита месторождения «Союзное» с добавлением сырого кокса и пека. Шихта сушилась в два этапа при 110°С в течение 8 ч, затем при 150°С в течение 4 ч с периодическим перемешиванием для последующего получения однородной смеси порошка в истирателе. Далее следовал этап прессования при 15 МПа и синтезирующий обжиг при 1050°С в течение 1 ч под слоем кокса.

Фазовый состав изучали с помощью рентгенофазового анализа. Окислительную стойкость композитов определяли изотермическим методом при 710°С в воздушной атмосфере в течение 30 ч с периодическим взвешиванием образцов. Скорость окисления рассчитывалась по потере массы на единицу поверхности. Электрофизические свойства оценивали по зависимости удельного электросопротивления порошка от насыпной плотности.

Результаты. В ходе лабораторных экспериментов удалось успешно синтезировать ИСГ, провести гидролиз и последующее терморасширение. В результате измерения удельного электросопротивления (УЭС) составлен график зависимости УЭС от насыпной плотности исходного природного графита и терморасширенных графитов (рис. 1), один из которых интеркалирован серной и азотной кислотами, а второй синтезирован в системе «графит – H_2SO_4 – HNO_3» в присутствии окислителя бихромата калия $K_2Cr_2O_7$.

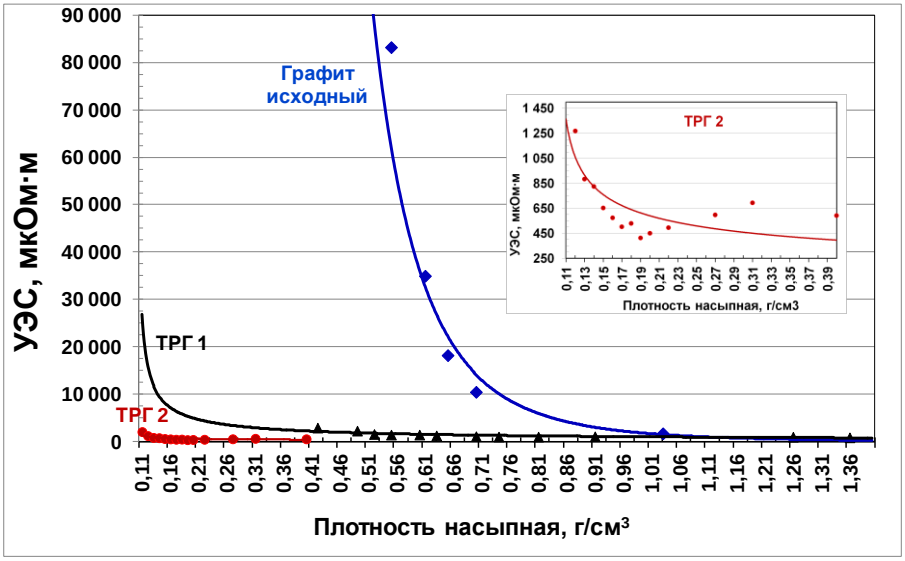


Рис. 1. Удельное электросопротивление (УЭС) природного графита исходного и терморасширенного (ТРГ)
ТРГ 1 – интеркалирован серной и азотной кислотами;
ТРГ 2 – интеркалирован серной, азотной кислотами и бихроматом калия

В ходе исследований получены композитные электроды с синтезированными тугоплавкими фазами на основе двух типов углеродной матрицы. Рентгенофазовый анализ состава образцов приведён в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика составов шихт и фазовый состав образцов

	Образец 1	**Образец 2**	**Образец 3**	**Образец 4**
Тип углеродной матрицы	**ТРГ в системе «графит – H_2SO_4 – HNO_3»**	**ТРГ в системе «графит – H_2SO_4 – HNO_3» с добавлением $K_2Cr_2O_7$**	**Природный графит**	**Природный графит**
Содержание компонентов шихты, мас. %				
Углеродная матрица	15,5	15,5	54,0	55,0
Бор B	14,5	14,5	6,0	-
B_2O_3 (реакция)	-	-	3,0	8,0
B_2O_3 (защита)	16,0	16,0	9,0	10,0
TiO_2 (рутил)	54,0	54,0	-	-
Ti (металл.)	-	-	10,0	6,0
Кокс сырой	-	-	1,0	4,0
Пек	-	-	17,0	17,0
Основные фазы после обжига	$TiBO_3$, TiO_2, TiB_2, C	$TiBO_3$, TiO_2, TiB_2, C	TiB_2, TiC_xO_{1-x}, TiO_2, Ti_2B_5, C	TiB_2, TiC_xO_{1-x}, TiO_2, Ti_2B_5, C

Источник: собственная разработка автора на основе данных РФА.

Испытания на окисление при 710°C в воздушной атмосфере (30 ч) выявили существенные различия в окислительной стойкости композитов. Образцы 1 и 2 продемонстрировали высокую стойкость: скорость окисления снизилась с 2,2 и 3,7 до -0,1 и -0,2 мг/(см^2·ч) соответственно. Образцы 3 и 4 показали худшие результаты: скорость окисления составила 1,4 и 3,6 мг/(см^2·ч) после 30 ч выдержки соответственно.

Обсуждение. Проведённые исследования подтверждают обратно пропорциональную зависимость электросопротивления от насыпной плотности углеграфитовых материалов (рис. 1). Наибольшей электропроводностью обладает пенографит, особенно после интеркалирования с бихроматом калия; однако при прессовании различия между модифицированными и природными графитами нивелируются.

Различия в окислительной стойкости композитов обусловлены не только разным содержанием защитного B_2O_3, но и природой углеродной матрицы. В образцах 1 и 2 на основе пенографита B_2O_3 способствует образованию стеклофазы $TiBO_3$, блокирующей доступ кислорода и обеспечивающей объёмную защиту [5]. К концу испытаний наблюдается отрицательная скорость окисления, что обусловлено дополнительным окислением TiB_2 до $TiBO_3$ с увеличением массы образца [5]. В образцах 3 и 4, матрица которых сформирована из природного графита, кокса и пека, а содержание защитного B_2O_3 ниже, доминирует карботермическое восстановление с выделением CO, что увеличивает пористость и снижает барьерные свойства. Таким образом, введение B_2O_3 позволяет сформировать стеклофазный барьер $TiBO_3$, повышающий окислительную стойкость композитов в 2-4 раза по сравнению с материалами без такой защиты.

Заключение. Разработан лабораторный регламент получения композитных электродов C–TiC/TiB_2 на основе терморасширенного и природного графита месторождения «Союзное». Показано, что введение борсодержащих компонентов обеспечивает формирование стеклофазной защиты в объёме электрода, повышая стойкость к окислению

в 2-4 раза; экспериментально подтверждено снижение УЭС пенографита на порядок по сравнению с исходным графитом (рис. 1). Однако традиционный кислотный метод интеркалирования сопряжён с образованием значительных объёмов кислых стоков (до 180 тыс. л на 1 т продукта) [9, 10], что ограничивает его промышленное применение. В связи с этим сделан вывод, что для масштабирования технологии предпочтительны бескислотные методы модификации графитовой матрицы, например, с использованием соединений щелочных металлов.

Список литературы

1. Терещенко М.Д., Ябуров М.И., Лукоянов В.Ю., Хименко Л.Л. Обзор существующих методов получения интеркалированного графита // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – №71. – С. 174-181. – EDN YQWCIY.
2. Сорокина Н.Е. Интеркалированные соединения графита с кислотами: синтез, свойства, применение: автореф. дис. д-р. хим. наук: 02.00.01. – М., 2007. – 46 с. – EDN: ZNGEWJ.
3. Ионов С.Г. Электронный транспорт и физико-химические свойства интеркалированных соединений графита: автореф. дис. д-р. физ.-мат. наук: 01.04.07. – М., 2016. – 45 с. – EDN ZQBKGB.
4. Антонова К.С., Гырдымова А.А., Ноздрюхин А.Д., Кобелева А.Р. Способы получения интеркалированного графита // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – №4. – С. 172-176. – EDN JWAAUO.
5. Gorlanov E.S., Sizyakov V.M., Sharikov F.Yu., Shaikina K.D., Mozulev O.A. Carbon-based composite electrodes C – TiC/TiB2. Part 1. Synthesis and oxidizability of composites // Non-Ferrous Metals. – 2024. – №2. – С. 14-23. – DOI 10.17580/nfm.2024.02.03.
6. Горланов Е.С., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю., Спекторук А.А., Бутакова Т.В. Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов. Обзор // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28 – № 3. – С. 513-537. – EDN AEDFQP.
7. Горланов Е.С., Леонтьев Л.И. Направления технологического развития алюминиевых электролизеров // Записки Горного института. – 2024. – №266. – С. 246-259. – EDN PYSEVM.
8. Кравцов А.В., Шорникова О.Н., Булыгина А.И. Влияние гранулометрического состава природного графита и способа синтеза на пористую структуру терморасширенного графита // Журнал физической химии. – 2022. – Т. 96 – № 12. – С. 1797-1804. – DOI 10.31857/S0044453722120172. – EDN IESSFG.
9. Гильманшина Т.Р., Дубова И.В., Ольшевский М.Ю., Королева Г.А., Твердохлебова Т.В. Повышение экологичности технологии окисления графитов // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29 – № 8. – С. 8-12. – DOI 10.18412/1816-0395-2025-8-8-12.
10. Гильманшина Т.Р., Ольшевский М.Ю., Дубова И.В., Доровская А.А. Цикличная технология интеркалирования графитов // Обогащение руд. – 2025. – №4. – С. 3-7. – DOI 10.17580/or.2025.04.01.

УДК 661.666.232

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИНТЕРКАЛИРОВАНИЯ И ТЕРМОРАСШИРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГРАФИТА

Гришанов К.В.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, qwertykirill579@yandex.ru

Научный руководитель: Горланов Е.С.
д.т.н., заместитель исполнительного директора по научному обеспечению научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ химических и электрохимических методов интеркалирования и терморасширения природного графита. Рассмотрены основные подходы к управляемому синтезу интеркалированных соединений графита (ИСГ), включая системы «графит – кислота – окислитель» и электрохимическое анодное окисление. Приведены результаты лабораторных экспериментов по синтезу ИСГ и получению терморасширенного графита (ТРГ). Показано, что удельное электросопротивление ТРГ значительно ниже, чем у исходного природного графита, и зависит от типа интеркалирующего агента. Обсуждены преимущества и ограничения химических и электрохимических методов интеркаляции. Отмечены ключевые факторы, влияющие на свойства конечного продукта, и перспективные области применения модифицированного графита, в частности, в электродах для алюминиевых и магниевых электролизёров.

Ключевые слова: пенографит, терморасширенный графит, интеркаляция, природный графит, терморасширение, углеграфитовый электрод, интеркалированные соединения графита, слоистые соединения графита.

Введение. Интеркаляция углерода может начинаться произвольно в зависимости от внешних факторов и оказывать разрушительное воздействие на углеродсодержащие материалы. На это деструктивное явление обратили внимание в алюминиевой промышленности в середине XX века. Углеграфитовые катодные блоки разрушались с последующим аварийным отключением алюминиевых электролизёров. Фундаментальными исследованиями М.Б. Рапопорта 1967 года было установлено, что интеркаляция ионов и атомов натрия из расплава электролита приводила к образованию его межслойных соединений с углеродом, которые под действием градиента температуры разрушались, а сама катодная подина увеличивалась в объёме. Этот процесс имеет циклический характер и сопровождается деградацией углеродного материала. В целях решения этой проблемы проводят управляемую предварительную интеркаляцию углеграфитового материала и терморасширение [1, 2]. Благодаря чему, помимо увеличенной стойкости к коррозии и воздействию веществ внедрения, можно получать передовые углеграфитовые материалы с рекордными показателями, такие как терморасширенный графит (ТРГ).

Терморасширенный графит (или пенографит) представляет значительный научный и промышленный интерес благодаря уникальному комплексу свойств, включая развитую удельную поверхность, химическую стабильность в агрессивных средах и низкую насыпную плотность [3, 4, 5]. Мировые исследования в данной области охватывают широкий спектр методов управляемого синтеза с использованием различных интеркалирующих агентов. Однако, несмотря на длительную историю изучения, сохраняются проблемы, связанные с управлением стадийностью процесса, воспроизводимостью свойств конечного продукта, экономической эффективностью и термостабильностью продуктов некоторых технологий синтеза.

Целью данной работы является комплексный сравнительный анализ методов интеркалирования и терморасширения природного графита. В задачи работы вошли анализ существующих методов интеркалирования и терморасширения природного графита; изучение влияния различных параметров синтез-систем на свойства продукта; систематизация данных о сферах применения модифицированного графита; поиск возможных путей решения проблем синтеза ИСГ и оценка практического применения модифицированного и терморасширенного графитов.

Методы. В основе методологии исследования лежит системный анализ научных публикаций, патентов и экспериментальных данных в области синтеза интеркалированных соединений графита и его термического расширения. Изучались как химические, так и электрохимические технологии интеркалирования природного графита.

Химический способ интеркалирования основан на прямой реакции твёрдых графитовых материалов с интеркаляционными соединениями (обычно в жидкой или паровой фазе) [1]. В электрохимическом методе использовалась гальваническая ванна, где в качестве анода выступал графитовый электрод, электролит представлен раствором интеркалата, катодом служил электрод из инертного металла [1]. Химические методы включали анализ процессов интеркаляции в системах «графит-кислота-окислитель». Исследовались классические системы с серной кислотой (H_2SO_4) в присутствии окислителей (HNO_3, $KMnO_4$, $K_2Cr_2O_7$) [2, 6], процессы самовнедрения азотной кислоты [7], а также синтез в тройных системах, таких как «графит-HNO_3-H_2SO_4» и «графит-HNO_3-H_3PO_4». Электрохимические методы были проанализированы на основе результатов анодного окисления графита в различных электролитах: растворах азотной, серной, фосфорной кислот и их смесях [1].

Результаты. В ходе лабораторных экспериментов удалось успешно синтезировать ИСГ, провести гидролиз и последующее терморасширение. В результате измерения удельного электросопротивления (УЭС) составлен график зависимости УЭС от насыпной плотности исходного природного графита и терморасширенных графитов (рис. 1), один из которых интеркалирован серной и азотной кислотами, а второй синтезирован в системе «графит-HNO_3-H_2SO_4» в присутствии окислителя бихромата калия $K_2Cr_2O_7$.

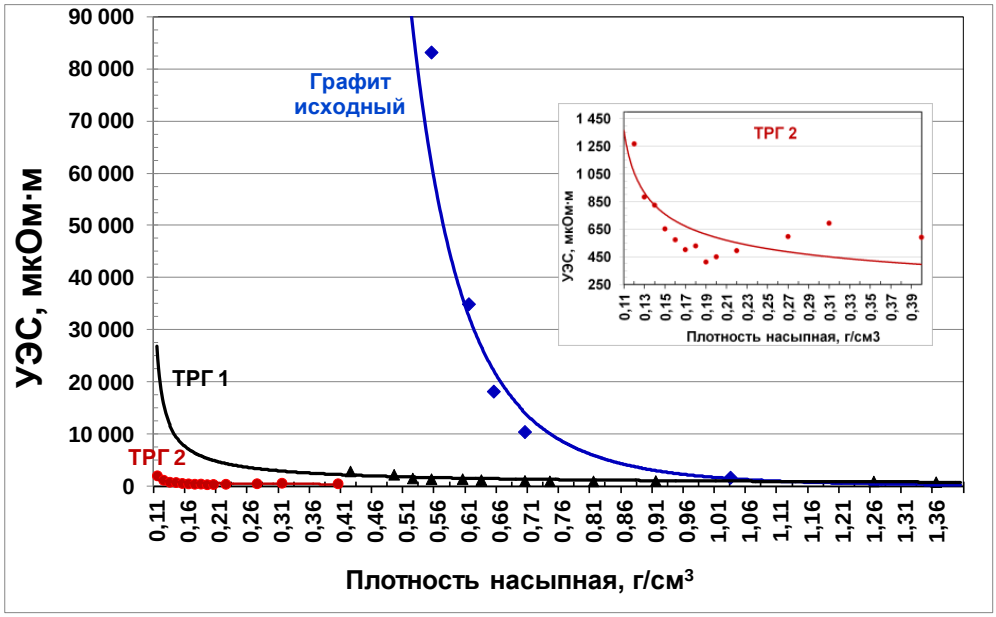


Рис. 1. Удельное электросопротивление (УЭС) природного графита исходного и терморасширенного (ТРГ)
ТРГ 1 – интеркалирован серной и азотной кислотами;
ТРГ 2 – интеркалирован серной, азотной кислотами и бихроматом калия

Обсуждение. Проведённые лабораторные исследования позволяют оценить целесообразность модифицирования структуры углеграфита. Вне зависимости от типа графитового материала связь удельного электросопротивления и насыпной плотности описывается степенной зависимостью. Электросопротивление тем больше, чем меньше насыпная плотность углеграфитового материала. Наибольшей электропроводностью характеризуется пенографит, причём предварительное интеркалирование материала бихроматом калия крайне положительно влияет на электропроводность графитовой структуры. Далее в порядке убывания электропроводности графиты располагаются в следующем порядке: терморасширенный графит без добавления бихромата калия, природный графит после сушки и исходный невысушенный природный графит. Однако, как следует из анализа графика удельного электросопротивления, электропроводность графитовой порошковой матрицы при повышении насыпной плотности, то есть при прессовании материала, перестаёт значимо отличаться у природных и модифицированных графитов. Очевидно, что такой зависимости подвержены все виды графитов со всевозможными вариациями модификаций.

Стоит отдельно отметить, что благодаря предварительному управляемому интеркалированию материал в меньшей мере будет восприимчив к веществам внедрения из агрессивной среды, что выгодно выделяет его в сравнении с существующими электродными материалами в алюминиевых электролизёрах, дуговых сталеплавильных и рудотермических печах [8, 9, 10].

Заключение. Главным преимуществом химических технологий интеркалирования однозначно является лёгкость управления этими процессами и контроля параметров конечного продукта. При изменении концентрации реагирующих веществ можно менять состав полученного ИСГ, о чём свидетельствует получение систем переменного состава, который зависит от соотношения кислот в растворе интеркалирующих агентов.

Благодаря отсутствию лишнего окислителя в электрохимическом способе продукт взаимодействия компонентов системы обладает гораздо более высокой химической чистотой. За счёт электрического тока достигается повышенный контроль и стабильная управляемость протекания внедрения инородных веществ в углеродную матрицу. Варьируя значение силы тока, можно влиять на глубину внедрения агентов интеркаляции. Электрохимические методы не получили широкого распространения в промышленной среде ввиду дороговизны аппаратно-технического обеспечения процессов. Химические методы отличаются большей рентабельностью, что способствует интенсификации их развития.

Материалы из модифицированного и терморасширенного графита имеют огромные перспективы во многих областях современной жизни: металлургии, медицине, нефтяной, экологической, газовой, трубопроводной и химической отраслях. Широта сфер применения обусловлена многообразием свойств различных интеркалированных соединений графита, которые проявляются вплоть до формирования различных субпродуктов на основе графита, а также структурой, защищённой от разрушительного воздействия внешней интеркаляции. Наиболее перспективным направлением использования терморасширенного графита определены электроды для алюминиевых и магниевых электролизёров, дуговых сталеплавильных и рудотермических печей. В объёме электрода исключено всякое нежелательное образование соединений типа графит-интеркалат.

Список литературы

1. Терещенко М.Д., Ябуров М.И., Лукоянов В.Ю., Хименко Л.Л. Обзор существующих методов получения интеркалированного графита // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – №71. – С. 174-181. – DOI 10.15593/2224-9982/2022.71.19. – EDN YQWCIY.
2. Сорокина Н.Е. Интеркалированные соединения графита с кислотами: синтез, свойства, применение: автореф. дис. д-р. хим. наук: 02.00.01. – М., 2007. – 46 с. – EDN ZNGEWJ.
3. Ионов С.Г. Электронный транспорт и физико-химические свойства интеркалированных соединений графита: автореф. дис. д-р. физ.-мат. наук: 01.04.07. – М., 2016. – 45 с. – EDN ZQBKGB.
4. Антонова К.С., Гырдымова А.А., Ноздрюхин А.Д., Кобелева А.Р. Способы получения интеркалированного графита // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – №4. – С. 172-176. – EDN JWAAUO.
5. Грязнова М.И., Лугвищук Д.С., Грязнов К.О., Филимоненков И.С., Митберг Э.Б., Караева А.Р., Мордкович В.З. Применение терморасширенного графита в пастах для трафаретной печати электрохимических сенсоров // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2022. – Т.65, №11. – С. 59-64. – DOI 10.6060/ivkkt.20226511.3y. – EDN JAEERT.
6. Sorokina N.E., Shornikova O.N., Avdeev V.V. Stability limits of graphite intercalation compounds in the systems graphite-HNO3(H2SO4)-H2O-KMnO4 // Inorganic Materials. – 2007. – Vol. 43, №8. – С. 822-826. – DOI 10.1134/S0020168507080031. – EDN IAZYHP.
7. Кравцов А.В., Шорникова О.Н., Булыгина А.И. Влияние гранулометрического состава природного графита и способа синтеза на пористую структуру терморасширенного графита // Журнал физической химии. – 2022. – Т. 96 – № 12. – С. 1797-1804. – DOI 10.31857/S0044453722120172. – EDN IESSFG.
8. Горланов Е.С., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю., Спекторук А.А., Бутакова Т.В. Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов. Обзор // iPolytech Journal. – 2024. – Т.28, №3. – С. 513-537. – DOI 10.21285/1814-3520-2024-3-513-537. – EDN AEDFQP.
9. Горланов Е.С., Леонтьев Л.И. Направления технологического развития алюминиевых электролизеров // Записки Горного института. – 2024. – №266. – С. 246-259. – DOI 10.31897/PMI.2024.266.246. – EDN PYSEVM.
10. Gorlanov E.S., Sizyakov V.M., Sharikov F.Yu., Shaikina K.D., Mozulev O.A. Carbon-based composite electrodes C – TiC/TiB2. Part 1. Synthesis and oxidizability of composites // Non-Ferrous Metals. – 2024. – №2. – С. 14-23. – DOI 10.17580/nfm.2024.02.03. – EDN UHLLQJ.

УДК 666.3-186

ИССЛЕДОВАНИЯ ДООБЖИГОВЫХ СВОЙСТВ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОЙ КЕРАМИКИ

Дурнева Д.А.
студент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия, daria-du@mail.ru

Научный руководитель: Климова Л.В.
кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

Аннотация. Данное исследование посвящено поиску экологической альтернативы в технологии производства тонкой керамики путем добавления отходов нефтедобывающей промышленности (буровой шлам), что может стать перспективным направлением в декоративно-прикладном искусстве. В связи с истощением запасов главного сырьевого компонента в керамической промышленности – глинистого сырья, а также в связи с нарастающей проблемой утилизации отходов нефтедобывающей промышленности становится востребованным поиск решений, направленный на разработку ресурсосберегающих технологий в технологии тонкой керамики.

Ключевые слова: буровой шлам, глина, отходы, тонкая керамика, сырьевая смесь, нефтедобывающая промышленность.

Введение. Производственная деятельность предприятий нефтегазового комплекса приводит к техногенному воздействию на окружающую среду путем ее загрязнения. В процессе бурения и эксплуатации нефтегазовых скважин образуются буровые отходы, скапливающиеся в шламовых амбарах и являющиеся одной из причин загрязнения геосферы. В связи с этим рациональное использование минеральных ресурсов геосферных оболочек Земли, минимизация негативных воздействий и сохранение продуктивной природной среды является одной из основных задач технологов и геоэкологических исследований [1-3]. Помимо глобальной проблемы, связанной с увеличением запасов бурового шлама, существует еще одна – это истощение запасов месторождений глинистого сырья, используемого в керамической промышленности. В связи с тем, что месторождения глин исчерпываются, становится востребованным поиск решений данной проблемы, направленные на разработку ресурсосберегающих технологий, в том числе в области декоративно-прикладного искусства [4]. Актуальность исследований заключается в разработке технологий и способов производства тонкой керамики с использованием отходов нефтедобывающей отрасли. Добавление отходов нефтедобывающей промышленности (буровой шлам) в технологию тонкой керамики может стать одним из перспективных направлений. В результате анализа месторождений углеводородного сырья Ямало-Ненецкого автономного округа объектом исследования выбраны отходы бурения Уренгойского нефтегазового месторождения, расположенного на Севере Тюменской области и Славянского месторождения, расположенного в Краснодарском крае, недалеко от города Славянск-на-Кубани. Химический состав исследуемых буровых шламов сравнивали с составом глины Владимирского месторождения (ВКС-1), расположенная в Ростовской области.

Методы. В настоящее время наблюдается существенное сокращение природных запасов глинистого сырья, следовательно, крайне целесообразным является разработка ресурсосберегающей технологии производства тонкой керамики на основе техногенного сырья, например, буровых отходов. В связи с этим необходимо провести исследования о возможности их непосредственного применения в разрабатываемой технологии. Чтобы

оценить возможность частичной замены глины на буровой шлам необходимо изучить химический состав буровых шламов, до обжиговые свойства и провести сравнительный анализ двух шламов разных месторождений и глины ВКС-1. Тонкой керамикой называют изделия, имеющие тонкозернистое строение, черепки имеют однородную гладкую структуру, а материалы для их производства состоят из частиц очень мелкого помола. Основными отличиями тонкой керамики от грубой (строительной) является высокая прочность, низкая пористость и малое значение водопоглощения [5]. Так же важным показателем является цвет массы так как в основном тонкая керамика находит свое применение в изделиях, где важен эстетический вид. Обычно в состав таких масс вводят более чистые глины и большее количество каолина, что позволяет достичь необходимых показателей. Тонкую керамики подразделяют на фарфор, фаянс, майолику и тонкокаменую декоративную керамику.

Результаты. В ходе проведенных испытаний был получен химический состав Уренгойского и Славянского шламов, глины Владимирского месторождения (ВКС-1). Несмотря на то что химический состав бурового шлама отличается от химического состава глины, в результате сравнения установлено наличие в буровом шламе основных минералообразующих элементов тонкой керамики таких как оксиды кремния (40-70 %) и оксиды алюминия (10-30 %). Исходя из химического состава и до обжиговых свойств видно, что Уренгойский шлам больше схож по составу и свойствам (пластичность, влажность, воздушная усадка) с глиной ВКС-1, чем шлам Славянского месторождения.

Обсуждение. Перспектива утилизации отходов нефтедобывающей промышленности путем их применения в технологии производства изделий тонкой керамики открывает новые возможности для оптимизации ресурсопользования и уменьшения негативного воздействия на экологию, а также могут способствовать созданию более устойчивых и эффективных производств. Перспективность выбранной темы и позволила выявить сходства составов и свойств отходов бурения и тонкой керамики на этапах подготовки, формования, сушки, что позволяет частично заменить глинистое сырье буровым шламом.

Заключение. Перспективы использования отходов нефтедобывающей промышленности в технологии тонкой керамики это перспективное направление, способное изменить подход к производству керамических изделий и улучшить экологию**.** Это способствует открытию новых составов тонких керамических масс. Кроме того, внедрение таких технологий способствует сохранению природных ресурсов и уменьшению объема отходов. Тем не менее, для успешной реализации этих перспектив необходимо продолжать научные исследования и разработки, направленные на оптимизацию процессов переработки и оценку свойств новых материалов.

Список литературы

1. E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, A.A. Tretyak, A.A. Chumakov. Influence of metallurgical slag additives on proppants synthesis processes based on drilling muds. – Chernye metally. – 2021. – T. 2021, № 8. – c. 49-53.
2. E.A. Yatsenko, A.A. Tretyak, A.A. Chumakov, V.A. Smoliy. Research of the Possibility of Using Glass and Sodium Hydroxide for Synthesis of Aluminum Silicate Propants Based on Drill Sludges. – Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – pp 678-683.
3. А.А. Третьяк, Е.А. Яценко, С.А. Онофриенко, Е.В. Карельская Идентификация отходов бурения и их использование. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332 (№ 2). – сс. 36-43.
4. Сергеев Н.П. Керамические материалы на основе системы CaO (MgO)-Al2O3-SiO2 из композиций природного и техногенного сырья: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 2.6. 14: дис. – 2025
5. Мустафоев Б.Ф. Основы создания технической керамики, преимущества и недостатки современных керамических материалов в мире //Строительство и образование. – 2022. – №. 2. – С. 18-22.

ЭКСТРУДЕР «ОТ ПЫЛИ К БРИКЕТУ»

Ильин Е.С.
аспирант каф. ОПИ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, ilineg@yandex.ru

Научный руководитель: Николаева Н.В.
к.т.н., доцент каф. ОПИ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В современном мире добыча и переработка полезных ископаемых играет ключевую роль в экономическом развитии большинства государств, включая и нашу страну. Металлургические процессы часто сопровождаются образованием значительного количества мелкофракционного материала, который сложно или невозможно использовать в дальнейшем производстве без окускования. Для решения проблемы накопления пылей металлургических процессов разработан проект шнекового экструдера с сегментной шайбой. Данная модель экструдера разработана с целью обеспечения возможности брикетирования «жесткой» шихты. Произведен опытный экземпляр экструдера, получены экспериментальные данные брикетирования пыли ЭСПЦ (электросталеплавильные цеха) и шлама КОШ (конвертерный шлам). Полученные результаты подтверждают эффективность спроектированного аппарата.

Ключевые слова: окускование, брикетирование, экструзия, экструдер, связующее вещество, брикет экструзионный, экструдат.

Введение. Горнодобывающая и перерабатывающая промышленность – важнейший сектор экономики многих стран мира, и для России эта отрасль имеет стратегическое значение [1-3]. Процесс окускования представляет собой технологию преобразования мелкозернистых материалов в крупные агрегаты, готовые к дальнейшей переработке [4-6].

В настоящее время весьма остро стоит проблема накопления металлургических отходов, к решению которой специалисты только начали подходить на практике [7]. В нашей стране накопление пылей сталеплавильного производства происходит в течении многих лет и даже десятилетий, объемы образования только на одном предприятии исчисляется несколькими десятками тысяч тонн, а таких предприятий в России на настоящий год насчитывается порядка 70 штук. Данные отходы пагубно влияют на экологию из-за выбросов загрязняющих веществ, которые поступают в атмосферу, почву и водные ресурсы [8, 9]. Кроме того, эти отходы содержат в своем составе от 50 до 60% железа, которое может быть вовлечено в повторную переработку.

Актуальность решения проблемы переработки пылей сталеплавильного производства для снижения экологической нагрузки не оставляет сомнений.

Целью проекта является создание брикетов из металлургических пылей, пригодных для повторной переработки.

Задачи проекта: разработка и создание опытного образца шнекового экструдера предназначенного для брикетирования твердых мелкозернистых материалов; получение экструзионных брикетов на экструдере собственной разработки с применением полимерного связующего вещества при минимальной влажности исходной шихты.

Методы. Для разработки новой модели шнекового экструдера произведен анализ существующих экструзионных прессов. С использованием компьютерного моделирования установлены основные технические параметры разработанного экструдера. На основании экспериментального исследования установлено содержание связующего вещества для брикетов из пыли ЭСПЦ (электросталеплавильные цеха) и шлама КОШ (конвертерный шлам).

Содержание железа в пыли ЭСПЦ составляет 59%, в шламе КОШ 64%, содержания определены рентгенофлуоресцентным методом. Влажность исходных пылей определена массовым методом и составляет 0,14 и 0,86% соответственно. Экструдирование производилось при влажности шихты 5%. Сушка брикетов осуществлялась их вылеживанием при температуре 25°С на протяжении 72 часов. В качестве связующего использовался специальный модифицированный крахмал.

Полученные брикеты имели диаметр 20мм, измерялась их прочность на сжатие и на сбрасывание в соответствии с ГОСТ 21289-2018. Испытания на сжатие проводилось

на брикетах длиной 25мм с предварительной шлифовкой торцевых поверхностей для обеспечения их плоскопараллельности.

Результаты. Разработан и произведен опытный образец шнекового экструдера для брикетирования металлургических пылей. В ходе работ по брикетированию аппарат работал стабильно, непрерывно выдавая брикет. Диаметр экструзионных брикетов составлял 20мм, длина полученных экструдатов находится в диапазоне от 80 до 100 мм.

Нормативом прочности брикетов на сжатие является предел в 120 кг на брикет, наблюдалось превышение этого показателя при содержаниях связующего вещества свыше 0.9%. Нормативом прочности на трехкратное сбрасывание с высоты 2 метра на стальную пластину является выход мелкой фракции -5мм не превышающий 5%, что достигалось при содержаниях связующего вещества свыше 1%.

Обсуждение. Полученные результаты проведенных экспериментов показывают, что разработанная модель шнекового экструдера с сегментной шайбой [10], которая обеспечивает вал-шнеку вторую заделку (опоры) в зоне сжатия материала, способна брикетировать такую шихту, как пылью ЭСПЦ и шлам КОШ. Шнековый экструдер способен производить брикеты с прочностью, превышающей требования к брикетам в соответствии с ГОСТ 21289-2018.

Учитывая перечисленное выше, полученные брикеты могут быть вовлечены в переработку. Примеры использования полученных брикетов: в качестве шлаконаведения в ДСП (дуговая сталеплавильная печь), в качестве охладителя в конвертерной печи, в качестве компонента шихты для доменной печи.

Заключение. Разработанная модель шнекового экструдера показала свою пригодность для брикетирования металлургических пылей. Полученные брикеты полностью удовлетворяют ГОСТ 21289-2018, что делает их пригодными к использованию в металлургическом производстве.

Следовательно проект по получению брикетов из металлургических пылей путем их экструзионного брикетирования на разработанной модели шнекового экструдера является перспективным решением проблемы накопления металлургических отходов в нашей стране.

Благодарности: *«Выражаю искреннюю благодарность и глубокую признательность Кускову Вадиму Борисовичу за идейное вдохновение в выборе направления научной деятельности, и помощь при реализации данного исследования».*

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., & Ратников М.А. (2023). // Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. Записки Горного института, 259, 95-111. DOI:10.31897/PMI.2022.100.
2. Недосекин А.О., Рейшахрит Е.И., Козловский А.Н. Стратегический подход к оценке экономической устойчивости объектов минерально-сырьевого комплекса России // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 354-360. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.354.
3. Litvinenko V.S., Sergeev I.B. Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector. // Studies on Russian Economic Development, 2019, vol. 30, no. 6, pp. 637-645. DOI: 10.1134/S107570071906011X.
4. Александрова Т.Н. (2022). Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы. // Записки Горного института. Т. 256, 503-504. DOI:10.24866/7444-5340-4.
5. Равич Б.М. Брикетирование руд. – М.: Недра, 1982. – 183 с.
6. Лурье Л.А. Брикетирование в металлургии. – М.: Металлургия, 1963. – 324 с.
7. Daniel Fernández-González, Íñigo Ruiz-Bustinza, Javie Mochón, Carmen González-Gasca, Luis Felipe Verdeja. Iron ore sintering: Process. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017, vol. 38, no. 4. pp. 215-227. DOI: 10.1080/08827508.2017.1288115.
8. Халифа А.А., Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Шалаби М.Э.Х. Исследование восстановления оксида железа из окатышей красного шлама коксом // Обогащение руд. – 2021. – №. 4. – С. 46-51. DOI:10.17580/or.2021.04.08.
9. Кусков, В.Б., Ильин Е.С. Изучение процесса окускования различных видов сырья экструзионным методом / В.Б. Кусков, Е.С. Ильин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-1. – С. 279-289. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_279.
10. Патент № 2773513 Российская Федерация, МПК B29C 48/00 (2019.01) B29C 48/92 (2019.01). Шнековый экструдер: № 2021128185 : заявл. 27.09.2021 : опубл. 06.06.2022 / Кусков В.Б. Ильин Е.С., Артамонов И.С. ; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с.

УДК 669.295

ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОСТРУКТУР ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Красильникова Е.И.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, rtnzmetil2004@gmail.com

Научный руководитель: Сизякова Е.В.
кандидат наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются проблема управления микроструктурой и свойствами титановых сплавов, получаемых методами аддитивного производства. Ключевым фактором, который определяет конечные характеристики изделий, являются фазовые и структурные превращения, происходящие в условиях циклического термического воздействия. Целью первого этапа исследования является экспериментальное обоснование параметров для последующей разработки упрощенной кинетической модели, позволяющей прогнозировать фазовый состав в процессе послойного синтеза. В качестве объекта исследования выбран промышленный прокатный титановый сплав. Основное внимание уделяется экспериментальному определению температурной области полиморфного превращения (ТПП) как базового параметра для верификации модели. Полученные результаты позволят повысить точность управления микроструктурой при аддитивном производстве.

Ключевые слова: титановые сплавы, модификация микроструктуры, фазовая классификация, механические свойства, термообработка.

Введение. Титановые сплавы относятся к числу ключевых конструкционных материалов для медицины, авиакосмической промышленности, двигателестроения, судостроения и машиностроения[1, 2, 3]. Такое широкое применение обусловлено уникальным сочетанием механических свойств: высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, пластичность[1, 4]. Аддитивные технологии (АТ) производства изделий из титановых сплавов открывают широкие возможности для авиакосмической и медицинской промышленности. Однако высокие градиенты температур и сложные термические циклы в процессе печати приводят к формированию неравновесных структур, что затрудняет прогнозирование механических свойств [1]. Ключевым процессом, определяющим структуру, является полиморфное α↔β-превращение [2]. Целью данной работы является экспериментальное определение температурных границ фазовых переходов как основы для последующего моделирования кинетики α↔β-превращений в условиях аддитивного производства. На начальном этапе ставится задача экспериментального определения температуры фазового перехода для промышленного прокатного титана.

Методы. Исследование проводится на цилиндрических образцах диаметром 10 мм промышленного титанового сплава ВТ8. Для определения температур полиморфного превращения (ТПП) образцы подвергались термическому воздействию в муфельной печи в интервале температур от 920 до 1020°С с шагом 10°С. После выдержки в печи образцы закалялись в воде для фиксации фазового состояния. Металлографическое исследование

[1] Гуляев А.П. Металловедение: учебник для студентов высших технических учебных заведений. – 5-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с

[2] Илларионов А.Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.

[3] Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.

[4] Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2012. – 643 с.

проводилось на оптическом микроскопе увеличением 500 крат. Выбор режимов термообработки и методика анализа микроструктуры выполнены в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [3, 5, 6].

Результаты. Металлографическим анализом образцов ВТ8, закаленных в диапазоне температур 920-1020°С с шагом в 10°С, установлено, что ТПП для данного сплава составила 1015°С.

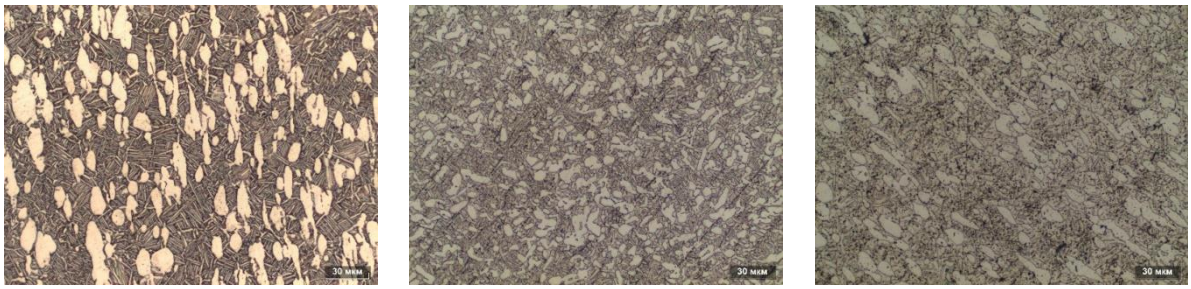
Анализ микроструктуры позволил выделить характерные температурные зоны.

Зона 1 – 920-970°С. Морфология альфа-фазы имеет цикличные изменения: 920-930°С – альфа-фаза представлена вытянутым пластинчатым зерном; 940°С – глобулярная форма; 950-970°С – вытягивание альфа-фазы.

Зона 2 – 980-1000°С. При 980°С формируется глобулярная альфа-фаза, при 990-1000°С видно уменьшение количества альфа-фазы, а так же заметна начальная стадия превращения альфа-фазы в бета-фазу.

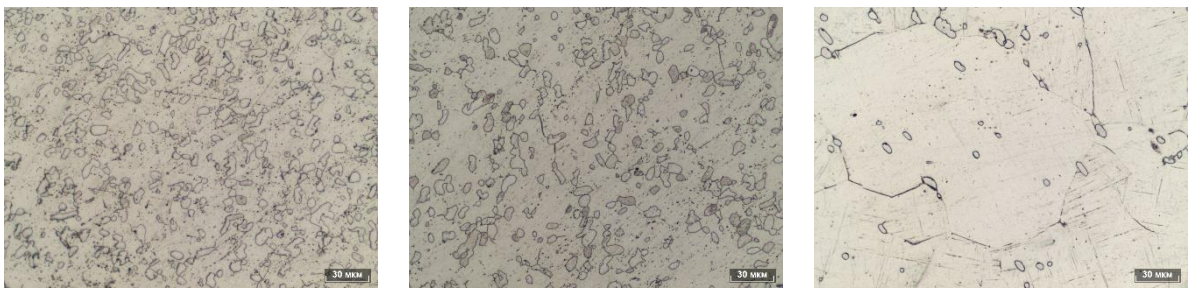
Зона 3 – 1010-1020°С. Фиксируется критическое уменьшение альфа-фазы, что свидетельствует о точке полиморфного превращения.

Обсуждение. Выявленная циклическая смена морфологии альфа-фазы отражает сложность фазовых переходов в (α+β)-сплаве, что ранее отмечалось в исследованиях [3, 5, 6]. Выше температуры 1015°Сформируется мартенситная структура, что подтверждает полное прохождение фазового перехода. Аналогичные закономерности формирования мартенситных фаз при закалке от температур выше ТПП отмечены в работе [3] для высокопрочных титановых сплавов. Визуализация микроструктуры первой термической зоны представлена на рис. 1, второй термической зоны на рис. 2, третей термической зоны на рис. 3.



а) б) в)

Рис. 1. Характерная морфология альфа – фазы:
а) – вытянутая после термообработки 920ºС; б) – глобулярная после термообработки 940ºС;
в) – вытянутая после термообработки 970ºС



а) б) в)

Рис. 2. Характерная морфология альфа – фазы во второй термической зоне:
а) – глобулярная после термообработки 980 ºС; б) – глобулярная после термообработки 990ºС,
уменьшение количество альфа-фазы; в) – уменьшение альфа-фазы после термообработки 1000ºС

[5] Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учебное пособие. – М.: ВИАМ, 2020. — 199 с.

[6] Бибиков Е.Л., Ильин А.А. Литье титановых сплавов: учебное пособие для вузов. – М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2014. – 304 с. – ISBN 978-5-98281-364-0.



а) б)

Рис. 3. Характерная морфология альфа – фазы в третей термической зоне
с фиксацией критического уменьшения альфа-фазы:
а) после термообработки 1010ºС; б) после термообработки 1020ºС

Заключение:

1. Определены температуры фазовых превращений сплава ВТ8. ТПП = 1015°С.
2. Установлено, что в интервале 920–1010°С морфология α-фазы претерпевает циклические изменения с чередованием пластинчатой и глобулярной форм.
3. Выше ТПП (1020°С) формируется мартенситная структура (видманштетен). Влияние подобных морфологических переходов на механические свойства (прочность и пластичность) ранее было показано на сплаве ВТ6 [4].
4. Полученные данные позволяют уточнить режимы термической обработки и могут быть использованы при моделировании процессов аддитивного производства.

Список литературы

1. Цюй Юньтао, Луо Чжитин, Дун Синь и др. Влияние температуры отжига на микроструктуру и механические свойства сплава Ti – 6 % Al – 4 % V, полученного селективным лазерным плавлением // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – № 1.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. – М.: ВИЛС, 2009. – 520 с.
3. Илларионов А.Г., Демаков С.Л., Илларионова С.М., Кичеров Д.А., Попов А.А. Влияние температуры нагрева под закалку на структуру, фазовый состав, физические и механические свойства высокопрочного сплава титана мартенситного класса // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 5.
4. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Челпанов А.В., Каратаева Е.С. Влияние структуры на механические свойства прутков из титанового сплава ВТ6 // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 6.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кульчицкий А.А.
студент 3-го курса ИММиТ СПБПУ,
Санкт-Петербург, Россия, alekskuu85@gmail.com

Научный руководитель: Кузин С.А.
кандидат технических наук, ассистент –
Высшая школа физики и технологий материалов,
СПБПУ, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Цель работы – обобщение опыта применения и структуризация свойств SLM (Selective Laser Melting) технологии. Детальное изучение характерных для нее сильных и слабых сторон, а также сравнение коррозионной стойкости получаемых изделий в сравнении с традиционными методами металлообработки на примере лопаток ГТД. На данную тему накоплен значительный опыт как отечественных, так и иностранных исследований о материаловедческих аспектах, возможностях проектирования и технологических ограничениях. От современных газотурбинных энергетических установок требуются высокие значения КПД и тяги в совокупности с повышенной термодинамической эффективностью, что вынуждает работать узлы при температурах свыше 2000 К. Высокие требования к лопаткам турбин, работающих при экстремальных условиях, превышают пределы ранее применяемых материалов.

Введение. На тему применения технологии *SLM*, в частности, для изготовления лопаток ГТД (газотурбинный двигатель) накоплен значительный опыт как отечественных, так и иностранных исследований о материаловедческих аспектах, возможностях проектирования и технологических ограничениях. Целью данной работы является обобщение опыта применения и структуризация свойств, на данный момент активно развивающейся *SLM* технологии. В задачи входит более детальное изучение характерных для нее сильных и слабых сторон, а также сравнение коррозионной стойкости получаемых изделий в сравнении с традиционными методами металлообработки на примере лопаток ГТД.

Методы. Методы исследования подбирались с учетом поставленной цели данной работы, в основном это описательный анализ и сравнение. В ходе работы описывается сама технологическая цепочка с присущими для данной технологии недостатками и преимуществами. Если вкратце, то сама технология представляет следующий набор операций: адаптация модели детали, ее послойная печать в специальной установке и механическая постобработка.

Результаты. После изучения источников можно выделить основное преимущество, говорящее в сторону применения этой технологии для производства лопаток турбин – это реализации сложных внутренних каналов охлаждения. В данном направлении присутствует многократное увеличение эффективности подобных конструкций охлаждения и теплоотвода.

Результаты исследований сравнения устойчивости к коррозии деталей, полученных методом *SLM* с деталями, изготовленными по другим технологиям, являются крайне неоднозначными. Здесь пористость и возможность создания гальванических пар из-за разности потенциалов применяемых металлов в совокупности с достаточно жесткими эксплуатационным условиями, зачастую в среде, содержащей сернистые соединения играют отрицательную роль. Данная тема требует дальнейших изучений, в том числе возможность компенсирования вышеупомянутых свойств, ухудшающих коррозионную стойкость, за счет свойств самих металлов, применяемых в качестве материала.

Главными сложностями на текущий момент остается высокая шероховатость необработанных поверхностей изделия, в связи с этим технология требует доработки трибологических свойств получаемых заготовок, т.е. отсутствия обязательной последующей механической обработки. В качестве перспективных направлений имеются разработка специализированных режимов под конкретные элементы лопаток, а также развивающиеся гибридные технологии и методологии проектирования учитывающие все технологические ограничения процесса.

Обсуждение. Данная работа обобщает собравшиеся на данный момент исследования на тему применения *SLM* технологии, позволяет увидеть направления дальнейшего совершенствования производства по *SLM* технологии. Одной из ключевых проблем на сегодняшний день мне видится недостаточная коррозионная стойкость изделий без дополнительной механической обработки или нанесения покрытий. Требуются дополнительные изыскания на предмет возможности улучшения качества «сырых» получаемых изделий, или включения дополнительной обработки непосредственно в производственный цикл с повышением производительности.

Заключение. Наблюдаемая высокая эффективность технологии *SLM* в ряде ключевых моментов позволяет сделать вывод об применяемости и эффективности *SLM* технологии в области производства турбинных лопаток, в том числе в сравнении с классическими технологиями металлургии.

Список литературы

1. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective laser melting: a manufacturing technology for the future? // Laser Technik Journal. Wiley Online Library, 2012. Т. 9, № 2. С. 33–38.
2. Беляков А. и др. Современные материалы и их применение при конструировании высокотемпературных изделий для специального машиностроения // Новые огнеупоры. 2023. № 5. С. 69–79.
3. Базылева О., Аргинбаева Э., Туренко Е. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 57.
4. Борисов Е.В. Формирование заданной структуры турбинной лопатки из жаропрочного никелевого сплава методом селективного лазерного плавления. 2017.
5. Hu K. и др. Optimization of turbine blade trailing edge cooling using self-organized geometries and multi-objective approaches // Energy. Elsevier, 2024. Т. 289. С. 130013.
6. Магеррамова Л. и др. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего …, 2019. Т. 18, № 3. С. 81–98.
7. 3D-печать открыла новую эру в производстве газовых турбин 14.04.2026.
8. Добрынин Д., Алексеева М., Афанасьев-Ходыкин А. Ремонт деталей горячего тракта газотурбинного двигателя из жаропрочного никелевого сплава марки ЖС6У // Труды ВИАМ. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно …, 2021. № 5 (99). С. 3–13.
9. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. М.: Недра, 1996. 591 с.
10. Л.Б Гецов КОРРОЗИЯ МАТЕРИАЛОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГОУСТАНОВОК.
11. Kong D. и др. Corrosion of metallic materials fabricated by selective laser melting // npj Materials Degradation. Nature Publishing Group UK London, 2019. Т. 3, № 1. С. 24.
12. Telega J. и др. Suitableness of SLM Manufactured Turbine Blade for Aerodynamical Tests // Materials. MDPI, 2023. Т. 16, № 7. С. 2866.
13. Godec M. и др. Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications // Materials Characterization. Elsevier, 2021. Т. 172. С. 110842.
14. Condruz M.R. и др. Investigation on Designing and Development of a Selective Laser Melting Manufactured Gas Turbine Blade—Proof-of-Concept // Inventions. MDPI, 2025. Т. 10, № 3. С. 36.

УДК 666. 293

ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ ЦИНКА И МАГНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СТЕКЛОЭМАЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Курдашов В.М.
аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия, viktorkurdashov@yandex.ru

Научный руководитель: Рябова А.В.
к.т.н., доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

Аннотация. Стальные трубопроводы подвержены разрушению из-за внутренней коррозии, вызванной агрессивными компонентами транспортируемой среды. Для их защиты применяются стеклоэмалевые покрытия. Целью работы является повышение коррозионной стойкости алюмоборосиликатного стеклоэмалевого покрытия путем модификации оксидами цинка и магния. Исследовано влияние добавок ZnO и MgO (1–3 %) на стойкость покрытия к действию 4 % уксусной кислоты. Установлено, что оптимальным является состав с 2 % ZnO, снижающий потерю массы до 0,49 мг/см²·ч, что в 11,8 раза превосходит исходный состав без модифицирующих добавок и соответствует требованиям ГОСТа 24788-2018 и 52569-2006 (менее 0,5 мг/см²·ч).

Ключевые слова: стальные трубопроводы, внутренняя коррозия, стеклоэмалевые покрытия, коррозионная стойкость и мотивирующие.

Введение. Стальные трубопроводы в России широко применяются в нефтегазовой, химической и энергетической отраслях благодаря своей прочности, долговечности и надежности. Однако серьёзную угрозу для труб представляет внутренняя коррозия, способная существенно сократить срок службы трубопроводов и спровоцировать аварийные ситуации [1].

При внутренней коррозии транспортируемая среда может содержать воду с хлоридом натрия (NaCl), сероводородом (H_2S) и углекислым газом (CO_2), воздействие которых провоцирует активную коррозию поверхности стали. Данный процесс создаёт серьёзную угрозу для целостности трубопроводов и поддержания их эффективной работы [2-4].

Для их надежной защиты необходимо использовать стеклоэмалевые покрытия, которые, благодаря высокой стойкости к кислотам и щелочам, успешно противостоят коррозии и служат более 20 лет [5]. Однако покрытия, стойкие к одному или нескольким реагентам, могут быть нестойкими к действию других. Поэтому контроль коррозионной стойкости одна из наиболее важных операций в производстве эмалированных изделий [6].

Поэтому целью данного исследования является модификация стеклоэмалевых покрытий для стальных трубопроводов, которая направлена на устранения ключевых недостатков традиционных составов, а именно недостаточной коррозионной стойкости.

Методы. Для модификации защитных неорганических аморфизированных покрытий был выбран оптимальный состав, разработанный ранее на основе алюмоборосиликатной системы $RO–R_2O–B_2O_3–Al_2O_3–SiO_2–TiO_2$, так как является наиболее приемлемой в технологии однослойного эмалирования для стальных трубопроводов. Варку стеклоэмалевых фритт использовалась шихта (кварцевый песок, борная кислота, полевой шпат,

сода, поташ, карбонат лития, известняк, криолит, оксиды Ti, Mn, Fe, Co, Cu, Ni) проводили в шамотных тиглях в печи ТК.4.1600.Э.ДМ.1Ф при 1400 °С (выдержка 60 мин). Далее на этапе помола в приготовленную фритту для повышения коррозионной стойкости покрытия, согласно аналитическому обзору, были выбраны и введены оксиды (Zn и Mg) в количествах от 1 до 3 % с шагом 1 % [7-9]. Испытания коррозионной стойкости проводились в соответствии с требованиями ГОСТа 24788-2018 и 52569-2006.

Результаты. Анализируя результаты исследования, можно сделать вывод, что модифицирующие добавки положительно влияют на коррозионную стойкость к действию 4 % уксусной кислоты. Без модифицирующих добавок исследуемое стеклоэмалевое покрытие обладает большой потерей массы, показывая низкую коррозионную стойкость – 5,78 мг/см^2·ч Установлено, что при увеличении содержания ZnO с 1 до 3 % коррозионная стойкость изменяется следующим образом: 0,96, 0,49 и 0,78 мг/см^2·ч соответственно. Установлено, что концентрация оксида цинка критически влияет на защитные свойства покрытия. При введении 1 % ZnO формируется рыхлая структура из-за дефицита ионов цинка, что облегчает диффузию агрессивных сред. Оптимальная концентрация в 2 % позволяет ионам цинка эффективно встраиваться и упрочнять кремнекислородную сетку стеклоэмали, блокируя активные центры диффузии и резко снижая скорость коррозии. Дальнейшее повышение содержания ZnO до 3 % приводит к перенасыщению системы, росту внутренних напряжений и образованию микротрещин, что вызывает локальное снижение защитных характеристик покрытия.

При увеличении содержания MgO с 1 до 3 % коррозионная стойкость изменяется следующим образом: 2,30, 1,64 и 1,83 мг/см^2·ч соответственно. При введении MgO наблюдается аналогичная зависимость: оптимальная концентрация (2 %) упорядочивает структуру, а её недостаток (1 %) или избыток (3 %) приводят к дефектам. Однако коррозионная стойкость покрытий с MgO значительно хуже, чем с ZnO, из-за меньшей химической стойкости образующихся соединений магния в кислой среде и более слабого упрочнения кремнекислородной сетки.

Результаты и обсуждение. В результате исследования установлено, что модифицированное стеклоэмалевого покрытия с добавками ZnO и MgO повышает его коррозионную стойкость в 4 % уксусной кислоте. Исходный состав без модифицирующих добавок показал максимальную потерю массы – 5,78 мг/см^2·ч. Выявлено, что состав с введением 2 % ZnO (0,49 мг/см^2·ч), является наиболее оптимальным, что в 11,8 раза превышает стойкость исходного состава. Для MgO минимальная потеря массы составила (1,64 мг/см^2·ч) при концентрации 2 %. При этом составы с MgO демонстрируют значительно более низкую коррозионную стойкость по сравнению с ZnO во всем диапазоне концентраций (1-3 %). Это объясняется меньшей химической стойкостью соединений магния в кислой среде и более слабым упрочняющим действием ионов Mg^{2+} на кремнекислородную сетку. Таким образом, исследования показали, что ZnO (0,49 мг/см^2·ч), является более эффективной модифицирующей добавкой, соответствую требованию ГОСТа 24788-2018 и 52569-2006 (менее 0,5 мг/см^2·ч).

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых составов стеклоэмалевых покрытий для защиты трубопроводов с улучшенными защитными характеристиками.

Благодарности: *Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-49-00002, https://rscf.ru/project/25-49-00002/ «Принципы модификации аморфизированных неорганических покрытий с улучшенной адгезией, теплопроводностью и коррозионной стойкостью для объектов энергетической инфраструктуры» (Руководитель Е.А. Яценко).*

Список литературы

1. Комарица В.Н. Стали для подводных трубопроводов: коррозионная стойкость и эксплуатационные характеристики // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 5-6. – С. 74-80. DOI: 10.24412/0131-4270-2024-5-6-74-80.
2. Ткачева В.Э., Маркин А.Н. Локальная CO_2-коррозия нефтепромыслового оборудования. – Уфа: РН-БашНИПИнефть. – 2022. – 296 с.
3. Ткачева В.Э. и др. Коррозия внутрискважинного оборудования в сероводородсодержащих средах // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 26. – № 2. – С. 7-26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2021.100.2-1.
4. Ha H.M., Alfantazi A. On the Role of Water, Temperature, and Glass Transition in the Corrosion Protection Behavior of Epoxy Coatings for Underground Pipelines // Journal of Coatings Technology and Research. 2015. Vol. 12. pp. 1095–1110. DOI: 10.1007/s11998-015-9705-0.
5. Yatsenko E.A. et al. Review of protective coatings for pipelines // International Journal of Hydrogen Energy. 2025. Vol. 110. pp. 656–663. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.200
6. Перелыгин Ю.П., Лось И.С., Киреев С.Ю. Коррозия и защита металлов от коррозии // Пенза: Изд-во ПГУ. – 2015.
7. Боровой В.Ю., Попандопуло Е.А., Брюхов Р.Д. Влияние оксида цинка на химическую стойкость силикатной эмаль для чугуна // Химия и химическая технология в XXI веке. 2024. Т. 1. – 2024.
8. Johari N.A. et al. Anti-corrosive coatings of magnesium: A review // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Т. 48. – С. 1842-1848. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.192
9. Borovoi V.Y., Chubik M.V., Kaz'mina O.V. Antibacterial properties of borosilicate enamel with nanosized zinc oxide particles //Glass and Ceramics. – 2023. – Т. 80. – №. 3. – С. 109-115. DOI: 10.1007/s10717-023-00567-9

УДК 622.7

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МЕДНЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Кухтина А.А.
студент группы ОП-20,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, arisha362@mail.ru

Научный руководитель: Николаева Н.В.
к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В современной горнодобывающей промышленности наблюдается тенденция к истощению запасов легкоперерабатываемого сырья, содержащего цветные металлы. В связи с этим основную долю перерабатываемого сырья начинают составлять руды со сложным минеральным составом и невысокой концентрацией полезных компонентов. Данное обстоятельство вынуждает необходимость модернизации существующих технологических схем обогащения, ориентированной на повышение их энергоэффективности. В последнее время особое внимание уделяется изучению эффективности предварительного физического воздействия на минеральное сырье. В данном исследовании рассматривается влияние ультразвуковой обработки на измельчение комплексных медных руд за счет изменения их прочностных характеристик. В результате исследования было выявлено, что предварительная обработка руды ультразвуком приводит к снижению показателя индекса шарового измельчения. Это, в свою очередь, обеспечивает сокращение энергетических затрат на последующих стадиях измельчения.

Ключевые слова: рудоподготовка, измельчение, ультразвуковое воздействие, энергоэффективность, медные руды, прочностные свойства, индекс шарового измельчения.

Введение. Запасы легкообогатимых руд цветных металлов, характеризующихся высоким содержанием ценного компонента и незначительным объемом примесей, практически исчерпаны [1, 2]. Для обеспечения растущих потребностей промышленности в меди в эксплуатацию вовлекаются месторождения со сложным минеральным составом. Трудности при переработке такого сырья связаны с неравномерным распределением мелковкрапленных минералов и невысокой концентрацией полезного компонента, что неизбежно приводит к переизмельчению и повышенному шламообразованию. Кроме того, одной из ключевых проблем подготовительного цикла остаются высокие энергетические затраты на разрушение материала. Данные обстоятельства обусловливают необходимость поиска перспективных технологических подходов и модернизацию действующих схем рудоподготовки, ориентированных на повышение энергоэффективности процессов дезинтеграции [3].

Цель данного исследования заключалась в экспериментальном обосновании применения ультразвукового воздействия для возможности направленной модификации прочностных свойств минерального сырья в циклах рудоподготовки.

Методы. Объектом исследования послужила проба комплексной медной руды с исходной крупностью частиц -2 мм. С целью изменения физико-механических характеристик материал подвергали ультразвуковому воздействию в ультразвуковой ванне Sonorex RK1028C. Длительность обработки составляла 15 минут при частоте ультразвука 35 Гц. Оценка эффективности ультразвуковой обработки проводилась путем определения показателя индекса шарового измельчения по методике Бонда (BWi). Данный метод широко применяется при проектировании и модернизации обогатительных фабрик, поскольку позволяет определить удельный расход электроэнергии, необходимый

для измельчения одной тонны руды. Эксперименты по определению индекса Бонда выполнялись с использованием стандартной шаровой мельницы Бонда.

Результаты. На основе ранее проведенных исследований было установлено рекомендуемое время воздействия УЗ [4]. Экспериментальные данные подтверждают, что за этот период обработки достигается требуемая крупность 70% готового класса -71 мкм, необходимая для дальнейших процессов обогащения. Анализ экспериментальных данных показал, что применение ультразвука приводит к росту показателя измельчаемости (G_{bp}) на 6,25% (с 0,96 до 1,02 г/об), что указывает на интенсификацию процесса измельчения. Помимо этого, предварительная ультразвуковая обработка обеспечила уменьшение индекса шарового измельчения (BWi) с 20,08 до 17,99 кВт·ч/т. Согласно классификации руд по рабочему индексу Бонда, это соответствует переходу исследуемого материала из категории «очень твердые» в категорию «твердые» руды. Следует также отметить, что в процессе обработки наблюдалось явление кавитации. Схлопывание кавитационных пузырьков сопровождается локальным высвобождением значительного количества тепла, что вызывает резкий кратковременный разогрев среды. В ходе экспериментов максимальная зафиксированная температура достигала 50,5°С.

Обсуждение. Ультразвуковая обработка инициирует образование в руде структурных нарушений в виде трещин и микротрещин, а также дислокаций кристаллической решетки. Данные изменения способствуют ослаблению связей между отдельными зернами и кристаллическими образованиями. Снижение прочности материала позволяет сократить энергетические затраты в процессе измельчения, поскольку обработанная руда становится более хрупкой.

Заключение. Полученные в ходе работы данные свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка оказывает значимое влияние на процесс измельчения комплексных медных руд. Экспериментально подтверждено изменение физико-механических характеристик материала, вызванное возникновением структурных нарушений под действием ультразвуковой обработки. Образование трещин и дефектов при схлопывании кавитационных пузырьков способствовало снижению индекса шарового измельчения (BWi) на 10,4%. Это позволило перевести исследуемую руду из категории «очень твердая» в категорию «твердая» согласно принятой классификации. В практическом отношении выполненные исследования подтверждают, что ультразвуковое воздействие, изменяющее прочностные свойства руды, способствует сокращению удельных затрат энергии в цикле рудоподготовки.

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами// Записки Горного института – 2023 – Т. 259. С.95-111. DOI:10.31897/PMI.2022.100.
2. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Justification for criteria for evaluating activation and destruction processes of complex ores // Minerals. 2023. Vol. 13, 684. DOI:10.3390/min13050684.3.
3. Чантурия В.А., Александрова Т.Н. Вклад ученых Российской академии наук в становление и развитие процессов обогащения и переработки минерального сырья. К 300-летию Российской академии наук // Цветные металлы. – 2024 – № 1. – С. 6 -16. DOI: 10.17580/tsm.2024.01.01.
4. Каллаев И.Т., Кухтина А.А., Кухтина П.А., Николаева Н.В. Влияние ультразвука на из-мельчаемость медно-молибденовых руд // Успехи современного естествознания. – 2024. – №5. – С. 90-97. https://doi.org/10.17513/use.38271.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ СЫРЬЯ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Кухтина П.А.
студент группы ОП-20,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, pkuhtina@gmail.com

Научный руководитель: Николаева Н.В.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Из-за постепенного истощения и снижения качества минерально-сырьевой базы непрерывно ведутся работы по поиску как новых технологических решений по добыче, обогащению и переработке полезных ископаемых, так и новых, нетрадиционных источников ценных компонентов. В работе приведены результаты изучения влияния режимов работы высокоградиентного магнитного сепаратора и реагентной обработки на извлечение полезных компонентов из шунгитовых пород.

Ключевые слова: высокоградиентная магнитная сепарация, эффективность, шунгитовые породы, извлечение.

Введение. В связи с ростом численности населения на планете Земля, возрастает потребность в различных минеральных ресурсах (в том числе в металлах), что, в свою очередь, ведет к интенсификации процессов добычи и переработки полезных ископаемых [1]. В настоящее время, запасы месторождений с легкообогатимыми рудами значительно истощены. В связи с этим существует риск полного исчерпания ряда ценных элементов в будущем. Данные обстоятельства вынуждают необходимость разработки и внедрение альтернативных источников получения сырья [2, 3].

Целью данного исследования является изучение влияния параметров работы высокоградиентного магнитного сепаратора и добавки реагентов на эффективность извлечения ценных компонентов из шунгитовых пород.

Методы. В качестве материала для исследования выступали шунгитовые породы. Для разделения материала в магнитном поле использовался вертикальный пульсационный сепаратор модели Slon-100. Установление элементного состава образцов проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре Shimadzu EDX 700.

Результаты и обсуждение. Для проведения исследования были подготовлены навески крупностью -0,5+0 мм массой 100 г. На первом этапе было изучено влияние индукции магнитного поля на эффективность получения железосодержащего концентрата из шунгитовых пород. Опыты выполнены при варьировании индукции магнитного поля на трех уровнях (0,1, 0,5 и 1,1 Тл) с фиксацией остальных параметров процесса: диаметр стержней в рабочей матрице сепаратора – 6 мм, частота пульсации пульпы – 30 Гц.

Анализ полученных результатов позволил установить, что наилучший показатель извлечения (52,74%) был зафиксирован при величине магнитной индукции 1,1 Тл.

Далее в ходе исследований проведена оценка влияния размера стержней рабочей матрицы сепаратора на эффективность извлечения железа из шунгитовой породы. В ходе экспериментов поддерживались следующие постоянные условия: индукция 1,1 Тл, частота пульсации 30 Гц, при этом диаметр стержней варьировался и составлял 1, 3 и 6 мм. Как свидетельствуют экспериментальные данные, между диаметром стержней матрицы и извлечением прослеживается обратная зависимость: с увеличением диаметра стержней матрицы извлечение железа в концентрат снижается, однако наибольшее суммарное содержание металлов достигается при размере матрицы 3 мм.

На заключительном этапе эксперимента изменялась частота пульсации промывной воды, установив значения 30, 34 и 38 Гц. Остальные параметры процесса поддерживались постоянными: магнитная индукция составляла 1,1 Тл, диаметр стержней матрицы – 3 мм. Обработка полученных данных выявила прямую зависимость: повышение частоты пульсаций ведет к росту степени извлечения Fe_2O_3 в концентрат.

Следующая серия опытов была посвящена изучению влияния флокулянта, который дозировался в количестве 100, 150, 200 и 250 г/т. Согласно экспериментальным данным, введение реагента в диапазоне 150–200 г/т обеспечивает извлечение железа свыше 90% при его содержании более 35%.

Таким образом, в ходе работы установлено, что оптимальные показатели извлечения достигаются при индукции магнитного поля 1,1 Тл, использовании матрицы с диаметром стержней 3 мм и частоте пульсации 38 Гц. Дополнительное применение флокулянта позволяет увеличить степень извлечения до 90% и более.

Заключение. По итогам выполненных экспериментов и интерпретации полученных результатов можно сделать вывод, что шунгитовые породы служат значимым источником минералов со слабыми магнитными свойствами, которые могут быть извлечены с помощью традиционных методов обогащения. Дополнительным преимуществом переработки шунгитов выступает возможность повышения степени комплексности освоения месторождений и сокращения экологического ущерба.

Список литературы

1. Litvinenko, V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. – 2020. – Vol. 29. –no. 3. – P. 1521-1541. DOI 10.1007/s11053-019-09568-4.

2. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С.95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

3. Keskin T., Yilmaz E., Kasap T., Sari M., Cao S. Toward viable industrial solid residual waste recycling: a review of its innovative applications and future perspectives // Minerals. 2024. Vol. 14, no 9, 943. DOI 10.3390/min14090943.

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЛИТКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА МАРКИ ХН62ВМЮТ-ВД

Лазаренко Н.К.
аспирант, ФГБОУ ВО «ДонНТУ», Донецк, ДНР, Россия
начальник технологического бюро по ВДП и ЭШП АО «СМК», Ступино, Россия, laznikc@gmail.com

Научный руководитель: Корзун Е.Л.
д.т.н., доц., проф., ФГБОУ ВО «ДонНТУ», Донецк, ДНР

Аннотация. В работе приведены технологические методы улучшения технологии производства жаропрочного сплава ХН62ВМЮТ-ВД (далее, ЭП708-ВД). Данный сплав производят на АО «СМК» (г. Ступино) в дуговой сталеплавильной, вакуумной индукционной и вакуумной дуговой печах. Из кованых прутков диаметром 150 мм производят кольцевые заготовки, используемые в турбореактивных авиационных двигателях с форсажными камерами, ввиду чего тема исследований является актуальной на сегодняшний день. Нормативная документация предполагает контроль качества кованых прутков, соответствие химического состава и механических свойств, отсутствие индикаций при проведении ультразвукового контроля (УЗК), поэтому важно получить качественный слиток перед его дальнейшей деформацией в пруток.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, вакуумная индукционная печь, вакуумная дуговая печь, химический состав, механические свойства, неметаллические включения.

Введение. При выплавке жаропрочных сплавов ответственного назначения, особенно используемых для деталей в авиационных двигателях, важно непрерывно совершенствовать качество, минимизируя брак. В процессе выплавки сплава ЭП708-ВД основное внимание уделяется технологическим приемам, которые позволяют получить чистый по неметаллическим включениям металл с заданными механическими свойствами.

В данной работе будет приведен краткий анализ влияния химического состава и баланса серы на механические свойства прутков, а также результаты фильтрации расплава при разливке сверху на удаление неметаллических включений.

Влияние химического состава на механические свойства прутков сплава ЭП708-ВД. При производстве сплава методом ВИП (вакуумная индукционная плавка) + ВДП (вакуумный дуговой переплав) на АО «СМК» были получены несоответствующие требованиям нормативной документации механические свойства при высоких температурах. Показатели относительного сужения на ряде плавок составили 20 – 25% при требуемом значении ≥25%. Повторные испытания не были результативны. Отклонений при вакуумном дуговом переплаве выявлено не было: переплав проводили в кристаллизаторе диаметром 315 мм по режиму с массовой скоростью 2,60-2,70 кг\мин и средней длиной дуги, что является оптимальным для сплава ЭП708-ВД [1, 2]. Химический состав при производстве данных слитков был следующий: Al=1,95%; Ti=1,15%; Cr=18,50%; C=0,07%; Mo=4,50%; W=5,70.

Одним из главных точек влияния на механические свойства является коррекция оптимального химического состава сплава в рамках диапазона нормативных значений, регламентированных документацией [ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки]. Для решения задачи по повышению механических свойств была проведена оптимизация химического состава сплава. Используя статистические данные прошлых периодов, в том числе данные, полученные при выплавке сплава методом ДСП (дуговая сталеплавильная печь) и ВДП, в программе Statistica было получено уравнение множественной линейной регресии для расчета

механических свойств. Анализу подвергли 8 основных элементов: Al, C, Cr, Mo, P, Ti, W, Ni. Результаты расчета показали хорошую сходимость с фактическими полученными данными.

Основными элементами, оказывающими влияния на повышение механических свойств, являются W (6,50%, далее, в скобках указано предпочтительное содержание элемента с учетом расчета), Mo (5,0%), Mn (0,20%) и в меньшей степени Ti (1,30%) и Al (2,10%). По сравнению с прошлым химическим составом, увеличили содержание вольфрама, молибдена, алюминия и титана, а также проведено легирование марганцем на уровень 0,20-0,25%. Добавление марганца благотворно влияет на снижение содержания σ-фазы, которая придает хрупкость изделиям [3-5]. Дефектообразование на прутках в виде трещин также может быть связано с отсутствием магния в составе [6, 7]. После проведения фактических плавок с указанным химическим составом были получены показатели относительного сужения на уровне 34-49%, что полностью соответствует требованиям ТУ 14-1-1018 (Прутки из жаропрочного сплава марки ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708-ВД). Технические условия).

Влияние баланса серы на технологическую пластичность сплава ЭП708-ВД. Легирование сплава ЭП708-ВД марганцем имеет отрицательную сторону – образование сульфида марганца – алабандина. Для снижения отрицательного влияния серы и связывания ее в более прочные соединения, рекомендуется проводить микролегирование металла церием и магнием. Оценить при этом пластические свойства сплава поможет параметр ΔS [8] – избыточная концентрация серы – который рассчитывается по формуле (1):

$$\Delta S = [S] - 0{,}8[Ca] - 0{,}3[Mg] - 0{,}35[Ce] \quad (1)$$

Высокие пластические свойства можно получить при оптимальном соотношении четырех элементов: S, Ca, Mg и Ce. Имея статистические данные химического состава и показателей механических свойств более чем 86 прутков, был произведен расчет баланса серы и определены оптимальные содержания Ca, Mg и Ce. Для получения максимальных пластических свойств прутков содержание Ce составило 0,0066%, Ca 0,0009%, Mg 0,010%.

Влияние фильтрации сплава ЭП708-ВД при разливке металла сверху. При производстве сплава ЭП708-ВД в дуговой сталеплавильной печи проводят оценку качества слитков на содержание неметаллических включений, используя суммарный коэффициент загрязнения, который рассчитывают по методике [РТМ 08.050 «Руководящий технический материал. Заготовки паспортные шихтовые из литейных никелевых жаропрочных сплавов вакуумной выплавки. Контроль чистоты сплава»]. Классификация нарушений качества металла по размерам и значения коэффициента включений подробно представлены в [9].

Для улучшения качества слитка, полученного разливкой сверху с ковша, была разработана компактная чаша с системой из двух фильтров. Разливочная чаша состоит из керамической емкости (72% масс.Al_2O_3), фильтр грубой очистки для первичного улавливания шлака из ковша также состоит из керамического материала, фильтр тонкой очистки с пористостью 5 и 10 ppi (отверстий на дюйм) на основе оксида циркония (IV) ZrO_2 [10]. В донной части предусмотрено отверстие для стандартного стаканчика внутренним диаметром от 30 до 20 мм.

После проведения опытной работы по сравнению загрязненности металла неметаллическими включениями были получены положительные результаты: средний балл загрязнений на слитках без применения фильтрации составил 46,8, средний балл с применением чаш с фильтрами составил 24,0. Таким образом, чистота металла увеличилась в 2 раза.

Заключение

1. Дополнительное легирование сплава ЭП708-ВД марганцем благотворно влияет на фазовый состав и повышает механические свойства. Дополнительная присадка вольфрама, молибдена и титана также способствует увеличению механических свойств, снижают вероятность получения карбидной неоднородности.

2. Для снижения вредного влияния серы при легировании металла марганцем, предпочтительно проводить микролегирование металла церием, магнием и кальцием.

3. Фильтрация сплава ЭП708-ВД при разливке с ковша сверху может существенно улучшить качество слитка, снизив концентрацию неметаллических включений в 2 раза. Для более полной очистки металла для слитков массой 1,0-3,0 т рекомендуется использовать фильтры пористостью 10 ppi и поддерживать скорость разливки от 5,0 до 6,0 кг/сек.

Список литературы

1. Швед, Ф.И. Слиток вакуумного дугового переплава. – Челябинск, Издательство Татьяны Лурье, 2009. – 428 с.
2. Белянчиков, Л.Н. К вопросу стабилизации процесса ВДП стали и сплавов / Л.Н. Белянчиков // Электрометаллургия – 2011, №8. – С. 18-23.
3. Кабанов, И.В. Проблемы обеспечения свойств крупногабаритных изделий жаропрочного сплава ВЖ175-ИД / И.В. Кабанов, П.А. Богатов, М.Н. Летников // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 12-14 сентября 2018г. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2018 – С.168-169.
4. Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Терехин А.М. Исследование причин образование трещин в сварных соединениях деталей из сплава ХН62ВМЮТ-ВД // Труды ВИАМ. 2022. №10 (116). С. 13-22.
5. Jiang, G. Effect of Mn addition on microstructure and mechanical properties of GX40CrNiSi25-12 austenitic heat resistant steel / G. Jiang, M. Wu, X. Yang, H. Wang, Y. Zhu - Research & Development. Volume 21, 2024 – p.205-212.
6. Сидоров, В.В. Улучшение свойств и технологической пластичности жаропрочных никелевых сплавов при модифицировании металла магнием / В.В. Сидоров // Электрометаллургия – 2006, №3. – С. 36 – 42.
7. Шабуров, А.Д. Изучение технологической пластичности сплава ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708-ВД) и совершенствование технологии его производства / А.Д. Шабуров, Е.Н. Акимов, Л.Л. Пономарева // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. Москва-Тула, 15-19 октября 2018 г. – Москва, Типография ООО «РПК ПринтАП», 2018 – С.557-563.
8. Сосков, Д.А. Влияние баланса серы, магния и кальция на технологическую пластичность жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ / Д.А. Сосков, Ф.И. Швед, С.Н. Чуватина, Л.В. Сергеева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия – 1985, №12. – С. 87 – 90.
9. Лазаренко Н.К. Оценка эффективности фильтрационной очистки слитков жаропрочного сплава ХН62ВМЮТ-ВД, полученных в открытой дуговой печи / Н.К. Лазаренко, Е.Л. Корзун, В.Н. Гребенюк // Металлург. 2025. №7 – С. 86-92.
10. Дейнега, Г.И. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 1 / Г.И. Дейнега, И.Г. Кузьмина, О.Н. Битюцкая, А.Р. Нарский // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129) – С. 17-25. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2093 (дата обращения: 06.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.

УДК 745:658.567.1

ПРИМЕНЕНИЕ ОТРАБОТАННЫХ КЕРНОВ В ДЕКОРАТИВНО-ПРИКЛАДНОМ ИСКУССТВЕ

Лебедева Е.М.
студентка 1 курса магистратуры,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт машиностроения, материалов и транспорта,
Санкт-Петербург, Россия, swaneliza789@mail.ru

Научный руководитель: Жданова Е.Ю.
кандидат технических наук,
ассистент Высшей школы физики и технологий материалов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность работы заключается в перспективной возможности использования отходов горнодобывающей промышленности, в частности отработанных кернов каменной соли, для создания новых продуктов. Традиционное захоронение данных материалов сопряжено с экономическими издержками и негативным воздействием на окружающую среду. В основе исследования лежит идея трансформации кернов в функциональные объекты декоративно-прикладного назначения. Целью является создание письменного набора, где отходы выступают главным конструкционным материалом. В работе решаются задачи разработки дизайна изделия, обоснования выбора породы и подбора технологии обработки. Результатом становится изготовление опытного образца.

Ключевые слова: отработанные керны, утилизация отходов, вторичное производство, декоративно-прикладное искусство, письменный набор.

Введение. Процесс недропользования сопровождается образованием значительных объёмов отходов, их ликвидация является одной из актуальных задач для горнодобывающих компаний [1, 2]. Традиционный подход требует регулярных финансовых затрат и создаёт потенциальные риски для окружающей среды. В связи с этим востребованным становится поиск альтернативных направлений использования продуктов недропользования, обеспечивающих их повторное применение.

Основная идея данной работы заключается в преобразовании отработанных кернов в функциональные объекты декоративно-прикладного искусства. В качестве предмета исследования выбраны керны каменной соли, которые после завершения полного цикла лабораторных испытаний подлежат захоронению [3, 4]. Эта работа предлагает иной путь: превращение этих материалов в основу для уникальных изделий, способных приносить доход.

Целью работы является разработка и создание уникального письменного набора, где керн выступает в качестве основного художественного и конструкционного материала. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать художественную концепцию предмета, обосновать выбор материала из числа отработанных пород, подобрать технологию обработки и изготовить образец художественного изделия.

Методы. На этапе эскизирования были разработаны внешние характеристики письменного набора, включающего пресс-папье и визитницу, а также определены его габаритные размеры. В ходе работы обоснован выбор материалов: каменная соль используется в качестве основания благодаря своим весовым и цветовым характеристикам [5], обеспечивающим устойчивость изделия и эстетическую выразительность; латунь применяется для создания проработанных малых скульптурных элементов; витражное стекло служит материалом для формирования декоративной мозаики. Технологический процесс включает следующие операции: укрепление каменной соли методом

заключения в эпоксидную смолу, литье по выплавляемой модели для изготовления латунных деталей, мозаичный набор из витражного стекла, резку материала лобзиком, шлифовку и полировку поверхностей с использованием бормашины, а также патинирование металлических элементов [6, 7].

Результаты. В ходе проведённой работы был разработан и изготовлен письменный набор, представляющий собой художественный объект, обладающий глубоким символическим смыслом (Рисунок 1). Готовое изделие может служить сувенирной продукцией и памятным подарком, напоминающим об актуальных проблемах недропользования и ценности природных ресурсов [8, 9]. Для создания набора потребовалось два лабораторных керна соли (галита). Таким образом, материал, уже выполнивший свою научную функцию, получает вторую жизнь. Результат представляет собой гармоничное сочетание художественной ценности и экологической ответственности.

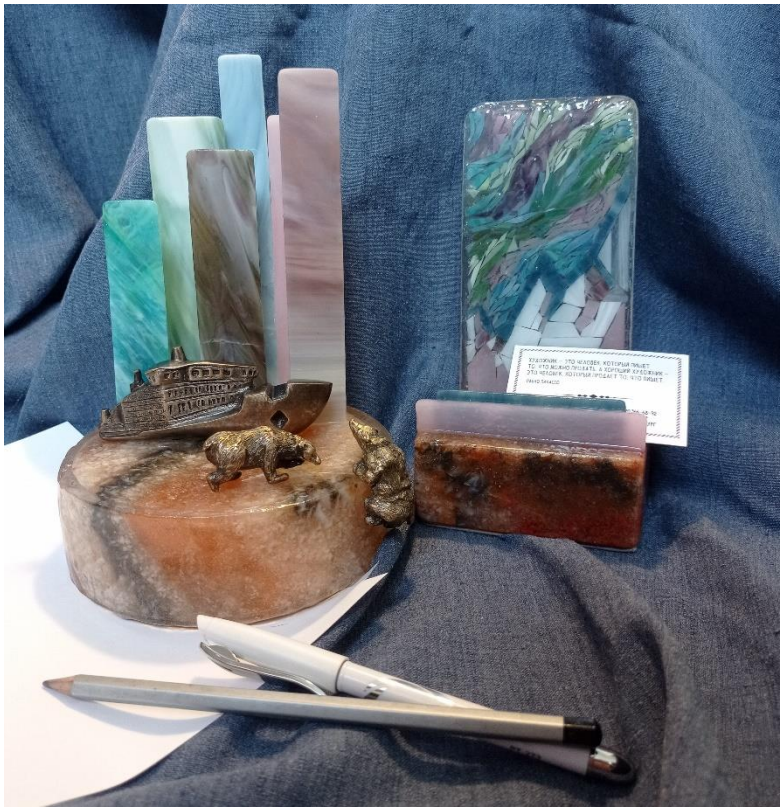


Рис. 1. Письменный набор, выполненный с применением отработанных кернов

Обсуждение. Представленное исследование открывает перспективное направление в области рационального природопользования: отработанные лабораторные керны могут обретать вторую жизнь в качестве востребованной сувенирной продукции. Вместо того чтобы захоранивать материал за дополнительные средства, предложенный подход позволяет перевести отходы горнодобывающей промышленности из затрат в прибыль. Сегодня широкая аудитория проявляет интерес к предметам, несущим память геологических процессов [10]. Письменный набор из лабораторного керна становится не просто сувениром, а памятным изделием, напоминающим о ценности природных ресурсов и важности ответственного отношения к ним. Такая продукция может быть востребована как корпоративный подарок для сотрудников добывающих компаний, а также как сувенир для широкого круга покупателей, ценящих уникальные изделия.

Заключение. В ходе выполнения работы были разработаны предметы интерьера, сочетающие в себе декоративную функцию и экологичное производство. Письменный набор, созданный на основе отработанных кернов, представляет собой пример успешного

соединения художественной выразительности с идеей вторичного использования природных материалов. Направления будущих исследований могут включать расширение ассортимента изделий, поиск новых способов художественной обработки материала, а также разработку технологий использования других видов отходов минерально-сырьевого комплекса для производства сувенирной продукции.

Благодарности: *Выражаю искреннюю благодарность дипломному руководителю Александру Емельянову за ценные советы, поддержку и профессиональное сопровождение на всех этапах выполнения работы. Особые слова признательности адресую своей сестре Анастасии Лебедевой — за предоставленные лабораторные керны и важную информацию, без которых создание этого проекта было бы невозможным.*

Список литературы

1. Гильманов Я.И. [и др]. Стандартизация работ по отбору и исследованиям керна // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 10. – С. 42-46. – DOI 10.24887/0028-2448-2024-10-42-46.
2. Пономарева, Е.А. Современные технологии отбора керна. Кернохранилище – инженерное пространство // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2023. – № 11(383). – С. 69-71. – DOI 10.33285/2413-5011-2023-11(383)-68-71.
3. Недзвецкий М.Ю. [и др]. Исследования пластовых систем - традиции и инновации // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2023. – № 2(54). – С. 4-16.
4. Коротченкова, О.В., Фадеева Т.В. Минералого-Петрографические особенности подсоляных пород Изверского участка Верхнекамского месторождения солей // Горное эхо. – 2022. – № 4(89). – С. 3-11. – DOI 10.7242/echo.2022.4.1.
5. Мельников Р.С. [и др]. Исследование физико-механических свойств образцов каменной соли // Студенческая наука : Сборник статей III Международной научно-практической конференции, Пенза, 17 августа 2021 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 154-157.
6. Готлиб Е.М. [и др]. Антифрикционные эпоксидные материалы, наполненные силикатами на основе ископаемого, растительного и техногенного сырья // Ползуновский вестник. – 2024. – № 1. – С. 214-223. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.027.
7. Выборкина Н.И. Эпоксидная смола в современном искусстве // Молодежь XXI века : материалы X Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 08–10 декабря 2021 года. – Новосибирск: НГПУ, 2022. – С. 122-123.
8. Вилкова М.Р., Марушина П.И. Возможности вторичного использования сырья в аксессуарах и предметах искусства // Проблемы современной науки и общества, Княгинино, 08–13 мая 2021 – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2021. – С. 126-129.
9. Ильина О.В. Монументальное искусство и инновационные возможности вторичных материалов // Актуальные проблемы монументального искусства : Сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 14–15 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО СПбГУПТД, 2025. – С. 93-98.
10. Шауро О.Г. Художник в экспедиции: образы Арктики и Антарктики в произведениях И.П. Рубана // География искусства : Сборник статей. – Москва : ИНИОН РАН, 2024. – С. 222-240.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО СОСТАВА ОБОРОТНЫХ ВОД РАЗЛИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕННОГО СЛОЯ И ФЛОТАЦИОННУЮ АКТИВНОСТЬ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Лушина Е.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, lushina_ea@mail.ru

Научный руководитель: Александрова Т.Н.
д.т.н., профессор, зав. каф. ОПИ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена оценке влияния минерализации оборотной воды на пенообразующие свойства флотационных реагентов при флотации сульфидных медных руд. Предложен подход к количественной характеристике поверхностно-активных свойств реагентов с учётом водной среды. Показано, что учёт ионного состава воды при подборе пенообразователя повышает обоснованность принимаемых технологических решений.

Ключевые слова: флотация, пенообразование, оборотная вода, селективность, медные руды, жесткая вода.

Введение. Изменение межфазных взаимодействий во флотационной пульпе в основном обусловлено накоплением растворенных ионов вследствие использования оборотного водоснабжения, отличающегося непостоянством и нестабильностью химического состава, а также минералогической изменчивостью поступаемой в процесс руды [1-3]. Несмотря на широкое распространение замкнутых водных контуров на горнообогатительном производстве, влияние ионного состава оборотной воды на процесс флотации, в частности на механизм действия пенообразователей, останется недостаточно изученным.

Методы. Опыты по определению пенообразующей способности ряда пенообразователей в двух водных средах, различающихся по ионному составу и жесткости, проводились с помощью DFA100FSM. Для флотационных исследований была выбрана медная руда сульфидного типа. Измельчение руды осуществлялось в лабораторной шаровой мельнице МШЛ-1 до достижения содержания класса –71 мкм не менее 65%.

Результаты и обсуждение. Установлено, что характеристики двухфазной пены определяются как природой флотационного реагента, так и химическим составом водной среды. На основании этого разработан интегральный критерий D_f, позволяющий оценивать эффективность пенообразователей в зависимости от ионного состава воды. Ранжирование пенообразователей по данному критерию продемонстрировало устойчивую корреляцию с результатами флотационных исследований при полном реагентном режиме, а также с опытами по механическому выносу, что подтверждает достоверность критерия. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанной методики при выборе реагентного режима флотации, в частности при подборе пенообразователя с учётом качества используемой воды.

Заключение. Полученные результаты формируют методическую основу для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию реагентного режима флотации сульфидных медных руд в условиях замкнутого водооборота с переменным ионным составом.

Список литературы

1. Александрова Т.Н., Лушина Е.А. «Влияние ионного состава жидкой фазы пульпы на технологические показатели обогащения» // Цветные металлы. – 2024. – №8. – С. 13–20 DOI: 10.17580/tsm.2024.08.02.

2. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. Геология и геофизика Юга России. 2022. 12 (4): 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.

3. Александрова Т.Н., Кузнецов В.В., Иванов Е.А. Исследование влияния ионов жесткости воды на флотируемость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–1. – С. 263–278. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_263.

УДК 622.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА «ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ-ЦЕМЕНТАЦИЯ-ФЛОТАЦИЯ»

Люблянова В.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, lyublyanova.spb.lera@yandex.ru

Научный руководитель: Александрова Т.Н.
д.т.н., зав. каф. ОПИ, профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. Актуальность работы обусловлена исчерпанием запасов легкообогатимых медных руд, в связи с чем возникает необходимость вовлечения в переработку сложных руд с различными формами меди в составе и примесями, предопределяя разработку новых технологий на основе комбинирования флотационных и химических методов обогащения. Для проведения исследований выбран метод «выщелачивание-цементация-флотация». В работе изложены результаты исследования возможности интенсификации выщелачивания минералов меди (азурит, малахит, халькопирит, хризоколла) посредством термического, ультразвукового и микроволнового воздействий. Достигнута концентрация меди в растворе выщелачивания 3 г/л. Приведены результаты цементации меди на железной стружке и флотации цементной меди с применением селективных реагентов. Обоснована возможность применения селективно действующих собирателей, в том числе неионогенных класса тионокарбаматы для повышения извлечения цементной меди в пенный продукт.

Ключевые слова: окисленные медные руды, кислотное выщелачивание, цементная медь, флотационное обогащение, ультразвук, СВЧ-излучение, азурит, малахит, халькопирит, хризоколла.

Введение. В условиях постепенного исчерпания богатых сульфидных медных месторождений возрастает потребность в переработке руд с низким содержанием ценных компонентов, а также окисленных медных руд [1]. Метод «выщелачивание–цементация–флотация» может быть эффективно применен для переработки окисленных медных руд ввиду большей по сравнению с экстракцией экологической безопасностью, также она может быть применена к растворам низкой концентрации меди (3–15 г/л), а также благодаря использованию недорогой железной стружки в качестве восстановителя [2]. Актуальным направлением в области выщелачивания [3, 4, 5] при этом является применение различных воздействий [6, 7] или окислителей [8] для интенсификации протекания процесса. В области флотации с целью повышения доли меди, извлекаемой в пенный продукт, перспективным является применение селективных реагентов собирателей [9, 10].

Цель работы – разработка и научное обоснование технологических решений для переработки окисленной медной руды на основе комбинирования химического и флотационного обогащения.

Методы. Исследуемый материал – окисленная медная руда с 27,66 % свободной окисленной меди, 33,74 % связанной окисленной меди и общим содержанием Cu 1,5 %, стоит отметить высокое содержание в исследуемой руде окисленной связанной меди, в следствие чего применение классических технологий выщелачивания и флотации может быть малоэффективным. Минеральные монофракции азурита, малахита, халькопирита, хризоколлы. Термодинамическое моделирования производилось в программном обеспечении HSC Chemistry.

Содержание меди в продуктивных растворах сернокислотного выщелачивания определялось методом йодометрического титрования. Цементация проводилась на железной стружке фракцией 100% < 0,1 мм.

Эффективность применения селективных реагентов для флотации цементной меди исследовалась с применением пневматической лабораторной флотомашины Laarmann Flotation Bench Test Machine; состав продуктов обогащения анализировался с применением метода рентгенофлуоресцентного анализа.

Результаты и обсуждение. Анализ диаграммы Пурбе для Cu–H_2O (20 °C) позволил выявить область стабильности иона Cu^{2+} в растворе в кислой среде и окислительных условиях (pH < 4 и Eh > 0,3 В). Отрицательные значения изменения энергии Гиббса, полученные при проведении термодинамических расчетов для сернокислотного выщелачивания минеральных монофракций позволяют сделать вывод о возможности спонтанного протекания данных реакций.

Установлено, что повышение температуры с 25 до 80 °C при сернокислотном выщелачивании минеральных монофракций усиливает извлечение меди в раствор на 1,5–1,9 %, с наибольший прирост отмечен для халькопирита.

Применение ультразвукового излучения при выщелачивании позволяет достичь прирост извлечения меди на 1,57 % (малахит), 2,34 % (азурит), 21,86 % (хризоколла) и 0,73 % (халькопирит, в 2,16 раз) за счет нагрева, вызываемого ультразвуковым излучением, а также явления кавитации. Эффективность возрастает в последовательности малахит → азурит → хризоколла → халькопирит.

Применение СВЧ-излучения (1 кВт, 30–120 с) при выщелачивании меди из исследуемых минералов позволяет значительно повысить извлечение в продуктивный раствор за счет каталитического эффекта и нагрева. Максимальный прирост в ходе проведения опытов отмечен для халькопирита (с 0,54 до 10,15%), что обусловлено частичным его превращением в ковеллин. Для азурита, малахита и хризоколлы извлечение выросло с 38,01; 30,48; 24,88% до 66,58; 57,87; 46,58% соответственно.

Термодинамический анализ реакций, протекающих при цементации меди позволил установить, что для основной реакции взаимодействия ионов меди с частицами железа $\Delta G<0$, одновременно с этим для побочных реакций, таких, как окисление железа и растворение образующейся цементной меди ΔG также меньше 0, что позволяет сделать вывод о необходимости точного дозирования стружки и H_2SO_4.

При сернокислотном выщелачивании окисленной медной руды с заданными технологическими параметрами получен продуктивный раствор выщелачивания с концентрацией Cu~3 г/л. Остаточное содержание Cu^{2+} в растворе после цементации составило 0,013–0,019 г/л. Цементная медь подвергалась флотации с использованием аэрофлотов: натриево-изобутилового, аммониево-бутилового, натриево-изооктилового, а также неионогенных селективных собирателей. При флотационном обогащении с применением неионогенных собирателей достигнуто извлечение 82,27 %, что позволяет сделать вывод о большей эффективности неионогенных собирателей по сравнению с применением дитиофосфатов.

Заключение. Термодинамический анализ системы медь-вода (20 °C) выявил устойчивость ионов Cu^{2+} в кислой окислительной среде, а отрицательные значения изменения энергии Гиббса для сернокислотного выщелачивания медных минералов позволили сделать вывод о возможности самопроизвольного протекания данных реакций. Анализ данных, полученных в результате применения энергетических воздействий, позволил сделать вывод о возможности интенсификации процесса выщелачивания для исследуемых минералов. При нагреве выщелачивающего раствора до 80 °C наибольший прирост извлечения отмечен для халькопирита; при применении ультразвукового воздействия – для хризоколлы; СВЧ-излучения – для халькопирита, что связано с его частичным переходом в ковеллин.

Сернокислотное выщелачивание окисленной руды позволило получить продуктивный раствор с концентрацией меди 3 г/л. Флотационное обогащение с применением селективного неионогенного собирателя позволило достичь извлечения 82,27%, что что

позволяет сделать вывод о большей эффективности неионогенных собирателей по сравнению с применением дитиофосфатов.

Список литературы

1. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 503-504. EDN UMOCVA.
2. Курдюмов В.Р. Кинетика цементации меди измельченным железом прямого восстановления // Современные технологии производства цветных металлов : материалы Международной научной конференции, посвященной памяти С.С. Набойченко, Екатеринбург, 27 октября 2023 г. 2023. С. 73-79.
3. Гордеев Д.В., Фоменко И.В., Шнеерсон Я.М., Петров Г.В. Переработка углеродистых золотосодержащих концентратов методом автоклавного окисления с добавлением азотной кислоты в качестве вторичного окислителя // Обогащение руд. 2023. № 5. С. 18–24. DOI 10.17580/or.2023.05.04.
4. Chanturiya V.A., Minenko V.G., Samusev A.L. [et al.] Combined Physicochemical and Energy Methods to Improve the Recovery of Rare Earth Elements from Eudialyte Concentrate // Minerals. 2023. Vol. 13, No. 3. P. 414. DOI 10.3390/min13030414.
5. Nor Kamariah, Panagiotis Xanthopoulos, Koen Binnemans, Jeroen Spooren Solvometallurgical Process for the Recovery of Copper from Chrysocolla in Monoethanolamine // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2023. Vol. 62. Iss. 33. Pp 12880–12890 DOI: 10.1021/acs.iecr.3c01834.
6. Olubambi Peter, J.H. Potgieter Investigations on the mechanisms of sulfuric acid leaching of chalcopyrite in the presence of hydrogen peroxide // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2014. Vol 50. No 2. Pp 657–666. DOI: 10.1080/ 08827500902958191.
7. Chanturiya V. A., Minenko V. G., Samusev A. L. [et al.] The Effect of Energy Impacts on the Acid Leaching of Eudialyte Concentrate. // Mineral Processing and ExtrActive Metallurgy Review. 2020. P. 1–12. DOI 10.1080/08827508.2020.1793141.
8. Cristina Leonelli, Timothy J. Mason Microwave and ultrasonic processing: Now a realistic option for industry // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2010. Vol. 49. Iss. 9. Pp 885–900. DOI: 10.1016/j.cep.2010.05.006.
9. Liu, Z., Feng, Y., Tang, X., Li, Y., Wu, D., Chen, J., Chen, Y. Insight into the physical assembly of alkanes with Z-200 molecules on surface hydrophobicity of chalcopyrite $CuFeS_2$ // Surfaces and Interfaces. – 2025. – Vol. 62. 106196. – DOI: 10.1016/j.surfin.2025.106196.
10. Semushkina, L., Abdykirova, G., Mukhanova, A., Mukhamedilova, A. Improving the copper-molybdenum ores flotation technology using a combined collecting agent // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 11. 1416. – DOI: 10.3390/min12111416.

УДК 669-1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО СОСТАВА ГИДРОКАРБОАЛЮМИНАТА КАЛЬЦИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСТВОРОВ ГЛИНОЗЁМНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Максимова Р.И.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Maksimova_RI@pers.spmi.ru

Научный руководитель: Бричкин В.Н.
д.т.н., заведующий кафедрой «Основы научной компетенции», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Современные технологии комплексной переработки алюминийсодержащего сырья неизменно сталкиваются с вопросами состава и свойств сложных алюминатов кальция, практическое значение которых сохраняется в рамках существующих технологических процессов производства вяжущих композиций, а также развивается в связи с повышением промышленного использования щелочных алюмосиликатов для получения глинозёма и возможностью расширения ассортимента товарной продукции. Задачей исследования стало определение состава и свойств карбоалюмината кальция (ГКАК) при его синтезе с использованием алюминатных растворов, содержащих различные по природе катионы щелочных металлов. Показана результативность использования комплексного физико-химического анализа сложных алюминатов кальция, основанного на определении и учёте фазового состава осадка и характерных химических изменений системы, что позволяет установить вещественный состав твёрдых продуктов и стехиометрию ГКАК.

Ключевые слова: алюминаты и гидроалюминаты кальция, алюмосиликатное сырьё, комплексная переработка, синтез, алюминатные растворы, показатели, свойства, применение, методы анализа.

В целях поддержания имеющихся производственных мощностей деятельность российских металлургических предприятий с момента их основания была ориентирована на вовлечение в технологический процесс глинозёмного производства наиболее доступных и предпочтительных природных ресурсов, отличающихся сложным химическим и минералогическим составом, на фоне дефицита отечественных запасов традиционного алюминиевого сырья. К настоящему времени решен целый ряд научно-технологических вопросов, позволяющих обеспечить эффективность использования национальных сырьевых ресурсов, представленных в значительной мере небокситовыми рудами и концентратами. Вместе с тем сохраняется необходимость в дальнейшем решении широкого перечня задач, направленных не только на интенсификацию технологических процессов производства глинозёма, но и на долгосрочное обеспечение металлургических предприятий сырьевыми ресурсами.

Наряду с этим, в интересах повышения комплексности переработки низкосортного алюминиевого сырья возникает потребность в изучении процесса синтеза и применения метастабильных композиционных материалов с выраженной функцией ионообменников, коагулянтов, химически активных реагентов для разделения и селективного выделения компонентов в системах глинозёмного производства и её аналогов. В наибольшей степени представленными характеристиками могут обладать твёрдые растворы на основе сложных алюминатов кальция, формирование которых в щелочной среде является инновационной технологией, разработанной профессором кафедры металлургии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Сизяковым В.М. и его учениками [1]. Подходы к кристаллизации гидрокарбоалюмината кальция (ГКАК) в среде сильных электролитов на десятилетия определили пути дальнейших исследований по повышению эффективности переработки низкокачественного алюмосиликатного

сырья, улучшению качества глинозёма, содопродуктов, портландцемента и другой попутной продукции, а также расширению её ассортимента.

Несмотря на разработку технологических решений по синтезу твёрдых растворов карбоалюминатного ряда с установленными физико-химическими характеристиками и успешное внедрение данного процесса на металлургических предприятиях, осуществляющих производство глинозёма из нефелиновых руд и концентратов, сохраняются вопросы о возможности использования данной технологии при переработке бесщелочных алюмосиликатов, а также ультракалиевых полевошпатовых пород, представляющих в среднесрочной перспективе существенный интерес для отечественного минерально-сырьевого комплекса. В этой связи задачей выполненного исследования стало установление состава и свойств гидрокарбоалюмината кальция (ГКАК), полученного в результате взаимодействия известкового материала с алюминатными растворами глинозёмного производства, содержащими различные по природе катионы щелочных металлов [2]. Наряду с этим, одним из наиболее сложных элементов исследования является определение молекулярного состава ГКАК ввиду несовершенства его кристаллической структуры и высокой дисперсности индивидов, формирующихся в условиях значительного пересыщения кристаллообразующей среды.

Отсутствие универсальных системных подходов, позволяющих однозначно устанавливать вещественный состав многокомпонентных твёрдых продуктов и стехиометрию ГКАК с учётом характерных химических изменений в реакционной среде при взаимодействии известкового компонента с алюминатным раствором, обусловило необходимость разработки специализированного инструмента, обеспечивающего обработку разнородных экспериментальных данных в едином контексте [3]. В этой связи была предложена методика комплексного физико-химического анализа сложных алюминатов кальция, основанная на определении состава ГКАК посредством сопоставления качественных и количественных характеристик осадков с закономерностями изменения концентраций Al_2O_3, каустической и общей щелочей в растворе при любом мольном соотношении катионов натрия и калия. Данный подход позволяет формализовать материальный баланс по четырём компонентам, в частности CaO, Al_2O_3, CO_2 и H_2O, участвующим в синтезе гидрокарбоалюмината кальция ($4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}nCO_2{\cdot}(13\text{-}2n)H_2O$), и рассматривать возможность присутствия в осадке таких кристаллических фаз, как $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$, ГКАК и трёхкальциевого гидроалюмината (ТКГА). Таким образом, применение комплексного физико-химического анализа сложных алюмокарбонатов кальция позволяет проводить прецизионную оценку степени гидратации ГКАК, его насыщения карбонат-ионами и расчёт выхода ключевой фазы.

Благодарности: *Работа проведена при поддержке Международного центра компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО по проекту «Наука», Санкт-Петербург, Россия.*

Список литературы

1. Сизяков, В.М. Повышение качества глинозёма и попутной продукции при комплексной переработке нефелинов / В.М. Сизяков, В.И. Корнеев, В.В. Андреев. – М. : Металлургия, 1986. – 111 с.

2. Sizyakov V.M. Synthesis, properties and applications of complex calcium aluminates and hydroaluminates / V.M. Sizyakov, V.N. Brichkin, R.V. Kurtenkov, R.I. Maksimova // Non-ferrous Metals. – 2025. – № 1. – P. 10-17. DOI: 10.17580/nfm.2025.01.02.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682672 Российская Федерация. Программа для расчёта химического и вещественного состава твёрдых растворов на основе сложных алюминатов щелочноземельных металлов. Заявка № 2024680941 : заявл. 11.09.2024 : опубл. 26.09.2024 / В. Н. Бричкин, Р. И. Максимова, А. Т. Федоров; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». –274 КБ.

УДК 620.22:544.72

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ТГС, И НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ П.П. ВЕЙМАРНА

Масленников А.А., Сырков А.Г., Семенов И.С., Анурова Д.В.
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье установлена преемственность между основным законом дисперсоидологии П.П. Веймарна и современными достижениями твердотельного гидридного синтеза (ТГС) металлов. Показано, что природа гидридной дисперсионной среды определяет формирование адсорбционных слоев различной химической структуры на поверхности металлов, обеспечивая управляемое изменение их функциональных свойств. В результате изучения отечественных и международных публикаций, работ научной группы проф. А.Г. Сыркова, а также классических трудов проф. П.П. Веймарна, сформировано комплексное представление о механизмах влияния дисперсионной среды на формирование свойств металлических материалов, получаемых методом ТГС. В работе отражён вклад ведущих мировых научных школ, приведён обзор последних экспериментальных тенденций. Отмечается, что, несмотря на значительный массив публикаций, анализирующих экспериментальные данные, практически остутствуют системные обзоры, связывающие количественные результаты ТГС с фундаментальными принципами дисперсоидологии П.П. Веймарна, что ограничивает выработку единых критериев для выбора среды под формирование целевых свойства у металлических материалов.

Ключевые слова: Веймарн; дисперсоидология; твердотельный гидридный синтез металлов; дисперсионная среда; дисперсные металлы; гидрофобность; коррозионная стойкость.

Фундаментальный закон дисперсоидологии П.П. Веймарна, утверждающий критическую роль дисперсионной среды в формировании свойств дисперсных систем, сохраняет неослабевающую актуальность для современного материаловедения. Развитие современной промышленности требует создания металлических материалов с контролируемыми функциональными свойствами: высокой коррозионной стойкостью, гидрофобностью, термостабильностью и специфической морфологией, что отражается в неуклонном росте числа патентов и научных публикаций в этой области [10, 11, 17]. Однако традиционные методы получения таких материалов часто экологически небезопасны и энергозатратны [9, 16]. Потому особый интерес представляют энерго- и ресурсосберегающие технологии, основанные на управлении свойствами дисперсионной среды при синтезе материалов. Спустя более века фундаментальные принципы Веймарна находят непосредственное воплощение в методе твердотельного гидридного синтеза (ТГС) металлов – зарекомендовавшей себя технологии получения дисперсных металлов с управляемыми функциональными свойствами [13]. В этой связи представляется перспективным проследить преемственность между классическими законами нанотехнологического подхода и текущими передовыми отечественными разработками.

Научное наследие профессора П.П. Веймарна

Петр Петрович Веймарн (1879–1935) – создатель дисперсоидологии, науки об ультрадисперсных системах, которую он определил как «науку о свойствах поверхностей и процессах, на них совершающихся» [2, 7]. Основной закон дисперсоидологии, сформулированный Веймарном, гласит: «При физико-химическом измельчении вещества последнее стремится превратиться в модификации, обладающие меньшим запасом поверхностной энергии; эти модификации обладают меньшим поверхностным натяжением» [1, 12]. Термодинамическая основа закона: при диспергировании возрастает свободная энергия Гиббса системы $\Delta G = \gamma \cdot \Delta S$, которую система минимизирует через снижение поверхностного натяжения γ посредством адсорбции стабилизаторов из дисперсионной среды [1].

Экспериментальные исследования Веймарна были направлены на изучение влияния состава жидкой дисперсионной среды на свойства ультрадисперсных частиц металлов [14, 15]. Он разработал несколько методов модифицирования наночастиц золота и серебра: формальдегидный метод основан на восстановлении золота из растворов формальдегидом в щелочной среде с одновременной адсорбцией гидроксильных ионов на поверхности наночастиц; цитратный метод использует цитрат-ионы для создания электростатического барьера; тартратный метод формирует стерический барьер за счет объемных карбоксильных групп тартрат-ионов [18].

Ключевой вывод Веймарна сформулирован следующим образом: «Поверхностный слой металла растворяет в себе до насыщения дисперсионную среду... одно и то же вещество, находящееся в различных дисперсионных средах, обладает существенно различными свойствами поверхности» [1]. Это фундаментальное положение легло в основу современного подхода к управлению свойствами наноматериалов через выбор дисперсионной среды. Рассмотрим далее, как эти принципы реализуются в методе ТГС на примере промышленно важных металлов.

Влияние дисперсионной среды на свойства промышленно важных металлов

Метод твёрдотельного гидридного синтеза (ТГС) обеспечивает целенаправленное управление функциональными свойствами металлических материалов путём варьирования химической природы газовой восстановительно-модифицирующей среды. Этот подход позволяет формировать на поверхности дисперсных металлов адсорбционные слои различного состава, контролируя тем самым гидрофобность, коррозионную стойкость и механические характеристики получаемых материалов [5, 9]. Систематическое исследование влияния восстановителей-модификаторов различной химической природы выявило чёткую зависимость между строением формируемого поверхностного слоя и комплексом функциональных свойств материала [4, 7, 14]. Роль дисперсионной среды играют гидридные газы различной химической природы: водород H_2, аммиак NH_3, метан CH_4, моносилан SiH_4, газообразный метилдихлорсилан CH_3SiHCl_2, марки кремнийорганической жидкости (ГКЖ-94) на основе этилгидридсилоксана (ЭГС). Гидриды выступают одновременно восстановителями металлов из оксидов и галогенидов и модификаторами поверхности, формируя адсорбционные слои различной химической природы.

Процесс модификации металлов в методе ТГС реализуется в температурном диапазоне 320–650 °C и основан на одновременном восстановлении соединений металлов и хемосорбции продуктов термического разложения гидридов на поверхности металлов. Выбор температурного режима определяется оптимальным балансом между скоростью восстановления и термической стабильностью формирующегося адсорбционного слоя. Термодинамическая стабильность и структура адсорбционных слоёв подтверждаются данными РФЭС, ИК-спектроскопии и квантово-химического моделирования [3, 8].

Характеристики используемых восстановительных сред

1. **Гидриды элементов** при 550–700 °C выполняет исключительно восстановительную функцию, практически не создавая защитных поверхностных слоёв. **Аммиак** (NH_3) в диапазоне 380–480 °C формирует азотсодержащие M–NH_2 группы, регистрируемые пиком N 1s при энергии связи 399,8–400,2 эВ по РФЭС. **Метан** (CH_4) выполняет в ТГС принципиально иную роль, чем простые гидриды [10]. При температурах 550–650°C CH_4 не является самостоятельным первичным восстановителем, а выступает в качестве финишной модифицирующей стадии после использования других гидридов. На первой стадии восстановления оксидов металлов применяются высокоэффективные восстановители (МДХС, ЭГС, SiH_4), а метан вводится затем для разрушения остаточных реакционноактивных групп (Si–H, Si–Cl) и создания заключительного защитного покрытия. Процесс заключается в формировании C 1s структур при 284,8 эВ, регистрируемых РФЭС, и закреплении метильных групп на поверхности металла.

2. Кремнийсодержащие модификаторы, восстановители со связью Si-H, обеспечивают качественно иные механизмы защиты. **Силан** (SiH_4) при 400–500 °C формирует Si–O связи (ИК 800–950 $см^{-1}$), но уступает по восстановительным свойствам метилдихлорсиалну что связано с образованием побочных продуктов на поверхности твердой фазы, в т.ч. оксигидрида кремния и оксида кремния. **Этилгидридсилоксан** (ЭГС) и **метилдихлорсилан** (CH_3SiHCl_2) при 600–700 °C образуют многослойные Si–O–C системы с включением карбидокремниевых соединений. Механизм защитного действия заключается в образовании упорядоченного мономолекулярного слоя низкой поверхностной энергии, функционирующего как граничная смазка и диффузионный барьер для коррозионных агентов. Этилгидридсилоксан (ЭГС) отличается выраженными электроноакцепторными свойствами и прочной химической фиксацией на металлической поверхности. Квантово-химическое моделирование показывает существенное превышение энергии адсорбции ЭГС над простыми гидридами, обеспечивая высокую термическую стабильность покрытия [3].

Сравнительный анализ функциональных свойств металлов, модифицированных различными восстановителями

1. **Гидрофобность**. Степень водоотталкивающих свойств количественно характеризуется сорбцией молекул воды при длительном контакте дисперсных металлических образцов с водяным паром. Для никеля при, восстановленного и модифицированного в среде МДХС с завершающей обработкой CH_4 водопоглощение составляет 0,027 ммоль/м² поверхности, для меди – 0,024 ммоль/м², для железа – 0,016 ммоль/м² [5]. Для сравнения: промышленные металлические порошки, обработанные коммерческими гидрофобизаторами (ГСЛ-94), показывают водопоглощение 2,2–2,3 ммоль/м², то есть в 80–140 раз выше. Эти показатели соответствуют переходу к супергидрофобной поверхности с углами смачивания выше 150°, характерных для компактных материалов.

2. **Коррозионная стойкость.** Скорость коррозионного разрушения в агрессивных средах существенно снижается при использовании кремнийорганических модификаторов. Железо, модифицированное МДХС с дальнейшей обработкой в CH_4, характеризуется удельным приростом массы 0,00011 мг/см² (при температуре 900 °C и экспозицией на воздухе 100 ч). Механизм защитного действия обусловлен формированием барьерного слоя толщиной 4–5 нм с прочной химической связью M–Si, подтверждённой методом РФЭС через величину химического сдвига уровня M2p. Дисперсные медь и никель, обработанные ЭГС или МДХС, демонстрируют значительное улучшение коррозионной стойкости в кислотных и щелочных средах.

3. **Антифрикционный эффект.** Испытания на машине трения ДМ-29М показали, что медь, модифицированная методом ТГС с ЭГС, характеризуется коэффициентом трения f = 0,0063 при нагрузке 500 кгс в индустриальном масле И-20, что на 29% ниже контрольного показателя масла без добавок (f = 0,0089), а железо и никель достигают f = 0,0069–0,0075, что сопоставимо с эффектом меди [7]. Существует чёткая линейная корреляция между степенью гидрофобности ТГС-металла и его антифрикционной эффективностью в смазочных системах (R^2 = 0,97–0,99 для различных режимов модификации), что свидетельствует о едином физико-химическом механизме формирования как водоотталкивающих, так и смазывающих свойств поверхностного слоя. Антифрикционное действие обусловлено образованием граничного смазочного слоя между поверхностью металла-наполнителя и парой трения, что подтверждается трибохимическими и акустико-эмиссионными методами анализа

Никель характеризуется высокой адсорбционной активностью ко всем типам модификаторов и способностью образовывать стабильные металл-модификаторные связи. При обработке МДХС и CH_4 адсорбция молекул воды достигает минимальных значений (0,027 ммоль/м²), что подтверждает оптимальность этого режима для никеля. Железо и медь демонстрируют сопоставимые закономерности в формировании защитных слоёв

при использовании кремнийорганических модификаторов. Железо отличается выраженной способностью формировать высокостабильные карбосилоксановые группы на поверхности, что находит практическое применение в защитных покрытиях [3, 5, 8].

Так, метод ТГС реализует принцип Веймарна о ключевой роли дисперсионной среды в создании требуемых свойств материала, распространяя классическое учение на метод современной нанотехнологии и открывая практические возможности управления свойствами промышленно важных металлов. Сказанное иллюстрируется в табл. 1, отражающей различия в свойствах металлических продуктов, полученных разными режимами восстановления.

Таблица 1

Характеристики металлических продуктов, полученных при разных режимах [9]

Образец на основе металла	I. Проведение всех стадий CH_4 (восстановление в ГКЖ)			II. Восстановление в МДХС в среде Ar			III. Восстановление в ГКЖ в среде Ar		
	Sуд, $м^2$\г	Δmвод/m, %	Ж, мкг/с $м^2$	Sуд, $м^2$\г	Δmвод/m, %	Ж, мкг/с $м^2$	Sуд, $м^2$\г	Δmвод/m, %	Ж, мкг/с $м^2$
Никеля	15	0,42	0,399	11	0,89	0,401	10	0,85	0,398
Железа	3	0,11	0,1	1	0,19	0,101	2	0,2	0,102
Меди	18	0,51	0,3	12	1	0,303	130	0,98	0,301

* Sуд – удельная поверхность материала; Δmвод/m – масса сорбированной воды, отнесенная к массе исходной навески, рвод./ps = 0,98 (20˚С); Ж- жаростойкость образца (900˚С, 100ч); ГКЖ гидрофобизирующая кремнийорганическая жидкость; МДХС – метилдихлорсилан.

** В I-ом режиме: все стадии осуществляются в среде метана (природного газа); Во II-ом происходит восстановление образцов в МДХС в среде аргона; в режиме III восстановление в ГКЖ в среде инертного газа (Ar).

В 2024 году в журнале «Полимерные материалы и технологии» №2, была опубликована статья Плескунова И.В., Кабирова В.Р., Прокопчука Н.Р. и др. «Разработка поверхностно-модифицированных металлических добавок с минимальным углеродным следом для лакокрасочных покрытий», в которой проведен комплексный анализ применения поверхностно-модифицированных железосодержащих добавок, синтезируемых методом твердотельного гидридного синтеза (ТГС), в составе лакокрасочных материалов. Авторы продемонстрировали, что такие добавки значительно усиливают гидрофобность покрытий и коррозионную защиту металлических подложек, включая сталь, под воздействием агрессивных факторов окружающей среды. Особое внимание уделено снижению углеродного следа производства данных добавок, что соответствует современным требованиям экологической безопасности и устойчивого развития. Экспериментальные данные показали, что введение ТГС-модифицированных частиц железа в основу покрытий снижает скорость коррозии трехкратно по сравнению с немодифицированными материалами, что выдвигает на первый план значимость управления дисперсионной средой путем тонкой поверхностной химической модификации металлов. Таким образом, комплекс исследований дополняет и конкретизирует текущие представления о применении принципов и подходов П.П. Веймарна в современных высокотехнологичных материалах, гарантируя повышение эксплуатационных характеристик и долговечности покрытий в промышленном производстве, что подтверждено внедрением разработок по ТГС на минерально-сырьевых предприятиях РФ и РБ [5, 6, 8].

Заключение. Представленное исследование подтверждает наличие глубокой связи между фундаментальными принципами дисперсоидологии П.П. Веймарна и практическими возможностями современного метода ТГС. Установлено, что управление химической природой газофазного восстановителя-модификатора приводит к возникновению на поверхности металлов упорядоченных адсорбционных структур, закономерно

коррелирующих с повышением функциональных характеристик синтезируемых материалов. Успешная реализация метода в области функциональных защитных покрытий подтверждает его технологическую состоятельность и промышленную перспективность. Выявленная универсальность принципа управления свойствами за счет выбора модификатора проявляется в применении к различным классам металлов, что свидетельствует об общности механизмов поверхностной модификации независимо от природы основного материала. Полученные результаты открывают новые направления для разработки материалов с заданными комплексами свойств в смежных областях – от коррозионной защиты до трибологических приложений. Исследование не только обосновывает преемственность между классической дисперсоидологией и современным методом ТГС, но и предоставляет научно обоснованные подходы к выбору оптимальной дисперсионной среды при целевом синтезе металлических материалов с требуемым функциональным набором свойств.

Список литературы

1. Веймарн П.П. Новая систематика агрегатных состояний материи и основной закон дисперсоидологии // Записки Горного института. 1912. Т. 4, № 2. С. 128–14.
2. Веймарн Пётр Петрович фон // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал –Дата публикации: 05.04.2023. – Дата обновления: 25.04.2023.
3. Кабиров В.Р. Физико-химические особенности получения поверхностно-модифицированных металлов с минимальным углеродным следом: Автореф. дис. канд. техн. наук: 1.4.4. СПб., 2024. 20 с.
4. Камалова Т.Г. Адсорбционно-химические и антифрикционные свойства металлов с низкоразмерными аммониевыми соединениями на поверхности: Автореф. дис. канд. хим. наук: 02.00.04. СПб., 2017. 20 с.
5. Кущенко А.Н. Особенности формирования сорбционных свойств и гидрофобности металлов, содержащих в поверхностном слое аммониевые и кремнийорганические соединения: Автореф. дис. канд. техн. наук: 02.00.04. СПб., 2020. 20 с.
6. Назарова Е.В. Влияние адсорбции аммониевых и кремнийорганических соединений на трибохимические свойства металлов (Al, Cu, Ni): Автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. СПб., 2016. 20 с.
7. Хисамутдинова, Н.В. Химик Петр Петрович фон Веймарн в России и Японии / Н.В. Хисамутдинова // Известия Дальневосточного отделения Российской Академии наук. – 2011. – №5. – С. 134-141.
8. Ячменова Л.А. Разработка энерго- и ресурсосберегающей технологии получения металлических продуктов с применением гидридных восстановителей-модификаторов: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.02. СПб., 2021. 20 с.
9. US Patent 10889531B2. Metal hydride nanoparticles / Inventors: Jouet R.J., et al. Priority date: 2016-12-02. Publication date: 2021-01-12.
10. Cao L., Wan Y., Li Y., Yang S. Corrosion-resistant and friction-reducing performance of superhydrophobic coating on hot-dip galvanised steel // Lubrication Science. 2021. Vol. 33, Iss. 8. P. 379–390. DOI: 10.1002/ls.1555.
11. Ejenstam L. Hydrophobic and superhydrophobic coatings for corrosion protection: A study of required surface topography and the application of nanoparticles: PhD Thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015. 78 p.
12. Iwase E. Studies on the Coagulation of von Weimarn's AuF-Sols. I // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1929. Vol. 4, Iss. 5. P. 120–125.
13. Musina D.T., Kabirov V.R., Khanh N.Q. Electrophilic and nucleophilic modifiers as a factor of formation of lipophilic properties of surface – modified materials. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1040. pp. 94–100.
14. Ostwald Wo.P.P. von Weimarn, 1879–1935 // Kolloid-Zeitschrift. 1936. Bd. 74, Heft 1. S. 1–10.
15. Syrkov A.G., Kuschenko A.N., Maslennikov A.A. Professor P.P. Weimarn, founder of the science of nanotechnology: development of works in the field of nanodispersed metals production. Non-ferrous Metals. 2024. №11. Pp. 63-71.
16. US Patent 5368657A. Gas atomization synthesis of refractory or intermetallic compounds / Inventors: Moll J.H., McSwain R.H. Priority date: 1993-03-04. Publication date: 1994-11-29.
17. Vazirinasab E., Jafari R., Momen G. Application of Superhydrophobic Coatings as a Corrosion Barrier: A Review // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 341. P. 40–56. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.05.
18. Weimarn P.P. Studies on the Dispersoidal Synthesis of Gold by Means of Alkaline Formaldehyde Solutions // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1929. Vol. 4, Iss. 2. P. 35–47.

УДК 622.7

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ

Масленников В.С.
аспирант, Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, v.maslennikov@ksc.ru

Научный руководитель: Опалев А.С.
к.т.н., зам. директора по научной работе, Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Аннотация. Работа посвящена разработке алгоритма управления процессом магнитно-гравитационной сепарации для получения магнетитовых концентратов высокого качества (ВКК). Рассмотрено влияние крупности питания и управляющих параметров на процесс сепарации с получением грубозернистого концентрата для флотационного дообогащения. Целью работы является разработка алгоритма управления МГ-сепарацией для разработки системы управления технологическим процессом производства при производстве ВКК премиального качества. Проведены лабораторные исследования с применением физического моделирования, показывающие возможность получения грубозернистых концентратов и подтверждающие практическую значимость разработки.

Ключевые слова: высококачественный концентрат, грубозернистый концентрат, магнитно-гравитационная сепарация, физическое моделирование, система управления.

Одной из актуальных проблем черной металлургии является увеличение производства высококачественных железнорудных концентратов для процессов прямого получения железа [1–2]. В условия снижения качества добываемых руд, вовлечения в переработку труднообогатимого минерального сырья природного и техногенного происхождения требуется внедрение как новых технических и технологических решений по повышению эффективности переработки, так и внедрения цифровых технологий управления технологическим процессом [3–4]. Одним из направлений решения этой проблемы является внедрение магнитно-гравитационных сепараторов МГС-2.0, разработанных Горным институтом КНЦ РАН. Их применение позволяет не только получать высококачественный железорудный концентрат премиального качества, улучшить рентабельность производства, но и использовать данный метод как элемент системы управления технологическим процессом [5–6]. Поскольку магнитно-гравитационная сепарация основана на разделении магнетитсодержащих минеральных комплексов в восходящих водных потоках при воздействии на ферросуспензию постоянным магнитным полем низкой напряженности, то регулированием этих параметров возможно управление процессом разделения для стабилизации качества получаемых концентратов [7–8]. Целью данного исследования является разработка алгоритма управления МГ-сепарацией для разработки системы управления технологическим процессом производства ВКК премиального качества. На данном этапе исследований для установления возможности получения грубозернистого магнетитового концентрата для флотационного дообогащения были выполнены подбор режимов магнитно-гравитационной сепарации при различном питании и определение их оптимального соотношения для достижения максимального прироста качества концентрата, что необходимо для разработки цифрового двойника технологического процесса обогащения.

В качестве питания МГ-сепарации был использован концентрат мокрой магнитной сепарации АО «Карельский Окатыш». В ходе проведения экспериментов были выполнены определения химических и гранулометрических составов исходных и получаемых продуктов. Благодаря масштабированию процесса и его физическому моделированию на лабораторном МГ-сепараторе, а также проведению нескольких серий опытов как с различным по гранулометрическому составу питанием [9], так и с различными значениями управляющих параметров сепарации, были получены следующие результаты.

Всего проведено 4 серии опытов с разным исходным питанием (3 концентрата ММС-2 различной крупности и один концентрат ММС-3) по 5 экспериментов с различными параметрами восходящего потока и напряженности магнитного поля.

Из магнитной фракции ММС-3 был получен концентрат высокого качества (более 69% содержания железа общего) с более крупным гранулометрическим составом (95% класса крупности -0,070 мм) по сравнению с получаемым на фабрике концентратом. Было подобрано оптимальное питание сепарации, а именно магнитная фракция ММС-2, из которой был получен концентрат содержанием железа общего 68,6% и содержанием класса крупности -0,067 мм 95%. Также были подобраны оптимальные управляющие параметры, а именно скорость восходящего потока и напряженность магнитного поля в центре сепаратора (1 см/с и 80 Эрстед соответственно). Прирост качества концентрата МГ-сепарации от исходного питания составил 23,4% по содержанию $Fe_{общ}$ для концентрата ММС-2 и 10,4% соответственно для концентрата ММС-3.

Полученные результаты являются еще одной ступенью разработки алгоритма управления процессом МГ-сепарации. Полученные ранее данные [10] учитывали работу сепараторов на практически идентичном по гранулометрическому составу питании, так как опыты проводились непосредственно на предприятии, в отличии от текущих лабораторных экспериментов. Исходя из них можно сделать вывод, что даже при изменении параметров питания сепарации возможно получить ВКК, что подтверждает практическую значимость алгоритма управления процессом МГ-сепарации.

Благодарности: *автор выражает благодарность научному руководителю, к.т.н., Опалеву А.С. за постановку целей и задач исследования, с.н.с. Алексеевой С.А. за методическое сопровождение работы. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Развитие научно-методических основ формирования эффективных технологий переработки минерального сырья Арктической зоны РФ на основе комплексного изучения его минералого-технологических свойств FMEZ-2025-0048).*

Список литературы

1. Опалев А.С., Алексеева С.А., Черезов А.А. Исследование режимов стадиального вывода железорудного концентрата при изменении вещественного состава руды // Обогащение руд. – 2023. – № 3. – С. 3-9. – DOI: 10.17580/or.2023.03.01.
2. Лебедок А.В., Маркворт Л. Современное обогащение железной руды – вызовы и решения от ALLMINERAL // Горная промышленность. – 2022. – № 3. – С. 84-88. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-84-88.
3. Исмагилов Р.И., Голеньков Д.Н., Шелепов Э.В., Игнатова Т.В. Современные пути повышения эффективности переработки неокисленных железистых кварцитов // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019) : матер. междунар. совещания. – Иркутск : ООО «Репроцентр А1», 2019. – С. 134–136.
4. Опалев А.С., Марчевская В.В. Разработка инновационных технологий обогащения полезных ископаемых Арктической зоны России // Горная промышленность. – 2023. – № 1. – С. 63-70. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-63-70.
5. Опалев А.С. Повышение качества магнетитовых концентратов на основе магнитно-гравитационной сепарации // Горный журнал. – 2020. – № 9. – С. 72-77. – DOI: 10.17580/gzh.2020.09.10.
6. Birukov V.V., Opalev A.S., Nikitin R.M. Model of the aggregation process of fine ferromagnetic particles // E3S Web of Conferences. – 2023. – № 383. – С. 04077. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338304077.
7. Никитин Р.М., Лукичев С.В., Опалев А.С., Бирюков В.В. Адаптивная модель технологической схемы обогащения горнообогатительного предприятия на основе технологии машинного обучения // Обогащение руд. – 2024. – № 6. – С. 54-58. – DOI: 10.17580/or.2024.06.09.
8. Опалев А.С., Черезов А.А. Опыт освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях России и стран СНГ для повышения качества железорудного сырья // Горная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 122-128. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-122-128.
9. Opalev A.S., Marchevskaya V.V. Influence of magnetite grain size on magnetic susceptibility of iron ore concentrates // Journal of Mining Science. – 2023. – Т. 59. – № 1. – С. 142-147. – DOI: 10.1134/S1062739123010155.
10. Масленников В.С., Опалев А.С. К вопросу о разработке системы управления процессом магнитно-гравитационной сепарации // Тезисы Московского Международного Конгресса Обогатителей (ММКО-2025). – М.: Издательский Дом «Графит», 2025. – С. 312.

УДК 622.7

ВЛИЯНИЕ МАГНЕТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА В ВОДОРОДЕ НА КИНЕТИКУ СУХОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГЕМАТИТОВОЙ РУДЫ

Масленников Н.А.
аспирант 2 курса, НИТУ МИСИС,
Москва, Россия, masl.nik2000@gmail.com

Научный руководитель: Конюхов Ю.В.
д.т.н., зав. каф. ОПИ, НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследовано влияние магнетизирующего обжига в токе водорода на кинетику измельчения труднообогатимой гематитовой руды Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева. Целью работы было сравнение кинетики измельчения исходной и обработанной в токе водорода при температуре 375₀С в течение 20 минут руды. Условия были достаточными для обеспечения полного перехода гематита в магнетит с образованием небольшого количества металлической фазы в количестве до 5%. Процесс измельчения проводили сухим способом в шаровой мельнице. Размер частиц определяли тремя методами: электронная микроскопия, лазерная дифракция и ситовой анализ. Расчеты кинетических параметров измельчения проводили по модели А.А. Товарова. По результатам проведенных исследований было показано, что скорость образования целевого класса для обратной флотации возрастает в несколько раз, а скорость образования шламистых частиц уменьшается. Полученные результаты объясняются образованием микротрещин вследствие изменения кристаллической структуры в ходе перехода гематита в магнетит.

Ключевые слова: Гематитовые руды, магнетитовые руды, водород, магнетизирующий обжиг, кинетика измельчения.

В настоящее время у горно-обогатительных комбинатов по добыче железной руды наблюдается истощение богатых запасов, что приводит к необходимости вовлекать в переработку труднообогатимые гематитовые руды. Кроме этого, горно-металлургические предприятия испытывают сильное давление со стороны общественности и законодательства в плане выполнения конкретных действий по снижению выбросов CO_2, что может быть достигнуто за счет повышения энергоэффективности производства, а также за счет применения в производстве альтернативных углероду восстановителей. Наиболее перспективным восстановителем видится водород, поскольку в результате реакции восстановления образуется водяной пар, не загрязняющий окружающую среду. До недавнего времени водород считался дорогим газом, что ограничивало его широкое применение в промышленности. В последнее время было разработано достаточно много новых методов получения водорода и приближается момент, когда цена достигнет того значения, которое позволит массово применять водород в металлургических и обогатительных процессах.

Считается, что до 70% всех расходов на обогащение приходится на дробление и измельчение, причём около 3/4 из них приходятся на измельчение [1–3]. Кроме этого, существует потребность в разработке “сухих” методов обогащения для применения в регионах с засушливым климатом, а также в условиях космоса.

Таким образом, поиск путей интенсификации процессов сухого измельчения[4], а также разработка научно-технологических основ применения водорода в процессах обогащения является важной научно-технической задачей [5, 6].

В качестве исходного материала использовали пробу гематитовой руды Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева с содержанием общего железа 51,6% [7]. Магнетизирующий обжиг выполняли в печи «Отжиг ТМ-7»: нагрев образцов в атмосфере аргона до 375°С с последующей изотермической выдержкой в течение 20 минут в газовой смеси H_2:Ar = 90:10 и охлаждением в атмосфере аргона. Фазовый состав определяли на дифрактометре TDM-20 с обработкой в программе Match!3 [2]. Гранулометрический состав и морфологию частиц изучали методами лазерной дифракции на анализаторе Bettersizer ST, ситового анализа на установке ASV-200 и сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Quanta 600 SEM. Измельчение проводили в шаровой мельнице MSHL-7

(масса навески 200 г, соотношение шаровой загрузки 10:1, частота вращения 75 об/мин); кинетику процесса исследовали по методике Товарова В.В. [7].

Согласно данным рентгенофазового анализа, основными компонентами руды являются гематит и кварц. Также присутствуют в незначительной количестве фазы магнетита, кальцита, пирита и глинозёма. Исследование материалов до и после сухого измельчения в шаровой мельнице не выявило изменения фазового состава.

В процессе магнетизирующего обжига произошло полное восстановление гематита до магнетита, а также частичное восстановление железа (до 5%) минуя стадию образования вюстита ввиду его термодинамической нестабильности при 375 °C. При последующем сухом измельчении металлическое железо полностью окислилось до магнетита. Также возможно окисление магнетита до маггемита, однако их дифракционные пики перекрываются, что затрудняет раздельное определение этих фаз. Средние значения размера частиц для магнетизированной руды, определённые методом СЭМ, уменьшились на 13–30%, размер частиц, определённый методом лазерной дифракции, уменьшился на 15–25%. Это связано с тем, что при магнетизирующем обжиге во время восстановления гематита до магнетита происходит превращение, сопровождающееся изменением кристаллической структуры и увеличением удельного объёма.

Расчёт констант измельчения по модели Товарова В.В. показал, что скорость образования целевого класса –0,045+0,020 мм, оптимального для обратной флотации [9] для магнетизированной руды превышает аналогичный показатель для исходной руды в 4,4 раза, тогда как скорость образования шламистых частиц (–0,002+0,001 мм), негативно влияющих на флотацию [10] оказалась в 2,5 раза меньше. Максимальная скорость измельчения, определённая путём расчёта по данным изменения среднего размера частиц от времени, полученные методом лазерной дифракции и СЭМ, для магнетизированной руды оказалась выше в 1,5 и 2,1 раза соответственно по сравнению с исходной рудой.

Совокупность полученных данных создаёт научный фундамент для разработки «сухих» технологий измельчения и обогащения труднообогатимых гематитовых руд а также техногенных отходов и хвостов обогащения с применением восстановительного магнетизирующего обжига в водороде, позволяя целенаправленно увеличить скорость процесса измельчения и повысить его энергоэффективность.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ №24-29-00672.

Список литературы

1. Sahin R. Beneficiation of low/off grade iron ore: a review // Int. J. Res.-GRANTHAALAYAH. 2020. Vol. 8, No. 8. P. 328.
2. Maslennikov N. A., Khanna R., Konyukhov Y. V., Burmistrov I. N., Kravchenko M. V. Low-temperature hydrogen reduction of hematite ores in stationary and vortex layer apparatus: Impact on reduction kinetics // Chernye Metally. 2024. No. 6. P. 75.
3. Adewuyi S. O., Ahmed H. A., Ahmed H. M. Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction // Minerals. 2020. Vol. 10, No. 5. P. 423.
4. Матвеев А. И. и др. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613–622.
5. Zhang X. et al. Efficient development of ultra-low-grade iron ore by hydrogen-based mineral phase transformation: Magnetic transition, phase transformation, and microstructure evolution // International Journal of Hydrogen Energy. 2025. Vol. 97. P. 757–765.
6. Kosdauletov N. et al. Selective hydrogen reduction of metals from complex iron-bearing ores and subsequent liquid-phase separation // Results in Engineering. 2026. P. 109768.
7. Nikolaeva N. V. et al. Mineral and technological features of magnetite–hematite ores and their influence on the choice of processing technology // ACS Omega. 2021. Vol. 6, No. 13. P. 9077–9085.
8. Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А. Закономерности измельчения и расчет характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959.
9. Filippov L. O., Severov V. V., Filippova I. V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation // International Journal of Mineral Processing. 2014. Vol. 127. P. 62–69.
10. McFadzean B., Lima N. P., Deglon D. A. Decoupling the pulp and froth effect of ultrafine particles on Itabirite iron ore flotation // Minerals Engineering. 2023. Vol. 204. P. 108367.

УДК 669

СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПЛАТИНЫ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО ХЛОРИДНО-СУЛЬФАТНОГО РАСТВОРА

Никитина Т.Ю.
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, nikatatka@yandex.ru

Научный руководитель: Фокина С.Б.
к.т.н., доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе изучается сорбция платины из хлоридно-сульфатных растворов на макропористой ионнообменной смоле Purolite S985 и на гелевых ионнообменных смолах АВ-17-8, АН-31. Используемые сорбенты перед работой подвергались кондиционированию с целью удаления органических и минеральных примесей. Построены изотермы сорбции платины 1/ОЕ=f(1/Ср) при температуре 20 ^{0}С и продолжительности 24 часа. Построена зависимость количества поглощенного металла от равновесной концентрации в растворе с помощью матетематической модели – уравнения Лэнгмюра. Для установления типа кинетики ионнообменного процесса в изучаемой системе использовали формальные критерии, рассчитанные по моделям Шмуклера и Бойда – Адамсона (часто упоминаемая как модель Бойда – Адамса).

Ключевые слова: платина, металлы платиновой группы, сульфатно-хлоридные растворы, сорбционное выделение, ионообменные смолы.

Введение. Металлы платиновой группы (МПГ), наряду с золотом являются стратегическим запасом для суверенного государства на основании: невысокого содержания в земной коре ($n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-4}$, %), уникальных свойств (химическая инертность, высокая электропроводность, износостойкость) и многогранного спроса применения в различных областях (каталитические системы, автомобилестроение, медицинская и военная техника, электроника, металлургия, ювелирная отрасль) [1, 2].

Значительная часть МПГ теряется с отходами производства при переработке цветных металлов, содержащих их [3]. Постепенное истощение ресурсов по запасам платиноидов приводит к поиску новых источников их концентрирования [4]. В качестве перспективного платинометального источника может выступать техногенное сырье: отходы горного производства (отвалы вскрышных пород), металлургии (шлаки, огарки и кеки) и передела обогащения (шламовые хвосты) [5]. Содержание металлов платиновой группы в техногенных образованиях отмечают на уровне 0,2-0,3 г/т в россыпях и 0,14-4,0 г/т в отходах производства, связанных с разработкой сульфидных платиносодержащих медно-никелевых месторождений. В нашей стране техногенные месторождения представлены [6, 7]: 1. Высокоресурсными промышленными объектами (балансовые запасы): Шануч-ский и Корякский (Камчасткий край), Нижнетагильский (Средний Урал), Норильский (Красноярский край), Алданский (Якутия) районы; 2. Потенциально промышленными объектами (забалансовые запасы): Печенгский и Мончегорский (Мурманская область), Уфалейский (Челябинская область), Качканарский (Свердловская область) районы; 3. Перспективными объектами (отсутствие промышленной переработки): Бураковский и Онежский (Карелия), Федорово-Панский (Кольский полуостров и Мурманская область), Сухоложский (Красноярский край), Полярноуральский (Ямалоненецкий автомномный округ) районы.

Металлы платиновой группы обладают собственно минеральной формой, характеризующийся наибольшей долей по сравнению с другими химическими элементами. Наряду с этим в природе МПГ встречаются в хлоридных комплексах, а также комплексах с серой и другими халькогенидами. Их образование связано со склонностью к образованию минералов с направленными ковалентными связями [8]. В зависимости от технологического цикла металлы платиновой группы встречаются в растворе в виде комплексных соединений: хлоридных, сульфатных и смешанных [9]. Сульфатные комплексы по сравнению с хлорокомплексами обладают кинетической инертностью и сложностью при сорбции по сравнению с хлорокомплексами. Цель работы: изучение сорбционного выделения платины из синтетического сульфатно-хлоридного раствора.

Методы. Исходный рабочий раствор платины готовили из платинохлористоводородной кислоты с добавлением концентрированной соляной кислоты [10]. Начальная концентрация платины при сорбционном концентрировании составляла 0,26 ммоль/л. Концентрации HCl и H_2SO_4 составили 0,5 моль/л при их молярном соотношении 1:1. Навеску анионита (1 г.) перемешивали в сульфатно-хлоридном растворе объемом 50 мл при температуре 20°С. По истечении 24 ч определяли концентрацию платины в равновесном растворе. Далее рассчитывали обменную ёмкость сорбента (ОЕ, ммоль/г), извлечение (R, %). Для построения изотерм сорбции $1/OE=f(1/C_p)$, где C_p – равновесная концентрация) использовали вариацию отношения ионитов (1 г) и растворов (25, 50, 75 и 100 мл). Для исследования кинетики сорбционного равновесия применяли формальтные критерии модели Бойда-Адамсона и Шмуклера.

Результаты. Анализируя данные по сорбции из сульфатно-хлоридных растворов составили ряд сорбируемости по отношению к комплексам Pt (II, IV) для ионитов: Purolite S 985 > АВ-17-8 > АН-31. Построили изотермы сорбции ионов платины. Изотермы сорбции, имеющие выпуклый вид, указывают на достаточную селективность к комплексным соединениям платины (II, IV). На основании расчета формальных критериев выявлено, что по модели Бойда-Адамсона лимитирующей стадией является внешнедиффузионный перенос (диффузия через слой жидкости (пленки) вокруг частицы), что подтверждает незначительная линейная корреляция экспериментальных данных. Критерии модели Шмуклера, рассчитанные двумя способами, подтверждают данные.

Обсуждение. Технологические растворы, полученные после выщелачивания сырья, содержащего малое количество МПГ, обладают высоким фоном других металлов. Зачастую такие растворы сложно оценить на содержание комплексов платиноидов. Достигнутые показатели извлечения платины в сорбент (80-95%), позволяют предположить, что выбранные иониты обладают достаточной селективностью по отношению к МПГ.

Заключение. Типы выщелачивания (кучное и подземное) для переработки техногенного сырья, обогащенного МПГ, базируются на работе в сульфатно-хлоридной среде, а сорбция на ионообменной смоле является методом селективного концентрирования МПГ из продукционных растворов. Из синтетических растворов при сорбции платины наиболее полное извлечение достигается при применении смолы Purolite S985.

Список литературы

1. Высотина А.Е., Слепченко Г.Б. Сорбционно-атомно-эмиссионное определение платины и палладия в технологических растворах с использованием сорбента Lewatit AF5 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2025. – Т. 91, № 5. – С. 22. – DOI: 10.26896/1028-6861-2025-91-5-10-15.

2. Широкая А.А., Дрогобужская С.В., Новиков А.И. Изучение сорбционных процессов на полиакрилонитрильных волокнах ФИБАН АК-22 // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2023. – Т. 14, № 5. – С. 108. – DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.5.019.

3. Дрогобужская С.В., Широкая А.А., Соловьев С.А. Сорбционное извлечение платиновых металлов из кислых хлоридно-сульфатных и сульфатных растворов волокнами ФИБАН // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62, № 11. – С. 118. – DOI: 10.6060/ivkkt.20196211.5982.

4. Кононова О.Н., Дуба Е.В., Ефимова А.С. [и др.]. Ионообменное извлечение платины (IV) в присутствии серебра (I) из солянокислых растворов // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94, № 4. – С. 602. – DOI: 10.31857/S004445372004007X.

5. Гурская Л.И., Додин Д.А. Минеральные ресурсы платиновых металлов России: перспективы расширения // Региональная геология и металлогения. – 2015. – № 64. – С. 84–93. – EDN: VLAKMF.

6. Алексеев Я.В., Заскинд Е.С., Конкина О.М. Сырьевая база металлов платиновой группы России: состояние, освоение и перспективы развития до 2040 года // Отечественная геология. – 2022. – № 2. – С. 6. – DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10006. – EDN: DBGRIX.

7. Гурская Л.И., Снежко О.Н., Молчанов А.В., Васильев С.П. Техногенные месторождения платиновых металлов – новый источник ценного промышленного сырья // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 66. – С. 80–90. – EDN: WEIOVP.

8. Янин Е.П. Платиновые металлы в окружающей среде (эколого-геохимические аспекты). – Москва : НП «АРСО», 2021. – 232 с. – ISBN 978-5-906731-88-3. – EDN: AICLOB.

9. Дуба Е.В., Косолапов И.И., Кононова О.Н. Сорбция и разделение платины (II, IV) и железа (III) на анионите Purolite S985 из хлоридных растворов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. VIII Международная конференция Российского химического общества имени Д.И. Менделеева : тезисы докладов, Москва, 24 октября 2017 года. – Москва : Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева ; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2017. – С. 128–129. – EDN: YJRWYP.

10. Petrov G., Zotova I., Nikitina T., Fokina S. Sorption recovery of platinum metals from production solutions of sulfate-chloride leaching of chromite wastes // Metals. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 1–2. – DOI: 10.3390/met11040569.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ СИСТЕМЫ AL-CU-FE ДЛЯ ЗАЩИТЫ НКТ

Парфенов К.В.
аспирант, преподаватель, ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия, kparfenovv@mail.ru

Научный руководитель: Ибатуллин И.Д.
д.т.н., и.о. заведующего кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств», ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

Аннотация. Коррозия насосно-компрессорных труб (НКТ) остаётся одной из основных причин отказов внутрискважинного оборудования, что определяет актуальность разработки новых методов защиты. Цель работы – изучение антикоррозионных свойств квазикристаллов Al-Cu-Fe. Научная новизна заключается в применении квазикристаллов, вводимых в агрессивную среду как ингибитор и действующих по принципу протектора с формированием устойчивой защитной пленки. Установлено, что максимальное защитное действие достигается при дисперсности 40 мкм и сохраняется при изменении температуры при различном химическом составестали.

Ключевые слова: коррозия, НКТ, квазикристаллы системы Al-Cu-Fe, порошковые защитные материалы, массовый показатель скорости коррозии.

Введение. Ежегодные мировые потери от коррозии составляют около 3,4 % мирового ВВП (более 2,5 трлн долл. США) [1]. НКТ, работающие в средах с хлоридами, CO_2 и H_2S, подвержены интенсивной коррозии, на которую приходится до 40 % отказов внутрискважинного оборудования [2-4]. Для защиты НКТ применяются легированные хромистые стали [5], покрытия [6], ингибиторная [7] и протекторная защита [8], однако эти методы имеют ограничения.

В работе [9] рассматриваются порошковые материалы на основе квазикристаллов Al-Cu-Fe как перспективный метод защиты благодаря сочетанию физико-химических свойств и доступности компонентов [10]. Научная новизна заключается в том, что квазикристаллы вводятся в агрессивную среду как ингибитор, действуют по принципу протектора и способствуют формированию на поверхности стали устойчивой защитной пленки.

Целью исследования является изучение антикоррозионных свойств порошкового защитного материала (протектора). В задачи работы входит проведение испытаний образцов-свидетелей коррозии (ОСК), изготовленных из ранее эксплуатировавшихся НКТ, в пластовых водах, отобранных со скважин Самарской области. В экспериментах использованы квазикристаллы системы Al–Cu–Fe с дисперсностью 5, 25 и 40 мкм, а также мелкодисперсные порошки алюминия, магния, цинка и их смесей.

Методы. Перед экспериментом поверхности образцов зачищали, обезжиривали и измеряли их размеры и массу. Порошки изучали методом сканирующей электронной микроскопии с EDS и микрорентгенофлуоресцентным анализом. Коррозионная стойкость оценивалась гравиметрическим методом по ГОСТ 9.506-87 с определением массового и глубинного показателя скорости коррозии и степени защитного действия.

Результаты. Испытания ОСК показали, что степень защитного действия квазикристаллов системы Al-Cu-Fe существенно зависит от дисперсности частиц, химического состава сталей НКТ и температуры среды. При дисперсности 40 мкм защита сталей 40, 35Г и D достигает 96–100 % и остаётся стабильной при изменении температуры. Для частиц 5 и 25 мкм степень защиты ниже (54-67 %) и в большей мере определяется составом стали, при этом повышение температуры до 40 °C приводит к увеличению

эффективности. Особо заметный защитный эффект (80-95 %) наблюдался для смеси квазикристаллов 25 мкм с магнием. Мелкодисперсные порошки алюминия, магния, цинка и их смесей проявили менее выраженный защитный эффект. Результаты демонстрируют оптимальное сочетание дисперсности и состава квазикристаллов для формирования устойчивой защитной пленки на поверхности НКТ.

Обсуждение. Полученные данные подтверждают, что защитное действие квазикристаллов Al-Cu-Fe тесно связано с формированием гальванической пары и устойчивой защитной пленки на поверхности стали. Для мелкодисперсных частиц защитный эффект ограничен структурной и химической неоднородностью сталей, что согласуется с литературными данными о влиянии углерода, марганца и серы на локальную коррозию. Увеличение дисперсности до 40 мкм позволяет нивелировать различия в составе сталей, обеспечивая высокую и температурно стабильную защиту. Эти результаты вписываются в контекст современных исследований по протекторной защите, подтверждая эффективность квазикристаллов как перспективного порошкового антикоррозионного материала.

Заключение. Квазикристаллы Al-Cu-Fe обеспечивают высокую коррозионную защиту НКТ, особенно при дисперсности 40 мкм. Метод увеличивает срок службы оборудования, а дальнейшие исследования направлены на оптимизацию состава и структуры порошков для различных условий эксплуатации.

Список литературы

1. Фот К.С., Маркин А.Н. Концепция высокой доступности ингибирования: миф или реальность? // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 2. – С. 179-190. – DOI 10.17122/ngdelo-2025-2-179-190.
2. Гарифуллина Г.И., Хасанова А.Р., Гиззатуллина А.А. Исследование структурно-механических свойств и коррозионной стойкости насосно-компрессорных труб // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 5. – С. 131-140. – DOI 10.17122/ngdelo-2025-5-131-140.
3. Вторенко Е.А., Валекжанин И.В., Латыпов О.А., Хакимов А.М. Определение скорости локальной коррозии насосно-компрессорных труб как необходимый элемент коррозионного мониторинга // Экспозиция Нефть Газ. – 2024. – № 4(105). – С. 40-44. – DOI 10.24412/2076-6785-2024-4-40-44.
4. Петров С.С., Васин Р.А., Князева Ж.В., Андриянов Д.И., Сургаева Е.С. Коррозионное разрушение металла нефтегазопроводных труб в процессе эксплуатации и при лабораторных испытаниях // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 102-112. – DOI 10.17122/ngdelo-2020-4-102-112.
5. Vakili M., Koutník P., Kohout Ja Addressing Hydrogen Sulfide Corrosion in Oil and Gas Industries: A Sustainable Perspective // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, No. 4. – P. 1661. – DOI 10.3390/su16041661.
6. Юдин П.Е. Функциональные покрытия погружного нефтепромыслового оборудования для защиты от коррозии, асфальтосмолопарафиновых и солевых отложений: Обзор // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2025. – Т. 19, № 1. – С. 58-74. – DOI 10.17073/1997-308X-2025-1-58-74.
7. Фот К.С., Ткачева В.Э., Гарфутдинов И.Ф., Маркин А.Н. Эффективные дозировки ингибиторов коррозии для защиты нефтепромыслового оборудования от локальной углекислотной коррозии // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2024. – № 5. – С. 193–220. – DOI 10.17122/ogbus-2024-5-193-220.
8. Апасов Г.Т., Апасов Т.К., Порожняков Д.В. Протекторная защита от коррозии насосного оборудования и НКТ // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса : материалы V региональной научно-практической конференции обучающихся ВО, аспирантов и ученых, Тюмень, 28 апреля 2015 года. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – С. 283-291.
9. Парфенов К.В. Повышение коррозионной стойкости НКТ порошковыми защитными материалами на основе квазикристаллов // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 3. – С. 184-195. – DOI 10.17122/ngdelo-2025-3-184-195.
10. Huttunen-Saarivirta E., Tiainen T. Corrosion behaviour of Al-Cu-Fe alloys containing a quasicrystalline phase // Materials Chemistry and Physics. 2004. vol. 85. no. 2-3. pp. 383-395. DOI 10.1016/j.matchemphys.2004.01.025.

УДК 622.732

СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ

Петровичева В.А.[1], Макарова П.О.[2]
[1] студентка, САФУ, Архангельск, Россия, petrovicheva.v@edu.narfu.ru
[2] студентка, САФУ, Архангельск, Россия

Научный руководитель: Ширанов А.М.
ассистент кафедры Инженерной геологии, оснований и фундаментов Высшей Инженерной Школы, САФУ, Архангельск, Россия.

Аннотация. Авторами проведено исследование зависимости эффективности процессов обогащения горных пород от их прочностных характеристик и предложен новый подход к первичной переработке полезных ископаемых на основе использования разрушения через растяжение. Актуальность данного исследования обусловлена не только экономическими факторами, но и общей тенденцией ресурсосберегающих технологий в горнодобывающей отрасли. Разрушение породы за счет ее наименьшей прочности на растяжение представляется перспективным направлением, позволяющим подойти к проблеме с новой стороны.

Ключевые слова: горные породы, обогащение, одноосное сжатие, одноосное растяжение, прочностные характеристики.

Введение. Современная горнодобывающая промышленность характеризуется постоянным увеличением объемов переработки руд совместно со снижением содержания полезных компонентов, усложнением вещественного состава и возрастающей долей труднообогатимых руд [1].

Одним из факторов, определяющих эффективность рудоподготовки и последующих процессов обогащения, являются прочностные свойства горных пород. Прочность на сжатие, растяжение, твердость и анизотропность непосредственно влияют на выбор технологической схемы, параметров оборудования, определение расхода электроэнергии [2], а также на конечные технологические показатели – извлечение полезного компонента и качество концентратов [3].

Вопросами взаимосвязи физико-механических свойств горных пород и эффективности их обогащения посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. Так были установлены факторы, при которых прочностные и деформационные свойства изменяются, также применяют методики расчета энергозатрат на измельчение, основанные на гипотезах Риттингера, Кирпичева и Бонда, которые оценивают зависимость между затрачиваемой энергией на дробление породы и вновь образованными после разрушения продуктом [4, 5, 6].

Проблемой исследования является противоречие между необходимостью точного прогнозирования технологических показателей обогащения и недостаточной изученностью влияния прочностных свойств на все стадии обогащения.

Актуальность данного исследования обусловлена не только экономическими факторами (снижение энергозатрат), но и общей тенденцией ресурсосберегающих технологий в горнодобывающей отрасли [7].

Цель работы – установление зависимости между прочностными характеристиками горных пород и эффективностью их обогащения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести лабораторные испытания по определению прочностных характеристик горных пород;
2. Исследовать эффективность дробления и измельчения образцов с различной прочностью;
3. Предложить модель системы дробления с учётом проведенных испытаний.

Методы. Наибольшие значения сопротивления горные породы проявляют при сжатии, меньше при изгибе и минимальные – при растяжении, но современные методы обогащения основываются преимущественно на раздавливании и ударной силе [8].

Из-за определённого уровня вариативности механических свойств горной породы в процессе дробления с применением традиционных методов (щековых, конусных дробилок) могут возникать резкие колебания в режиме работы, моменты недогрузки и перегрузки тракта дробления и снижение производительности с увеличением расхода электроэнергии [9, 10].

В качестве исходного материала были взяты образцы вмещающей горной породы – падунская свита венда (V_2pd), сложенные средне- и крупноозёрными красноцветными песчаниками [11, 12]. По результатам испытаний предел прочности на сжатие составил 3,00 МПа, прочность на растяжение 0,25 МПа.

Для реализации и лабораторной апробации способа предварительного дробления грунтов растяжением была спроектирована и собрана модель тросовой дробилки. Образцы породы разрушаются путём защемления их тросами, прижатия к центральной осевой штанге, а также истиранием и перетиранием между собой и элементами рабочей камеры. Предполагаемый процесс разрушения носит преимущественно характер растяжения вследствие прикладывания разрушающей нормальной нагрузки точечно или линейно, в зависимости от размера образца горной породы и степени его обхвата тросами.

Для количественной оценки эффективности работы макета дробилки фиксировались следующие параметры:

- Время, затраченное на один цикл разрушения (от загрузки до выгрузки продукта);
- Максимальное усилие, прикладываемое к рукоятке, которое позволяет судить о крутящем моменте, необходимом для разрушения образца;
- Количество и линейные размеры полученных фрагментов после цикла разрушения.

Результаты. Сравнительный анализ энергозатратности является ключевым для оценки перспективности технологии. Так, для разрушения образца песчаника с прочностью на растяжение 0,25 МПа потребовалось усилие, эквивалентное примерно 100 Н. Для сравнения, согласно классической теории, разрушение того же образца сжатием потребовало бы создания усилия, превышающего текущее в 10-12 раз (соотношение прочности на сжатие и растяжение для данной породы ≈ 12:1). Это служит косвенным, но убедительным подтверждением потенциального преимущества в энергоэффективности

Обсуждение. Анализ результатов лабораторных испытаний подтвердил работоспособность предложенной концепции разрушения горной породы путем создания напряжений растяжения.

Проведённое исследование указывает на зависимость эффективности процессов обогащения от прочностных характеристик, а существующие технологии дробления и измельчения, основанные преимущественно на сжатии и сдвиге, не учитывают нестабильность физико-механических свойств перерабатываемой породы.

Заключение. Ключевым результатом стало использование совершенно другого подхода к первичной переработке полезных ископаемых

Основные достижения и выводы:

1. Влияние прочности на процесс предварительного дробления. Учитывая переменчивость свойств руды стоит принимать во внимание распределение нагрузки и производительность дробящего оборудования.

2. Проведен сравнительный анализ и доказана потенциальная энергоэффективность предложенного метода тросового разрушения по сравнению с традиционными способами, основанными на сжатии.

3. Установлено комплексное влияние на последующие стадии обогащения. Кроме разрушения геологического материала, предварительное дробление выше предложенным

методом позволяет влиять на селективную дезинтеграцию в последующих процессах [13]. Так, в образцах, которые не разрушились, при воздействии усилий на разрыв, возникает сеть трещин и с дальнейшим повышением нагрузки или с ее прекращением начнется самопроизвольный процесс развития и увеличения трещин [14].

4. Повышение энергоэффективности на стадии рудоподготовки за счет использования более «слабого» типа деформаций.

Список литературы

1. Авдохин, В.М. Проблемы и перспективы переработки тонких частиц [Текст] / В.М. Авдохин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва. – 2011. – № S1. – С. 567–579.
2. Хопунов, Э.А. Причины низкой энергоэффективности процессов измельчения минерального сырья [Текст] / Э. А Хопунов // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург – 2015. – №4. – С. 98–100.
3. Малич, Н.Г. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов [Текст] / Н.Г. Малич, В.С. Блохин, А.О. Дегтярев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва. – 2007. – № 21. – С. 365–380.
4. Свойства горных пород и методы их определения [Текст]: книга/ Е.И. Ильницкая [и др.]; Недра. – Москва: 1969. – 392 с.
5. Лагунова, Ю.А. Энергетическая модель процесса дробления горных пород сжатием [Текст] / Ю.А. Лагунова // Известия уральского государственного горного университета. – Екатеринбург – 1997. – №6. – С. 100–104.
6. Мишин, И.И. Определение зависимости потребной мощности щековой дробилки от степени износа дробящих плит [Текст] / И.И. Мишин, В.И. Болобов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – Санкт-Петербург. – 2019. – № 3. – С. 18–25.
7. Буткевич, Г.Р. Ресурсосберегающие технологии горных работ [Текст] / Г.Р. Буткевич // ГИАБ. 1997. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayuschie-tehnologii-gornyh-rabot (дата обращения: 03.10.2025).
8. Горлов, И.В. Анализ процесса измельчения слабых горных пород [Текст] / И.В. Горлов, П.Е. Митусов, А.М. Беляев // Уголь. – Москва. – 2022. – № 6 (1155). – С. 44–47.
9. Хопунов, Э.А. Энергетические и силовые факторы селективного разрушения руд [Текст] / Э.А. Хопунов // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург – 2020. – №1. – С. 79–88.
10. Хурэлчулуун, И. Применение визиометрического анализа гранулометрического состава руды для автоматизированного управления процессом дробления [Текст] / И. Хурэлчулуун [и др.] // Руды и металлы. – Москва. – 2019. – № 1. – С. 67–73.
11. Кутинов, Ю.Г. Возможности обнаружения месторождений полезных ископаемых на территории Архангельской области (по геолого-геофизическим данным) [Текст] / Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 83. – С. 68–75.
12. Маслов, А.В. Геохимические особенности тонкозернистых терригенных пород верхнего венда Беломорско-Кулойского плато – индикаторы состава палеоводосборов [Текст] / А.В. Маслов [и др.] // Известия уральского государственного горного университета. – Екатеринбург – 2007. – № 22. – С. 22–29.
13. Краснов, Г.Д. Оценка селективности измельчения минеральных комплексов [Текст] / Г.Д. Краснов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва. – 2013. – № 2. – С. 86–97.
14. Калачев, В.А. Особенности растрескивания горных пород под действием растягивающих нагрузок [Текст] / В.А. Калачев [и др.] // Минералы: строение, свойства, методы исследования. – Екатеринбург – 2020. – № IX. – С. 84.

СЕЛЕКТИВНОСТЬ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА ИЗ ЗОЛЫ-УНОСА ТЭЦ НА КОНЦЕНТРАЦИОННОМ СТОЛЕ РП-4

Пличко С.С., Шипунов Л.В.
Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия

Научный руководитель: Лавриненко А.А.
д.т.н., гл. науч. сотр., зав. лаб. (ИПКОН РАН)

Актуальность исследования. Золошлаковые отходы (ЗШО) тепловых электростанций представляют собой крупнотоннажный техногенный ресурс, комплексная переработка которого является актуальной задачей минералотехнологии [1]. Зола-унос угольных ТЭЦ содержит различные кремний-, алюминий-, железо- и титан-содержащие фазы, однако селективное концентрирование TiO_2 затруднено из-за рассеянного характера вхождения титана в алюмосиликатную стекловидную матрицу [2]. В настоящей работе исследована Ti-селективность концентрационного стола РП-4 со встроенной системой вращающихся редкоземельных магнитов и предложен механизм аномального концентрирования TiO_2 при одновременном удалении Fe_2O_3.

Методика эксперимента. Исследования проводились на золе-уносе Магаданской ТЭЦ. Химический состав исходного питания (масс. %): Fe_2O_3 = 6,74; TiO_2 = 1,72; SiO_2 = 58,7; Al_2O_3 = 22,7; C = 6,14. По данным рентгенофазового анализа (ИПКОН РАН), проба содержит ≈40 % аморфного стекла, ≈20 % кварца, ≈18 % муллита, а также клиноэнстатит $MgSiO_3$, силлиманит, цоизит и тридимит. Самостоятельные минеральные фазы титана (ильменит, рутил) не обнаружены, что указывает на рассеянное вхождение TiO_2 в алюмосиликатное стекло.

Микрозондовый анализ (СЭМ Newton NT-3200 + ЭДС INCA, 170 спектров по 13 участкам) показал, что 30,6 % исследованных частиц (52 спектра) представляют собой дискретные Fe-сферы (FeO > 50 %, $\rho \approx 5{,}0–5{,}2$ г/см³), из которых 22 являются магнезиоферритом (MgO до 23,9 %). Самостоятельных Ti-минералов не обнаружено: все 23 спектра с TiO_2 > 1 % соответствуют алюмосиликатному стеклу (SiO_2 > 30 %, Al_2O_3 > 8 %). Титан в золе-уносе не образует собственных минеральных фаз, а входит в состав тяжёлых алюмосиликатных микросфер, тогда как железо представлено дискретными магнитными частицами.

Эксперименты выполнены на концентрационном столе РП-4 в штатной конфигурации – с системой вращающихся редкоземельных магнитов под декой стола. Проведено 6 экспериментов с тремя повторами каждый (18 записей). Анализ продуктов обогащения выполнен методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF).

Результаты и обсуждение. В штатной конфигурации стола РП-4 получен концентрат (КЦ+ПП) с выходом γ = 4,49 %, содержанием $\beta_{(TiO_2)}$ = 7,14 % и $\beta_{(Fe_2O_3)}$ = 3,11 %. Коэффициент концентрации титана $K_{(TiO_2)}$ = 4,15, извлечение $\varepsilon_{(TiO_2)}$ = 18,64 %. При этом коэффициент концентрации железа $K_{(Fe_2O_3)}$ = 0,461, то есть содержание Fe_2O_3 в концентрате существенно ниже исходного. Данный результат является аномальным для гравитационного аппарата: одновременное обогащение по TiO_2 (в 4,15 раза) и обеднение по Fe_2O_3 (в 2,2 раза) указывает на действие двойного принципа селекции.

Механизм двойной селекции объясняется совместным действием магнитных и гравитационных сил. Вращающиеся редкоземельные магниты под декой стола поднимают магнитные частицы – дискретные Fe-сферы (магнетит, магнезиоферрит; FeO до 94,8 %, $\rho \approx 5{,}0–5{,}2$ г/см³) – к поверхности потока, откуда они смываются в хвосты. Магниты работают как «отрицательный селектор» для железа: вместо того чтобы удерживать магнитные частицы в концентрате, они выводят их из зоны гравитационного обогащения. Одновременно тяжёлые немагнитные частицы – алюмосиликатные стёкла с включённым TiO_2 – задерживаются в нарифлениях деки и переходят в концентрат.

Данные микрозондового анализа (170 спектров ЭДС) количественно подтверждают эту модель. Максимальное содержание TiO_2 в отдельных частицах достигает 10,3 % при SiO_2 = 38,3 % и FeO = 2,1 %, что однозначно указывает на стекловидную фазу. Скачок FeO от 1,9 до 94,8 % между соседними точками анализа подтверждает дискретный характер Fe-сфер, что согласуется с литературными данными о железосодержащих микросферах золы-уноса [4]: магнитная система стола удаляет именно эти частицы, а Ti-обогащённые стёкла удерживаются в нарифлениях деки. Низкий выход концентрата (4,49 %) при высоком $К(TiO_2)$ = 4,15 свидетельствует о высокой избирательности процесса двойной селекции [3].

Выводы

1. Штатная конфигурация магнитной системы стола РП-4 обеспечивает уникальный механизм двойной селекции – магнитное удаление железосодержащих фаз и гравитационное удержание тяжёлых Ti-содержащих алюмосиликатных стёкол, – что приводит к $К_{(TiO_2)}$ = 4,15 при одновременном $К_{(Fe_2O_3)}$ = 0,46.

2. Микрозондовый анализ 170 спектров ЭДС подтвердил отсутствие самостоятельных минеральных фаз титана: все частицы с TiO_2 > 1 % являются алюмосиликатными стёклами. Это обосновывает «стекловидную модель» вхождения TiO_2 в тяжёлые алюмосиликатные микросферы ($\rho \approx 2{,}5–2{,}8$ г/см³) и объясняет механизм магнитогравитационного концентрирования.

3. Полученный предконцентрат ($\beta_{(TiO_2)}$ = 7,14 %, $\beta_{(Fe_2O_3)}$ = 3,11 %, γ = 4,49 %) пригоден для последующей гидрометаллургической переработки; пониженное содержание Fe_2O_3 существенно упрощает кислотное выщелачивание титана.

Список литературы

1. Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Крылов И.О., Писарева А.А. Извлечение ценных компонентов из золошлаковых отходов слоевого сжигания каменных углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9-1. – С. 90–102. – DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_90.
2. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash // Earth-Science Reviews. – 2015. – Vol. 141. – P. 105–121. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016.
3. Гайдай Н.К., Кузьменков М.А., Шипунов Л.В. Определение базовых технологических параметров обогащения зол МТЭЦ // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2022. – № 37. – С. 86–92.
4. Sharonova O.M., Anshits N.N., Anshits A.G. Composition and morphology of narrowly sized ferrospheres isolated from various types of fly ash // Inorganic Materials. – 2013. – Vol. 49, No. 6. – P. 586–594. – DOI: 10.1134/S0020168513060113.
5. Xue Q., Lu S. Microstructure of ferrospheres in fly ashes: SEM, EDX and ESEM analysis // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. – 2008. – Vol. 9, No. 11. – P. 1595–1600. – DOI: 10.1631/jzus.A0820051.
6. Zhao Y.C., Zhang J.Y., Sun J.M., Bai X.F., Zheng C.G. Mineralogy, chemical composition, and microstructure of ferrospheres in fly ashes from coal combustion // Energy & Fuels. – 2006. – Vol. 20, No. 4. – P. 1490–1497. – DOI: 10.1021/ef060008f.
7. Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – Vol. 36, No. 3. – P. 327–363. – DOI: 10.1016/j.pecs.2009.11.003.
8. Vassilev S.V., Vassileva C.G. Methods for characterization of composition of fly ashes from coal-fired power stations: A critical overview // Energy & Fuels. – 2005. – Vol. 19, No. 3. – P. 1084–1098. – DOI: 10.1021/ef049694d.

УДК 621.793.6

КОМПЛЕКСНАЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Савула Е.А.
аспирант, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия, katya.savula.01@mail.ru

Научный руководитель: Горбатенко В.П.
д.т.н., профессор, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию комплексной химико-термической обработки стальных изделий путем последовательного насыщения бором и цинком. Целью работы является изучение структуры и свойств полученных покрытий, а также оценка их коррозионной стойкости. В ходе исследования проведены эксперименты по борированию и цинкованию образцов углеродистой стали с последующим анализом микроструктуры и измерением толщины диффузионных слоев. Установлено, что сплошной боридный слой достигает глубины около 25 мкм, а цинковое покрытие – около 9 мкм. Результаты показали значительное повышение коррозионной стойкости стали в нейтральной среде после борирования и дополнительного цинкования. Полученные данные имеют практическое значение для создания износостойких покрытий для применения в условиях абразивного износа и высокой коррозионной активности среды.

Ключевые слова: углеродистая сталь, комплексная обработка, борирование, цинкование, коррозионная стойкость, структура, глубина диффузионного слоя.

Введение. Получение на поверхности изделия диффузионного слоя определенной толщины и состава позволяет решить целый ряд задач: повысить износостойкость, твердость поверхности, коррозионную стойкость, использовать дешевые и нелегированные стали. Современные исследования в направлении химико-термической обработки сталей преимущественно ориентированы на совершенствование соответствующего метода получения диффузионного слоя и повышение эффективности процесса и качества структуры как самого слоя, так и основного металла [1, 2]. Недостаточно внимания уделяется реализации комплексного последовательного диффузионного насыщения поверхностного слоя различными насыщающими компонентами.

Цель работы состоит в исследовании поверхностного слоя стали, полученного в ходе комплексной химико-термической обработки, заключающейся в последовательном насыщение бором и цинком.

Исходя из цели сформулированы задачи исследования:

- изучение структуры и свойств борированной стали, оценка ее коррозионной стойкости;

- исследование структуры борированных образцов после дополнительного цинкования, оценка глубины цинкового слоя, оценка его коррозионной стойкости.

Методы. В качестве материала для исследований были выбраны образцы низкоуглеродистой стали в виде пластин с размерами 20х15х2 мм. Обработка образцов представляла собой борирование и последующее диффузионное цинкование. Борирование выполняли в порошке карбида бора в контейнере с плавким затвором. Цинкование выполняли во вращающейся кварцевой трубке, имитирующей обработку в ретортной печи для получения более равномерного цинкового покрытия.

После обработки на образцах исследовали микро и макроструктуру, проводили измерение толщины полученных диффузионных слоев и коррозионные испытания в различных средах.

Результаты. Наличие цинкового слоя фиксируется по макроструктуре – поверхность борированного образца приобретает светло-серый цвет. Цинкование никак не изменяет строение боридного слоя.

Толщину слоя боридов определяли двумя методами: металлографическим и магнитной толщинометрией. По результатам металлографического анализа, толщина сплошного боридного слоя составила 23±6 мкм, в то время как общий слой с боридными иглами составляет 119±17 мкм. Толщина слоя, определенная магнитным методом, составила около 11 мкм.

Толщина цинкового слоя, определенная металлографическим методом, в среднем равна 9 мкм.

Борирование повышает коррозионную стойкость стали в кислой и нейтральной среде в 5 и 10 раз соответственно. Однако борированная поверхность низкоуглеродистой стали в атмосферных условиях достаточно быстро покрывается слоем продуктов коррозии. Дополнительное цинкование позволяет увеличить коррозионную стойкость исходной стали в нейтральной среде.

Обсуждение. При оценке глубины боридного слоя методом магнитной толщинометрии с большой вероятностью прибор определял толщину верхнего слоя – борида FeB [3].

Данные, полученные в ходе коррозионных испытаний, позволяют говорить о значительном повышении коррозионной стойкости стали в нейтральных средах стали после комплексной обработки по сравнению с борированием.

Полученные поверхностные слои имеют перспективы использования в условиях абразивного износа в сочетании с высокой коррозионной активностью среды. Примером использования могут служить щелевые сита для роторов центрифуг, которые широко используются для обезвоживания сырья во многих отраслях промышленности

Заключение. Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- борирование позволяет повысить коррозионную стойкость низкоуглеродистой стали в нейтральной и кислой средах:
- в атмосферных условиях поверхность покрывается продуктами коррозии;
- дополнительное цинкование в порошковой смеси позволяет повысить коррозионную стойкость борированной низкоуглеродистой стали почти в 5 раз.

Список литературы

1. Федоров, А.Д. К вопросу последовательного титанирования и цементации стали 45 / А.Д. Федоров, М.Н. Тимофеев, С.Я. Пичхидзе // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2022. – № 3(94). – С. 92-102.

2. Шабурова, Н.А. Распределение хрома и молибдена в диффузионном слое стали 35Х2Н3 при совместном термодиффузионном насыщении / Н.А. Шабурова, Ю.Д. Шабурова, И.Ю. Пашкеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 53-63.

3. Ляхова, М.Б. Доменная структура и магнитные свойства соединений железа и бора / М.Б. Ляхова, О.В. Жданова // Вестник ТвГУ. Серия: Физика. – 2009. – №5. – С. 9-17.

УДК 666.3.022 :622.276-048.583

УТИЛИЗАЦИЯ БУРОВОГО ШЛАМА В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАСС ДЛЯ МЕЛКОЙ ПЛАСТИКИ И ДЕКОРАТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сагинашвили А.Р.
студент кафедры «Общая химия и технология силикатов»,
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия, sasha.saginashvili@gmail.com

Научный руководитель: Климова Л.В.
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Общая химия и технология силикатов»,
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия, lyudmila.clim@yandex.ru

Аннотация. Исследована возможность утилизации бурового шлама путем внедрения в технологию производства художественной керамики, разработаны составы керамических масс КШ-30 (буровой шлам – 30%, глина – 35%, каолин – 15% песок – 20%) и КШ-40 (буровой шлам – 40%, глина – 25%, каолин – 15% песок – 20%). Проведены исследования физико-химических свойств керамических масс: воздушная, огневая и общая усадка образцов при температурах обжига 1000°С и 1100°С. Выявлено, что составы относятся к среднепластичному сырью (число пластичности 17,5 и 15,3). Показано, что увеличение доли шлама снижает общую усадку (с 9,22% до 6,06% при 1100°С и с 7,82% до 6,48% при температуре 1000 ºС) и придает черепку насыщенный терракотовый цвет. Полученные результаты подтверждают перспективность использования бурового шлама для керамических масс при производстве декоративных изделий.

Ключевые слова: буровой шлам, художественная керамика, утилизация отходов, сырьевая смесь, глина, керамические массы.

Введение. На сегодняшний день одной из актуальных экологических проблем является утилизация отходов нефтедобывающей промышленности, в том числе буровых шламов, на долю которых приходится порядка 1-5 тонн на 1 тонну выработанной нефти. Россия занимает третье место среди лидеров по добыче нефти, а количество образовавшихся отходов от добычи нефти за год достигает нескольких миллионов тонн. Помимо экологической проблемы, актуальность работы связана с истощением запасов качественных глин – не возобновляемого сырья, свойства которого требуют коррекции, в том числе за счет техногенных отходов. Именно по этой причине требуются разработка новых методов утилизации отходов нефтедобывающей промышленности и разработка ресурсосберегающих керамических масс. Одним из возможных способов становится внедрение бурового шлама в составы художественных керамических масс [1-3].

Методы. В качестве объектов научного исследования были выбраны буровой шлам Уренгойского месторождение (Ямало-ненецкий автономный округ, глина ВКС-1 Владимирского месторождения (Ростовская область) и каолин КР-1 Еленинского месторождения (Челябинской области) соответствующий требованиям ГОСТ 21286-82 «Каолин обогащённый для керамических изделий. Технические условия», в качестве отощителя – кварцевый песок (Ерофеевский Песчаный карьер, Ростовская область). Определение химического состава и концентрации оксидов, проводили методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF), и было выявлено, что в составе бурового шлама присутствуют SiO_2 (63,23%) и Al_2O_3 (12,11%) необходимые для формирования кристаллической фазы в структуре керамического черепка. Потеря массы при прокаливании определялась по методике Научного совета по аналитическим методам исследований с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии (НСАМ, ВИМС) 418-Х при температуре 1050 ºС [5]. Были разработаны два состава керамических масс КШ-30 (буровой

шлам – 30%, глина – 35%, каолин- 15% песок – 20%) и КШ- 40 (буровой шлам – 40%, глина – 25%, каолин- 15% песок – 20%). Образцы отформовывались пластичным способом, далее подвергались сушке на воздухе и в сушильном шкафу при 105 ºС. Был выбран оптимальный режим обжига: 3 °/мин до температуры 1000 или 1100 ºС с выдержкой при конечной температуре в течении 30 минут, изучены физико-химические свойства керамических масс (пластичность, воздушная, огневая и общая усадка).

Результаты. Результаты исследований показали, что состав керамической массы КШ-30 (число пластичности – 15,3) менее пластичный в сравнении с КШ-40 (число пластичности – 17,5), но оба находятся в пределах значений умерено пластичного сырья (КШ-40 находиться в крайних пределах допустимых значений) согласно ГОСТу 9169-75 («Сырье глинистое для керамической промышленности»). Общая объемная усадка уменьшается, в зависимости т увеличения количества шлама в составе от 7,82% до 6,48% при температуре 1000 ºС и 9,22% до 6,06% при температуре 1100 ºС. Цвет черепка имеет терракотовый окрас и становиться более насыщенным с увеличением шлама в составе.

Обсуждение. Полученные результаты позволяют составить ряд выводов: разработанные составы керамических масс относятся к категории средне пластичного сырья по ГОСТу 9169-75 «15–25», что подтверждает возможность использования данных составов для пластического формования. Значения, полученные при изучении общей объемной усадки, свидетельствуют о снижении усадки при увеличении процентного соотношения шлама (от 30% до 40%) в составе керамических масс, наблюдаемое явление можно объяснить более низкой спекаемостью шлама по сравнению с глиной, а также возможным образованием жесткого каркаса из кварцевых зерен и тугоплавких компонентов шлама. Интенсификация окраски черепка при увеличении доли шлама связана с повышенным содержанием оксидов железа (Fe_2O_3) 4,15% в составе шлама. Проведенные исследования расширяют область применения отходов нефтедобывающей отрасли, доказывая их перспективность именно в сегменте художественных масс, где требования к пластичности и декоративным свойствам сочетаются с необходимостью экологической безопасности [5].

Заключение. Экспериментально доказана возможность использования бурового шлама Уренгойского месторождения в составах художественных керамических масса. Предлагаемый подход позволяет сочетать утилизацию отходов нефтедобычи с экономией природных глинистых ресурсов, а также снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду и сформировать основы для безотходных производственных циклов в смежных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Афанасьев, С.В. Нефтешламы как вторичное сырье / С.В. Афанасьев, М.А. Паис, Н.С. Носырев // Neftegaz.RU. – 2020. − № 3, 5 [Электронный ресурс].
2. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Chumakov A.A., Vilbitskaya N.A., Wensheng Li. Research on the synthensis of propants ap-plied for oil production by the method of hydraulic facing // Mate-rials Science Forum. – 2021. Vol. 1037. – pp. 181-188.
3. Yatsenko E.A. Research of the Possibility of Using Glass and Sodium Hydroxide for Synthesis of Aluminum Silicate Propants Based on Drill Sludges / E.A. Yatsenko, A.A. Tretyak, A.A. Chumakov, V.A. Smoliy – Key Engineering Materials, Vol. 910, 2022. – 678-683 pp.
4. Альмяшев В.И. Гусаров В.В. Термические методы анализа: учеб. Пособие // СПбГТУ (ЛЭТИ). – СПб, 1999, с. 40
5. Романюк В.С., Климова Л.В., Яценко Е.А., Третьяк А.А. Исследование свойств Керамического рядового кирпича на основе отходов бурения нефтедобывающей отрасли // Техника и технология силикатов. – 2024. – №2 – 118-127 с.

УДК 622.7

ПОДАВЛЕНИЕ ФЛОТАЦИИ СЛОИСТЫХ СИЛИКАТОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЗОЛОТО-МЕДНО-МАГНЕТИТОВЫХ РУД[1]

Сидорович А.С.[1], Киселёва А.В.[2]
[1] научный сотрудник, АО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, sidorovich.as@mekhanobr.com
[2] научный сотрудник, АО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, kiseleva.av@mekhanobr.com

Научный руководитель: Таранов В.А.
к.т.н., начальник отдела технологических исследований, АО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе приведены данные по изучению влияния органических депрессоров на основе анионных полимеров различного химического состава со средними молекулярными массами в диапазоне 3250-27500 а.е.м. на флотацию слоистых силикатов в составе золото-медно-магнетитовых руд. Результаты опытов показывают тенденцию к снижению и последующей стабилизации выхода пенного продукта флотации с увеличением молекулярной массы анионных полимеров различного химического состава при их постоянном расходе, отмечено негативное влияние применения данных депрессоров на извлечение меди. При исследовании действия анионных полимеров одинакового химического состава с соответственными средними молекулярными массами 7000 и 27500 а.е.м. в диапазоне расходов 50-1000 г/т были обнаружены схожие тенденции к снижению и последующей стабилизации извлечения в пенный продукт меди и оксида магния. Отмечено снижение эффективности депрессирующего действия высокомолекулярного депрессора на слоистые силикаты с ростом концентрации полимера в жидкой фазе пульпы.

Ключевые слова: сульфидная флотация, анионные полимеры, депрессоры слоистых силикатов, золото-медно-магнетитовая руда, медная флотация, молекулярная масса полимеров.

При обогащении различных типов руд часто сталкиваются с проблемой нежелательной флотации слоистых силикатов, что приводит к снижению качества получаемых концентратов. На практике в качестве депрессоров талька и других слоистых силикатов наиболее часто применяют природные полисахариды – гуаровую камедь [1], карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) и карбоксиметилкрахмал (КМК), как в чистом виде [2-3], так и в смеси с другими соединениями [4-5]. В этой связи необходимо подчеркнуть первенство института Механобр в разработке и внедрении КМЦ в качестве депрессора силикатов на обогатительных фабриках Кольского полуострова и Красноярского края, а также в лабораторных и полупромышленных условиях на валовых пробах сульфидных медно-никелевых руд других месторождений [6-7]. Реже в качестве модификаторов, воздействующих на флотацию слоистых силикатов, применяются сополимеры и смеси органических кислот [8-9]. В работе [10] рассмотрено влияние молекулярной массы карбоксиметилированных крахмалов на их депрессирующее действие, однако для реагентов на основе производных органических кислот аналогичные зависимости изучены недостаточно.

Исследования проводились на золото-медно-магнетитовой руде, вещественный состав которой был определен с помощью количественного оптического анализа, рентгенофазового (РФА), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), а также согласованных химического и фазового анализов. Содержание элементов в продуктах обогащения

[1] Тезисы доклада впервые были представлены на Международной конференции «Плаксинские чтения-2025» (Екатеринбург, Россия, 29.09-04.10.2025) и опубликованы в сборнике «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья», ISBN: 978-5-6047797-5-0. Материалы тезисов частично основаны на публикации авторов: Сидорович А.С., Коваль А.В., Подавление флотации слоистых силикатов при переработке золото-медно-магнетитовых руд // Цветные металлы. 2026. 997. 1 С. 7-14. DOI 10.17580/tsm.2026.01.01.

определялось в аккредитованной химической лаборатории методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП, ICP-AES) в соответствии с СТО АЦ 3.001-2016[2].

Основная доля пробы представлена магнетитом (27,6 %), пироксенами (18,9 %) и карбонатами (9,2 %) – характерными минералами для скарнов. Помимо магнетита в группу рудных минералов входят халькопирит (1,5 %) и пирит (2,4 %). На минералы группы слоистых алюмосиликатов (глинисто-слюдистые минералы, хлорит, тальк, серпентин) приходится 24,2 % общей массы.

Для оценки влияния молекулярной массы на депрессирующие свойства реагентов использованы образцы депрессоров 1-6 (таблица 1). Состав и среднее значение молекулярной массы приняты по данным паспортов реагентов. Приведенные ниже реагенты, за исключением образцов 1 и 2, 3 и 6, имеют различный химический состав, но входят в одну группу анионных полимеров по причине наличия в них одинаковой функциональной группы – карбоксилат-иона.

Таблица 1

Характеристика образцов депрессоров

№ образца	Состав	Средняя молекулярная масса, а.е.м.	Функциональная группа в ионизированной форме	
			Формула	Наименование
1	Полиакрилат натрия	3250	$-COO^-$	Карбоксилат-ион
2	Полиакрилат натрия	6000	$-COO^-$	Карбоксилат-ион
3	Сополимер акриловой и малеиновой кислот и их солей	7000	$-COO^-$	Карбоксилат-ион
4	Сополимер акриловой, метакриловой и малеиновой кислот	13750	$-COO^-$	Карбоксилат-ион
5	Смесь акриловой и винилсульфоновой кислот и их солей	17500	$-SO_3^-$ $-COO^-$	Сульфонат-ион Карбоксилат-ион
6	Сополимер акриловой и малеиновой кислот и их солей	27500	$-COO^-$	Карбоксилат-ион

Действие реагентов рассматривается на стадии основной флотации на питании крупностью 70 % класса -0,071 мм в открытом цикле и сравнивается с результатами базового опыта без подачи депрессора. По результатам проведенных опытов наблюдается общая тенденция к снижению выхода пенного продукта и извлечения в него меди с ростом молекулярной массы депрессора и стабилизация показателей с некоторого значения молекулярной массы реагента, в рассматриваемых условиях 13750 а.е.м., наряду с незначительным увеличением извлечения магниевых минералов в хвосты флотации.

Для объективной оценки влияния молекулярной массы на подавление флотации слоистых силикатов были отобраны образцы 3 и 6 сходного химического состава, различающиеся только молекулярной массой входящих в них сополимеров (7000 и 27500 а.е.м.), и протестированы при расходах 50, 150, 500 и 1000 г/т. Введение депрессора оказывает влияние на извлечение меди в концентрат и приводит к его снижению уже при расходе 50 г/т, при этом потери меди выше при подаче высокомолекулярного депрессора. Подавление магниевых силикатов несколько усиливается при повышении расхода депрессора с массой 7000 а.е.м., однако с повышением молекулярной массы этот эффект не прослеживается явно, и извлечение MgO в концентрат стабилизируется.

[2] СТО АЦ 3.001–2016. Методика (метод) измерений. Породы горные, руды, продукты их переработки. Определение массовых долей элементов атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой. – ФГУП «ВИМС», 2025.

Это говорит о снижении эффективности депрессирующего действия высокомолекулярного депрессора при повышении его концентрации в жидкой фазе флотационной пульпы, которое может быть объяснено возникающими стерическими эффектами, затрудняющими реакционную способность крупных молекул, особенно в реакциях, требующих доступа к функциональным группам, а также электростатическими силами отталкивания, возникающими вследствие возрастания числа ионизирующихся групп, увеличению отрицательного заряда полианиона и снижению сорбции полимера на поверхности минеральной частицы.

Структурная стабильность компонентов анионных полимеров зависит от величины показателя pH среды, реакционная способность обусловлена нахождением вещества в ионизированной форме и проявляется в нейтральной и щелочной среде. На примере образцов 3 и 6 рассмотрена стабильность действия депрессоров при pH 8,5, 9,5, 10,5 с целью определения рабочего диапазона значений pH. Нижняя граница рассматриваемого диапазона обусловлена естественным pH пульпы. В результате проведенных опытов установлено, что с изменением pH пульпы с 8,5 до 10,5 в случае применения сравниваемых депрессоров наблюдается прирост извлечения меди в концентрат до 3 %, при этом с ростом молекулярной массы потери меди в хвостах при прочих равных условиях увеличиваются.

Таким образом, в ряду рассматриваемых депрессоров при флотации золото-медно-магнетитовых руд с увеличением молекулярной массы реагента наблюдается тенденция к снижению выхода флотационного концентрата с его стабилизацией по достижении средней молекулярной массы 13750 а.е.м. Опыты с применением депрессоров одного химического состава, но различной молекулярной массы показали, что высокомолекулярные депрессоры в большей степени ухудшают показатели медной флотации, при этом эффективность их подавляющего действия на слоистые силикаты снижается с ростом концентрации реагента. Применение анионного полимера меньшей молекулярной массы в диапазоне pH 10,5-10,7 позволило повысить качество концентрата в 1,8 раза при сокращении извлечения на 1 % по сравнению с опытом без добавления депрессора.

Список литературы

1. Красавцева Е.А., Горячев А.А. Обзор способов депрессии талька при флотации медно-никелевых руд // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019. – Т. 10. – №. 6 (1). – С. 149-154.
2. Лавриненко А.А. и др. Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды // Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya. – 2023. – Т. 29. – №. 5. – С. 5-14.
3. Лавриненко А.А. и др. Поверхностные взаимодействия частиц талька с пузырьками воздуха в присутствии депрессора карбоксиметилцеллюлозы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №. 11. – С. 68-79.
4. Афанасова А.В. и др. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – №. 6-2. – С. 161-174.
5. Арабаджи Я.Н. и др. Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения //Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – №. 4. – С. 55-70.
6. Зашихин Н.В., Ванеев И.И., Горловский С.И. Авторское свидетельство №110039, 1957.
7. Ванеев И.И. К вопросу о механизме депрессирующего действия карбоксиметилцеллюлозы на флотоактивные силикаты при флотации медно-никелевых руд //Некоторые вопросы теории и технологии обогащения руд. – 1962. – №131. – С. 75-88.
8. Ahmadi M., Gharabaghi M., Abdollahi H. Effects of type and dosages of organic depressants on pyrite floatability in microflotation system // Advanced Powder Technology. – 2018. – Т. 29. – №. 12. – С. 3155-3162.
9. Beattie D.A. et al. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals // Minerals Engineering. – 2006. – Т. 19. – №. 6-8. – С. 598-608.
10. Лавриненко А.А. и др. Влияние молекулярного веса карбоксиметилированных крахмалов на их депрессирующее действие при флотации оталькованной платинометалльной Cu-Ni руды // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. – 2022. – С. 216-219.

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИРИТНОГО КОЛЛЕКТОРА

Слободин В.А.[1], Пахомов Р.А. [2], Бажин В.Ю.[3]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, victorslobodin2002@mail.ru
[2] к.т.н., старший научный сотрудник, ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия
[3] д.т.н., заведующий кафедрой металлургии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Бажин В.Ю.
д.т.н., заведующий кафедрой металлургии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследована возможность извлечения Pt, Pd, Rh из отработанных автокатализаторов с использованием природного пирита в качестве коллектора для системы SiO_2-Al_2O_3-CaO-B_2O_3. Термодинамическим моделированием в программном комплексе FactSage 7.3 определен оптимальный состав шихты и температура плавки. Экспериментально достигнут коэффициент обогащения МПГ 10,3. Результаты подтверждают перспективность пиритного коллектора для создания экономичной технологии вторичной переработки платиноидов.

Ключевые слова: отработанные автомобильные катализаторы, металлы платиновой группы, палладий, платина, родий, переработка отходов, коллекторная плавка

Введение. В современной мировой практике отработанные автомобильные катализаторы рассматриваются как высококонцентрированный источник металлов платиновой группы [1, 2], что обусловлено их стратегической значимостью, экономической ценностью и экологическими требованиями циркулярной экономики [3, 4]. Существующие пирометаллургические методы извлечения МПГ, основанные на использовании различных металлических или сульфидных коллекторов, часто характеризуются высокими энергозатратами, сложностью аппаратурного оформления или недостаточной эффективностью извлечения платиноидов [5–7].

Никелевый штейн применяется качестве коллектора, как для анализа на драгоценные металлы в аналитических лабораториях [8], так для промышленной переработки сырья, содержащего благородные металлы [9]. Morcali M.H. также исследовал возможность применения FeS_2 в качестве коллектора МПГ с добавлением буры и соды в качестве флюсов. Он получил коэффициент обогащения ~ 6.0, при соотношении B_2O_3/Na_2O равном 0.72, температуре – 950 °C, времени – 75 мин [10].

К преимуществам описанного метода относятся:

- низкая температура процесса по сравнению с классическими методами;
- отсутствие необходимости добавлять в систему восстановитель.

Цель данной работы исследовать возможность применения железного штейна в качестве коллектора МПГ в системе SiO_2-Al_2O_3-CaO-B_2O_3.

Методы. В отличии от работы Morcali M.H. в шихту вводится не отдельно железо и сера в определенной пропорции, а природный пирит (состав, %: 45,8 Fe, 50,2 S, 0,667 Cu, 0,266 Ni, 1,5 SiO_2, MgO, Cr_2O_3). Состав отработанного автомобильного катализатора, используемого для экспериментов приведен в табл 1.

Таблица 1

Химический состав отработанного автомобильного катализатора, % (*составлено авторами*)

Содержание, % масс.											г/т		
SiO_2	Al_2O_3	MgO	ZrO_2	TiO_2	CaO	Fe	C	S	P	Прочие	Pt	Pd	Rh
34,29	36,83	9,2	8,22	0,37	0,38	0,54	0,1	0,05	0,33	9,7	17	1000	280

Для определения состава шихты и необходимой температуры процесса была построена фазовая диаграмма системы SiO_2-Al_2O_3-CaO-B_2O_3 в программе для термодинамического моделирования FactSage 7.3 (рис. 1) [5]. Пунктирными линиями показана точка пересечения выбранного состава эксперимента. Применяемые флюсы прокаленная известь и борная кислота.

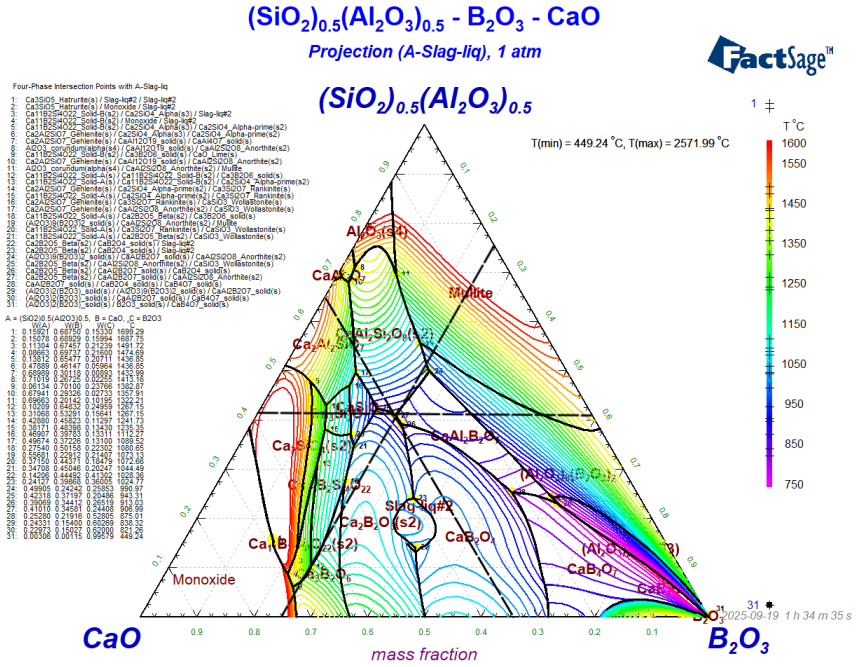
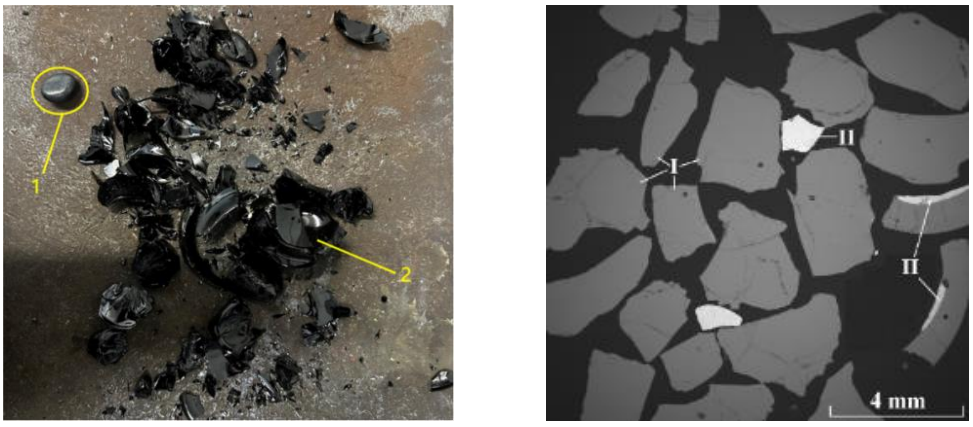


Рис. 1. Фазовая диаграмма шлаковой системы SiO_2-Al_2O_3-CaO-B_2O_3
с указанием выбранной точки эксперимента – 27 (*составлено авторами*)

Результаты. На рисунке 2 показаны продукты опытной плавки в индукционной печи при максимальной температуре 1360°С. Общее время плавки составило 1 час 15 минут.



а б

Рис. 2. Общий вид продуктов опытной плавки:
1 – штейн, 2 – шлак (а), микроструктура залаленной пробы шлака, отобранной при 1350°С:
I – шлаковые частицы, II – сульфидная фаза (составлено авторами)

В табл. 2 приведены составы образовавшихся штейна и шлака. Коэффициент обогащения составил ~ 10,3, что является довольно высоким показателем в сравнении с другими работами [6, 7, 10].

Таблица 2

Составы продуктов плавки, % (*составлено авторами*)

Штейн									
Содержание, % масс.									
Fe		S	Cu	Ni	Прочие	Pt	Pd	Rh	Сумма МПГ
57,9		35	1,62	1,27	2,87	0,0063	1,05	0,284	1,34
Шлак									
Содержание, % масс.							**г/т**		
FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	BaO	ZrO_2	B_2O_3	Прочие	Pt	Pd	Rh	Сумма МПГ
1,98	18,64	22,29	24,50	5,13	0,47	3,83	21,16	2,13	0,12	40	23,3	63,42

Обсуждение. По результатам РЭМ-РСМА получившийся шлак содержит микронные и субмикронные включения МПГ, из чего следует вывод, что для их более полного осаждения в штейн необходимо увеличить время выдержки/температуру плавки, количество добавляемого в шихту коллектора.

Заключение. Результаты исследования показывают, что применение пиритного коллектора для сбора МПГ при плавке автокатализаторов в системе SiO_2-Al_2O_3-CaO-B_2O_3 может быть эффективно, но требует более глубокого изучения. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния различных факторов на процесс, а также на возмодность использования других источников пирита (концентраты, хвосты).

Финансирование. *Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (Договор о предоставлении гранта «УМНИК» №19983ГУ/2025).*

Список литературы

1. Cherepovitsyn A., Mekerova I., Nevolin A. Analysis of the palladium market: a strategic aspect of sustainable development // Mining. 2025. Vol. 5. P. 39–54 https://doi.org/10.3390/mining5030039.

2. Grilli M.L., Bellezze T., Gamsjäger E., Rinaldi A., Novak P., Balos S., Piticescu R.R., Ruello M.L. Platinum group metals: Green recovery from spent auto-catalysts and reuse in new catalysts – A review. Crystals. 2023;13(4):550. https://doi.org/10.3390/cryst13040550.

3. Александрова Т.Н., О'Коннор К. Переработка руд металлов платиновой группы в России и Южной Африке: текущее состояние и перспективы // Журнал Горного института. 2020. Т. 244. С. 462–473. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.9.

4. Бодуэн А.Я., Фокина С.Б., Федоров А.Т., Петров Г.В. Технологическое усовершенствование процесса адсорбционной концентрации платиновых металлов из хлоридных растворов после гидрометаллургической переработки малосульфидных флотационных концентратов // Горный журнал. 2023. № 10. С. 34–40. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.10.04.

5. Пахомов Р.А., Фокина С.Б., Мушихин Е.А., Щербаков С.В. Использование многокомпонентных диаграмм состояния шлаковых систем применительно к переработке отработанных автомобильных катализаторов // Цветные металлы. 2023. № 2. С. 49–59. https://doi.org/10.17580/tsm.2023.02.07.

6. Tang H., Peng Z., Tian R., Ye L., Zhang J., Rao M., Li G. Recycling of platinum-group metals from spent automotive catalysts by smelting. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022;10:108709. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108709.

7. Yan J., Wei J., Zhang F. et al. Comprehensive review on recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts by metal capture technology: Present progress and outlook. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024;12:114017. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114017.

8. Morcali M.H., Akman S., Yücel O. Determination of platinum, palladium and rhodium by nickel sulphide fire assay (pre-concentration) method and its optimization // Journal of Engineering and Natural Sciences. 2014. Vol. 32. P. 211–220.9.

9. Кузнецов А.П., Коротков В.А., Остапчук И.С. Способ получения концентрата драгоценных металлов из продуктов переработки руды и вторичного сырья: пат. RU 2 673 590 C1 / ООО «Никелевый штейн». – опубл. 28.11.2018. – Бюл. № 34.

10. Morcali M.H. A new approach to recover platinum-group metals from spent catalytic converters via iron matte // Resources, Conservation & Recycling. 2020. Vol. 159. P. 104891. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104891.

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Смирнова М.Р.[1], Хузнахметов Р.М.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, mashulya.smirnova@icloud.com,
[2] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Вологжанина С.А.
доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В ходе работы проведены электрохимические исследования зоны выпуклой маркировки, полученной в ходе лазерной обработки с переплавом поверхности. Экспериментальное определение коррозионных характеристик выполнялось методом потенциодинамической поляризации в хлоридсодержащей среде с использованием потенциостата. Проведено сравнение электрохимических параметров основного металла и зоны лазерного воздействия. Установлены изменения стационарного потенциала, потенциала питтингообразования и базиса питтингостойкости, свидетельствующие о снижении локальной коррозионной стойкости в зоне обработки. Выявлена незначительная разность стационарных потенциалов между зонами. Подтверждена возможность применения поверхностной лазерной обработки для аустенитных сталей без существенной потери их коррозионной стойкости.

Ключевые слова: лазерная маркировка, коррозионная стойкость, электрохимический метод.

Введение. Современное машиностроение предъявляет высокие требования к коррозионной стойкости оборудования нефтехимических отраслей, эксплуатируемых в агрессивных средах [1, 2]. Одним из распространённых способов идентификации изделий является лазерная маркировка, которая может выполняться с переплавом поверхности без использования дополнительных присадок и защитных атмосфер. Влияние такого метода маркировки на коррозионную стойкость материала остается предметом исследования, так как для нержавеющих сталей критическим является потеря устойчивости пассивной пленки и развитие коррозионных дефектов в зоне лазерного воздействия, в т.ч. возникновение межкристаллитной коррозии [3, 4].

Целью данной работы является количественная оценка коррозионных характеристик исследуемого материала после лазерной маркировки с переплавом поверхности с использованием электрохимических методов исследования.

В качестве объекта исследования выступает лазерная обработка поверхности стали 12Х18Н10Т, а предметом – ее влияние на коррозионную стойкость зоны воздействия.

Методы. Исследования проводили на образцах из стали 12Х18Н10Т. Лазерную маркировку выполняли с переплавом поверхности без присадок и защитных атмосфер. Для электрохимического исследования использовали 5 % водный раствор NaCl при комнатной температуре с применением потенциостата VersaSTAT 4. Электрод сравнения – хлорсеребряный (ЭВЛ-1М3.1), вспомогательный электрод – платиновый. Участки образца, не подвергаемые исследованию, изолировали лакокрасочным покрытием, оставляя открытой либо зону основного металла, либо зону лазерной обработки [5].

Перед началом измерений образец выдерживали в растворе в течение 20 мин для установления равновесного потенциалм коррозии ($E_{кор}$) [6]. Поляризационные кривые снимали в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки 0,16 мВ/с в интервале от –250 до +1700 мВ относительно потенциала коррозии $E_{кор}$.

По полученным кривым был определен потенциал питтингообразования (пробоя) $E_{пит}$ и рассчитан базис питтингостойкости по формуле:

$$\Delta E = E_{пит} - E_{корр.} \quad (1)$$

Плотность тока коррозии $j_{кор}$ находили методом экстраполяции тафелевских участков анодной ветви, после чего скорость коррозии (мм/год) вычисляли по закону Фарадея в соответствии с ASTM G59 и G102.

Результаты. В ходе экспериментов установлено, что для основного металла характерна протяжённая пассивная область с потенциалом питтингообразования $E_{пит}$ = 0,508 В. Для зоны лазерной обработки значение $E_{пит}$ снижается до 0,074–0,084 В. Соответственно, базис питтингостойкости ΔE для основного металла составляет 0,665 В, тогда как для образцов после лазерной маркировки его среднее значение не превышает 0,303 В, что соответствует снижению в два раза.

Обсуждение. По данным электрохимических измерений коррозионная стойкость основного металла выше, чем у металла возле лазерного воздействия. Поскольку исследуемые образцы изготовлены из коррозионностойкой аустенитной стали, корректнее сравнивать их коррозионные характеристики по базису питтингостойкости [7]. Для основного металла значение базиса питтингостойкости составляет 0,665 В, тогда как для металла в зоне лазерной обработки – 0,303 В (среднее значение). Следовательно, нужно учитывать, что устойчивость к питтинговой коррозии в области лазерного воздействия снижается примерно в два раза по сравнению с основным металлом. Вероятно, они являются следствием воздействия лазера с малым разлетом капель оплавленного металла из зоны плавления. Вместе с тем, предлагаемые параметры лазерной обработки и значения скорости коррозии для зоны рельефа позволяют сохранить аустенитную структуру без формирования карбидных фаз различной морфологии в стали [8, 9, 10].

Заключение. Полученные результаты подтверждают необходимость использования электрохимических методов, а не только визуального и гравиметрического контроля, для оценки качества лазерной обработки ответственных деталей . Выполненные электрохимические исследования в хлоридсодержащем электролите подтвердили сохранение пассивного состояния материала, однако выявили незначительное снижение устойчивости к локальной коррозии в зоне лазерного воздействия по сравнению с основным металлом. Таким образом, можно утверждать, что подтверждена возможность применения поверхностной лазерной обработки для аустенитных сталей без существенной потери их коррозионной стойкости.

Благодарности: *авторы выражают благодарность коллективу Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого за содействие в проведении исследований.*

Список литературы

1. Choi Y.Y., Kim M.H. Corrosion behaviour of welded low-carbon steel in the Arctic marine environment // RSC Advances. – 2018. – Vol. 8. – P. 30155–30162. – DOI: 10.1039/C8RA05371E.
2. Panchenko Y.M., Marshakov A.I., Kudryavtseva L.A., Kovtanyuk V.V., Nenasheva T.A. A chloride deposition model for predicting the categories of atmospheric corrosivity in coastal areas // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2024. – DOI: 10.1177/1478422X241298181.
3. S.A. Vologzhanina, R.M. Khuznakhmetov, J.V. Amyaga, E.Yu. Zhdanova, A. Ramos-Velazkuez Influence of laser exposure on the processes occurring in a surface layer of austenitic steel products // CIS Iron and Steel Review – Vol. 30 (2025), pp. 52–58. DOI: 10.17580/cisisr.2025.02.09.
4. Ramos-Velazquez, A., Amiaga, J., Veĭko, V., Khuznakhmetov, R., Polyakov, D. (2025). The peculiarities of ablation and deposition of brass by nanosecond laser pulses at the LIBT-scheme. Optics and Laser Technology, 181, Article 112006. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112006.
5. Veiko V.P., Slobodov A.A., Odintsova G.V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Physics, 2013, 23, 066001. doi:10.1088/1054-660X/23/6/066001.
6. Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Grothe H. Analysis of metal corrosion methods and identification of cost-efficient and low corrosion deicing agents // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2023. – DOI: 10.1080/1478422X.2023.2200008.
7. Wei M., Yao J., Chen Y., Yang B., Chen D., Cai Y. Optimization and Evaluation of Accelerated Corrosion Tests Based on Mechanism Equivalence Principles // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 16. – Art. 4042. – DOI: 10.3390/ma17164042.
8. Rezayat M., Karamimoghadam M., Contuzzi N., Casalino G., Mateo A. Statistical Modeling and Characterization of Laser Marking on AISI 301LN Stainless Steel Using Short-Pulsed Fiber Laser // Metals. – 2025. – Vol. 15, No. 5. – Art. 519. – DOI: 10.3390/met15050519.
9. Cai Y., Xu Y., Zhao Y., Ma X. Atmospheric corrosion prediction: a review // Corrosion Reviews. – 2020. – Vol. 38, № 4. – P. 299–321.
10. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 20. – Art. 7067.

УДК 622.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РУДОПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУБОЗЕРНИСТОЙ ФЛОТАЦИИ

Соколов М.В.
аспирант, Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, m.sokolov@ksc.ru

Научный руководитель: Опалев А.С.
к.т.н., зам. директора по научной работе, Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможности получения грубозернистых продуктов обогащения, пригодных для флотации магнетитовых концентратов высокого качества (ВКК). Рассмотрено негативное влияние шламов на основные процессы обогащения. Изучены особенности рудоподготовки железистых кварцитов одного из предприятий северо-запада России, производящих магнетитовые концентраты. Целью работы является изучение возможности применения флотации с использованием грубозернистых продуктов для повышения качества производимых концентратов и снижения потерь с тонкими классами магнетита. Проведены лабораторные исследования, показывающие возможность получения грубозернистых продуктов, пригодных для дальнейшего обогащения с использованием флотационной доводки.

Ключевые слова: железистые кварциты, грубозернистый концентрат, стержневое измельчение, магнитное обогащение, iron ore, coarse concentrates, magnetic separation.

Введение. Снижение качества минерального сырья обусловливает вовлечение в переработку возрастающих объемов руд среднего и низкого качества, характеризующихся тонкой вкрапленностью полезного компонента. Рудоподготовка таких руд сопровождается их интенсивным ошламованием [1].

Повышенное содержание магнетитовых шламов негативно влияет на селективность и технико-экономические показатели последующего обогащения железистых кварцитов. При сульфидной флотации тонкодисперсные частицы магнетита снижают избирательность процесса, налипая на поверхности сульфидных минералов, а их высокая удельная поверхность приводит к повышенному расходу реагентов при силикатной флотации [2–4]. В гравитационных процессах шламы из-за малой массы и низкой инерции ухудшают качество продуктов разделения и снижают эффективность сепарации [5, 6]. В процессах магнитной сепарации снижение магнитной восприимчивости частиц при уменьшении их крупности приводит к существенному росту потерь полезного компонента с хвостами [7, 8].

Несмотря на то, что технологии обесшламливания известны [9–11], для тонковкрапленных руд проблема образования ультратонких классов остается актуальной из-за несовершенства применяемых технологических схем рудоподготовки. Стандартные схемы дробления и измельчения при совместном измельчении раскрытых рудных фаз магнетита и его сростков с породообразующими компонентами не обеспечивают селективного раскрытия зерен ценных минералов, что приводит к накоплению шламов в циклах рудоподготовки и потерям полезных минералов с хвостами. В связи с этим разработка и обоснование решений, направленных на снижение образования шламов при оптимальном раскрытии ценных минералов на стадии рудоподготовки, является актуальной задачей. Это позволит снизить энергозатраты на эти операции, повысить качество производимых концентратов за счет увеличения эффективности сепарационных процессов при уменьшении потерь концентрируемого компонента.

Методы. Методической основой для исследований являлись принципы оптимизации существующей технологии обогащения железосодержащих руд, связанные с обеспечением максимального раскрытия ценных минералов при их минимальном переизмельчении, на основе принципа стадиального вывода готового концентрата в каждой стадии обогащения.

Результаты. На текущем этапе исследований было проведено изучение предварительного грохочения мелкодробленой руды одного из предприятий северо-запада страны

по классу 2 и 3 мм с последующим стержневым измельчением и обогащением на мокрой магнитной сепарации ММС-I; исследования шарового измельчения на II стадии обогащения. По сравнению с фабричной схемой получены близкие показатели по обогащению, но с применением меньшего количества операций и получением более грубозернистых продуктов для последующего флотационного процесса.

Обсуждение. Для оценки рациональных параметров автором были изучены гранулометрические характеристики полученных продуктов измельчения с учетом распределения компонентов в продуктивные классы. Также был проведен анализ кинетики стержневого и шарового измельчения, отмечены особенности измельчения для этих типов оборудования. С учетом выше обозначенной актуальности темы, снижение шламообразования позволит оптимизировать уже существующие технологии обогащения руд черных металлов.

Заключение. Показано, что применение предварительного грохочения мелкодробленой руды с последующим стержневым измельчением, дальнейшим снижением крупности шаровым измельчением в замкнутом цикле с гидравлической классификацией и магнитной сепарацией позволяет получить промпродукт с более грубым гранулометрическим составом, пригодным для дальнейшего обогащения. Выполненные исследования могут быть продолжены для дальнейшей оптимизации технологической схемы рудоподготовки, процессов магнитно-гравитационной сепарации и грубозернистой флотации, а также выполнен поиск оптимальных методов снижения крупности готового концентрата для процессов окомкования и последующего прямого восстановления железа.

Благодарности: *автор выражает благодарность своему научному руководителю, к.т.н. Опалеву А.С. за постановку целей и задач исследования, с.н.с. Алексеевой С.А. за методическое сопровождение работы. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Развитие научно-методических основ формирования эффективных технологий переработки минерального сырья Арктической зоны РФ на основе комплексного изучения его минералого-технологических свойств FMEZ-2025-0048).*

Список литературы

1. Padhi M., Vakamalla T.R., Mangadoddy N. Iron ore slimes beneficiation using optimised hydrocyclone operation // Chemosphere. – 2022. – Т. 301. – С. 134513. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134513.
2. Zhang X. et al. Flotation of iron ores: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2021. – Т. 42. – № 3. – С. 184-212. – DOI: 10.1080/08827508.2019.1689494.
3. Митрофанова Г. В. Повышение качества тонко-измельченных магнетитовых концентратов комбинированием сульфидной и силикатной флотации / Г. В. Митрофанова, А. С. Опалев // Обогащение руд. – 2024. – № 4. – С. 17-22. – DOI: 10.17580/or.2024.04.03. – EDN: CTEMZQ.
4. Anzoom S. J., Bournival G., Ata S. Coarse particle flotation: A review // Minerals Engineering. – 2024. – Т. 206. – С. 108499. – DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108499.
5. Ji Y. et al. Comparative study on separation characteristics between magnetic and conventional spiral separator via CFD-DEM // Minerals Engineering. – 2026. – Т. 240. – С. 110123. – DOI: 10.1016/j.mineng.2026.110123.
6. Liu W., Ye G., Liu P. CFD-DEM Simulation of the Effect of Transverse Inclination Angle on Particle Moving Behavior in Spiral Separation // Separations. – 2026. – Т. 13. – № 2. – С. 73. – DOI: 10.3390/separations13020073.
7. Опалев А. С., Марчевская В. В. Исследование влияния крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость железорудных концентратов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 161-167. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230115.
8. Kharitonskii P. et al. Magnetic granulometry, frequency-dependent susceptibility and magnetic states of particles of magnetite ore from the Kovdor deposit // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 553. – № 1. – С. 169279. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169279.
9. Bretas P. L., Rodrigues O. M. S., da Luz J. A. M. Selective flocculation and floc-flotation of iron bearing mineral slimes // Research, Society and Development. – 2022. – Т. 11. – № 5. – С. e45011528289. – DOI: 10.33448/rsd-v11i5.28289.
10. Amosah M. E. et al. The role of enhanced desliming and gravity separation as a precursor to flotation in the upgrading of cassiterite from tailings // Minerals Engineering. – 2024. – Т. 208. – С. 108581. – DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108581.
11. Pakki D. S. P. et al. Recovery of Iron Values from Bacheli Iron Ore Slimes for Use in the Iron and Steel Industries // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2026. – Т. 79. – № 1. – С. 18. – DOI: 10.1007/s12666-025-03768-8.

УДК 621.77.019

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТОЕК КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ ГРУППЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ИНИЦИАЦИИ И РАЗВИТИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

Сомкина П.Д.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, linasomkina@yandex.ru

Научный руководитель: Пряхин Е.И.
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедения и технологии художественных изделий», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. В составе реакторных установок предусмотрена группа исполнительных механизмов, включающая стойки компенсирующих групп (КГ), которые служат для регулирования избыточной мощности. Как правило, данные элементы не определяют ресурс реактора, однако в относительно недавнее время были зафиксированы признаки повреждения указанного узла. Любые случаи досрочного (до истечения проектного срока) отказа оборудования подлежат тщательному анализу. В настоящей работе проведено исследование фрагментов стойки компенсирующей группы, повреждённых в ходе эксплуатации, с применением люминесцентной дефектоскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В результате исследования выявлены два дефекта, представляющих собой усталостные трещины. Их возникновение обусловлено многоцикловой усталостью материала, а также неудовлетворительным качеством механической обработки внутренней поверхности трубы.

Ключевые слова: усталостная трещина, излом, инициация, сканирующая электронная микроскопия, дефект, механическая обработка.

Введение. В процессе эксплуатации стойка привода КГ испытывает воздействие избыточного давления и подвергается интенсивным термоциклическим нагрузкам, обусловленным высоким температурным перепадом [1], что приводит к образованию дефектов в данных элементах конструкции [2]. В связи с этим, целью настоящей работы являлось выявление эксплуатационных повреждений на внутренней поверхности фрагментов труб стоек КГ, а также изучение механизмов зарождения и развития указанных дефектов [3].

Методы. Для выявления дефектов был выполнен люминесцентный контроль с применением светодиодной ультрафиолетовой лампы EV6000 Magnaflux, в ходе которого зафиксированы линейные индикаторные следы протяженностью 20 и 60 мм. Из трубы вырезан фрагмент, содержащий указанные дефекты, который впоследствии был разделен на восемь равных сегментов. На следующем этапе каждый сегмент подвергался очистке в ультразвуковой ванне в растворе ацетона и спирта (1:1) в течение 30 минут. Затем методом СЭМ на приборе Vega 3 TESCAN проведен анализ внутренних поверхностей образцов с целью подтверждения того, что выявленные дефекты представляют собой трещины. Для последующего фактографического исследования выполнялось раскрытие трещин с использованием копра КМ-0,05.

Заключение. По результатам проведённого исследования установлено, что в стойке присутствовали два дефекта, представляющих собой усталостные трещины, распространяющиеся от внутренней поверхности трубы к наружной. Причинами их образования являются многоцикловая усталость материала и неудовлетворительное качество механической обработки внутренней поверхности трубы.

Список литературы

1. Пирогова Н.Е. Определение доминирующих механизмов и разработка методов прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР и PWR: Автореферат диссертации на соискание учен. степ. канд. тех. наук. – СПБ, 2020. – 24 с.

2. Perveitalov, O.G., Nosov, V.V., Borovkov, A.I., Khanukhov, K.M., & Chetvertukhin, N.V. (2023). Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow. Metals, 13(1) doi:10.3390/met13010004

3. Мурашов, А.А., Нохрин А.В., Берендеев Н.Н. Изучение процессов усталостного и коррозионно-усталостного разрушения мелкозернистых металлов и сплавов: практикум – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2022. – 53 с.

УДК 622.7

ПРИМЕНЕНИЕ ВГМС ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЛАБОМАГНИТНЫХ МИНЕРАЛОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Степанов Д.В.
аспирант каф. ОПИ,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, s.dmitttry@gmail.com

Научный руководитель: Александрова Т.Н.
д.т.н., профессор, зав. каф. ОПИ,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе обоснована возможность применения высокоградиентной магнитной сепарации (ВГМС) для извлечения меди и никеля из хвостов обогащения медно-никелевых руд, являющимися перспективным источником ценных компонентов, преимущественно представленных тонкими частицами (82,23 % частиц менее 63 мкм). Цель исследования заключается в установлении закономерностей влияния конструктивных и режимных параметров ВГМС (диаметра матрицы, магнитной индукции, частоты пульсации) на технологические показатели процесса. Эксперименты проведены на сепараторе SLon100 и трубке Дэвиса. Установлены рекомендуемые параметры: диаметр стержней матрицы – 1,5 мм, индукция – 1 Тл, частота пульсации – 32 Гц. В результате исследования усыновлено, что ВГМС является перспективным методом, способствующим рациональному недропользованию за счет снижения потерь ценных компонентов.

Ключевые слова: Высокоградиентная магнитная сепарация, матрица, хвосты обогащения, медь, никель, магнитное фракционирование.

Введение. В условиях истощения запасов и снижения качества руд перспективным решением становится переработка хвостов обогащения ГОКов – в частности, хвостов обогащения вкрапленных медно-никелевых руд, содержащих медь, никель, металлы платиновой группы и другие ценные компоненты [1-3]. Для повышения эффективности извлечения тонкоизмельченных слабомагнитных минералов из данного сырья предлагается использовать ВГМС – экологически более чистый метод по сравнению с флотацией, позволяющий обогащать мелкие классы крупностью −0,03+0 мм [4-6]. Изучение влияния различных параметров на технологические показатели сепарации может выполнятся посредством реальных экспериментов на лабораторном оборудовании или с использованием программного моделирования [7-9].

Цель работы заключалась в обосновании возможности применения ВГМС для извлечения ценных компонентов из хвостов обогащения медно-никелевых руд и установлении закономерностей влияния конструктивных особенностей и режимных параметров (частоты пульсаций, магнитной индукции и др.) на эффективность процесса.

Методы. В работе исследованы хвосты переработки медно-никелевых руд (с содержанием меди 0,30 % и никеля 0,72 %), гранулометрический состав которых характеризуется преобладанием тонких фракций: 82,23 % частиц – менее 63 мкм, 50 % – менее 13,78 мкм. Эксперименты по ВГМС проводились на сепараторе SLon100, магнитное фракционирование было выполнено на трубке Дэвиса.

Результаты. Для обоснования применения ВГМС при переработке хвостов обогащения медно-никелевых руд проведено магнитное фракционирование, показавшее возможность выделения минералов в различные продукты в зависимости от их магнитной восприимчивости. Степень концентрации никеля в магнитных фракциях варьируется от 2,07 (при 3 А) до 2,36 (при 4 А); для меди наблюдаются пики концентрации (1,65) при силе тока 2 А и 5 А, что связано с извлечением минералов с разными магнитными свойствами (кубанита, борнита, халькопирита). Исследование влияния диаметра матричного элемента (стержня) на показатели ВГМС выявило, что максимальное извлечение никеля, железа и меди в концентрат достигается при диаметре 1 мм, однако такой режим сопровождается высоким

механическим выносом немагнитных частиц и загрязнением концентрата минералами пустой породы [10], в связи с чем, для баланса между извлечением ценных компонентов и отсевом минералов породы оптимальной признана матрица с диаметром осадительных элементов 1,5 мм, обеспечивающая перераспределение никеля относительно кремния (0,25) при достаточно высоких показателях извлечения ценных компонентов в концентрат. Анализ влияния режимных параметров показал, что наибольшие значения извлечения никеля, железа и меди, а также наименьшее извлечение кремния достигаются при магнитной индукции 1 Тл, а максимальное извлечение никеля, железа и меди – при частоте пульсации 32 Гц. При этом, наиболее чистый продукт с высоким соотношением никеля и серы относительно кремния (0,25 и 0,27, соответственно) и никеля относительно серы (0,93) получается при частоте пульсации 38 Гц, что минимизирует извлечение силикатов в концентрат.

Обсуждение. На основании комплексных исследований рекомендованные параметры ВГМС для эффективного извлечения слабомагнитных минералов из хвостов обогащения медно-никелевых руд: диаметр стержней матрицы – 1,5 мм, магнитная индукция – 1 Тл, частота пульсации – 32 Гц, что позволяет достичь высокого извлечения ценных компонентов при минимизации загрязнения концентрата минералами породы.

Заключение. Интерпретация результатов исследования позволяет обосновать эффективность применения ВГМС для извлечения меди и никеля из хвостов обогащения медно-никелевых руд. Магнитное фракционирование показало, что полезные минералы выделяются в зависимости от магнитной восприимчивости, при этом отмечены низкие степени концентрации минералов породы в магнитных фракциях. Рекомендованный режим ВГМС: диаметр стержней матрицы – 1,5 мм, магнитная индукция – 1 Тл, частота пульсации – 32 Гц. Обосновано применение эллиптической формы матрицы для повышения концентрирования ценных компонентов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на обоснование и подбор геометрических параметров матричного элемента (форма поперечного сечения, соотношение сторон и др.) и реализованы с использованием программных пакетов для моделирования (Ansys, Comsol и др.).

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р. Фор¬мирование экологического ущерба при складировании суль¬фидсодержащих отходов обогащения полезных ископае¬мых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
3. Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Afanasova A.V., Chenlong D., Romashev A.O., Aburova V.A., Prokhorova E.O. Increase in Recovery Efficiency of Iron-Containing Components from Ash and Slag Material (Coal Combustion Waste) by Magnetic Separation // Minerals. – 2024. – V. 14. – № 2. – pp. 136. DOI: 10.3390/min14020136.
4. Liang Z. Wang, Q., Tang, L., Duan, H., Chen, L., Xue, Z., Li, Y. Recover of Cu from copper oxide ore using magnetic separation-leaching process and magnetism study of copper-containing minerals // Minerals Engineering. – 2024. – V. 218. – pp. 109006. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.109006.
5. Пелевин А.Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 579-592. DOI: 10.31897/ PMI.2022.61.
6. Pelevin A.E., Shigaeva V.N. The potential of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore tailings // Obogashchenie Rud. 2022. N2. pp. 46-52. DOI: 10.17580/or.2022.02.08.
7. Мушкетов А.А., Шигаева В.Н., Пелевин А.Е. Получение ильменитового концентрата из лежалых хвостов обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд // Горный журнал. 2024. N5. С. 36-46. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-36-46.
8. Ilyushin, Y.V., Boronko, E.A. Development of a Mathematical Model of the Electromagnetic Field Formation Process Based on System Analysis Methods // Mathematics. 2026. Vol. 14(3). P. 399. DOI: 10.3390/math14030399.
9. Zheng, X., Xue Z., Wang Y., Zhu G., Lu D., Li X. Modeling of particle capture in high gradient magnetic separation: A review // Powder technology. 2019. Т. 352. С. 159-169. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.04.048.
10. Zhou S., Wang Y., Zheng X., Lu D., Xia F., Cheng W. Study on capture behaviors of particles with different magnetic characteristics in axial high gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid // Minerals Engineering. 2025. Т. 227. С. 109261. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109261.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПЕРАТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ РУДОПОДГОТОВКИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕДНЫХ РУД

Струк Г.В.[1], Евтушок В.А.[2]
[1] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s245018@stud.spmi.ru
[2] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, lera.evtushok@gmail.com

Научный руководитель: Николаева Н.В.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. На протяжении многих лет исследование физико-механических свойств минерального сырья является стандартной процедурой для выполнения рационального расчета и выбора оборудования циклов рудоподготовки. Однако, данные исследования сопряжены со значительными временными и финансовыми затратами, что заставляет ученых по всему миру концентрировать усилия на интенсификации стандартизированных тестовых процедур и разработке автоматизированных систем, способных адаптировать технологические параметры в реальном времени. В связи с этим, в работе рассматривается математическая модель разрушения руды в конусной дробилке и автоматизированная система на основе мягкого датчика для управления шириной разгрузочной щели. Экспериментально установлена логарифмическая зависимость между индексом точечной нагрузки $I_{s(50)}$ и индексом Бонда CWi. Предложен алгоритм работы системы на основе мягкого датчика, способствующий сокращению энергозатрат за счёт оперативной адаптации режима работы оборудования изменяющимся свойствам перерабатываемого сырья.

Ключевые слова: 5-10 слов/словосочетаний, встречающихся в рамках предметной дисциплины.

Введение. Оптимизация процессов рудоподготовки традиционно осуществляется через рациональный выбор схем дробления и измельчения, а также оптимизацию параметров работы основного технологического оборудования [1–3]. Для получения достоверных данных, необходимых для инженерных расчётов и проектирования технологических схем, широко используются методики экспериментального определения физико-механических свойств минерального сырья [4–6]. Однако данные тестовые процедуры требуют высоких временных и финансовых затрат, что затрудняет их применение в проектах, где необходимы сотни и тысячи тестов, и побуждает специалистов по всему миру прикладывать значительные усилия для их интенсификации [7–9]. Данная проблема, в свою очередь, обусловливает острую необходимость разработки автоматизированных систем управления оборудованием рудоподготовки, способных в режиме реального времени адаптировать технологические параметры на основе актуальных данных о свойствах перерабатываемого сырья, создание которых позволит существенно сократить зависимость от трудоёмких лабораторных испытаний и повысить эффективность управления процессами рудоподготовки [10].

Целью работы является разработка и валидация математической модели разрушения руды в конусной дробилке в автоматизированной системе на основе мягкого датчика для адаптивного управления.

Задачи исследования включали проведение экспериментальных исследований по оценке физико-механических свойств минерального сырья, а также разработку алгоритма автоматизированной системы управления процессом дробления;

Методы. В качестве объекта исследования были выбраны 3 типа проб комплексных медных руд. Методы исследования включали проведение стандартизированных испытаний на воздействие сосредоточенным нагружением (Point Load Test) и дробимость по методике Ф. Бонда.

Результаты. В результате экспериментальных исследований были определены прочностные параметры $I_{s(50)}$ и *CWi* исследуемого минерального сырья. Обоснованы три принципиально различных механизма разрушения комплексных медных руд в зависимости от величины данных параметров.

Обсуждение. Обработка результатов экспериментальных исследований показала высокую отрицательную сходимость между параметрами $I_{s(50)}$ и *CWi* (R^2=0,83), что позволяет объяснить 86,11% изменения энергоёмкости изменчивостью прочностных характеристик:

$$CWi=11{,}13–2{,}34\cdot\ln(I_{s(50)}).$$

На основе полученной зависимости предложен алгоритм управления оборудованием для дробления в автоматизированной системе с использованием мягкого датчика, позволяющий регулировать ширину разгрузочного отверстия конусной дробилки исходя из физико-механических свойств перерабатываемого сырья.

Заключение. Экспериментальные исследования по определению физико-механических свойств комплексных медных руд позволили установить количественную логарифмическую зависимость между индексом сосредоточенного нагружения $I_{s(50)}$ и индексом дробления Ф. Бонда *CWi*. Предложен алгоритм работы автоматизированной системы управления конусной дробилкой на основе мягкого датчика в контуре АСУ ТП для сокращения энергозатрат за счет своевременной адаптации оборудования к изменяющимся характеристикам рудного потока.

Список литературы

1. Saramak D., Lesniak K. Impact of HPGR operational pressing force and material moisture on energy consumption and crushing product fineness in high-pressure grinding processes // Energy. 2024. Vol. 302. P. 1-10. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131908.
2. Yu J., Sun H., An Y., Gao P., Zhang X., Han Y. Energy conservation and consumption reduction in grinding operations through ceramic media stirring mill: An industrial validation test // Powder Technology. 2023. Vol. 429. 2023. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118943.
3. Liu X., Li S. A crushing index for granular soils based on comminution energy consumption theory // Powder Technology. 2024. Vol. 434. 2024. P. 1-14. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119380.
4. Ali S., Powell M.S., Yahyaei M., Ballantyne G.R., Weatherley D.K. Assessing Comminution Circuit Performance Using Precision Measurement of Size Specific Energy // 8th International Conference on Semi-Autogenous Grinding & High Pressure Grinding Technology, Vancouver, 25-28 September 2023. P. 1-13.
5. Hosseini P., Gharib N., Derakhshandeh J.F., Radziszewski P. Exploring an Energy-Based Model in Comminution // Journal of Tribology. 2022. Vol. 144. №4. P. 1-10. DOI: 10.1115/1.4052780.
6. Ranjbar A., Mousavi A., Asghari, O. Using Rock Geomechanical Characteristics to Estimate Bond Work Index for Mining Production Blocks // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021. Vol. 38. P. 2569–2583. DOI: 10.1007/s42461-021-00498-5.
7. Bergerman M.G., Pamparana G., Delboni H., Klein B. Development of a simplified test for the determination of the Bond Ball Mill Work Index using a modified Hardgrove test // Minerals Engineering. 2023. Vol. 203. P 1-9. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108359.
8. Nikolic V., Doll A., Trumic M. A new methodology to obtain a corrected Bond ball mill work index valid with non-standard feed size // Minerals Engineering. 2022. Vol. 188. P. 1-8. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107822.
9. Nikolic V., Ferradal P.S., Pierres J.M., Menendez-Aguado J.M., Trumic M. Methods for Estimating the Bond Work Index for Ball Mills // Minerals. 2024. Vol. 14. №12. P. 1-16. DOI: 10.3390/min14121264.
10. Wang M., Liu W., Liu H., Xu W. Development of empirical equations between uniaxial compressive strength and point load index: a case study for sandy dolomite // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. P. 1-16. DOI: 10.1038/s41598-024-77169-0.

УДК 666.293

МОДИФИКАЦИЯ СОСТАВА СТЕКЛОЭМАЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО ПОКРЫТИЯ СТАЛЬНЫХ БОЙЛЕРОВ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ТКЛР

Ткаченко В.Д.
аспирант, Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия, tkachenko.vadik2014@yandex.ru

Научный руководитель: Рябова А.В.
кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая химия и технология силикатов», Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

Аннотация. Проведено исследования влияния модифицирующих добавок на помол (кварцевого песка, диатомита и диоксида титана) на согласованность температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) однослойных стеклоэмалевых покрытий и стального субстрата трубопровода. В ходе работы были синтезированы и исследованы образцы стеклоэмалевых покрытий с различным содержанием добавок (5% и 10%). Установлено, что введение добавок позволяет эффективно регулировать ТКЛР покрытия. Наилучшие результаты получены при использовании диоксида титана в количестве 5%, обеспечивающего оптимальное значение ТКЛР ($94{,}20\times10^{-7}$ K^{-1}).

Ключевые слова: стеклоэмалевые покрытие, температурный коэффициент линейного расширения, дилатометр, добавки на помол, стальной субстрат, внутренняя коррозия.

Введение. В Российской Федерации бойлеры для нагревания воды и стальные трубопроводы широко применяются в системах отопления и горячего водоснабжения, как в коммунальном хозяйстве, так и в промышленности [1].

Водонагреватели (бойлеры) являются одним из наиболее распространенных видов бытовой нагревательной аппаратуры. Качество горячей воды: степень ее чистоты, химический состав, отсутствие бактерий, зависит не только от исходных параметров в момент поступления в нагреватель, но и от состояния внутренней поверхности стального бака, в котором осуществляется нагрев [2].

Для предотвращения негативного воздействия внутренней коррозии на стальной субстрат применяют различные антикоррозионные покрытия, которые обеспечивают надежную защиту металлических поверхностей от химического и механического разрушения, одними из которых являются стеклоэмалевые покрытия [3].

Надежность и долговечность стеклоэмалевого покрытия во многом зависит от температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), как ключевого параметра, определяющего совместимость покрытия с металлической основой. Если коэффициент ТКЛР эмали больше, чем у металла, то при охлаждении эмаль сокращается быстрее, чем поверхность металла, что противодействует ее усадке. При этом в слое эмали возникают растягивающие напряжения, которые приводят к появлению в эмалевом слое дефектов в виде трещин [4]. Если же коэффициент эмали ниже, чем у металла, то эмалевый слой будет сжиматься медленнее, чем металл, в нем появятся большие напряжения сжатия, и он будет откалываться. По этой причине на практике обычно стремятся к тому, чтобы ТКЛР эмали был немного меньше, чем у металла. В соответствии с ГОСТ Р 52569-2018 ТКЛР стеклоэмалевого покрытия должен быть в диапазоне $(90–120)\cdot10^{-7}$ К–1, тогда как у малоуглеродистой стали, из которой обычно изготавливается трубопроводы и бойлеры $(110–130)\cdot10^{-7}$.

Такого результата можно добиться посредством введения на помол стеклоэмалевой фритты добавок, улучшающих согласованность ТКЛР эмали с металлической основой за счет изменения структурного состава. [5].

Таким образом целью данного исследования была модификация состава однослойного стеклоэмалевого покрытия для улучшения температурного коэффициента линейного расширения в системе стальной субстрат-эмаль.

Методы. Для модификации стеклоэмалевого покрытия был выбран состав, на основе алюмоборосиликатной системы $RO–R_2O–B_2O_3–Al_2O_3–SiO_2–TiO_2$, так как является наиболее приемлемой в технологии однослойного эмалирования для стали. Синтез составов эмалей в данной алюмоборосиликатной системе позволяет при оптимальных соотношениях оксидов стеклообразователей и модификаторов получить стабильные стеклообразные материалы с гомогенной аморфной структурой. Это обеспечивает образование прочно связанной трехмерной структурной сетки, основными элементами которой являются тетраэдры $[SiO_4]$, $[BO_4]$ и $[AlO_6]$. Такая структура обуславливает полностью аморфное строение без наличия кристаллической фазы, что обеспечивает высокую стойкость эмали к действию различных агрессивных сред, в том числе кислот, щелочей и воды [6]. В качестве модифицирующих добавок на помол для разработанного состава стеклоэмалевого покрытия были выбраны кварцевый песок, диатомит и диоксид титана в количестве 5 и 10 %.

Для приготовления шихт сырьевые компоненты отвешивали на технических весах и смешивали в фарфоровых барабанах на шаровой мельнице. Варку стеклоэмалей проводили высокотемпературной электрической печи элеваторного типа при температуре 1400 °С с выдержкой 60 мин. Охлаждение и грануляцию жидкотекучего расплава проводили по «мокрому» способу согласно ГОСТу Р 52569–2018 «Фритты. Технические условия», затем фритту высушивали в сушильном шкафу при температуре 100 °С до влажности не более 3%. Далее фритты измельчались до прохождения через сито № 0,065.

На ручном прессе в металлической форме были спрессованы из измельченного порошка с добавлением воды образцы каждого состава размерами 50×10 мм были высушены в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 10 минут. После сушки образцы помещались в алундовые лодочки-тигли для сохранения правильной формы и обжигались в муфельной электрической печи при температуре 700 °С с выдержкой 3 мин.

Для исследования температурного коэффициента линейного расширения исследуемых составов был проведен экспериментальный метод и теоретический расчет для сопоставления результатов. Экспериментальный метод проводили с использованием дилатометра в интервале температур 30-400 ºС при скорости нагрева 7 ºС/мин. Испытуемый образец помещается в специальную кварцевую трубку при открытой камере печи и закрепляется при помощи толкателя, при этом избегая перекосов после чего печь закрывается. Через программное обеспечение Proteus указывается температурный режим, а также параметры самого образца. После запуска измерения в реальном времени на экране отображаются графики зависимости удлинения образца от температуры. После завершения цикла данные сохраняются для последующего анализа. Теоретический расчет ТКЛР проводится по методу А.А. Аппена в соответствии с ГОСТ Р 52569-2018.

Результаты. В результате исследования ТКЛР дилатометрическим методом синтезированных составов стеклоэмалей и теоретическим расчетам методом Аппена, были получены средние значения.

В ходе теоретического расчета было установлено, что добавление песка до 10% повышает ТКЛР с 97,94 до $95{,}10\times10^{-7}$ K^{-1}, диатомит в концентрации 10% дает более значительное снижение до $95{,}62\times10^{-7}$ K^{-1}, а диоксид титана (TiO_2) при 10 % добавке показывает минимальное значение среди исследованных добавок – $95{,}86\times10^{-7}$ K^{-1}. Во всех образцах наблюдается превышение экспериментальных значений над теоретическими, при этом наибольшее расхождение зафиксировано в образцах с песком (до +7,5 % от теоретического значения). Образцы с TiO_2 показывают наименьшее отклонение от теоретических значений.

Анализ полученных результатов показывает, что все образцы находятся в пределах допустимых значений. При этом наиболее оптимальные характеристики демонстрируют образцы с добавлением диоксида титана до 5 %. Таким образом, проведенные исследования

подтверждают эффективность использования диоксида титана как модификатора для получения эмалей с заданными теплофизическими характеристиками, что может быть использовано при разработке новых составов эмалевых покрытий.

Обсуждение. В результате исследования установлено, что введение различных добавок (кварцевого песка, диатомита и диоксида титана) в количестве 5-10 % позволяет влиять на изменение ТКЛР стеклоэмалевых покрытий.

Выявлено, что наибольшее влияние оказывает – диоксид титана при содержании 5 % обеспечивает наилучшее значение ТКЛР (теоретический расчет – $95{,}86\times10^{-7}$ K^{-1} и экспериментальное исследование – $94{,}20\times10^{-7}$ K^{-1} стеклоэмалевого покрытия со стальным субстратом. Теоретические расчеты, подтвержденные экспериментальными данными, показали, что образцы с добавлением TiO_2 демонстрируют минимальные отклонения от требуемых параметров и наиболее стабильные характеристики.

Проведенные исследования также позволили установить, что все полученные составы соответствуют требованиям ГОСТ Р 52569-2018 по значению ТКЛР, находясь в допустимом диапазоне $(90\text{-}120)\times10^{-7}$ K^{-1}. При этом экспериментальные значения ТКЛР во всех случаях превышали теоретические расчеты, что свидетельствует о сложности процессов, происходящих при формировании структуры стеклоэмалевого покрытия.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки новых составов однослойных стеклоэмалевых покрытий, обеспечивающих надежную защиту стального субстрата от внутренней коррозии. Предложенные подходы к модификации состава могут быть использованы при создании эмалевых покрытий с заданными теплофизическими характеристиками для различных условий эксплуатации.

Заключение. Установлено, что введение добавок (кварцевого песка, диатомита и диоксида титана) в количестве 5-10 % позволяет направленно изменять ТКЛР эмалевого покрытия. Наибольшее влияние на сближение теплофизических характеристик эмали и стали оказывает диоксид титана (TiO_2). Наилучшие результаты показал состав с добавлением 5 % диоксида титана. Экспериментальное значение ТКЛР для данного образца составило $94{,}20\times10^{-7}$ K^{-1}, что максимально приближено к теоретическому расчету ($95{,}86\times10^{-7}$ K^{-1}) и находится в оптимальном диапазоне для обеспечения совместимости с малоуглеродистой сталью. Это позволяет минимизировать внутренние напряжения в системе «металл – эмаль». Установлено, что все разработанные составы удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 52569-2018, так как их ТКЛР находится в допустимом интервале $(90–120)\times10^{-7}$ K^{-1}.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-49-00002, https://rscf.ru/project/25-49-00002/ «Принципы модификации аморфизированных неорганических покрытий с улучшенной адгезией, теплопроводностью и коррозионной стойкостью для объектов энергетической инфраструктуры» (Руководитель Е.А. Яценко).

Список литературы

1. Соколов Л.И. Внутренние системы водоснабжения и водоотведения // Инфра-Инженерия. 2022. – 508 с.
2. Berezovskaya V.V., Berezovsky A.V. Corrosion-resistant steels and alloys: a tutorial. – 2019. – 235.
3. Konnov D.V. Forecasting corrosion defects in oil pipelines // Universum: technical sciences. 2023. No. 10-5 (115). P. 22-32.
4. Savenok O.V., Gorpinchenko A.N. Features of operation of oil and gas wells in conditions of high corrosion aggression // Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). 2022. No. 2. P. 155.
5. Русанова Н.Л., Саулин Д.В. Исследование структуры и состава дефектного стеклоэмалевого покрытия в области сварного соединения //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2016. №. 1. С. 130-144.
6. Яценко Е.А. и др. Силикатное эмалевое покрытие для внутренней защиты стальных трубопроводов //Патент РФ. – 2022. – №. 2769688.

УДК 669.712.111.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ НАТРИЙ-КАЛИЕВЫХ АЛЮМИНАТНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Шерстнева Э.А.[1], Сизякова Е.В. [2], Федоров А.Т.[3]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, sherstneva-elvira@mail.ru
[2] к.т.н., доцент кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия
[3] к.т.н., ассистент кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Сизякова Е.В.
к.т.н., доцент кафедры металлургии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Истощение месторождений традиционного алюминиевого сырья создает предпосылки для освоения альтернативных руд, ранее не вовлекавшихся в промышленную переработку. В работе представлены результаты экспериментального исследования плотности смешанных натрий-калиевых алюминатных растворов в системе Al_2O_3–Na_2O–K_2O–H_2O при 90°C. Определены функциональные зависимости плотности от состава растворов при различных мольных долях K_2O. Полученные данные создают научную основу для оптимизации технологических параметров процессов переработки калийсодержащего алюминиевого сырья.

Ключевые слова: глинозем, алюминатные растворы, повышенное содержание калия, физические свойства, плотность.

Современная глиноземная промышленность испытывает необходимость расширения сырьевой базы вследствие истощения и отсутствия развития месторождений высокосортных бокситов [1]. В качестве перспективных альтернативных источников алюминия рассматриваются уртитовые, нефелиновые, рисчорритовые и сыннырытовые руды [2-4]. Технологическая переработка указанных видов сырья сопровождается формированием многокомпонентной системы Al_2O_3–Na_2O–K_2O–H_2O, физико-химические свойства которой остаются недостаточно изученными [5].

Несмотря на достаточно полную исследованность тройных систем Na_2O–Al_2O_3–H_2O и K_2O–Al_2O_3–H_2O, сведения о плотности смешанных натрий-калиевых алюминатных растворов характеризуются крайней ограниченностью. Существующие эмпирические зависимости, в частности уравнение, предложенное Бароном с сотрудниками [6], описывают плотность исключительно как функцию концентраций Na_2O и Al_2O_3, не учитывая влияние катионов калия.

Целью работы является экспериментальное определение плотности равновесных растворов в системе Al_2O_3–Na_2O–K_2O–H_2O при 90°C с варьированием мольной доли калия.

Для исследования были приготовлены синтетические смешанные натрий-калий алюминатные растворы системы с различной мольной долей K_2O. Эксперимент проводился на реакторной установке H.E.L. Auto-MATE II, обеспечивающей наиболее точное моделирование технологического процесса выщелачивания глиноземного производства. Методика эксперимента включала подход к состоянию равновесия "снизу" через контролируемое растворение избытка гидроксида алюминия в ненасыщенных щелочных растворах [7]. Плотность смешанных натрий-калиевых алюминатных растворов измерялась пикнометрическим методом.

Полученные данные представлены в виде таблиц (табл.1-3), отражающих зависимость плотности от состава раствора при различных значениях n(K_2O).

Таблица 1

Плотность смешанного алюминатного раствора с различной концентрацией щелочи при мольной доле K_2O (n_K) = 0,25

%K_2O = 0,25					
R_2O = 75 г/л		**R_2O = 100 г/л**		**R_2O = 120 г/л**	
Al_2O_3, г/л	***p*, г/см^3**	**Al_2O_3, г/л**	***p*, г/см^3**	**Al_2O_3, г/л**	***p*, г/см^3**
14,79	1,036	17,595	1,062	14,9175	1,0795
18,36	1,044	30,345	1,0695	30,09	1,0795
26,265	1,051	39,7	1,095	42,075	1,0915
46,92	1,075	54,57	1,1235	57,315	1,102
47,94	1,085	71,145	1,1285	79,05	1,1535
48,45	1,087	75,48	1,1325	94,86	1,1555
49,47	1,089	75,99	1,139	99,705	1,1565
49,98	1,09	76,99	1,139	99,96	1,1565

Таблица 2

Плотность смешанного алюминатного раствора с различной концентрацией щелочи при мольной доле K_2O (nK) = 0,5

%K_2O = 0,5					
R_2O = 75 г/л		**R_2O = 100 г/л**		**R_2O = 120 г/л**	
Al_2O_3, г/л	***p*, г/см^3**	**Al_2O_3, г/л**	***p*, г/см^3**	**Al_2O_3, г/л**	***p*, г/см^3**
38,25	1,037	46,41	1,078	73,44	1,09
40,8	1,041	55,08	1,051	74,46	1,108
44,88	1,042	58,65	1,071	75,48	1,11
45,9	1,0425	61,71	1,082	76,5	1,111
46,41	1,043	63,24	1,091	77,52	1,113
46,92	1,043	64,77	1,097	78,03	1,114
46,92	1,043	65,34	1,099	78,54	1,115

Таблица 3

Плотность смешанного алюминатного раствора с различной концентрацией щелочи при мольной доле K_2O (nK) = 0,75

%K_2O = 0,75					
R_2O = 75 г/л		**R_2O = 100 г/л**		**R_2O = 120 г/л**	
Al_2O_3, г/л	***p*, г/см^3**	**Al_2O_3, г/л**	***p*, г/см^3**	**Al_2O_3, г/л**	***p*, г/см^3**
35,7	1,025	42,84	1,0595	57,12	1,073
35,9	1,027	47,94	1,0675	62,22	1,091
36,21	1,0345	48,96	1,074	62,22	1,091
36,21	1,0345	49,47	1,081	62,22	1,091
36,21	1,0345	49,98	1,0835	62,73	1,128
36,21	1,0345	49,98	1,0835	62,73	1,128

Экспериментально исследована плотность смешанных натрий-калиевых алюминатных растворов в системе Al_2O_3–Na_2O–K_2O–H_2O при 90°С. Установлены количественные зависимости плотности от концентрации компонентов и мольной доли калия.

Полученные данные демонстрируют закономерное увеличение плотности с ростом общей концентрации Al_2O_3 и щелочи (R_2O). Выявлено существенное влияние мольной доли калия на плотность растворов: при одинаковой общей молярной концентрации щелочи и содержании глинозема плотность систематически изменяется в зависимости от значения $n(K_2O)$.

Результаты работы вносят вклад в развитие фундаментальных представлений о физико-химических свойствах многокомпонентных щелочных алюминатных систем, так как от плотности зависят такие параметры раствора, как: вязкость, поверхностное натяжение, тепло-, электропроводность и другие. Таким образом, их исследование даст научную основу для оптимизации технологических параметров процессов переработки калийсодержащего алюминиевого сырья.

Благодарности: *Работа проводилась с привлечением лабораторной базы ФПМС Санкт-Петербургского горного университета.*

Список литературы

1. Sizyakov V.M., Brichkin V.N., Kurtenkov R.V., Maksimova R.I. Synthesis, properties and applications of complex calcium aluminates and hydroaluminates // Non-ferrous Metals. 2025. No. 1. P. 10-17. DOI: 10.17580/nfm.2025.01.02

2. Горбунова Е.С., Захаров В.И., Алишкин А.Р. Химико-обогатительная технология комплексной переработки рисчорритов // Обогащение руд, 2011. № 4. С.12-16.

3. Левин Б.В., Лисюк Б.С., Луценко К.Л. Нефелиновые концентраты и шламы – уникальное сырье для геополимерных материалов и конструкций // Мир дорог. 2020. № 129-130. С. 91-100. DOI: 10.13140/RG.2.2.17349.06880

4. Антропова И. Г., Алексеева Е. Н., Будаева А. Д., Доржиева О. У. Термохимическое обогащение ультракалиевого алюмосиликатного сырья (сыннырита) с использованием магнийсодержащих добавок природного происхождения // Обогащение руд. 2018. № 6. С. 14-19. DOI: 10.17580/or.2018.06.03

5. Luo M., Ye J., Xue J., Liu Ch., Song X., Yu J. Phase Equilibrium in the Ternary System K_2O–Al_2O_3–H_2O at 323.15, 333.15, 343.15, and 353.15 K // Journal of Chemical & Engineering Data. 2020. Vol. 65. No. 7. P. 3463–3471 DOI: 10.1021/acs.jced.0c00017.

6. Барон Н.М., Баранова Т.А., Матвеева Р.П. / Плотность растворов алюминатов натрия при температурах от 25 до 90о // Журнал прикладной химии. 1965. № 1. С. 185.

7. Бричкин В.Н., Фёдоров А.Т. Расчет и экспериментальное определение равновесного состава растворов в частных разрезах системы Na_2O–K_2O–Al_2O_3–H_2O // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 33-38. DOI: 10.17580/tsm.2022.07.03

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ С МАРКИРОВКОЙ, ВЫПОЛНЕННОЙ ЛАЗЕРОМ

Янусова А.Г.[1], Хузнахметов Р.М.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s231927@stud.ru
[2] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Вологжанина С.А.
доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В ходе работы был проведён анализ влияния лазерной маркировки с переплавом поверхности на коррозионные свойства стальных образцов из 12Х18Н10Т. Исследования проводились с применением камеры солевого тумана, отдельно в кислой и нейтральной средах. Проведено сравнение вида поверхности образцов до проведения эксперимента, после выдержки в течение 240 часов в агрессивных средах с применением визуального осмотра, оптического микроскопа при увеличении 50, 100 и 200. После лазерной обработки на части образцов выявлены углубления малого диаметра на стыке зон основного и обработанного металла. Формирование дефектов поверхности с большей вероятностью связано с лазерной обработкой, чем с воздействием коррозионных сред, что подтверждается результатами исследования.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, лазерная маркировка, камера солевого тумана, электрохимические исследования, коррозия, металлография.

Введение. Актуальная проблема повышения долговечности и удобства идентификации изделий в промышленности требует разработки эффективных методов модификации поверхностей [1]. Перспективным способом нанесения постоянной маркировки является лазерная маркировка с переплавом [2]. Однако ее влияние на электрохимическое поведение и коррозионную стойкость стали 12Х18Н10Т остается предметом исследования [3].

Целью данной работы была оценка влияния лазерной маркировки с переплавом поверхности на коррозионные свойства исследуемого материала в агрессивных средах.

Задачи для достижения поставленной цели: оценка стойкости обработанных и необработанных образцов к воздействию солевого тумана в условиях длительной выдержки; металлографический контроль поверхности для выявления морфологических дефектов и следов коррозионной деградации после испытаний; выявление взаимосвязи между появлением дефектов, лазерной обработкой и влиянием агрессивных сред.

В качестве объекта исследования выступает процесс формирования поверхностного слоя стальных изделий при лазерной маркировке с переплавом.

Методы. Для достижения поставленной цели была разработана программа исследований. Программа исследований включала оценку внешнего вида образцов, испытания в камере солевого тумана, металлографические исследования оценки стойкости к воздействию коррозионных сред. Стойкость образцов оценивали в камере солевого тумана нейтрального и кислого с pH=3,0 растворов по отдельности. Подготовленные образцы помещались в камеру солевого тумана и выдерживались при температуре (35±2) °С в течение 240 часов для обоих проведённых типов выдержки. Распыление солевого раствора NaCl концентрацией (50±5) г/дм^3 производилось непрерывно на протяжение всего времени выдержки. Результаты испытаний оценивались с последующим визуальным и гравиметрическим анализом. Состояние поверхности контролировалось с использованием оптической микроскопии для выявления дефектов и продуктов коррозии. Образцы взвешивались до и после испытаний. [4, 5, 6]

Результаты. Проведенные испытания показали отсутствие значимой макроскопической деградации стальных образцов. Визуальный контроль и гравиметрический анализ по завершении 240-часовой экспозиции в нейтральном (pH=7) и кислом (pH=3) солевом тумане не выявили значимой потери массы образцов, что свидетельствует об удовлетворительной

общей коррозионной стойкости материала. При этом на контрольных образцах без лазерной обработки следы коррозии или признаки деградации поверхности не обнаружены. [7]

Для изучения состояния границы основного и обработанного металла, подвергшейся лазерной обработке, и регистрации характерных изменений поверхности после воздействия солевого тумана были выполнены металлографические исследования. Металлографические исследования позволили выявить, что в переходной области лазерная зона – основной металл присутствуют углубления диаметром до нескольких микрон. Данные дефекты, наиболее отчетливо проявившиеся после воздействия кислого солевого тумана, не являются продуктом коррозии в чистом виде, а представляют собой результат термического воздействия лазерного излучения при переплаве. В зонах, прилегающих к этим углублениям, наблюдалось локальное изменение цвета поверхности, что косвенно указывает на повышенную химическую активность данных участков.

Обсуждение. После проведения испытаний наблюдаются локальные углубления и изменение цвета поверхности в обработанной зоне, несмотря на отсутствие общей потери массы. Дефекты, видимые после обработки, с наибольшей вероятностью, являются результатом лазерного процесса, а не продуктами коррозии в агрессивных средах. Образовавшиеся локальные углубления могут в дальнейшем стать концентраторами напряжений [8, 9].

Заключение. Проведенные исследования показали, что лазерная маркировка с переплавом более негативно сказывается на локальной коррозионной стойкости стальных образцов в зоне стыка между основным металлом и полученным валиком, чем агрессивные среды нейтрального и кислого солевых туманов. После завершения испытаний в нейтральном и кислом солевых туманах не произошло значительной потери массы образцов. Установлено, что на стыке зон основного и обработанного металла формируются дефекты в виде микроскопических углублений. Для точного определения природы этих дефектов и их влияния на эксплуатационные характеристики в будущем необходимо провести дополнительные исследования [10].

Благодарности: *Авторы выражают благодарность коллективу Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого за содействие в проведении исследований.*

Список литературы

1. Veiko V.P., Slobodov A.A., Odintsova G.V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Physics, 2013, 23, 066001. doi:10.1088/1054-660X/23/6/066001.
2. Choi Y.Y., Kim M.H. Corrosion behaviour of welded low-carbon steel in the Arctic marine environment // RSC Advances. – 2018. – Vol. 8. – P. 30155–30162. – DOI: 10.1039/C8RA05371E.
3. Ramos-Velazquez, A., Amiaga, J., Veĭko, V., Khuznakhmetov, R., Polyakov, D. (2025). The peculiarities of ablation and deposition of brass by nanosecond laser pulses at the LIBT-scheme. Optics and Laser Technology, 181, Article 112006. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112006
4. Momeni M., Naboka O. Corrosion Performance of Atmospheric Corrosion Resistant Steel Bridges in the Current Climate: A Performance Review // Materials. – 2025. – Vol. 18, No. 15. – Art. 3510. – DOI: 10.3390/ma18153510.
5. Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Grothe H. Analysis of metal corrosion methods and identification of cost-efficient and low corrosion deicing agents // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2023. – DOI: 10.1080/1478422X.2023.2200008.
6. Panchenko Y.M., Marshakov A.I., Kudryavtseva L.A., Kovtanyuk V.V., Nenasheva T.A. A chloride deposition model for predicting the categories of atmospheric corrosivity in coastal areas // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2024. – DOI: 10.1177/1478422X241298181.
7. Rezayat M., Karamimoghadam M., Contuzzi N., Casalino G., Mateo A. Statistical Modeling and Characterization of Laser Marking on AISI 301LN Stainless Steel Using Short-Pulsed Fiber Laser // Metals. – 2025. – Vol. 15, No. 5. – Art. 519. – DOI: 10.3390/met15050519.
8. Panchenko Y.M., Marshakov A.I., Kudryavtseva L.A., Kovtanyuk V.V., Nenasheva T.A. A chloride deposition model for predicting the categories of atmospheric corrosivity in coastal areas // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2024. – DOI: 10.1177/1478422X241298181.
9. Yang L., Liu C., Wang Y., Wang X., Gao H. Dynamic Marine Atmospheric Corrosion Behavior of AZ91 Mg Alloy Sailing from Yellow Sea to Western Pacific Ocean // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 10. – Art. 2294. – DOI: 10.3390/ma17102294.
10. S.A. Vologzhanina, R. M. Khuznakhmetov, J. V. Amyaga, E. Yu. Zhdanova, A. Ramos-Velazkuez Influence of laser exposure on the processes occurring in a surface layer of austenitic steel products // CIS Iron and Steel Review – Vol. 30 (2025), pp. 52–58. DOI: 10.17580/cisisr.2025.02.09.

Секция 9. ЭНЕРГЕТИКА, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, МЕТРОЛОГИЯ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.316.722

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ШУНТИРУЮЩЕГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ ЖЁСТКОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Аббасов Г.А.[1], Бойкова И.С.[2]
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Abbasov.Goshgar2001@yandex.ru
[2] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Сериков В.А.
кандидат технических наук, ассистент кафедры ЭиЭМ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается задача повышения эффективности компенсации высших гармоник в промышленных электрических сетях. Обоснована недостаточность аналитических методов расчёта параметров активного фильтра гармоник для систем с нелинейным гистерезисным управлением. Предложен подход к параметрической оптимизации на основе имитационного моделирования. Выявлены закономерности, определяющие выбор критериев оптимизации. Исследование выполнено на основе имитационных моделей, реализованных в среде MATLAB/Simulink, для систем с различным отношением Isc/Il.

Ключевые слова: активный фильтр гармоник, качество электроэнергии, гистерезисный контроллер тока, коэффициент несинусоидальности напряжения, суммарное гармоническое искажение, параметрическая оптимизация, жёсткость сети, MATLAB/Simulink, промышленные сети, горные предприятия.

Введение. Применение силовых преобразователей в системах электроснабжения горных предприятий сопровождается генерацией высших гармоник тока, что создаёт предпосылки для несоответствия нормативным требованиям в области качества электроэнергии [1, 2, 10]. Одним из технических решений данной проблемы является применение шунтирующего активного фильтра гармоник (АФГ) [3]. Гистерезисный контроллер тока, широко используемый в составе АФГ, функционирует с переменной частотой коммутации, что существенно ограничивает точность аналитических методов расчёта его параметров [4, 5]. Существующие оптимизационные подходы к настройке параметров АФГ, как правило, ориентированы на конкретные условия и не учитывают влияния жёсткости сети [3, 4, 9]. Целью настоящей работы является разработка и верификация метода имитационной параметрической оптимизации АФГ применительно к промышленным сетям с различными характеристиками жёсткости.

Методы. В качестве объекта исследования рассматривается электротехнический комплекс в составе системы электроснабжения горного предприятия и шунтирующего АФГ, реализованный в среде MATLAB/Simulink. Для охвата практически значимого диапазона условий эксплуатации сформирована совокупность расчётных

систем с различным отношением тока короткого замыкания к расчётному току нагрузки Isc/Il, соответствующих различным категориям жёсткости сети по IEEE 519-2022[1]. Разработанный алгоритм реализует последовательную оптимизацию параметров АФГ на основе имитационной модели. В качестве приоритетного критерия оптимизации принят коэффициент несинусоидальности напряжения Ku, нормируемый в точке общего присоединения, поскольку искажение напряжения характеризует совокупное воздействие на всех потребителей сети [6].

Результаты. В ходе исследования выявлена зависимость эффективности оптимизации параметров АФГ от характеристик питающей сети, определяемых отношением Isc/Il [6]. Установлено, что показатели качества электроэнергии по току и по напряжению определяются физически независимыми механизмами, что обусловливает необходимость их раздельного учёта при формировании критериев оптимизации [7, 8]. Обоснована приоритетность коэффициента несинусоидальности напряжения как критерия оптимизации, обусловленная его нормированием по ГОСТ 32144-2013[2] и интегральным характером его влияния на качество электроэнергии в точке общего присоединения [6].

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применимость аналитического метода расчёта параметров АФГ определяется характеристиками конкретной электрической системы. Использование имитационного моделирования позволяет учесть нелинейные эффекты, присущие гистерезисному контроллеру тока [4, 5], и обеспечить обоснованный выбор параметров с учётом приоритетного критерия качества электроэнергии.

Заключение. Предложен и верифицирован подход к имитационной параметрической оптимизации АФГ для промышленных сетей с различной жёсткостью. Установлены условия применимости аналитического метода и обоснован выбор приоритетного критерия оптимизации. Практическая значимость работы состоит в формировании методической основы для обоснованного выбора параметров АФГ на стадии проектирования, что способствует повышению надёжности и качества электроснабжения горных предприятий. Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная верификация полученных результатов и распространение разработанного подхода на более широкий класс нагрузок.

Благодарности. *Авторский коллектив выражает благодарность д.т.н., профессору кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета Сычеву Юрию Анатольевичу за помощь и конструктивные замечания при подготовке научного проекта.*

Список литературы

1. Siostrzonek T., Wójcik J., Dutka M., Siostrzonek W. Impact of Power Quality on the Efficiency of the Mining Process // Energies. 2024. Vol. 17, № 22. Art. 5675. DOI: 10.3390/en17225675.

2. Sychev Y.A., Zimin R.Y. Improving the Quality of Electricity in the Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex with Hybrid Filter-Compensating Devices // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. P. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.

3. Li D., Wang T., Pan W., Ding X., Gong J. A Comprehensive Review of Improving Power Quality Using Active Power Filters // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 199. Art. 107389. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107389.

[1] IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 2022.

[2] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

4. Szromba A. Improvement of the Source Current Quality for a Shunt Active Power Filter Operating Using Hysteresis Technique with Stabilized Switching Frequency // Energies. 2024. Vol. 17, № 20. Art. 5098. DOI: 10.3390/en17205098.

5. Sayahi K., Khiareddine A., Bacha F. STATCOM-Active Power Filter Improved Hysteresis Current Control for Power Quality Management under Unbalanced and Distorted Grid Voltage // Results in Engineering. 2025. Vol. 27. Art. 107064. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107064.

6. Сериков В.А., Костин В.Н., Сычев Ю.А., Самет Х. Метод оценки качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий с мощными высоковольтными частотно-регулируемыми электроприводами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12. С. 162–177. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_162.

7. Hu Z., Han Y., Zalhaf A.S. et al. Harmonic Sources Modeling and Characterization in Modern Power Systems: A Comprehensive Overview // Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 218. Art. 109234. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.

8. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O. A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems // Energies. 2021. Vol. 14, № 20. Art. 6467. DOI: 10.3390/en14206467.

9. Bakria D., Laouid A.A., Korich B. et al. An Optimized Shunt Active Power Filter Using the Golden Jackal Optimizer for Power Quality Improvement // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 15869. DOI: 10.1038/s41598-025-00204-1.

10. Karpov A.S., Yaroshevich V.V., Gubskaya E.I. Research on Electrical Energy Parameters in the Distribution System of a Mining Facility // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, № 21. Art. 11355. DOI: 10.3390/app152111355.

УДК 621.3.053

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Бабырь В.В.
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, vbabyr@yandex.ru

Научный руководитель: Назарычев А.Н.
доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена оценке электробезопасности персонала угольных предприятий при однофазных замыканиях. Приведен анализ нормативных требований к защите от поражения током. С использованием симуляции в Mathlab исследовано влияние сопротивления защитного заземления, емкости сети и режима нейтрали на ток через человека при напряжении 3300 В. Выявлена возможность внедрения компенсированной нейтрали в угольных шахтах. Предложены варианты обеспечения безопасного тока через человека.

Ключевые слова: Безопасность, защитное заземление, однофазное замыкание на землю, ток через человека, изолированная нейтраль, резистивная нейтраль, шахта.

Введение. Угольная промышленность является производством с повышенным уровнем опасности, где важным фактором является обеспечение безопасности рабочих [1-2]. В условиях угольного предприятия – обеспечение безопасного значения тока через человека является фундаментальной задачей охраны труда, так как превышение определенных пороговых значений лишь на несколько миллиампер необратимо ведет к тяжелым последствиям.

Анализ нормативной документации позволяет выделить основные моменты, связанные с ограничением параметров системы электроснабжения для обеспечения безопасности человека при напряжении 3300 В:

1. Ток, проходящий через тело человека при его прикосновении к корпусу машины, оказавшемуся под напряжением при однофазном замыкании на землю (корпус), не должен превышать 0,025 А [3].
2. Для повышения чувствительности защиты от однофазных утечек (замыканий) тока на землю и уменьшения вероятности ее ложных срабатываний допускается заземление нейтрали со стороны вторичной обмотки трансформатора ПУПП через ограничительный высоковольтный резистор. При этом ток, проходящий через указанный резистор при однофазном замыкании на землю в любой точке сети, не должен превышать 2 А [3].
3. Общая длина кабелей на напряжение 3300 В, присоединенных к одной ПУПП, ограничивается значением емкости относительно земли не более 1 мкФ на фазу [3].
4. Общее переходное сопротивление сети заземления, измеренное у любых заземлителей, должно быть не более 2 Ом [4].
5. Согласно [4] для электроснабжения шахтных электроустановок используются сети с изолированной или заземлённой через резистор нейтралью трансформатора не превышающего значения тока, указанного в пункте 2.

Ранее в угольных шахтах к применению была разрешена только изолированная нейтраль, но на данный момент можно применять и резистивную нейтраль. В связи с разрешением применения заземления через резистор становится актуальным рассмотреть и сравнить влияние этого решения на безопасность ведения работ при различных значениях емкости кабельной сети, изменении сопротивления защитного заземления и заземляющего резистора.

Методы. Для изучения изменения тока через человека была собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 1, которая имитирует однофазное замыкание на корпус. При ОЗЗ в системе с изолированной нейтралью при напряжении 660 В через тело человека, сопротивлением 1000 Ом [5] протекает ток 0.265 А. Для подтверждения значений, полученных вследствие опыта, была собрана аналогичная модель в Mathlab, а также был проведен расчет тока через человека по формуле[1].



Рис. 1. Фото части экспериментальной установки

Высокая степень совпадения результатов, представленных в таблице 1, полученных расчётным путём, на экспериментальном стенде и в программе Mathlab, позволяет сделать вывод о корректности применяемой математической модели. Это даёт основание использовать данную программу для моделирования и исследования в сетях напряжением 3300 В.

Таблица 1

Значения токов через человека в системе 660 В с изолированной нейтралью

Теоретический расчёт	0,261 А
Экспериментальный опыт	0,265 А
Mathlab	0,262 А

Согласно нормативной документации, ток через резистор не должен превышать 2 А. Таким образом, анализируя полученные значения, представленные в таблице 2, наиболее целесообразно применять резисторы от 1000 до 3000 Ом, так как при увеличении сопротивления будет уменьшаться ток через резистор и это приведет к снижению чувствительности защиты.

[1] «Электробезопасность». Комплект лабораторных работ: учебное пособие по практическому изучению средств защиты от электропоражения в сетях до 1 кВ для студентов всех специальностей: учебное пособие. А.Г. Дашковский, Ю.В. Бородин, А.А. Сечин, М.В. Гуляев, А.Г. Кагиров – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 97 с.

Таблица 2

Зависимость тока через человека при изменении сопротивления резистора нейтрали в сети 3300В с ёмкостью 1 мкФ

Сопротивление резистора нейтрали, Ом	Ток через резистор нейтрали, А	Ток через человека при исправном защитном заземлении и касании человека корпуса, оказавшегося под напряжением, А	Ток через человека при обрыве защитного заземления и касании человека корпуса, оказавшегося под напряжением или непосредственном прикосновении человека к фазе, А
500	3,798	0,00836	-
500	1,214	-	1,339
1000	1,903	0,00521	-
1000	0,863	-	1,184
1700	1,12	0,00422	-
1700	0,607	-	1,146
3000	0,635	0,00380	-
3000	0,389	-	1,167

Заземление электроустановок должно обеспечивать защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям электрооборудования или устройствам, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции [6].

Результаты моделирования (табл. 3) наглядно демонстрируют критическую зависимость тока через человека от сопротивления ЗУ. Даже незначительное увеличение сопротивления сверх нормативного значения приводит к многократному росту поражающего тока, что создаёт прямую угрозу жизни.

Таблица 3

Зависимость тока через человека при изменении сопротивления защитного заземления в различных системах нейтрали 3300В с ёмкостью линии 1 мкФ

Сопротивлением ЗУ, Ом	Ток через человека при изолированной нейтрали, А	Ток через человека при резистивной нейтрали 1700 Ом, А
2	0,0036	0,0042
15	0,027	0,031
100	0,166	0,182
∞=обрыв	1,307	1,146

При изменении ёмкости линии, как видно из таблицы 4 – ток через человека при резистивной нейтрали практически не изменяется, в то время как при уменьшении емкости линии ток через человека в изолированной нейтрали изменяется значительно.

Таблица 4

Зависимость тока через человека при изменении ёмкости линии в различных системах нейтрали 3300В при обрыве защитного заземления и касании человеком корпуса, оказавшегося под напряжением или непосредственном прикосновении человека к фазе

Емкость линии, мкФ	Ток через человека при изолированной нейтрали, А	Ток через человека при резистивной нейтрали 1700 Ом, А
1	1,306	1,146
0.5	0,811	0,868
0.25	0,436	0,753

На данный момент в угольных шахтах можно применять 2 вида нейтрали – изолированная и резистивная. Однако необходимо оценить эффективность применения компенсированной нейтрали на ток через человека при ОЗЗ. Результаты моделирования представлены в таблице 5.

Таблица 5

Зависимость тока через человека при изменении индуктивности в сети 3300В с ёмкостью 1 мкФ

Индуктивность реактора, Гн	Ток через реактор, А	Ток через человека при исправном защитном заземлении и касании человека корпуса, оказавшегося под напряжением, А	Ток через человека при обрыве защитного заземления и касании человека корпуса, оказавшегося под напряжением или непосредственном прикосновении человека к фазе, А
1	6,013	0,00841	-
1	2,477	-	1,737
3,4	1,78	0,0000334	-
3,4	1,779	-	0,0167
5	1,213	0,00117	-
5	1,158	-	0,559

При правильно выбранной индуктивности в компенсированной нейтрали возможно обеспечить безопасное значение тока не только при касании человеком корпуса, оказавшегося под напряжением, но и при непосредственном касании человеком фазы, что невозможно при использовании разрешенных систем заземления нейтрали.

Заключение. Согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что разрешенные на сегодняшний день к применению в угольных шахтах изолированная и резистивная нейтрали не способны спасти человека при непосредственном касании фазы и касании корпуса с неисправным защитным заземлением. Потому что при допустимом времени срабатывания защиты в 0.2 секунды предельно допустимая величина тока будет превышать установленное значение в 350 мА.

Для реализации защиты человека при непосредственном касании фазы напряжением 3300В необходимо рассмотреть вопрос о возможности применения компенсированной нейтрали в угольных шахтах либо разработать аппарат защиты с автоматической компенсацией ёмкостного тока. Также необходимо разработать аппарат автоматического контроля переходного сопротивления защитного заземления.

Список литературы

1. Бабырь, К.В. Повышение электробезопасности обслуживающего персонала в условиях неполных однофазных замыканий на землю / К.В. Бабырь, Д.А. Устинов, Д.Н. Пеленев // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 8. – С. 55-61. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-8-55-61. – EDN LDSFID.
2. Маренич, К.Н. Анализ факторов ограничения функции защиты человека от электропоражения в электрической сети участка шахты / К.Н. Маренич, А.И. Денисова // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 54-58. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-4-54-58. – EDN LNKFWC.
3. Приказ Ростехнадзора от 28.10.2020 N 429 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по электроснабжению угольных шахт»
4. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 N 507 (ред. от 23.06.2022) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах"»
5. ГОСТ Р 12.1.038-2024. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
6. ГОСТ 28298-2016. Заземление рудничных электроустановок.

УДК 621.316.1

ОЦЕНКА ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РЕЗУЛЬТИРУЮЩУЮ НЕСИММЕТРИЮ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МНОЖЕСТВОМ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ

Воробьева В.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Vorobyova-Valeriya0928@yandex.ru

Научный руководитель: Добуш В.С.
к.т.н., доцент кафедры общей электротехники, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. Вопрос идентификации источников несимметрии режимов в электрических сетях сохраняет высокую значимость для энергосбытовых организаций, сетевых компаний и крупных промышленных потребителей. Несмотря на экономическую и техническую заинтересованность в установлении фактического вклада каждого участника в ухудшение показателей качества электроэнергии, существующие подходы к решению данной задачи не позволяют получить однозначные и достоверные результаты в условиях реальной эксплуатации сетей. В работе рассмотрены основные методы определения источника несимметрии и его фактического вклада в общую несимметрию в точке общего присоединения, а также выявлены их основные преимущества и ограничения. На основе анализа существующих методов выдвинуто предложение по улучшению существующей методики определения фактического вклада потребителей в общие искажения системы.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, несимметрия напряжения, определение фактического вклада потребителей.

Введение. Основными показателями качества электроэнергии являются несимметрия и несинусоидальность напряжения. Несмотря на наличие отработанных методов компенсации, эти проблемы по-прежнему актуальны для распределительных и промышленных сетей. Их решение требует сочетания технических решений с правовым регулированием. Ключевым элементом выступает распределение ответственности между поставщиком и потребителями за генерацию искажений – это создаст нормативную базу для обязательного снижения негативного влияния со стороны источника искажения.

Методы. Исследование базировалось на методе систематического обзора литературы. На первом этапе был выполнен анализ отечественных (eLibrary.ru, архив диссертаций Российской государственной библиотеки) и зарубежных (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore и др.) научных источников. Дополнительно проведен патентный анализ по базам Роспатента и Espacenet для выявления существующих технических решений в области идентификации источников несимметрии.

Результаты. Анализ научно-технической литературы показывает, что основное внимание исследователей уделено методам выявления источников высших гармоник [1], тогда как проблема определения ответственных за несимметрию напряжений и токов проработана в значительно меньшей степени. Между тем несимметричные режимы приводят к повышенным потерям мощности, снижению пропускной способности линий, дополнительному нагреву оборудования и сокращению срока его службы, что подтверждает актуальность разработки эффективных инструментов распределения ответственности. В зависимости от необходимости изменения конфигурации сети методы

идентификации источников несимметрии подразделяются на две категории: инвазивные, предусматривающие воздействие на топологию, и неинвазивные, основанные исключительно на вычислительных процедурах и данных измерений.

В числе неинвазивных подходов выделяют следующие: метод, основанный на оценке проводимости искажений [2]; метод, использующий определение активной составляющей сопротивления искажений [3]; способ, базирующийся на балансе искажающих мощностей [4, 5]; а также методики, построенные на анализе зависимости уровня искажений от загрузки потребителя, и ряд алгоритмов, оперирующих данными измерительных комплексов на границах раздела.

К инвазивным подходам относятся: метод последовательного отключения потребителя и различные методы, являющиеся вариациями определения параметров схемы замещения Тевенина или Нортона. Определение фактического вклада каждого из источников искажения по методу наложения в схеме Тевенина или Нортона дает наиболее точное представление о влиянии каждого из участников сети электроснабжения на общее искажение в системе [6-8]. Однако, для использования этого метода необходимо точно определить сопротивления потребителей для составления схемы замещения, на чем и сосредоточены основные исследования, направленные на этот метод.

Одним из таких инвазивных методов является подключение известного источника дисбаланса – однофазных конденсаторов [9]. Однако, внесение новых элементов в систему может негативно повлиять на результаты оценки.

Ряд исследований также направлен на неинвазивное определение параметров схемы замещения, базирующееся на множественных измерениях в точках учета и корреляционных методиках [10]. Такие методики не влияют на режим работы сети, но требуют большего количества вычислений и дополнительных проверок точности.

Обсуждение. Методика определения доли потребителя в несимметрии в точке общего присоединения, регламентированная ГОСТ IEC/TR 61000-3-14-2019, обладает существенным недостатком: она базируется на инвазивном подходе, требующем последовательного отключения потребителей. Ряд подходов, предлагаемых научным сообществом, также не гарантирует достоверных результатов. К их числу относятся методы, использующие баланс искажающих мощностей, а также алгоритмы, основанные на анализе направлений токов. В то же время перспективные методики, несмотря на свою привлекательность, содержат определенные ограничения и пока не получили нормативного закрепления.

Заключение. Таким образом, задача установления доли участия потребителей в формировании несимметрии и выявления конкретного источника искажений попрежнему актуальна. Ее решение открывает возможность создания объективной системы фиксации искажающих воздействий. Наиболее многообещающей основой для реализации такой системы являются алгоритмы, использующие метод наложения в эквивалентной схеме Тевенина и неинвазивную оценку параметров сопротивления системы и искажающего источника. Существующие стандарты нуждаются в адаптации к этим подходам.

Список литературы

1. Wilsun Xu and Yilu Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, pp. 804-811, April 2000, doi: 10.1109/61.853023.

2. Moraes, M.A.; Brito, V.H.F.; de Oliveira, J.C. An Approach for Determining Voltage Imbalance Contributions Based on Complex Independent Component Analysis. Energies 2022, 15, 7014. https://doi.org/10.3390/en15197014.

3. Дворкин, Д.В. Методика поиска источников несимметрии напряжения в точке общего присоединения подстанции и оценки их фактического влияния: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дворкин Дмитрий Валентинович. – М., 2018. – 24 с. – Текст: непосредственный.

4. Костюков, Д.А. Оценка долевого вклада потребителя в несимметрию напряжений по обратной последовательности в сетях с изолированной нейтралью / Д.А. Костюков, А.В. Петров, А.Е. Кущ // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 5(68). – С. 7-18. – DOI 10.37493/2307-907X-2018-68-5-7-18. – EDN VTMGJQ.

5. Костюков, Д.А. Оценка вклада потребителя в несимметрию напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения / Д.А. Костюков // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 6(69). – С. 24-34. – DOI 10.37493/2307-907X-2018-69-6-24-34. – EDN YWPRNJ.

6. Sun, Y.; Li, P.; Li, S.; Zhang, L. Contribution Determination for Multiple Unbalanced Sources at the Point of Common Coupling. Energies 2017, 10, 171. https://doi.org/10.3390/en10020171.

7. Yuanyuan Sun, Peixin Li, Yixuan Wang and Zhiming Yin, "Determination of the main unbalance sources on PCC in the distribution system," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7285893.

8. Yang, Y.; Wang, Y.; Ma, X. Determining the Responsibility of Three-Phase Unbalanced Sources Based on RICA. Energies 2019, 12, 2849. https://doi.org/10.3390/en12152849.

9. Gregory R.C.F., dos Santos A.C, Santos I.N., Ran L., de Oliveira J.C. A practical approach for determining voltage imbalance contributions from suppliers and consumers. Int Trans Electr Energ Syst. 2020; 30:e12627. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12627.

10. Moraes, M.A.; Brito, V.H.F.; de Oliveira, J.C. An Approach for Determining Voltage Imbalance Contributions Based on Complex Independent Component Analysis. Energies 2022, 15, 7014. https://doi.org/10.3390/en15197014.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ МИКРОСТРУКТУРЫ НЕФТЯНЫХ И ПЕКОВЫХ КОКСОВ ДЛЯ АКТУАЛИЗАЦИИ ГОСТ 26132-84

Горбачева В.Н.[1], Говкелевич К.Ю.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, gorbacheva.vladislava27@mail.ru
[2] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, ksushevich0208@gmail.com

Научный руководитель: Шихов А.И.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального обоснования возможности актуализации ГОСТ 26132-84 путем модернизации процесса пробоподготовки при оценке микроструктуры нефтяных и пековых коксов. Проведена сравнительная оценка прецизионности измерений серий образцов кокса.

Ключевые слова: нефтяной кокс, пековый кокс, микроструктура, пробоподготовка, прецизионность, повторяемость.

Введение. Нефтяные и пековые коксы являются стратегическим видом сырья для металлургической, электротехнической и химической промышленности. Одним из важнейших параметров, характеризующих технологическую значимость материала, является его микроструктура [1]. На данный момент метод оценки микроструктуры нефтяных и пековых коксов регламентируется ГОСТ 26132-84[1]. С момента введения документа в действие в области технического обеспечения произошли значительные изменения, поэтому технологии используемые в стандарте не в полной мере соответствуют современному уровню развития аналитической базы. Цель работы- актуализация ГОСТ 26132-84 за счет внедрения современного технического обеспечения. Качество оценки микроструктуры кокса в значительной степени зависит от этапа пробоподготовки, что обуславливает целесообразность модернизации данного этапа как одного из ключевых направлений совершенствования метода [2,3].

Методы. В ходе работы была проведена оценка возможности проведения пробоподготовки с использованием смолы в качестве связующего материала и механизированной обработки шлифов [4,5]. С целью оценки эффективности модернизации было проведено сравнение прецизионности в условиях повторяемости измерений микроструктуры кокса при использовании стандартизированной и модернизированной методик[2]. План эксперимента предусматривал изготовление четырех серий образцов с варьированием двух факторов: типа заливочного материала и способа обработки. Оценка микроструктуры проводилась методом оптической миикроскопии по балльной шкале в соответствии с ГОСТ 26132-84.

Результаты. В ходе экспериментальной работы выполнена оценка микроструктуры четырех серий образцов нефтяного игольчатого прокаленного кокса. Установлено, что для всех четырех серий образцов показатели повторяемости не превышают допустимого значения, установленного ГОСТ 26132-84, которое составляет 0,3 балла для коксов с оценкой микроструктуры выше 5 баллов. Измеренные значения составили: для

[1] ГОСТ 26132-84. Коксы нефтяные и пековые. Метод оценки микроструктуры.

[2] ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.

стандартизированной методики – 5,5 баллов; для методики с заменой только способа обработки – 5,7 баллов; для методики с заменой только связующего материала – 5,6 баллов; для полностью модернизированной методики – 5,8 баллов [6,7]. Анализ распределения оценок показал, что предложенные изменения обеспечивают более узкое распределение значений [8].

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что модернизированная методика пробоподготовки обеспечивает требуемый уровень прецизионности в условиях повторяемости измерений микроструктуры нефтяных и пековых коксов, установленный действующим нормативным документом. Данные полученные в ходе исследования можно считать достоверными. Значения показателя повторяемости модернизированной методики пробоподготовки свидетельствуют о стабильности результатов и позволяют рассматривать предложенные изменения как потенциальное направление совершенствования нормативной базы.

Заключение. Проведенное экспериментальное исследование можно считать необходимым обоснованием для актуализации ГОСТ 26132-84, с целью внедрения более надежных методов подготовки проб, что будет способствовать повышению качества контроля продукции в отрасли. Но так же стоит отметить, что в рамках настоящей работы оценка прецизионности ограничивалась показателем повторяемости, для полного метрологического обоснования внесения изменений необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на оценку воспроизводимости.

Список литературы

1. Габдулхаков, Р.Р. Оценка качества игольчатого кокса для производства графитированных электродов металлургических печей / Р.Р. Габдулхаков, В.А. Рудко, И.И. Ефимов, А.А. Спекторук // Цветные металлы. – 2022. – № 7. – С. 46-56. – DOI 10.17580/tsm.2022.07.05.
2. Зольников, В.В. Влияние сырья на основные качественные показатели малосернистого кокса / В.В. Зольников, Б.С. Жирнов, И.Р. Хайрудинов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2020. – № 4. – С. 23-27.
3. Ким, В.А. Сравнительная оценка структуры спецкоксов, используемых в электротермии / В.А. Ким, Г.А. Ульева // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – №2.
4. You, Z. Microstructural features transformation at various temperature stages and multi-scale atomistic representations of calcined petroleum coke based on HRTEM / Z. You, J. Xiao, Q. Mao, X. Zhang, Q. Zhong // Fuel. – 2022. – Vol. 330. – № December. – DOI:10.1016/j.fuel.2022.125521.
5. Созинов, С.А. Структура и текстура промышленных коксов: сравнительный анализ / С.А. Созинов, А.Н. Попова, Ю.Н. Дудникова, З.Р. Исмагилов // Кокс и химия. – 2021. – № 10. – С. 21-29. – DOI:10.52351/00232815_2021_10_21.
6. Асланов, З.Ю.о. Правильность и прецизионность методов и результатов измерений / З.Ю.о. Асланов, М.С. Зейналова // Современные инновации. – 2016. – №6. – С. 8.
7. Попов, А.А. Оценка показателей прецизионности результатов измерений в научных исследованиях на основе правила сложения дисперсий / А.А. Попов, О.Н. Косырева, С.А. Добротин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – №3. – С. 138.
8. Картечина, О.С. Сравнение нормального распределения и эмпирической функции распределения при статистической обработке результатов измерений / Н.В. Картечина, Л.В. Бобрович, Н.В. Пчелинцева, О.С. Картечина // Наука и Образование. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 20.

УДК 621.316

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЧЕРЕДНОСТИ ПЕРЕВОДА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6-10 КВ НА РЕЖИМ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Григоров А.М.[1], Королев А.А.[2]
[1] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, grigorov.andrey1@yandex.ru
[2] заместитель главного инженера, ПАО «Россети», Москва, Россия

Научный руководитель: Назарычев А.Н.
д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматривается проблема низкой надежности распределительных сетей 6–10 кВ, обусловленная широким применением изолированного режима заземления нейтрали. Проанализированы недостатки существующих режимов заземления, включая дугогасящие реакторы. Обоснована целесообразность перехода на низкоомное резистивное заземление, обеспечивающее селективное отключение однофазных замыканий на землю и предотвращающее развитие аварий. Для определения очередности перевода подстанций на резистивное заземление нейтрали предложена методика на основе комплексного показателя приоритета, учитывающего совокупность технико-экономических критериев с весовыми коэффициентами, рассчитанными методом парных сравнений. Результаты апробации подтвердили эффективность разработанного подхода для объективного ранжирования объектов и устойчивого отключения однофазных замыканий на землю.

Ключевые слова: Резистивное заземление нейтрали, распределительные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, изолированная нейтраль, надежность, дугогасящий реактор, селективность

Введение. Краткий обзор изученности проблемы в мире, цели и задачи исследования, постановка проблемы.

Повышение надежности электроснабжения является одним из основных рассматриваемых вопросов в распределительных сетях 6–10 кВ. В России основная часть распределительных сетей эксплуатируется с изолированным режимом заземления нейтрали, который нашел широкое применение в советский период [1]. Несмотря на простоту и дешевизну, многолетний опыт выявил серьезные недостатки изолированной нейтрали: возникновение опасных дуговых и феррорезонансных перенапряжений при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), сложность обнаружения поврежденной линии, риски для персонала и высокая вероятность перехода ОЗЗ в межфазные короткие замыкания, сопровождающиеся протеканием больших токов [2-3]. Учитывая, что ОЗЗ составляют до 80% от всех повреждений, проблема низкой надежности электрических сетей становится особенно актуальной. Международная практика зарубежных стран давно демонстрирует отказ от изолированной нейтрали в пользу других режимов заземления, основным из которых является резистивное заземление нейтрали. В России перспективной альтернативой изолированной нейтрали считается низкоомное резистивное заземление. Оно создает такой ток при однофазном замыкании, которого достаточно для селективного срабатывания защит, что позволяет мгновенно отключать поврежденный участок. Использование резистивного заземления исключает перенапряжения и развитие ОЗЗ в межфазные замыкания [4-6].

Целью исследования является анализ существующих режимов заземления нейтрали, применяемых в распределительных сетях среднего класса напряжения. Кроме того, целью исследования является формирование методики по выбору режима заземления нейтрали. Основные задачи: анализ недостатков различных режимов заземления

нейтрали среднего класса напряжения, выделение основных преимуществ каждого режима заземления нейтрали, а также формирование методики по выбору режима заземления нейтрали.

Актуальность работы заключается в необходимости повышения надежности распределительных сетей 6-10 кВ. Выбор режима заземления нейтрали влияет на аварийность основного оборудования, а также на электробезопасность.

Объект исследования – влияние режимов заземления нейтрали на надежность электрических распределительных сетей.

Предмет исследования – электрические распределительные сети 6-10 кВ.

Методы. Выбор режима заземления нейтрали является актуальным вопросом, поскольку изолированный режим заземления нейтрали, который является наиболее распространенным в распределительных сетях среднего класса напряжения в России. Актуальность исследования обусловлена большим количеством аварийных отключений из-за однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью. ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью сопровождается большим количеством негативных факторов, которые могут привести, в конечном итоге, к повреждению оборудования. Кроме того, распределительные сети 6-10 кВ в Росии сильно изношены, поэтому этот факт только усугубляет процесс протекания ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью [7]. Большинство подстанций 6-10 кВ были построены в прошлом столетии и у них уже давно истек нормативный срок службы, что влияет на состояние изоляции, качества соединений токопроводящих металлов, что может привести к серьезным авариям [8]. Несмотря на истекший срок службы, такие подстанции продолжают эксплуатироваться без необходимого ремонта, что снижает надежность сети.

Перечисленные выше проблемы приводят к серьезному росту количества аварий из-за ОЗЗ. Ситуации усугубляется из-за того, что ОЗЗ приводит не только к локальному повреждению оборудования, но также может привести и к отключению электроснабжения большого количества потребителей. Кроме того, отключение одних потребителей будет накладывать дополнительную нагрузку на другие сети, что ускорит их износ. [9-10].

Результаты. В результате исследования обосновано применение резистивного заземления в качестве основного режима нейтрали для распределительных сетей 6–10 кВ. Резистивное заземление нейтрали позволяет предотвратить развитие однофазных замыканий в более серьезные двух и трехфазные короткие замыкания. Кроме того, резистивное заземление позволяет исключить возникновение феррорезонансных перенапряжений и замедлить процессы износа изоляции. Применение ДГР в данном случае нецелесообразно. Хотя реактор способен компенсировать емкостную составляющую тока замыкания, само ОЗЗ не будет отключено. Кроме того, компенсированная нейтраль снижает и без того небольшой ток в месте повреждения, что затрудняет его обнаружение. Работа ДГР требует сложной системы настройки, а ее неправильное функционирование может ухудшить режим работы сети. Анализ отечественного и зарубежного опыта подтверждает целесообразность перехода на резистивное заземления нейтрали. Наиболее эффективным из них является низкоомное резистивное заземление, обеспечивающее быстрое и селективное отключение поврежденного участка. Очередность перевода подстанций на резистивное заземление предлагается определять на основании различных критериев, которые являются наиболее важными, применительно к распределительным сетям 6-10 кВ, например, критерий надежности, технико-экономической обоснованности и другие. В случае, когда одни критерии более приоритетны, чем другие, в тех случаях, когда требуется учесть эту разницу, предлагается присваивать к каждому критерию свой собственный весовой коэффициент, значение которого предлагается определять на основании метода парного сравнения, после чего будет рассчитан комплексный показатель приоритета, который и будет определять очередность перевода подстанций на резистивное заземление нейтрали.

Таблица 1

Результаты расчета комплексного показателя приоритета [материалы автора]

Название ПС	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П $\sum j$
ПС №1	0,3423	1	0,3275	0,6667	0,7778	0,0000	0,1815	0,4702
ПС №2	1,0000	1	0,6000	0,3333	0,3333	0,7273	0,1366	0,6579
ПС №3	0,6577	0	1,0000	0,6667	0,0000	0,3636	0,3665	0,5287
ПС №4	0,3694	1	0,9500	0,0000	0,7778	0,2727	1,0000	0,5265
ПС №5	0,0450	1	0,1475	0,3333	0,4444	0,5455	0,0771	0,2872

Заключение. В результате исследования установлено, что однофазные замыкания на землю составляют большинство повреждений в сетях 6–10 кВ. Изолированный режим нейтрали не позволяет селективно отключать такие повреждения и провоцирует возникновение дуговых перенапряжений, что делает переход на резистивное заземление необходимым. Для определения очередности перевода на резистивное заземление подстанций предложен интегральный показатель, объединяющий различные критерии, что обеспечивает объективное ранжирование объектов и рациональное планирование работ. Применение низкоомного резистивного заземления в соответствии с разработанной методикой обеспечит селективность работы защит, исключит дуговые перенапряжения, повысит надежность электроснабжения и сократит эксплуатационные расходы.

Список литературы

1. Опыт реализации комбинированного ВЧ-ВОЛС канала связи для передачи сигналов релейной защиты линий 35 кВ и выше / Д.Б. Гвоздев, П.И. Бартоломей, Р.Т. Валиев [и др.] // Новое в российской электроэнергетике. – 2024. – № 8. – С. 6-14. – EDN KPHZOL.
2. Пеленев, Д.Н. Анализ влияния режима однофазного замыкания на эффективность функционирования защиты систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса / Д.Н. Пеленев, К.В. Бабырь // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых : Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов, Москва, 28 октября – 01 2019 года. – Москва: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2019. – С. 206-208. – EDN JSRDIF.
3. Nazarychev, A. Damage Assessment in Switchgear Schemes with Various Types of High Voltage Circuit Breakers / A. Nazarychev, A. Pugachev, I. N. Sulynenkov // AIP Conference Proceedings : RUDENKO INTERNATIONAL CONFERENCE “METHODOLOGICAL PROBLEMS IN RELIABILITY STUDY OF LARGE ENERGY SYSTEMS” (RSES 2021), Volzhsky, 13–17 сентября 2021 года. Vol. 2552. – AIP PUBLISHING: AIP PUBLISHING, 2023. – P. 050008. – EDN HAYKTS.
4. Бабырь, К.В. Организация селективной защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей горных предприятий / К.В. Бабырь, Д.Н. Пеленев // Новые идеи в науках о Земле : Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах, Москва, 02–05 апреля 2019 года. Том 4. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2019. – С. 31-33. – EDN ARPWZE.
5. Ustinov, D.A. Determination of Dynamic Characteristics for Predicting Electrical Load Curves of Mining Enterprises / D.A. Ustinov, K.A. Khomiakov // Electricity. – 2022. – Vol. 3, No. 2. – P. 162-181. – DOI 10.3390/electricity3020010. – EDN TKUQWL.
6. Z. Tang et al., "Research on the Influence of Urban Subway on Neutral Current of High-Voltage Substations Along the Line Under Complex Environment," in IEEE Access, vol. 11, pp. 21912-21920, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3251347.
7. H. Bai, J. -H. Gao, W. Li, K. Wang and M. -F. Guo, "Detection of High-Impedance Fault in Distribution Networks Using Frequency-Band Energy Curve," in IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 1, pp. 427-436, 1 Jan.1, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3330970.
8. Mathur, V. Pratap Singh and M. Bukya, "A Generic Power Flow Analysis of Multi-Grounded Multi-Phase Distribution Network in the Presence of Inverter-Based Distributed Generations," in IEEE Access, vol. 13, pp. 191126-191143, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3630484.
9. M. Naghizadeh, H. Hojabri and E. Muljadi, "A Common-Grounded Single-Phase AC/Bipolar DC Hybrid Microgrid With a Four-Leg Interlinking Converter," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 11, no. 5, pp. 5337-5353, Oct. 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2023.3312210.
10. Borghetti, K. Ishimoto, F. Napolitano, C. A. Nucci and F. Tossani, "Assessment of the Effects of the Electromagnetic Pulse on the Response of Overhead Distribution Lines to Direct Lightning Strikes," in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 522-531, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3099596.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЗОН ЗАЩИТЫ ОРУ СТЕРЖНЕВЫМИ МОЛНИЕОТВОДАМИ

Калин К.В.
магистрант кафедры энергоснабжение промышленных предприятий и городов,
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Донецк, Россия, kostia.kalin@mail.ru

Научный руководитель: Бершадский И.А.
доктор технических наук, зав. кафедры
электроснабжение промышленных предприятий и городов,
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Донецк, Россия, ibersh164@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема повышения эффективности расчёта молниезащиты зданий и сооружений. Проведён анализ традиционных методов расчёта и существующих программных решений, выявлены их основные недостатки, связанные с высокой трудоёмкостью, вероятностью ошибок и сложностью использования. Предложено программное решение, направленное на автоматизацию вычислительных процессов и упрощение взаимодействия пользователя с системой. Разработанное приложение реализует алгоритмы расчёта на основе нормативной документации и обеспечивает получение точных результатов при минимальных временных затратах. Проведённое тестирование подтвердило работоспособность и эффективность предложенного решения. Результаты работы могут быть использованы для повышения качества и скорости выполнения инженерных расчётов в области молниезащиты.

Ключевые слова: молниезащита, автоматизация расчётов, программное обеспечение, инженерные расчёты, алгоритмы, безопасность зданий, нормативная документация, цифровизация, вычислительные методы.

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения уровня безопасности зданий и сооружений в условиях воздействия атмосферных перенапряжений [1]. Молниевые разряды могут приводить к повреждению электрооборудования [2], нарушению работы инженерных систем, а также представлять угрозу для жизни и здоровья людей. В связи с этим особое значение приобретает корректный и своевременный расчёт систем молниезащиты.

Современные подходы к проектированию молниезащиты основаны на использовании нормативной документации [2], регламентирующей требования к расчёту и размещению защитных элементов. Однако традиционные методы выполнения расчётов предполагают значительный объём ручной работы, что повышает трудоёмкость процесса и увеличивает вероятность возникновения ошибок. Кроме того, такие методы требуют от специалиста высокой квалификации и внимательности при работе с нормативными данными.

Методы. Анализ существующих методов расчёта показывает, что на практике применяются как графические, так и аналитические подходы. Графические методы отличаются наглядностью [4], однако их применение ограничено сложностью обработки больших объёмов данных. Аналитические методы, в свою очередь, обеспечивают более высокую точность [5], но требуют выполнения большого количества вычислений, что затрудняет их использование без автоматизации.

В настоящее время на рынке представлены различные программные решения [6], предназначенные для автоматизации расчётов в области молниезащиты. Тем не менее, проведённый анализ показал, что большинство из них ориентированы на широкий круг задач, обладают сложным интерфейсом и требуют специальной подготовки пользователя. Кроме того, нередко наблюдается избыточность функционала, что снижает удобство использования при решении конкретных задач.

В рамках данной работы разработано программное решение, направленное на упрощение и автоматизацию процесса расчёта молниезащиты. Основной задачей разработки является создание инструмента, обеспечивающего выполнение необходимых вычислений на основе исходных данных пользователя с учётом требований нормативной документации (методика СО 153-34.21.122-2003).

Разработанное приложение реализует алгоритмы расчёта, позволяющие обрабатывать параметры объекта, включая его геометрические характеристики и условия эксплуатации. В процессе работы пользователь вводит исходные данные, после чего система автоматически выполняет вычисления и формирует результаты в удобной для восприятия форме.

Особое внимание при разработке было уделено обеспечению корректности расчётов и удобству пользовательского интерфейса. Применение структурированного подхода к организации данных и алгоритмов позволило повысить надёжность работы системы и минимизировать вероятность возникновения ошибок.

Результаты. Выполнен расчёт зон защиты открытого распределительного устройства ручным расчётом и существующими программами по молниезащите (программа для расчёта молниезащиты «ЗУМ» и сервис расчётов надёжности «ЭНИН») [7], включая разработанное Web-приложение.

Среди отличительных особенностей разработанного Web-приложения можно выделить реализацию возможности деления защищаемого объекта на зоны для расчёта защиты на выбранных уровнях, автопроверку защищённости объекта и вычисление минимизированной высоты молниеприёмника в автоматическом режиме.

Обсуждение. Результаты тестирования подтверждают работоспособность разработанного программного решения и его соответствие поставленным задачам. Программа корректно выполняет расчёты в различных условиях и может быть использована в практической деятельности при проектировании систем молниезащиты.

Заключение. Предлагаемый инструмент способен оперативно осуществить расчёт молниезащиты с минимальным, но достаточным функционалом, и решает следующие задачи: расчёт зоны защиты многократными стержневыми молниеприёмниками; автопроверка защищённости объекта; произвольное расположение стержневых молниеприёмников на плане; деление защищаемого объекта на зоны для расчёта защиты на выбранных уровнях; вычисление минимизированной высоты молниеприёмника в автоматическом режиме.

В перспективе развития работы предполагается расширение функциональных возможностей приложения, включая реализацию дополнительных методов расчёта, интеграцию с другими инженерными системами и совершенствование пользовательского интерфейса.

Список литературы

1. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений.
2. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.
3. IEC 62305. Protection against lightning.
4. Базилевич В.Д. Основы молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 2010.
5. Кудрин Б.И. Электробезопасность и молниезащита. – М.: Академия, 2015.
6. Pressman R. Software Engineering: A Practitioner’s Approach.
7. Sommerville I. Software Engineering.
8. ГОСТ 34.602-89. Техническое задание на создание автоматизированной системы.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

Кучерук А.С.[1], Старшая В.В.[2]
[1] студент 3-го курса,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, s230389@stud.spmi.ru
[2] кандидат технических наук, ассистент кафедры общей электротехники,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В рамках работы приведены результаты анализа динамики развития фотоэлектрических панелей (ФЭП) российского производства. Целью исследования является актуализация параметров солнечных панелей и проведение сравнительного анализа электрических, эксплуатационных и конструктивных характеристик в 2021 г. и первом полугодии 2026 г. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автономных фотоэлектрических станций, а также при совершенствовании методик моделирования режимов их работы.

Ключевые слова: фотоэлектрические панели, солнечная энергия, энергетическая эффективность, анализ параметров, автономное электроснабжение.

Глобальный сектор возобновляемой энергетики на начало 2025 года продемонстрировал рекордные темпы роста, объем нового строительства вырос сразу на 25% [1]. По данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) Российской федерации по итогам 2024 года суммарная мощность введённых в сеть возобновляемых источников энергии (ВИЭ) превысила 440 МВт. Из них 81% составляют солнечные электростанции [1]. Однако несмотря на рост установленной мощности, а также постепенное снижение стоимости электроэнергии от ВИЭ, высокая зависимость фотоэлектрических установок (ФЭУ) от климатических условий продолжает создавать существенные барьеры для обеспечения надежности автономных энергетических систем [2]. Стохастическая природа солнечного излучения, изменение температуры воздуха и атмосферные явления приводят к значительной нестабильности выработки электроэнергии, что осложняет задачи управления такими станциями [3].

Выбор фотоэлектрических панелей (ФЭП) в качестве основного источника энергии является определяющим фактором, влияющим на техническую эффективность, экономическую целесообразность и эксплуатационную надёжность разрабатываемых электростанций [4, 5]. Существующее многообразие производителей и технологических решений в области производства панелей формирует задачу необходимости оптимизации выбора оборудования для обоснования их технико-экономической эффективности.

С 2021 года по 2026 российский рынок фотоэлектрического оборудования претерпел значительные перемены как на структурном, так и на технологическом уровнях. Для обновления сведений о производственном потенциале и верификации параметров российских ФЭП авторами проведен сравнительный анализ, где использовались собранные данные первого полугодия 2026 года в сопоставлении с ранее разработанной базой данных в 2021 году.

В рамках проведенной работы осуществлена верификация базы данных, содержащей сведения об односторонних ФЭП номинальной мощностью свыше 200 Вт, выпускаемых на территории Российской Федерации. В аналитическую выборку вошли солнечные панели на основе монокристаллического и поликристаллического кремния, а также гетероструктурные ФЭП.

Основными параметрами, используемыми для сравнения, были:

- КПД η, %.
- Температурный коэффициент мощности Pmax, %/°C.
- Температурный коэффициент напряжения ХХ, Uoc, %/°C.
- Температурный коэффициент тока КЗ, Isc, %/°C.
- Удельная масса m_p, кг/кВт.
- Удельная площадь s_p, м2/Вт.

Дополнительно были рассмотрены такие характеристики как:

- Fill Factor, %.
- NOCT, °C.
- Гарантированная мощность, %.
- Выработка через 25 лет использования, %.
- Цена, руб/Вт.

По результатам работы был установлен значительный рост уровня производства отечественных ФЭП. Устойчивый технологический прогресс наблюдается в области развития монокристаллических ФЭП. Установлен рост номинальной мощности в среднем на 100-150 Вт, а также повышение КПД с 16% до 18% у ранее рассмотренных компаний-производителей, а также выявлены улучшенные характеристики некоторых ФЭП, где КПД достигает 22,57%, что окажет положительное влияние на повышение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) солнечных электростанций.

Такие ФЭП занимают большую часть ассортимента предлагаемых технических решений в качестве основного источника электроэнергии, однако производство поликристаллических ФЭП продолжает устойчиво развиваться, несмотря на более низкий КПД по сравнению с монокристаллическими, за счет их меньшей стоимости и возможности преобразования рассеянного солнечного излучения. Развитие также подтверждается появлением новых производственных мощностей.

По результатам анализа, гетероструктурные ФЭП остаются наиболее энергоэффективными по сравнению с классическими кремниевыми технологиями. Такие ФЭП обеспечивают повышенный КИУМ, что достигается благодаря оптимальной производительности. Они эффективно функционируют как в пасмурную погоду в условиях облачности, так и при повышенных температурах окружающей среды за счет низкого температурного коэффициента мощности.

В рамках дополнительного этапа сравнивались удельные цены панелей (руб./Вт). Наиболее низкие значения показали гетероструктурные ФЭП – около 50 руб./Вт. Средняя удельная цена поликристаллических составляет 120 руб./Вт. Для монокристаллических характерен наибольший интервал варьирования: от минимального значения в 34 руб./Вт до максимального – 238,8 руб./Вт.

Наибольшее развитие по всем параметрам показывают монокристаллические панели. Они являются универсальным решением для различных областей применения. Гетероструктурные остаются надежным и перспективным направлением развития ФЭП. Поликристаллические занимают середину: они менее эффективны, но более стойки к климатическим изменениям и рассеянному излучению.

В результате исследования выполнена актуализация базы данных параметров ФЭП российских производителей и выявлены основные тенденции их изменения за период 2021–2026 гг. Наблюдается повышение КПД солнечных модулей, электрических параметров, снижение температурных коэффициентов, увеличение числа ячеек в панелях. Эксплуатационные характеристики остались без изменений. Значительный прогресс заметен в гетероструктурных технологиях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автономных фотоэлектрических станций, а также при совершенствовании методик моделирования режимов их работы.

Список литературы

1. Рынок возобновляемой энергетики России. Текущий статус и перспективы развития. 2026 г. Ассоциация развития ВИЭ РФ. Электронный ресурс: https://rreda.ru/upload/iblock/519/8hwuf1swgx9ecj9r2cniyqksw45c7dss/%D0%90%D0%A0%D0%92%D0%AD%202025.pdf (дата посещения 20.03.2026).

2. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. №6. Т. 331. С. 184-96.

3. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А., Слетова Е.Д. Анализ видов деградации фотоэлектрических модулей и их вольтамперных характеристик // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 51. – С. 176–200. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.10.

4. Libra M., Mrázek D., Tyukhov I., Severová L., Poulek V., Mach J., Šubrt T., Beránek V., Svoboda R., Sedláček J. Reduced real lifetime of PV panels – Economic consequences // Solar Energy. – 2023. – Vol. 259. – P. 229–234. DOI: 10.1016/j.solener.2023.04.063.

5. Нгуен Т.Н., Сизов В.Д., Ву М.Ф., Ку Т.Т.Х. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. №1. С. 30-41.

УДК 621.314

ИСТОЧНИК БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ИСКАЖЕНИЙ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Лобанова Е.А.
Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, katya-lobanova04@mail.ru

Научный руководитель: Аванесов В.М.
к.т.н, доцент, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация. Рассматривается структура источника бесперебойного питания (ИБП), обеспечивающего компенсацию неактивной (реактивной мощности и мощности искажений) составляющей полной мощности в однофазной сети переменного тока ограниченной мощности. Система позволяет улучшить качество питающего напряжения и снизить потери мощности в питающей сети. Предлагается вариант реализации следящей системы управления (СУ) с асинхронной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) автономного инвертора напряжения (АИН) в составе ИБП. Результаты исследования системы подтверждают высокую эффективность предложенного подхода к компенсации искажений и стабилизации напряжения в питающей сети.

Ключевые слова: ИБП, компенсация искажений, система управления, асинхронная ШИМ.

Электрические сети подвергаются электромагнитным воздействиям, которые вызваны ростом числа и нелинейностью подключаемых потребителей. Это ведёт к искажениям формы токов и напряжений, росту неактивных составляющих полной мощности и потерь электроэнергии [1]. Необходимость применения различных структур ИБП к электрическим сетям высокотехнологического оборудования (компьютеры, телекоммуникационная аппаратура, банковская, офисная, медицинская сферы) возникла вследствие снижения качества электроэнергии: отключения, провалы напряжения, высокочастотный шум и т.д.

Существующие структуры ИБП с корректором коэффициента мощности (ККМ), АИН и аккумуляторной батареей (АБ) обеспечивают единичный коэффициент мощности на входе и стабильное напряжения на выходе системы [2]. Однако приведённые виды ИБП не компенсируют высшие гармоники токов от нелинейных нагрузок при подключении их к точке общего присоединения (ТОП). Это приводит к снижению качества электропитания, росту потерь и ухудшению электромагнитной совместимости потребителей, особенно в сетях ограниченной мощности.

Целью работы является создание структуры ИБП, обеспечивающего компенсацию неактивной составляющей полной мощности (реактивная мощность и мощность искажений) в однофазной питающей сети в ТОП потребителей (искажающих и неискажающих) на входе ИБП и стабилизацию напряжения для питания электроприёмников особой группы 1 категории. На рис.1 приведена функциональная схема рассматриваемого ИБП [3].

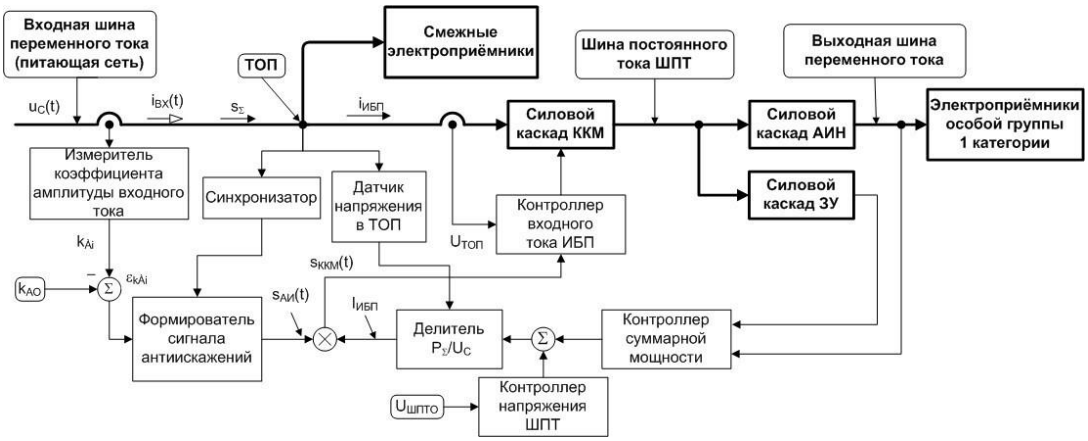


Рис. 1. Функциональная схема ИБП с компенсацией искажений в питающей сети

Задача компенсации искажений решается изменением режима работы ККМ таким образом, что последний формирует сигнал антиискажений и определяет форму входного тока ККМ за счёт инжекции гармоник. Входящие в состав СУ ККМ генераторы гармоник сети обеспечивают адаптивное изменение амплитуды и фазового сдвига гармонических составляющих управляющего сигнала $s_{АИ}(t)$. Такая подстройка позволяет компенсировать искажения, создаваемые нелинейными нагрузками в питающей сети [4-5]. На рис.2 приведены спектральные диаграммы частот тока на входе до и после инжекций сигнала антиискажений.

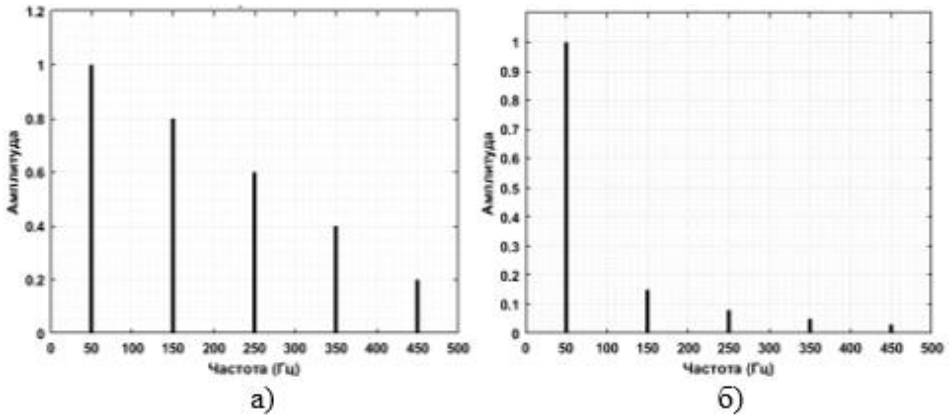


Рис. 2. Спектральный состав тока, потребляемого нелинейными нагрузками до (а) и после (б) применения рассматриваемого ИБП

Из спектральных диаграмм на рис.2 видно, что адаптивная система управления позволяет снизить коэффициент гармоник $K_Г$ с 87 % до 18%, что свидетельствует о существенном уменьшении значений высших гармоник тока и снижении влияния нелинейных нагрузок на качество электроэнергии питающей сети.

Другим аспектом исследования является стабилизация напряжения на выходе ИБП при питании электроприёмников особой группы 1 категории. В этом случае используется АИН, который обеспечивает преобразование постоянного напряжения в переменное синусоидальное высокой верности и стабилизацию напряжения при снижении качества электроэнергии. В результате проведённых анализа, моделирования и синтеза получена следящая СУ с асинхронной ШИМ [6-7], обеспечивающая высокую энергоэффективность за счёт изменения ширины импульсов при постоянной частоте. Такая СУ предполагает наличие в составе широтно-импульсного преобразователя и модального регулятора с отрицательной обратной связью по состоянию силовой схемы АИН [8]. Асинхронная ШИМ реализована с использованием регулятора с малой зоной переключения в области ведущего сигнала, чем обеспечивает слежение за заданием и минимизацию ошибки регулирования. На рис.3 приведены результаты моделирования в MLab.

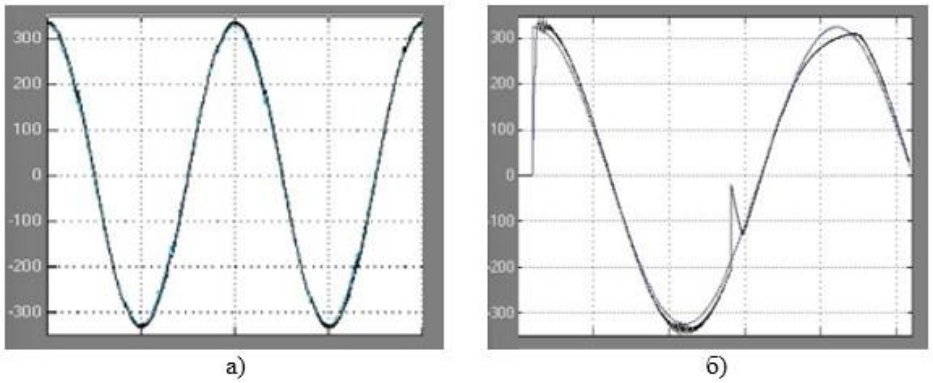


Рис. 3. Временные диаграммы установившегося (а) и пускового (б) режимов объекта управления в среде MLab

Временные диаграммы на рис.3 показывают, что разработанная следящая СУ АИН с асинхронной ШИМ для ИБП обеспечивает слежение за ведущим сигналом, стабилизацию напряжения при возникновении возмущений и качественное гарантированное питание ответственных потребителей как в статическом, так и в динамическом режимах. Количественная оценка качества регулирования представлена следующими показателями: время пуска $t_{ПУСК}$=1,45 мс; время переходного процесса при пуске (в момент времени, соответствующий амплитудному значению) $t_{ПП}$ =1,4 мс; время отработки возмущения $t_{ВОЗМ}$=1,5 мс; отклонение напряжения ΔU не более 2 %.

Таким образом, разработана структура ИБП, обеспечивающего комплексное решение проблемы электромагнитной совместимости в однофазных сетях ограниченной мощности по входу и качественного электропитания ответственных потребителей особой группы 1 категории.

Предложена структура ИБП, содержащего формирователь сигнала антиискажений на входе и АИН со следящей СУ с асинхронной ШИМ на выходе. Такой подход позволяет одновременно компенсировать неактивные составляющие полной мощности (реактивную мощность и мощность искажений), вносимые нелинейной нагрузкой в питающую сеть, и обеспечивать стабилизацию выходного напряжения [9-10].

Метод компенсации искажений, основанный на адаптивной инжекции высших гармоник обеспечивает снижение гармонических составляющих тока в ТОП, что подтверждается спектральными диаграммами (рис. 2).

Разработанная следящая система управления АИН с асинхронной ШИМ и модальным регулятором обеспечивает высокое качество переходных процессов, малую статическую ошибку, эффективное подавление возмущений и воспроизведение заданной формы выходного напряжения (рис. 3).

Таким образом, предложенное техническое решение имеет практическую значимость для применения в системах гарантированного электроснабжения ответственных потребителей, включая вычислительную и телекоммуникационную технику, медицинскую сферу, банковское и офисное оборудование [11]. Направлением дальнейших исследований является совершенствование адаптивного метода компенсации искажений.

Список литературы

1. Фридман Л.Р. Качество электрической энергии в системах электроснабжения / Л.Р. Фридман. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2022. – 145 с.
2. Василевич А.С. Источник бесперебойного питания / А.С. Василевич // Информационные радиотехнологии: сб. тезисов докладов 60-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 26.
3. Аванесов В.М., Лобанова Е.А. Источник бесперебойного электропитания с компенсацией искажений в питающей сети. Патент РФ 2856342, МПК H02J 9/06. Заявлено 20.08.2025. Опубликовано 20.02.2026, Бюл. №5.
4. Черепанов А.В. Анализ факторов, влияющих на искажение показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения / А.В. Черепанов // Электроэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 45-52.
5. Асташев М.Г. Компенсация реактивной мощности в условиях искажения токов и напряжений / М.Г. Асташев, А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Р.Н. Красноперов // Электричество. – 2025. – № 8. – С. 42-52. – DOI: 10.24160/0013-5380-2025-8-42-52
6. Гайворонский А.Ю., Лобанова Е.А. Статический преобразователь в системе гарантийного электроснабжения / А.Ю. Гайворонский, Е.А. Лобанова // Проблемы современной системотехники – сборник научных статей. – Таганрог : ИП Ступин С. А., 2025. – С. 53-59.
7. Харитонов С.А. Принципы формирования широтно-импульсной модуляции в преобразователях частоты для электроприводов переменного тока / С.А. Харитонов // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 3. – С. 15-22.
8. Белоус А.И. Основы силовой электроники / А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.А. Ефименко, В.А. Пилипенко. – Москва : Техносфера, 2019. – 424 с.
9. Воронин П.А. Импульсные преобразователи напряжения для систем вторичного электропитания : учебное пособие / П.А. Воронин. – Москва : ИНФРА-М, 2026. – 248 с.
10. Компанеец Б.С. Качество электроэнергии и энергоэффективность в системах электроснабжения : учебное пособие / Б.С. Компанеец, В.Н. Пильгунов, Л.И. Свешкарева. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 300 с.
11. Аванесов В.М., Лобанова Е.А. Источник бесперебойного питания с компенсацией искажений в питающей сети / В.М. Аванесов, Е.А. Лобанова // Оптика и спектроскопия конденсированных сред – Материалы XXXI Международной конференции.– Краснодар: ИП Кабанов В.Б. (Издательство «Новация»), 2025. – С. 251-256.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ

Малышев М.А.
аспирант, Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, maks_malyshev1998@mail.ru

Научный руководитель: Лебедев В.А.
к.т.н., заведующий кафедрой теплотехники и теплоэнергетики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена анализу современных технологических решений в области повышения манёвренности ядерных установок малой мощности за счёт интеграции систем теплового аккумулирования. В статье рассматриваются преимущества использования материалов с фазовым переходом по сравнению с традиционными методами аккумулирования явного тепла. Проведена классификация типов тепловых аккумуляторов и схем их сопряжения со вторым контуром АЭС. Определены ключевые барьеры и перспективные направления исследований для внедрения теплового аккумулирования в ядерные установки малой мощности для изолированных энергосистем, в том числе и в арктическом регионе.

Ключевые слова: хранение энергии, материалы с фазовым переходом, тепловое аккумулирование, ядерная установка малой мощности, манёвренность АЭС, изолированная энергосистема, скрытая теплота.

Введение. Освоение отдаленных районов Восточной Сибири, Дальнего Востока и арктической зоны России невозможно без развития минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов в них. В силу отдалённости и труднодоступности энергосистемы этих районов обычно изолированы от общей энергосистемы страны. Наиболее перспективным способом энергоснабжения таких изолированных систем является использование стационарных атомных станций малой мощности [1]. Однако атомные электростанции (АЭС) проектируются для работы в базовом режиме производства электроэнергии. Маневрирование для отработки неравномерности энергопотребления на сегодняшний день обычно выполняется путем изменения параметров активной зоны реактора, что представляет большую проблему для АЭС, так как связано с повышенным износом оборудования и снижением КПД [2]. Именно поэтому возникает необходимость разработки таких конструкторских решений, которые позволят выполнять маневрирование не в активной зоне реактора, а в тепловых контурах энергетической установки. Для решения данной проблемы рассматривается использование теплового аккумулирования (ТА).

Цель. Анализ последних разработок в области использования ТА на АЭС.

Задачи. 1. Обзор современных систем ТА. 2. Формулирование требований к материалам с фазовым переходом (МФП). 3. Изучение различных способов подключения ТА в тепловую схему ядерной установки. 4. Сравнение манёвренных характеристик ядерных установок малой мощности (ЯУММ) с ТА. 5. Оценка технико-экономических и эксплуатационных преимуществ от внедрения ТА. 6. Выявление и анализ барьеров, препятствующих развитию использования ТА в ЯУММ.

Методы. Классификация и сравнительный анализ разработок в области использования ТА на АЭС, основанный на обзоре научно-технической документации и профильных публикаций в базах данных Scopus, Web of Science и РИНЦ.

Результаты. Аккумулирование явного тепла – наиболее понятный и распространенный способ сохранения энергии. Этот способ основан на нагреве или охлаждении без изменения фазового состояния материала [3, 4, 5]. В аккумулировании скрытого тепла ключевую роль играют материалы с фазовым переходом (МФП). Когда материал переходит в жидкое состояние, он поглощает большое количество тепла, а при кристаллизации выделяет его [6, 7]. Нельзя не упомянуть термохимическое аккумулирование, основанное на обратимых химических реакциях [8, 9].

МФП должен иметь такую же температуру плавления, как и рабочая температура теплоносителя в контуре [10, 11], обеспечивать высокую плотность хранения энергии [12, 13], иметь высокую теплопроводность [7], быть стабильным в широком диапазоне температур и во времени [13, 14], быть недорогим [12, 13] и технологичным [11, 15].

Наиболее предпочтительными точками внедрения ТА в тепловую схему АЭС является линия после парогенератора до турбины низкого давления [16, 17, 18].

Основное преимущество от использования ТА заключается в том, что реактор может работать на постоянной номинальной мощности, так как манёвренность обеспечивает система аккумулирования [1, 2]. Это решает проблемы, связанные с переменными режимами работы активной зоны и оборудования первого контура. Внедрение ТА позволяет расширить диапазон электрической мощности [19], увеличить скорость отклика [20], повысить стабильность частоты электрического тока, появляется возможность поставлять не только электроэнергию, но и тепло, что особенно актуально при использовании ЯУММ в изолированных энергосистемах [10, 21]. Таким образом, ЯУММ с ТА приобретают характеристики эффективных [12, 22, 23] высокоманёвренных источников энергии, способных быстро и в широком диапазоне изменять выдаваемую мощность, оставаясь при этом экономичными, безопасными и стабильными [10, 21, 24].

Однако широкому внедрению ТА на АЭС препятствуют конструкционные [14, 25, 26] и материаловедческие [25, 26, 27] барьеры, отсутствие нормативной базы для оценки безопасности таких систем [26, 28], а также сомнения в экономической целесообразности [29, 30, 31].

Обсуждение. Авторская позиция заключается в том, что именно тепловое аккумулирование с использованием МФП позволит сделать ЯУММ полноценным и самостоятельным источником энергии для изолированных энергосистем. В контексте современной науки использование МФП в связке с ЯУММ решает фундаментальное противоречие атомной энергетики – необходимость работы реактора на постоянной номинальной мощности в условиях резко переменного графика нагрузки потребителя.

Заключение. В результате проведённого обзора подтверждена техническая возможность и целесообразность интеграции тепловых аккумуляторов на основе МФП в состав ЯУММ. Использование ТА переносит регулирование мощности с реактора на тепловую схему, что не только повышает манёвренность, но и увеличивает ресурс критически важного оборудования. Полученные данные могут быть использованы при проектировании автономных энергетических комплексов с ЯУММ для изолированных энергосистем. Дальнейшее развитие темы подразумевает поиск МФП с повышенными теплофизическими свойствами, а также изучение различных режимов совместной работы реактора и ТА.

Список литературы

1. Лебедев В.А., Деев А.С., Ступкин А.Д. АЭС малой мощности с аккумулятором теплоты фазового перехода // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. №5. С. 19-27. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.019-027.
2. Lebedev V., Deev A. Heat Storage as a Way to Increase Energy Efficiency and Flexibility of NPP in Isolated Power System // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, № 24. DOI: 10.3390/app132413130.
3. Muhammad Tawalbeh, Hafsah A. Khan, Amani Al-Othman, Fares Almomani, Saniha Ajith. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications // International Journal of Thermofluids. 2023. Vol. 18. DOI: 10.1016/J.IJFT.2023.100326.
4. A.G. Olabi, Aasim Ahmed Abdelghafar, Hussein M. Maghrabie, Enas Taha Sayed, Hegazy Rezk, Muaz Al Radi, Khaled Obaideen, Mohammad Ali Abdelkareem. Application of artificial intelligence for prediction, optimization, and control of thermal energy storage systems // Thermal Science and Engineering Progress. 2022. Vol. 39. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101730.
5. G. Angelini, A. Lucchini, G. Manzolini. Comparison of thermocline molten salt storage performances to commercial two-tank configuration // Energy Procedia. 2014. Vol. 49. P. 694-704. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.075.
6. Xinyu Huang, Fangfei Li, Tian Xiao, Junfei Guo, Fan Wang, Xinyu Gao, Xiaohu Yang, Ya-Ling He. Investigation and optimization of solidification performance of a triplex-tube latent heat thermal energy storage system by rotational mechanism // Applied Energy. 2023. Vol. 331. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120435.
7. G. Wilson, S. Sahoo, P. Sabharwal, H. Bindra. Chapter seven – packed bed thermal storage for LWRs // Storage and Hybridization of Nuclear Energy. Academic Press. 2019. P. 229-248. DOI: 10.1016/B978-0-12-813975-2.00007-7.

8. Егоров А.Н., Юрин В.Е. Первичное регулирование частоты тока в энергосистеме атомными электростанциями на основе водородно-теплового аккумулирования // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2021. № 1-3 (359-361). С. 21-33. DOI: 10.15518/isjaee.2021.01.002.

9. Egorov A.N., Yurin V.E. Comprehensive methodology for identifying tariff zones of efficiency of hydrogen-thermal accumulation system at the NPP // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46, № 69. P. 34097-34104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.030.

10. Аминов Р.З. Применение многофункциональных систем с тепловыми аккумуляторами фазового перехода как путь повышения безопасности и эффективности АЭС // Теплоэнергетика. 2022. № 8. С. 5-13. DOI: 10.56304/S004036362208001X.

11. Аминов Р.З., Гариевский М.В., Аношин Д.М. Разработка конструктивных решений аккумулятора фазового перехода в условиях его функционирования в едином энергокомплексе с АЭС // Теплоэнергетика. 2024. № 3. С. 18-31. DOI: 10.56304/S0040363624030019.

12. Fletcher Carlson, Jane H. Davidson, Nam Tran, Andreas Stein. Model of the impact of use of thermal energy storage on operation of a nuclear power plant Rankine cycle // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 181. P. 36-47. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.058.

13. Silvino A. Balderrama Prieto, Piyush Sabharwall. Technical and economic evaluation of heat transfer fluids for a TES system integrated to an advanced nuclear reactor // Applied Energy. 2024. Vol. 360. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122714.

14. A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. Vol. 12, № 9. P. 2438-2458. DOI: 10.1016/j.rser.2007.06.009.

15. Mohamed Ali, Ahmed K. Alkaabi, Jeong Ik Lee. CFD simulation of an integrated PCM-based thermal energy storage within a nuclear power plant connected to a grid with constant or variable power demand // Nuclear Engineering and Design. 2022. Vol. 394. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2022.111819.

16. Ju Yeon Lee, Jeong Ik Lee. A study on steam cycle optimization for integrating energy storage system to nuclear power plant // Annals of Nuclear Energy. 2021. Vol. 160. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108349.

17. Kafilat Funmilola Amuda, Robert M. Field. Nuclear heat storage and recovery for the APR1400 // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 28. DOI: 10.1016/j.est.2019.101171.

18. Fletcher Carlson, Jane H. Davidson. Parametric study of thermodynamic and cost performance of thermal energy storage coupled with nuclear power // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 236. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114054.

19. Daniel Mikkelson, Konor Frick. Analysis of controls for integrated energy storage system in energy arbitrage configuration with concrete thermal energy storage // Applied Energy. 2022. Vol. 313. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118800.

20. Hovsapian, R., Osorio, J.D., Panwar, M., Chryssostomidis, C., Ordonez, J.C. Grid-Scale Ternary-Pumped Thermal Electricity Storage for Flexible Operation of Nuclear Power Generation under High Penetration of Renewable Energy Sources // Energies. 2021. Vol. 14, № 13. DOI: 10.3390/en14133858.

21. G.T. Sager, D.-K. Sze, C.P.C. Wong, C.G. Bathke, J.P. Blanchard, C. Brimer, E.T. Cheng, L.A. El-Guebaly, M.Z. Hasan, F. Najmabadi, S. Sharafat, I.N. Sviatoslavski, L. Waganer. Using the shield for thermal energy storage in pulsar // Fusion Engineering and Design. 1995. Vol. 29. P. 43-50. DOI: 10.1016/0920-3796(95)80004-H.

22. Abdullah A. Al Kindi, Marko Aunedi, Antonio M. Pantaleo, Goran Strbac, Christos N. Markides. Thermo-economic assessment of flexible nuclear power plants in future low-carbon electricity systems: Role of thermal energy storage // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 258. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115484.

23. Yongliang Li, Hui Cao, Shuhao Wang, Yi Jin, Dacheng Li, Xiang Wang, Yulong Ding. Load shifting of nuclear power plants using cryogenic energy storage technology // Applied Energy. 2014. Vol. 113. P. 1710-1716. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.077.

24. Ana Borisova, Dimityr Popov. An option for the integration of solar photovoltaics into small nuclear power plant with thermal energy storage // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2016. Vol. 18. P. 119-126. DOI: 10.1016/j.seta.2016.10.002.

25. Ben Xu, Peiwen Li, Cholik Chan. Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments // Applied Energy. 2015. Vol. 160. P. 286-307. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.016.

26. Shukla, K.N. Thermal Energy Storage for Solar Power Generation: State of the Art // Heat Transfer Engineering. 1981. Vol. 3, № 2. P. 62-67. DOI: 10.1080/01457638108939581.

27. Forsberg C. Separating Nuclear Reactors from the Power Block with Heat Storage to Improve Economics with Dispatchable Heat and Electricity // Nuclear Technology. 2022. Vol. 208, № 4. P. 688-710. DOI: 10.1080/00295450.2021.1947121.

28. Soto G.J., Lindley B., Neises T., Stansbury C., Wagner, M.J. Dispatch Optimization, System Design and Cost Benefit Analysis of a Nuclear Reactor with Molten Salt Thermal Storage // Energies. 2022. Vol. 15, № 10:3599. DOI: 10.3390/en15103599.

29. H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron. Energy storage systems – Characteristics and comparisons // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. Vol. 12, № 5. P. 1221-1250. DOI: 10.1016/j.rser.2007.01.023.

30. Behnam Zakeri, Sanna Syri. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 569-596. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.011.

31. Bing-chen Zhao, Mao-song Cheng, Chang Liu, Zhi-min Dai. Conceptual design and preliminary performance analysis of a hybrid nuclear-solar power system with molten-salt packed-bed thermal energy storage for on-demand power supply // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 166. P. 174-186. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.04.015.

УДК 622.311

РАЗРАБОТКА ПРИОРИТЕТНОГО ГРАФИКА РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Манукян Д.Д.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, manukian.daniel22@yandex.ru

Научный руководитель: Назарычев А.Н.
д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе разработана методика приоритизации электроагрегатов электростанций собственных нужд для формирования программ технического обслуживания и ремонта. Подход основан на совместном учете индекса технического состояния, сработанного технического ресурса и уровня риска отказа. Вероятность отказа описана двухпараметрическим распределением Вейбулла, а изменение индекса технического состояния аппроксимировано линейной зависимостью. На основе единичных показателей сформирован комплексный показатель приоритета, позволяющий ранжировать электроагрегаты. Апробация методики на фактических эксплуатационных данных показала, что комплексный учет состояния, ресурса и риска повышает обоснованность планирования технических воздействий.

Ключевые слова: электроагрегаты, электростанции собственных нужд, индекс технического состояния, технический ресурс, уровень риска, комплексный показатель приоритета

Введение. Электроагрегаты (ЭА) электростанций собственных нужд (ЭСН) [1] обеспечивают надежность электроснабжения промышленных предприятий [2], а их отказ может приводить к значительным потерям [3]. Современные методы управления надежностью используют индекс технического состояния (ИТС) [4], вероятностные модели отказов [5] и риск-ориентированные подходы [6], однако они часто применяются раздельно. Цель исследования – разработка методики приоритизации ЭА на основе комплексного показателя приоритета (КПП), интегрирующего ИТС [7], сработанный технический ресурс (ТР) и уровень риска (УР) [8].

Методы. Методология исследования основана на совместном использовании показателей ИТС, сработанного ТР и УР для приоритизации ЭА при формировании программ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [9]. Изменение ИТС ЭА во времени $s(t)$ описывается линейной зависимостью:

$$s(t) = kt + s_0, \tag{1}$$

где k – коэффициент скорости изменения ИТС, 1/ч; s_0 – начальное значение ИТС; t – наработка ЭА, ч.

Сработанный ТР $CR(t)$ определяется как интегральная характеристика, отражающая различие между фактической и нормативной функциями изменения ИТС:

$$CR(t) = \int_0^t \frac{1 - s_{\text{факт}}(t)}{1 - s_{\text{ном}}(t)}\, dt, \tag{2}$$

где $s_{\text{факт}}(t)$ – функция изменения ИТС при фактических условиях эксплуатации; $s_{\text{ном}}(t)$ – функция изменения ИТС при нормативных условиях эксплуатации.

Уровень риска ЭА определяется как произведение вероятности отказа и величины его последствий.

КПП определяется на основе произведения номеров приоритета ЭА по ИТС, сработанному ТР и УР.

Результаты. Методика реализована на основе ретроспективных данных эксплуатации 46 ЭА энергетической компании [10]. Анализ показал, что значительная часть ЭА находится в критическом и неудовлетворительном техническом состоянии. На основе КПП сформирована программа ТОиР ЭА с учетом ограниченности ресурсов.

Обсуждение. Полученные результаты показали, что использование только ИТС не позволяет в полной мере отразить фактическое состояние ЭА и корректно определить приоритеты технических воздействий. Учет сработанного ТР позволяет выявить оборудование со скрытой степенью износа. Предложенный подход интегрирует диагностические, вероятностные и экономические показатели в единую систему принятия решений при управлении надежностью ЭА.

Заключение. Разработана методика приоритизации ЭА ЭСН на основе комплексной оценки ИТС, сработанного ТР и УР. Показано, что КПП повышает обоснованность формирования программ ТОиР по сравнению с использованием отдельных показателей. Результаты работы могут быть использованы при разработке цифровых систем мониторинга технического состояния в энергетических компаниях.

Благодарности: *автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору Назарычеву Александру Николаевичу за научное руководство и формирование идеи исследования.*

Список литературы

1. Студенческая библиотека: СТО Газпром 2-6.2-208-2008. Выбор количества электроагрегатов электростанций ОАО «Газпром». URL: https://3uch.ru/textbook/jowa/pieg/fingutong (дата обращения 10.03.2026).
2. Абрамович Б.Н., Богданов И.А. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.
3. Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 171–180. EDN UIZSOQ.
4. Информационно-правовой портал «Гарант»: Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». URL: https://base.garant.ru/71779722/ (дата обращения 10.03.2026).
5. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146523 (дата обращения 10.03.2026).
6. Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. Риск-ориентированный подход к выбору стратегии управления производственными активами энергетической компании // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 29–42. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42.
7. Шавлов А.В., Анацкий В.С., Астапенко В.А. и др. Прогнозирование технического состояния сложных технических систем по статистическим данным // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1 (47). С. 170–177. EDN SVPVXV.
8. Секретарев Ю.А., Горшунов А.А. Разработка и исследование моделей оценки текущего технического состояния электрооборудования систем электроснабжения на основе риск-ориентированного подхода // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2024. Т. 20. № 1. С. 3–17. DOI: 10.53015/18159958_2024_20_1_3.
9. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Васильева Н.С. Разработка методики оценки надежности и приоритетности ремонтов для электрооборудования нефтяной промышленности с учетом возможного риска // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 3 (66). С. 106–116. EDN EDSPHI.
10. Назарычев А.Н., Мельникова О.С., Манукян Д.Д., Сафиуллин А.Х. Оценка надежности автономных электростанций электротехнических комплексов газовой отрасли // Надежность и безопасность энергетики. 2025. Т. 18. № 1. С. 21–30. DOI: 10.24223/1999-5555-2025-18-1-21-30.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

Садулаев А.А-В.
ассистент кафедры «АТПП», ГГНТУ им. Акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия, abdulvahid.sadulaev@mail.ru

Научный руководитель: Минцаев М.Ш.
доктор технических наук, профессор, ректор ГГНТУ им. акад.М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты разработки системы автоматизированного контроля и управления для геотермальной энергоустановки на органическом цикле Ренкина (ОЦР) мощностью 100 кВт, проектируемой для Ханкальского месторождения в Чеченской Республике. На основе проектной документации определен перечень из контролируемых параметров с указанием типов приборов (Элемер, Сенсор, Взлёт), диапазонов измерений и погрешностей. Разработаны алгоритмы функционально-группового управления пуском и остановом установки, а также система технологических защит по критическим параметрам. Предложенные решения соответствуют требованиям промышленной безопасности для объектов с рабочим телом 1-го класса опасности и могут быть реализованы на базе отечественных программируемых логических контроллеров.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, автоматизация, контроль параметров, технологические защиты, геотермальная энергетика, изопентан, Ханкальское месторождение.

Введение. Россия обладает значительным геотермальным потенциалом, в том числе низкопотенциальным с температурой менее 100°C, который перспективно использовать для выработки электроэнергии [1, 2]. Одним из таких объектов является Ханкальское геотермальное месторождение в Чеченской Республике, где с 2014 года функционирует тепловая станция мощностью 8 МВт с полной обратной закачкой отработанной термальной воды в пласт. В концепции станции предусмотрен опытный участок для подключения установки генерации электроэнергии на органическом цикле Ренкина (ОЦР) мощностью до 500 кВт [3, 4]. Эффективная и безопасная эксплуатация таких установок невозможна без развитой системы автоматизированного контроля и управления технологическими параметрами. Целью данной работы является разработка системы контроля и управления для геотермальной ОЦР-установки мощностью 100 кВт на основе анализа проектной документации.

Методы. Объектом исследования является геотермальная энергоустановка на органическом цикле Ренкина (ГеоЭС-ОЦР), разрабатываемая в рамках проекта Передовой инженерной школы «РосГеоТех» Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова [5]. Проектирование выполняется в соответствии с ГОСТ 2.103-2013. Основные параметры установки: электрическая мощность нетто 108,9 кВт, частота вращения ротора 12 700 об/мин, рабочее тело – изопентан марки А (класс опасности 1 по СГС, температура вспышки –60°C, минимальное давление взрыва 843 кПа). На основе проектной документации составлен перечень контролируемых параметров, включающий 29 точек измерения (температура, давление, уровень, расход). Все приборы имеют выходной сигнал 4-20 мА, что обеспечивает унифицированный интерфейс подключения к системе управления. Разработаны алгоритмы функционально-группового управления, реализующие процедуры пуска и останова установки, а также система технологических защит. В соответствии с РД 153-34.1-35.137-00 для критических параметров применено троирование датчиков с мажоритарным голосованием «2 из 3».

Результаты. Разработана структура системы автоматизированного управления, включающая подсистему сбора данных (29 аналоговых сигналов 4-20 мА от датчиков

температуры, давления, уровня, расхода), подсистему логико-программного управления (алгоритмы пуска, штатного и аварийного останова) и подсистему технологических защит. Система технологических защит включает следующие уставки: защита по превышению частоты вращения (14 000 об/мин) с остановом турбины; защита по снижению уровня в конденсаторе; защита по аварии генератора (сигнал EGS_XB01); защита по превышению давления в конденсаторе. Для частоты вращения предусмотрено троирование датчиков с голосованием «2 из 3» согласно РД 153-34.1-35.137-00 [6].

Обсуждение. Разработанная система управления базируется на реальных проектных данных и серийно выпускаемых отечественных приборах (Элемер, Сенсор, Взлёт), что обеспечивает высокую достоверность предложенных решений и их готовность к практической реализации. Применение унифицированного сигнала 4-20 мА позволяет использовать любой промышленный контроллер, включая отечественные (Fastwel, ОВЕН, «Сонет»). Система технологических защит с троированием критических параметров соответствует требованиям промышленной безопасности для взрывопожароопасных объектов с рабочим телом 1-го класса опасности (изопентан). Полученные результаты вписываются в контекст современных исследований по автоматизации геотермальных энергоустановок [7] и могут быть использованы при создании системы управления для Ханкальской геотермальной станции.

Заключение. В работе на основе проектной документации разработана система автоматизированного контроля и управления для геотермальной ОЦР-установки мощностью 100 кВт. Определен перечень контролируемых параметров с указанием типов приборов, диапазонов измерений и погрешностей. Разработаны алгоритмы пуска, останова и технологические защиты с троированием критических параметров. Все предложенные решения базируются на реальных данных и могут быть реализованы с использованием отечественной элементной базы. Направлением будущих исследований является реализация разработанных алгоритмов на базе программируемого логического контроллера и проведение опытной эксплуатации системы на Ханкальской геотермальной станции.

Благодарности: работа выполняется при поддержке Передовой инженерной школы «РосГеоТех» Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова.

Список литературы

1. Бутузов В.А., Томаров Г.В., Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 3-17. DOI: 10.1134/S004036362112002X.

2. Алексеенко С.В., Бородулин В.Ю., Гнатусь Н.А., Низовцев М.И., Смирнова Н.Н. Проблемы и перспективы развития петротермальной энергетики (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 1-16.

3. Фархутдинов А.М., Хамитов И.Ш., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Заурбеков Ш.Ш., Шаипов А.А., Лабазанов М.М. Термальные подземные воды восточно-предкавказского артезианского бассейна: экономические аспекты использования на примере Ханкальского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 50-61.

4. Zaurbekov Sh.Sh., Mintsaev M.Sh., Shaipov A.A., Machigova F.I., Churikova T.G., Cherkasov S.V., Gairabekov I.G. Prospects of multilevel use of geothermal resources of the Khankala deposit of the Chechen Republic // Information. 2016. Vol. 19, No. 2. P. 437-443.

5. Мильман О.О., Шифрин Б.А., Перов В.Б., Лукин В.В., Чебанюк С.В. Рабочее тело для утилизационного теплоэнергетического комплекса мегаваттного класса на основе ОЦР // Тезисы доклада на Всероссийской конференции «XXXIV Сибирский теплофизический семинар». Новосибирск, 27–30 августа 2018. С. 171.

6. РД 153-34.1-35.137-00. Общие технические требования к автоматизированным системам управления технологическими процессами тепловых электростанций. М.: СПО ОРГРЭС, 2001. 48 с.

7. Шифрин Б.А., Перов В.Б., Толкачев В.М. Варианты турбогенератора утилизационного теплоэнергетического комплекса на базе низкокипящего рабочего тела // Теплоэнергетика. 2021. № 7. С. 26-34. DOI: 10.1134/S004036362113004X.

УДК 621.317.3:681.518.5

ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПЧ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Скворцов И.В.[1], Шклярский Я.Э.[2]
[1] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, si-28@mail.ru

[2] д.т.н., зав. кафедрой Общей электротехники, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Шклярский Я.Э.
д.т.н., зав. кафедрой Общей электротехники, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследование посвящено оценке технического состояния полупроводниковых ключей инвертора электропривода. Целью исследования является обеспечение бесперебойной работы автоматизированного электропривода за счет раннего выявления неисправностей полупроводниковых ключей в инверторе. На основе компьютерного моделирования в Matlab Simulink получены пространственно-векторные диаграммы обобщенных векторов напряжения и тока нагрузки для различных типов повреждений ключей. В результате корреляционного анализа установлены зависимости между типом неисправности, положением ключа в стойках преобразователя и формой диаграмм. Разработана методика, позволяющая оперативно идентифицировать поврежденный ключ и тип нарушения. Применение данного подхода позволяет предотвратить аварийный останов электропривода и минимизировать экономические потери от недоотпуска продукции.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, полупроводниковые ключи, автономный инвертор напряжения, оценка технического состояния, выявление неисправности.

Введение. Одним из аспектов современного развития мирового топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является широкое применение автоматизированных электроприводов (АЭП) [1–3]. В состав таких электротехнических комплексов, обычно, входят преобразовательные устройства на базе полупроводниковых элементов, электродвигатели и рабочие механизмы той отрасли и тех объектов, на которых они применяются [4–6]. В процессе эксплуатации, помимо естественного старения основных узлов, такие системы зачастую подвергаются перегрузкам и эксплуатируются в достаточно суровых климатических условиях, что может привести ко многим неисправностям, возникающим, в основном, в электродвигателе и инверторе [7]. Цель исследования: обеспечение бесперебойной работы таких электротехнических комплексов за счет раннего выявления неисправности полупроводниковых ключей в инверторе. Задачи исследования: анализ факторов и статистических данных для определения причин возникновения нарушений в ключах инвертора [8]; выделение основных типов неисправностей полупроводниковых элементов; построение имитационной математической модели преобразователя и нагрузки; выявление зависимостей между типом неисправности и реакции мгновенных значений напряжения и тока нагрузки; разработка методики определения неисправного ключа в инверторе по пространственно-векторным диаграммам напряжения и тока нагрузки [9].

Методы. В работе методом дескриптивного анализа выполнен обзор литературных источников, посвященных теме исследования. С помощью анализа данных, полученных с отраслевых предприятий, были определены основные причины появления отклонений в нормальной работе полупроводниковых ключей, а сценарный анализ позволил выделить типовые нарушения работы элементов. Компьютерное моделирование в *Matlab*

Simulink рассматриваемых устройств применено для проведения экспериментов и получения выходных данных. Индуктивный метод использовался для выявления зависимостей между типом неисправности, положением сломанного ключа в стойках инвертора и полученными годографами обобщенных векторов напряжения и тока нагрузки.

Результаты. В ходе проведения исследования для каждого ключа преобразователя и типа неисправности были получены пространственно-векторные диаграммы обобщенных векторов напряжения и тока нагрузки.

Обсуждение. В результате корреляционного анализа диаграмм при наличии неисправности на ключах преобразователя с такими же диаграммами, но найденными при исправной работе инвертора установлены зависимости между ними и составлена сводная таблица, позволяющая по форме и составу определить какой ключ в какой стойке перешел в неисправное состояние, а также тип этого нарушения.

Заключение. Раннее выявление неисправности ключей инвертора с помощью предложенного метода, позволяет локализовать место аварии, предотвратить физическое разрушение устройства и не допустить аварийного останова АЭП с рабочим механизмом, что в условиях непрерывного технологического процесса производства напрямую связано с издержками на недоотпуск продукции.

Благодарности: *авторы выражают благодарность к.т.н., доценту образовательного центра цифровых технологий Королеву Николаю Александровичу за помощь в проведении исследования.*

Список литературы

1. Shklyarskiy, Ya. Energy management in hybrid complexes based on wind generation and hydrogen storage / Ya. Shklyarskiy, Iu. Andreeva, T. Sutikno, M. H. Jopri // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13, No. 3. – P. 1483-1494. – DOI 10.11591/eei.v13i3.6757. – EDN HKDMJQ.
2. Gardouh, A.S. Novel Fuzzy-Based Open-Switch Fault Detection Scheme of Voltage Source Inverter Induction Motor Drive / A.S. Gardouh, S. Abulanwar, F. Deng, E. Gouda, A. Ghanem // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2024. – Vol. 39, No. 11. – P. 14961-14973. – DOI 10.1109/tpel.2024.3438989. – EDN ETDWES.
3. Guo, H. Power Switch Open-Circuit Fault Diagnosis of Six-Phase Fault Tolerant Permanent Magnet Synchronous Motor System Under Normal and Fault-Tolerant Operation Conditions Using the Average Current Park's Vector Approach / H. Guo, Si. Guo, J. Xu, X. Tian // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, No. 3. – P. 2641-2660. – DOI 10.1109/tpel.2020.3017637. – EDN WWFSKL.
4. Yang, G. A Simple and Efficient Strategy for Online Detection of Multiple Open-Switch Fault in Multiphase Machine Drive Systems / G. Yang, J. Yang, Sh. Li, H. Hussain // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – Vol. 37, No. 9. – P. 11058-11070. – DOI 10.1109/tpel.2022.3168848. – EDN THWIOL.
5. Khojet El Khil, S. Diagnosis of open-switch and current sensor faults in PMSM drives through stator current analysis / S. Khojet El Khil, I. Jlassi, A.J. Marques Cardoso, J.O. Estima, N. Mrabet-Bellaaj // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2019. – Т. 55. – №. 6. – P. 5925-5937. – DOI: 10.1109/TIA.2019.2930592.
6. Cai, J. Real-Time Power Switch Short-Circuit Fault Diagnosis for the Power Converter in SRM Drives / J. Cai, Y. Wang, W. Ding, A. David Cheok, Y. Yan, X. Zhang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2025. Vol. 74. – P. 1-14. – DOI: 10.1109/TIM.2024.3509593.
7. Power switch open circuit fault diagnosis strategy for novel fault-tolerant electric drive system based on fuzzy logic / K. Wang, X. Jiang, S. Wang, Zh. Han // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 914-921. – DOI 10.1016/j.egyr.2022.08.149. – EDN WWNDNH.
8. Li, C. Diagnosis and location of the open-circuit fault in modular multilevel converters: An improved machine learning method / C. Li, Z. Liu, Y. Zhang, L. Chai, B. Xu // Neurocomputing. – 2019. – Т. 331. – P. 58-66. – DOI: 10.1016/j.neucom.2018.09.041.
9. Trabelsi, M. Boussak M., Benbouzid M. Multiple criteria for high performance real-time diagnostic of single and multiple open-switch faults in ac-motor drives: Application to IGBT-based voltage source inverter / M. Trabelsi, M. Boussak, M. Benbouzid // Electric Power Systems Research. – 2017. – Т. 144. – P. 136-149. – DOI 10.1016/j.epsr.2016.11.021.

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Скворцова Ю.Е.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, yulia77577@mail.ru

Научный руководитель: Шклярский Я.Э.
д.т.н., заведующий кафедрой общей электротехники, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В сетях электроснабжения объектов МСК часто возникают нарушения режимов работы из-за провалов и прерываний напряжения. Существующие технические решения не способны обеспечить устойчивую работу потребителей. Авторами разработан новый подход для поддержания нормального режима функционирования частотно-регулируемого электропривода при провалах и прерываниях напряжения, основанный на эксплуатации гибридного накопителя электрической энергии. Оценка эффективности предложенного подхода была проведена на модели электропривода, разработанной в программе MatLab Simulink. Результаты свидетельствуют о значительном потенциале применения таких решений в структуре электротехнических комплексов объектов МСК.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, частотно-регулируемый электропривод, электрический накопитель энергии, провал напряжения, электрохимический накопитель энергии.

Введение. Наибольшую долю потребителей электрической энергии в мире составляют системы электроприводов. Важнейшей задачей является обеспечение их бесперебойной, устойчивой работы, поскольку нарушения в их работе всегда приводят к экономическому ущербу. Особенно остро задача стоит в минерально-сырьевом комплексе (МСК) [1]. Основными средствами, применимыми на сегодняшний день для поддержания работы электроприводов при провалах и прерываниях напряжения являются: активные выпрямители [2, 3]; встраиваемые накопители электрической энергии [4, 5]; динамические компенсаторы искажений напряжения, вольтодобавочные трансформаторы [6]; z-инверторы [7]; алгоритмы управления электроприводом [8]; кондиционеры сети. Известные средства не обеспечивают должного уровня защиты: 60% отказов силового оборудования происходят из-за провалов и прерываний напряжения [9, 10]. Существует необходимость разработки новых средств поддержания работы электротехнических комплексов при наступлении аварийных ситуаций в системах электроснабжения.

Методы. Авторами был разработан новый подход для обеспечения устойчивой работы частотно-регулируемых электроприводов при провалах и прерываниях напряжения. В основе подхода – применение гибридного накопителя электрической энергии (ГНЭЭ). В структуре ГНЭЭ предполагается использование комбинации электрохимического и электрического накопителей, с подключением в две точки системы: в точку общего присоединения группы потребителей через DC/AC-преобразователь и в звено постоянного тока (ЗПТ) через DC/DC-преобразователь (рис. 1). При этом между составными частями ГНЭЭ предполагается наличие связи через DC/DC-преобразователь. Управление гибридным накопителем электрической энергии осуществляется с помощью разработанного алгоритма, обеспечивающего выдачу накопителем электрической энергии с заданием по мощности.

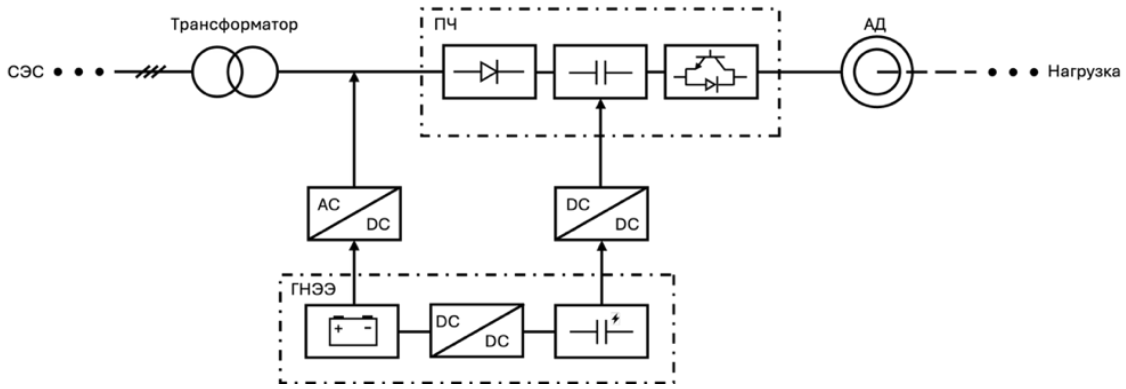


Рис. 1. Схема электротехнического комплекса с подключением ГНЭЭ [*составлено автором*]

На вход управляющего алгоритма поступает информация об уровне питающего напряжения, уровне заряда ГНЭЭ, технических ограничениях. Алгоритм непрерывно оценивает ситуацию, отслеживая отклонение уровня питающего напряжения от допустимого и оценивая величину ускорения изменения напряжения. В случае фиксации отклонения напряжения, превышающего 5,5% от номинального значения и отрицательного значения ускорения, ситуации присваивается статус – «развитие провала». Системой производится оценка уровня заряда ГНЭЭ. Вновь обновляется статус системы, осуществляется проверка по отклонению напряжения: в случае, если развитие провала продолжается, ситуации присваивается статус – «провал напряжения», в ином случае снова осуществляется проверка для оценки вероятности развития провала напряжения. Если провал зафиксирован, запускается процесс формирования кривой разряда ГНЭЭ в форме $P(t)$. Осуществляется запуск разряда сначала электрохимического накопителя, с учетом отсрочки, и далее электрического накопителя. Работа группы электроприводов поддерживается вплоть до разряда накопителя или штатного режима.

Результаты и Обсуждение. Оценка эффективности алгоритма была проведена с применением модели, разработанной в программе MatLab. В структуре электропривода рассматривалась асинхронная машина мощностью 0,37 кВт. Моделирование провалов осуществлялось с помощью программы, позволяющей регулировать глубину и длительность провала. Рассматривались глубины 10%, 50%, 95% при наличии ГНЭЭ и без него, при этом рассматривались различные причины провалов: нарушения режимов работы сети централизованного энергоснабжения или нагрузки. Основными критериями эффективности были приняты допустимые отклонения развиваемых двигателем момента и частоты вращения от величин «до» провала. В подавляющем большинстве случаев останова электропривода удалось избежать (табл. 1).

Таблица 1

Результаты исследований эффективности разработанного подхода [*составлено автором*]

Источник провала	Глубина, %	ГНЭЭ	Отклонение частоты, рад/с	Отклонение момента, Н·м
Сеть	10	-	0,6	0
		+	0	0
	50	-	137	2,7
		+	$2,6 \rightarrow 0$	0
	95	-	137	2,7
		+	0	0
ЗПТ	10	-	137	2,7
		+	2	0
	50	-	137	2,7
		+	0	0
	95	-	137	2,7
		+	137	2,7

Заключение. Теоретическая значимость работы заключается в разработке нового подхода к интеграции в структуру электротехнических комплексов накопителей электрической энергии гибридной конфигурации. Практическая значимость работы заключается в разработке новой системы управления частотно-регулируемым электроприводом, основанной на регулировании мощности. Предложенная система управления может рассматриваться, как в условиях технологических объектов различных отраслей МСК, так и в других сферах, где активно применяются частотно-регулируемые электроприводы и существует проблема провалов и прерываний напряжения в сетях электроснабжения.

Благодарности: *к.т.н., доценту кафедры прикладных компетенций в области цифровых технологий Н.А. Королёву за помощь в организации исследований.*

Список литературы

1. Саттаров, Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 6. С. 92-100. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.
2. Барданов, А.И. Провалы напряжения в сетях электроснабжения и методы борьбы с ними // Главный энергетик. 2019. № 3. С. 32-45. EDN VVCAJT.
3. Шклярский, Я.Э. Управление активным выпрямителем напряжения в составе частотно-регулируемого привода при провалах напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 414-425. EDN: UWJDUX.
4. Червонченко С.С., Фролов В.Я. Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения // Записки Горного института. 2023. № 261. С. 470-478. EDN: MGAPVA.
5. Иванова Т.С., Шонин О.Б. Обеспечение устойчивой работы частотно-регулируемого привода шахтной подъемной установки при провалах напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 6. С. 53-67. EDN: ZFIANN.
6. Шклярский А.Я. Повышение качества электроэнергии в промысловых распределительных сетях предприятий нефтедобычи топлива : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н., / Шклярский Андрей Ярославович. Санкт-Петербург, 2013. 20 с.
7. Салов Р.А. Обеспечение бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания при провалах напряжения и смене топлива : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н., / Салов Роман Алексеевич. Санкт-Петербург, 2020. 21 с.
8. Shonin O.B., Novozhilov N.G. Studying the operation of a sensorless V/F electric drive in the mode of kinetic energy recovery for keeping the controllability of the drive during voltage sags // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. 2017. P. 1022-1027. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910730.
9. Севостьянов, А.А. О влиянии провалов и прерываний напряжения на режимы функционирования промышленных систем электроснабжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 6(81). С. 50-56. EDN: DHRBWL.
10. Konuhova M. Modeling of Induction Motor Response to Voltage Sags with Re-Acceleration Analysis //Energies. 2025. Т. 18. №. 21. С. 5682. DOI: 10.3390/en18215682.

УДК 621.313.33: 004.032.26

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Складчиков М.В.
аспирант, ФГБОУ ВО «ДонНТУ», Донецк, Россия, maxsklad19981@yandex.ru

Научный руководитель: Розкаряка П.И.
к.т.н., доцент, зав. кафедрой «ЭАПУ», ФГБОУ ВО «ДонНТУ», Донецк, Россия

Аннотация. Работа посвящена разработке интеллектуальной системы ранней диагностики межвиткового короткого замыкания в обмотке статора асинхронного двигателя – одной из наиболее часто встречаемых и трудно выявляемых на начальных стадиях неисправностей, которая приводит к лавинообразному развитию дефекта и полному разрушению машины. Предложен и реализован алгоритм идентификации на основе сверточной нейронной сети, осуществляющий классификацию технического состояния непосредственно по необработанным временным зависимостям трёхфазных токов статора без предварительного выделения диагностических признаков и без необходимости знания точных параметров объекта. Данные для обучения и тестирования получены путём детального математического моделирования электромагнитных процессов в фазных координатах в среде MATLAB/Simulink, а также экспериментальной верификации на реальном стенде с двигателем Siemens 1LA7083-8AB10 мощностью 0,25 кВт при имитации дефекта введением дополнительного сопротивления в фазу статора. Разработанная архитектура CNN, преобразующая сигналы в RGB-изображения размером 40×50×3, показала высокую устойчивость к реальным помехам электропривода и достигла точности классификации нормального и дефектного состояний ≈94 %. Полученные результаты подтверждают перспективность подхода для создания встроенных систем предиктивной диагностики в современных преобразователях частоты.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, сверточная нейронная сеть, идентификация несимметрии, диагностика неисправностей.

Асинхронные двигатели остаются основным типом электродвигателей в промышленности, включая горнодобывающую и перерабатывающую отрасли, где их отказы приводят к значительным экономическим потерям и простоям технологического оборудования [1]. Одной из наиболее опасных и трудно выявляемых на ранних стадиях неисправностей является межвитковое короткое замыкание в обмотке статора, которое развивается лавинообразно и часто заканчивается полным разрушением машины [2-7]. Традиционные методы диагностики, такие как моторный токовый сигнатурный анализ (MCSA) и спектральный анализ гармоник, проявляют ограниченную устойчивость к искажениям питающего напряжения, нестационарным режимам и комбинациям дефектов, что снижает их эффективность в реальных условиях эксплуатации [8, 9]. В связи с этим актуальным направлением является разработка интеллектуальных методов на основе глубокого обучения, позволяющих анализировать необработанные сигналы токов статора напрямую и обеспечивать высокую точность раннего обнаружения дефектов [10].

Цель исследования – разработка алгоритма идентификации неисправностей асинхронного двигателя на основе сверточных нейронных сетей, способного осуществлять классификацию технического состояния непосредственно по необработанным временным зависимостям токов статора без предварительной обработки сигналов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: создание математической модели асинхронного двигателя в фазных координатах для получения синтетических экспериментальных данных; формирование датасета для классификации нормального состояния двигателя и межвиткового короткого замыкания; создание модели сверточной нейронной сети и экспериментальная верификация на базе реальных данных от двигателя.

В отличие от традиционных методов диагностики (метод сигнатур тока, анализ гармоник, метод вектора Парка и его модификации) [3], опирающихся на выделение диагностических признаков и требующих знания параметров объекта, предложенный подход осуществляет классификацию технического состояния двигателя непосредственно по необработанным трёхфазным сигналам токов статора без предварительной обработки и без необходимости знания точных электромагнитных параметров машины.

Для формирования обучающего и тестового наборов данных применён комбинированный подход. На первом этапе проведено математическое моделирование асинхронного двигателя в фазных координатах в среде MATLAB/Simulink. Разработанная модель учитывает электромагнитные связи между фазами и позволяет имитировать локальное межвитковое замыкание с произвольной глубиной в любой фазе статора, а также воспроизводить симметричные и нестационарные режимы работы. Это обеспечило получение большого объёма синтетических данных с контролируемыми параметрами дефекта (рисунок 1).

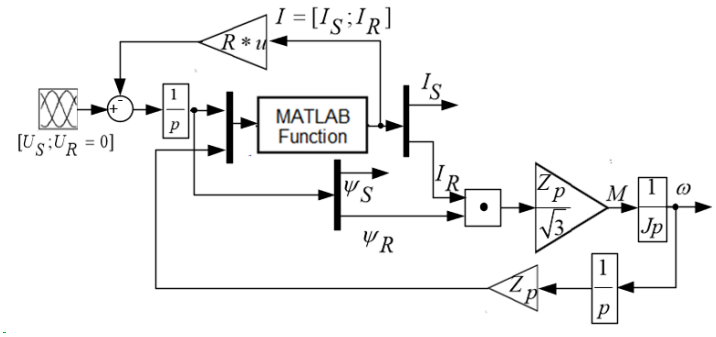
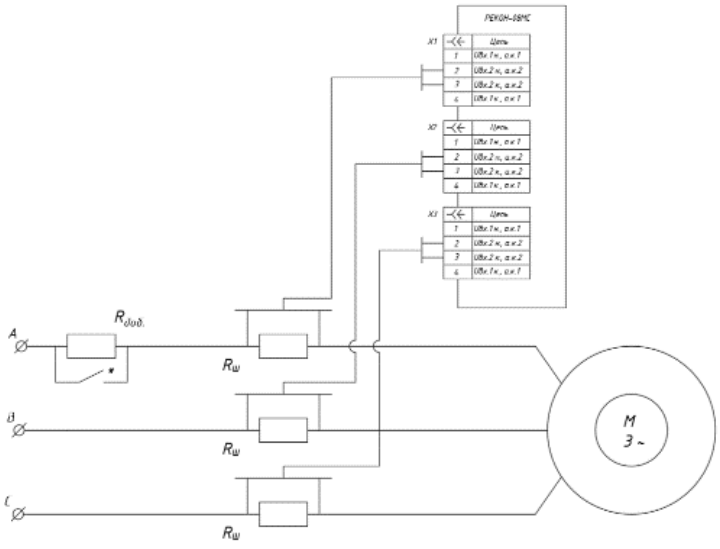


Рис. 1. Математическая модель асинхронного двигателя в фазных координатах

На втором этапе выполнена экспериментальная верификация на реальном объекте – асинхронном двигателе Siemens 1LA7083-8AB10 мощностью 0,25 кВт. Имитация межвиткового короткого замыкания осуществлялась путём искусственного введения дополнительного активного сопротивления в цепь одной из фаз статора. Трёхфазные токи регистрировались с частотой дискретизации 2 кГц. Принципиальная схема исследуемого стена представлена на рисунке 2.



*Использовался автоматический выключатель РЦ 6–Г32/1
$R_{доб}$ =0 50 ОМ добавочное сопротивление, для создания несимметрии в работе АД
$R_ш$ = 1 ОМ– шунт для снятия графика тока

Рис. 2. Принципиальная схема стенда для сбора данных

Ключевым элементом алгоритма является способ представления данных для сверточной нейронной сети: выделенный участок установившегося режима преобразуется в многоканальное RGB-изображение размером 40×50×3 пикселя, где каждая фаза тока отображается в отдельном цветовом канале. Такой подход сохраняет информацию о форме сигнала, амплитудных и фазовых соотношениях и делает данные непосредственно пригодными для обработки сверточными слоями.

Архитектура сверточной нейронной сети включает последовательность свёрточных блоков с операциями свёртки, активацией ReLU и слоями максимального пулинга, за которыми следуют полносвязные слои и выходной слой с функцией активации Softmax для бинарной классификации состояний («нормальный режим» / «наличие межвиткового короткого замыкания»). Обучение проходило на синтетическом и реальном наборе данных.

Результаты экспериментальной проверки подтвердили высокую эффективность предложенного подхода. Алгоритм продемонстрировал способность надёжно различать нормальное и дефектное состояния в условиях реальных промышленных помех, обеспечив точность классификации около 94%. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования сверточных нейронных сетей для создания встроенных интеллектуальных систем предиктивной диагностики асинхронных электроприводов, интегрируемых непосредственно в состав современных преобразователей частоты.

Список литературы

1. Иванов, Д.В. Идентификация параметров асинхронного двигателя с автокоррелированной ошибкой по скорости / Д.В. Иванов, И.Л. Сандлер, С.И. Макаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 3(119). – С. 130-139.
2. Солодкий, Е.М. Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора / Е.М. Солодкий, С.В. Сальников, Д.А. Даденков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 114-127.
3. Сравнительный анализ методов диагностики неисправностей изоляции обмоток статора асинхронного двигателя / А. Сарманова, П. Мади, А. Умирзакова, Б. Мухамадиев // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2024. – № 4(133). – С. 481-495.
4. Васильев, И.С. Современные методы диагностики механических неисправностей асинхронных двигателей / И.С. Васильев // Перспективы развития науки в современном мире : Сборник трудов по материалам XII Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ. В 2 частях, Уфа, 20 февраля 2023 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2023. – С. 93-97.
5. Королев, Н.А. Особенности разработки систем диагностики частотно-регулируемого электропривода / Н.А. Королев, Ю.Л. Жуковский // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 37-43.
6. Kovalchuk, M.S. Ensuring the Reliable Operation of the Pumping Units by Efficient State Diagnosis / M.S. Kovalchuk, D.A. Poddubniy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : Current Problems and Solutions, Yurga, 22–24 ноября 2018 года. Vol. 224, №1. – Yurga: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012032.
7. Хамидов, О.Р. Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей / О.Р. Хамидов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 251-262.
8. Еремочкин, С.Ю. Разработка имитационной модели однофазного асинхронного электропривода в среде динамического моделирования SimInTech / С.Ю. Еремочкин, Д.В. Дорохов, А.А. Жуков // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 1(152). – С. 59-71.
9. Виноградов, А.А. Диагностика обмоток трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А.А. Виноградов, Е.Ю. Сусленникова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2024. – № 3. – С. 74-81.
10. Булдыско А.Д. Повышение эффективности эксплуатации асинхронного электропривода на основе ранней идентификации дефектов путем анализа сингулярного спектра тока: дис. канд. техн. наук: 2.4.2. – Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 2023 – 202 с.

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА СБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СКВАЖИНЫ

Смирнов В.А.[1], Сандов А.М.[2]
[1] аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, vovsm1999@gmail.com
[2] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, SandovAndrey@yandex.ru

Научный руководитель: Растворова И.И.
доктор технических наук, заведующий кафедрой электронных систем, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема оперативного контроля параметров бурения в реальном времени. Предложена архитектура беспроводной системы сбора данных с забоя скважины, основанная на ячеистой топологии с ретрансляцией сигнала вдоль бурильной колонны. Обоснован выбор частотного диапазона 500-1000 Гц и шага ретрансляции 50-70 м, позволяющих использовать многопозиционную квадратурную модуляцию (16-QAM) для достижения скорости передачи до 800 бит/с на пролет. Рассмотрены вопросы защиты электроники от экстремальных скважинных условий и энергопитания ретрансляторов с помощью гидрогенераторов, использующих поток бурового раствора. Показано, что предложенное решение обеспечивает более высокую скорость телеметрии по сравнению с существующими беспроводными аналогами.

Ключевые слова: бурение, беспроводная связь, QAM, ретрансляция, буровой раствор, помехоустойчивость.

Введение. Оперативный контроль параметров бурения в реальном времени необходим для предотвращения аварий и повышения эффективности строительства скважин. Существующие системы телеметрии имеют ограничения: гидроимпульсные каналы (Mud Pulse) обеспечивают скорость лишь 5-10 бит/с [1]; электромагнитные системы (EM-MWD) на сверхнизких частотах (0.5-10 Гц) достигают 20-40 бит/с, но сильно зависят от проводимости среды [2]; проводные системы типа IntelliServ дают высокие скорости, но требуют дорогостоящих труб с кабелем [3]. Цель работы – разработка архитектуры беспроводной системы с ретрансляцией и многопозиционной модуляцией, адаптированной к экстремальным условиям скважины.

Методы. На качество передачи сигнала существенно влияют высокая электропроводность бурового раствора (0,1-10 См/м) и экранирующие свойства металлической бурильной колонны [4]. Помимо этого, значительный уровень помех вносят работающие буровые насосы и двигатели [5]. Дальность распространения электромагнитных волн в такой среде определяется, главным образом, частотой сигнала и удельной проводимостью раствора. Для оценки затухания были проведены расчеты в диапазоне частот 50-2000 Гц при типичной проводимости 1 См/м для различных расстояний (50-150 м). Установлено, что на частотах до 200 Гц затухание невелико, однако узкая полоса пропускания не позволяет достичь требуемой скорости передачи данных. При частотах выше 1500 Гц, напротив, затухание становится чрезмерно большим и приближается к пределу энергетического бюджета линии. Наилучший компромисс между допустимым затуханием и доступной полосой частот достигается в интервале 500-1000 Гц.

Результаты. Предложена линейная ячеистая сеть с регенеративными ретрансляторами, встраиваемыми в переводники бурильных труб. Каждый ретранслятор выполняет полный цикл приёма, демодуляции, декодирования, повторной модуляции и передачи сигнала, что предотвращает накопление искажений [6]. Для модуляции используется адаптивная схема: 16-QAM в благоприятных условиях и QPSK при ухудшении

помеховой обстановки [7]. При шаге сети 50-70 м и частоте 700 Гц достигается скорость 560-1400 бит/с на пролёт, что в 20-80 раз выше показателей существующих беспроводных систем [1-3]. Для повышения помехоустойчивости применяется помехоустойчивое кодирование и синхропосылки для оценки канала [7].

Для работы в экстремальных условиях (температура до 150°C, давление до 150 МПа, вибрации до 30g) электроника ретрансляторов размещается в герметичных маслозаполненных корпусах с компенсаторами давления. Активные системы охлаждения на термоэлектрических модулях позволяют снизить температуру компонентов до 163°C при внешней температуре 200°C [8-10]. Энергопитание осуществляется от гидрогенераторов, преобразующих энергию потока бурового раствора; буферные батареи обеспечивают работу в моменты остановки циркуляции.

Обсуждение. Предлагаемая архитектура сочетает преимущества беспроводного канала (отсутствие кабеля) с высокой скоростью передачи, недоступной для классических EM-MWD и Mud Pulse систем. В отличие от проводных аналогов, она не требует специальных труб, а адаптивная модуляция и регенерация сигнала компенсируют изменчивость среды и помехи [5, 6].

Заключение. Предложенная концепция позволяет значительно повысить скорость передачи телеметрической информации и позволяет осуществлять оперативный контроль расширенного набора параметров в режиме реальном времени. Дальнейшие исследования будут направлены на создание опытных образцов ретрансляторов и проведение стендовых испытаний.

Список литературы

1. Li C., Xu Z. A review of communication technologies in mud pulse telemetry systems // Electronics. 2023. Vol. 12, No. 18. P. 3930. DOI: 10.3390/electronics12183930.
2. Jarrot A., Gelman A., Kusuma J. Wireless digital communication technologies for drilling: communication in the bits/s regime // IEEE Signal Processing Magazine. 2018. Vol. 35, No. 2. P. 112-120. DOI: 10.1109/MSP.2017.2781288.
3. Yi Z., Li Z., Yi M., Wang D., Cheng P. Intelligent real-time risk evaluation and drilling parameter optimization for enhanced safety in deep-well operations // Processes. 2025. Vol. 13, No. 10. P. 3102. DOI: 10.3390/pr13103102.
4. Saasen A., Ding S., Amundsen P. A., Tellefsen K. The Shielding Effect of Drilling Fluids on Measurement While Drilling Tool Downhole Compasses – The Effect of Drilling Fluid Composition, Contaminants, and Rheology // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2016. Vol. 138. No. 5. DOI: 10.1115/1.4033304.
5. Han H., Xue L., Yao T., Sun L., Fan H., Wang Z. A transient flow analysis method for high-rate mud pulse telemetry in rotary steerable system // Geoenergy Science and Engineering. 2023. Vol. 232. P. 212392. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212392.
6. Shao J., Yan Z., Han S., Li H., Gao T., Hu X., Wei C. Differential signal extraction for continuous wave mud pulse telemetry // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 148. P. 127-130. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.09.047.
7. Wei Y., Qu F., Zhang Z., Wang Z. Noise cancellation method for mud pulse telemetry based on discrete Fourier transform // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13, No. 1. P. 75. DOI: 10.3390/jmse13010075.
8. Lv Y.G., Chu W.X., Wang Q.W. Thermal management systems for electronics using in deep downhole environment: a review // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 139. P. 106450. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106450.
9. Wei M., Cai W., Xu M., Deng S. Active cooling system for downhole electronics in high-temperature environments // ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2022. Vol. 14, No. 8. DOI: 10.1115/1.4053120.
10. Lan W., Peng J., Wang Y., Ma Y., Hua N., Luo X. Distributed thermal management system for downhole electronics at high temperature // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 180. P. 115853. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115853.

УДК 536.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТУРБУЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КОТЛАХ

Устин Ю.А.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, yurust22898@mail.ru

Научный руководитель: Лебедев В.А.
кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплотехники и теплоэнергетики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Объект исследования – двухходовой жаротрубный водогрейный котел ТТ-3150. Предмет исследования – теплообмен в дымогарных (конвективных) трубах котла в зависимости от установленного турбулизатора (завихрителя). Целью исследования является анализ тепломассообмена в дымогарных трубах водогрейных котлов ТТ-3150 и оценка его эффективности при применении вставок-турбулизаторов. Основная проблема котлов данного типа – низкие показатели энергоэффективности, вызванные малогабаритностью котлов, в связи с чем большая часть энергии теряется за счет высоких температурных показателей уходящих дымовых газов. Идеей решения проблемы является внесение завихрителей в высокотемпературную среду (дымовые газы), протекающую в дымогарных трубах, для интенсификации теплообмена и роста показателей эффективности котла. Актуальность работы связана с нарастающим дисбалансом в энергетической отрасли: высокая степень износа основного генерирующего оборудования на фоне стремительного удорожания топливных ресурсов, опережающих рост тарифов, и усиление экологических требований приводят к необходимости модернизации оборудования теплогенерирующих объектов. В результате исследования были получены графики показателей технической эффективности применяемых турбулизаторов в расчетной модели в зависимости от режима работы котла.

Ключевые слова: повышение эффективности, тепломассообмен, жаротрубные котлы, дымогарные трубы, турбулизаторы, завихрители.

Введение. Мировая энергетика активно изучает проблему интенсификации теплообмена в котельных установках, наиболее перспективным вариантом решения данной проблемы является применение вставок-турбулизаторов, позволяющих усилить теплообмен и тем самым эффективность оборудования [1, 2]. Целью данного исследования является анализ тепломассообмена в дымогарных трубах водогрейных жаротрубных котлов серии ТТ-3150 и оценка технической эффективности применения турбулизаторов в зависимости от режима работы котла, начиная от технического минимума до номинального режима. Задачами исследования являются построение численной модели теплообмена в дымогарных трубах в зависимости от конфигурации вставки-турбулизатора и расчет показателей эффективности, характеризующих интенсификацию теплообмена в котле. Основополагающей проблемой котлов данного типа являются их низкие показатели энергоэффективности, вызванные потребностью компактности данного оборудования, ввиду чего возникает нехватка площади теплообмена и как следствие – возникают большие потери энергии с уходящими дымовыми газами [3, 4].

Методы. Методикой исследования является численное моделирование процессов теплообмена в дымогарных трубах жаротрубного водогрейного котла ТТ-3150 с использованием CFD-пакета Ansys Fluent [5–7]. Данная методика базируется на решении дифференциальных уравнений неразрывности, энергии и турбулентного течения. В качестве модели вязкости используется гибридная модель SST k-w, необходимость применения которой подтверждается сложным описанием движения среды дымовых газов при внесении вставки-турбулизатора в дымогарные трубы [8].

Результаты. В ходе выполнения исследования были рассмотрены 2 типа вставок-турбулизаторов с различным количеством витков (однопластинные турбулизаторы с количеством витков 6, 9, 12 и двухпластинные турбулизаторы с аналогичным количеством витков) при работе котла на нагрузке от технического минимума до номинального режима. Получены температурные поля и линейные потери по продольному сечению дымогарных труб, характеризующие влияние турбулизаторов на теплообмен и аэродинамическое

сопротивление по тракту. Для оценки повышения эффективности тепломассобмена в жаротрубном котле ТТ-3150 были рассчитаны следующие показатели: потери с уходящими дымовыми газами, коэффициент полезного действия брутто, удельный расход условного топлива на выработку 1 ГДж тепловой энергии.

Обсуждение. Численное моделирование дымогарных труб позволяет дать предварительную оценку влияния той или иной конфигурации турбулизатора на теплообмен и аэродинамику в котле. В ходе выполнения исследования было выполнено построение математической модели дымогарных труб с установленными в них турбулизаторами. Модель определяет характер теплообмена в тракте дымогарных труб на режимах работы котла от технического минимума до номинальных параметров. Результаты исследования вписываются в контекст мировой науки по таким направлениям, как повышение энергоэффективности существующего оборудования. Применяемое решение по использованию вставок-турбулизаторов позволит снизить расходы топлива, повысить коэффициент полезного действия установок без замены дорогостоящего оборудования, снизить количество выбросов в атмосферу [9, 10].

Заключение. При эксплуатации котлов с турбулизаторами увеличивается аэродинамическое сопротивление по газовоздушному тракту, но при работе котлов под наддувом данное изменение не оказывает значительного влияния на тягу. Вставки-турбулизаторы повышают эффективность теплообмена в котлах – это подтверждают полученные в результате расчета графики показателей технической эффективности. При работе котла на нагрузке свыше 1600 кВт доминирующим в эффективности вариантом является двухпластинный турбулизатор с наибольшим количеством витков. Ввиду того, что высокотемпературные уходящие газы нагревают пластину, площадь которой больше, относительно представленных вариантов, соответственно доля лучистого теплового потока усиливается, в связи с чем увеличивается эффективность теплообмена в котле.

Направлением будущих исследований является подбор оптимальной геометрической конфигурации вставки-турбулизатора, обладающей низким аэродинамическим сопротивлением при значительном вкладе в эффективность теплообмена на всех режимах работы котла.

Список литературы

1. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в кольцевых каналах с турбулизаторами «выступ – канавка» // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2015. № 4 (43). С. 61–73. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.43.05.
2. Каримов И.Б., Бабаходжаев Р.П. Современные конструкции турбулизаторов для интенсификации процессов гидродинамики и теплообмена в рекуперативных теплообменных аппаратах // ReFocus. 2023. № 2. С. 229–234. DOI: 10.5281/zenodo.7709409.
3. Ahn J. Heat Transfer and Thermal Efficiency in Oxy-Fuel Retrofit of 0.5 MW Fire Tube Gas Boiler // Processes. – 2024. – Vol. 12, No. 5. – Art. 959. – P. 1–14. – DOI: 10.3390/pr12050959.
4. Qiao J., Wang Q., Na E., Wen X., Liang Z., Zhang Y. Recent Progress in Waste Heat Recovery Technology for Boiler Flue Gas: A Comprehensive Review // Thermal Science. – 2025. – Vol. 29, No. 6A. – P. 4453–4471. – DOI: 10.2298/TSCI250703176Q.
5. Khaustov S.A., Zavorin A.S., Buvakov K.V., Sheikin V.A. Computer simulation of the fire-tube boiler hydrodynamics // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol. 82. – Art. 01039. – P. 01039-p.1–01039-p.5. – DOI: 10.1051/epjconf/20158201039.
6. Daneshparvar M.R., Beigzadeh R. Multi-objective optimization of helical baffles in the shell-and-tube heat exchanger by computational fluid dynamics and genetic algorithm // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 11064–11077. – DOI: 10.1016/j.egyr.2022.08.249.
7. Zahid H.B., Mubashar A., Waqas M., Siddiqi M.H., Munir U., Naqvi S.M.A. Experimental and CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations // Thermal Science. – 2023. – Vol. 27, No. 1B. – P. 843–853. – DOI: 10.2298/TSCI220124075Z.
8. Суслов Д.Ю., Подпоринов Б.Ф., Темников Д.О. Модели турбулизации потока при численном моделировании // Эпоха науки. 2017. № 11. С. 123–128. DOI: 10.1555/2409-3203-2017-0-11-123-128.
9. Hasan I.A., Maki W. Effect of the Arrangement of a New-Type of Turbulator Inserts on Heat Pipe Exchanger Performances // Fluid Dynamics & Materials Processing (FDMP). – 2023. – Vol. 19, No. 10. – P. 2750–2759. – DOI: 10.32604/fdmp.2023.027260.
10. Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A., Soni M.K., Goel V., Sharifpur M., Ahmadi M.H., Issakhov A., Meyer J. Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2022. – Vol. 147. – P. 9229–9281. – DOI: 10.1007/s10973-021-11168-5.

УДК 543.632.9

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Филатов В.М.
аспирант кафедры ЭС,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, vladislav-fil01@mail.ru

Научный руководитель: Растворова И.И.
д.т.н., член АЕН РФ, зав. кафедрой ЭС,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность. Доминирование высоковязких нефтей в структуре мировых запасов требует разработки экспресс-методов оперативного контроля их свойств непосредственно в промысловых условиях. Основные проблемы. Традиционные методы малопригодны для оперативного сопровождения добычи из-за длительности и логистических задержек, а применение ИК-спектроскопии затруднено спектральными искажениями, вызванными присутствием воды и оптической неоднородностью высоковязких нефтей. Цель. Экспериментальное обоснование ультразвуковой обработки как способа пробоподготовки для устранения неоднородностей и повышения достоверности ИК-спектроскопического анализа высоковязких нефтей. Результаты. Установлено, что ультразвуковая обработка нефти снижает содержание воды на 94,3% и рассеяние на 67,7%, увеличивая спектральную доступность углеводородных полос в точках отбора проб. Для менее обводненных образцов изменения слабее, что подтверждает ведущую роль исходной эмульсионной структуры в искажении спектров.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, ИК-спектроскопия, ультразвуковая пробоподготовка, водонефтяная эмульсия, экспресс-анализ.

Введение. Высоковязкие и тяжелые нефти составляют не менее половины мировых запасов углеводородов, однако их освоение в условиях Крайнего Севера сопряжено с существенными технологическими трудностями [1, 2]. Оперативный контроль физико-химических свойств такого сырья непосредственно на промыслах является критически важным для оптимизации добычи и транспортировки, особенно с учетом нестабильности состава продукции даже соседних скважин [3, 4, 5]. В условиях удаленных месторождений логистические задержки традиционные лабораторные подходы неприемлемы для оперативного сопровождения добычи. Инфракрасная спектроскопия рассматривается как экспресс-метод, однако анализ необработанной высоковязкой нефти затруднен искажениями, вызванными присутствием воды и оптической неоднородностью среды [6, 7, 8].

Методы. Объектами исследования выбраны нефти Крайнего Севера: сырая сверхвысоковязкая, вязкая и обезвоженная высокопарафинистая. Пробоподготовка включала ультразвуковую обработку проб в непрерывном режиме. Анализ проводился методом ИК-Фурье-спектроскопии с регистрацией спектров до и после ультразвукового воздействия для оценки изменения водного индекса $I_{\mathrm{H_2O}}$ (1), индекса рассеяния I_{trs} (2) и структурных параметров.

$$I_{\mathrm{H_2O}} = \frac{S_{1620-1680}}{S_{1440-1480}}; \quad (1)$$

$$I_{\mathrm{trs}} = \frac{S_{400-650}}{S_{2910-2930}}, \quad (2)$$

где S – площадь фигуры на ИК-спектре в соответствующем диапазоне.

Результаты. Наиболее выраженный эффект получен для сырой обводненной нефти: ультразвуковая обработка в течение 9 минут обеспечила снижение водного индекса I_{H_2O} на 94,3% и индекса рассеяния I_{trs} на 67,7%. Это сопровождалось переходом карбонильного индекса в положительную область и ростом структурных индексов в областях 720 см$^{-1}$ и 1580–1620 см$^{-1}$. Для менее обводненных образцов изменения оказались существенно слабее.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка позволяет селективно разрушать эмульсионную структуру и снижать оптическую неоднородность среды. Зарегистрированный рост структурных индексов ароматики и парафинов следует трактовать не как образование новых соединений, а как увеличение спектральной доступности углеводородных полос на фоне подавления рассеяния. Это согласуется с современными представлениями о преимуществе ультразвуковой деэмульсации именно при пониженных температурах [9, 10].

Заключение. Экспериментально обоснована эффективность ультразвуковой пробоподготовки как способа повышения информативности ИК-анализа высоковязких нефтей. Практическая значимость заключается в возможности интеграции разработанной методики в портативные устройства для анализа в полевых условиях. Дальнейшие исследования предполагают валидацию методики на расширенной выборке нефтей с контролем химического состава после ультразвукового воздействия для подтверждения отсутствия окислительных изменений, способных повлиять на ИК-анализ.

Благодарности: *выражаю признательность руководству и персоналу Научного центра «Экосистема» за предоставленное оборудование.*

Список литературы

1. Парамзин А.Р., Зиновьев А.М., Канайкин И.Е., Зиганшин Р.Ш., Давыдов М.А., Маргачев Д.А. Современное состояние мировых запасов высоковязкой нефти и природного битума // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 2. 13 с. EDN: 08NZVN224.

2. Semenova T., Sokolov I. Theoretical Substantiation of Risk Assessment Directions in the Development of Fields with Hard-to-Recover Hydrocarbon Reserves // Resources. – 2025. – Т. 14. – №. 4. – С. 64. DOI: 10.3390/resources14040064.

3. Raupov I., Burkhanov R., Lutfullin A., Maksyutin A., Lebedev A., Safiullina E. Experience in the Application of Hydrocarbon Optical Studies in Oil Field Development // Energies. 2022. V. 15(10). 3626. DOI: 10.3390/en15103626.

4. Xu S., Xu Z., Zheng J., Lin H., Zou L., Lei M. Where does the crude oil originate? The role of near-infrared spectroscopy in accurate source detection // Memetic Computing. – 2024. – Т. 16. – №. 3. – С. 429-443. DOI: 10.1007/s12293-024-00425-3.

5. Santos F.D., Vianna S.G., Cunha P.H., Folli G.S., de Paulo E.H., Moro M.K., Filgueiras P.R. Characterization of crude oils with a portable NIR spectrometer // Microchemical Journal. – 2022. – Т. 181. – С. 107696. DOI: 10.1016/j.microc.2022.107696.

6. Rastvorova I.I., Filatov V.M., Vilkov S.A. Reduction of Optical Density in Highly Viscous Oils through Ultrasonic Treatment within The Infrared Wavelength Range // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2026. – Т. 39. – №. 8. – С. 1865-1877. DOI: 10.5829/ije.2026.39.08b.08.

7. Муллакаев М.С., Муллакаев Р.М., Есипов И.Б. Ультразвуковое регулирование вязкоупругих свойств нефтяных дисперсных систем // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69. – №. 3. – С. 322-329. DOI: 10.31857/S0320791922600408.

8. Sargazi M., Hashemi S.H., Kaykhaii M. Modern sample preparation techniques: A brief introduction // Sample preparation techniques for chemical analysis. – 2021. – Ч. 2. DOI: 10.5772/intechopen.100715.

9. Volkova G., Zubarev D., Kadychagov P. Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties and Composition of High-Wax Crude Oil and Its Precipitates // Petroleum Chemistry. – 2024. – Т. 64. – С. 540-547. DOI: 10.1134/S0965544124020026.

10. Shiyi Lv., Zhang R., Guo Z., Du W., Zhang J., Chen G., Peng S. Воздействие ультразвука на вязкость тяжелой нефти // Нефтехимия. – 2020. – Т. 60. – №. 5. – С. 607-611. DOI: 10.31857/S0028242120050196.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАТИВНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Филимошина Д.Е.
кандидат технических наук, ведущий специалист департамента энергоаудита промышленных предприятий ООО «ГЦЭ-энерго», Санкт-Петербург, Россия, dariabatueva418@gmail.com

Аннотация. В рамках исследования рассматривалось потребление электроэнергии аппаратами воздушного охлаждения (АВО) на газоперерабатывающем предприятии. При сезонных изменениях температуры наружного воздуха меняется его плотность, что вызывает колебания потребляемой электродвигателем АВО мощности до 30%. В связи с этим становятся важными вопросы повышения энергетической эффективности и определения норматива электропотребления АВО в зависимости от изменяющихся внешних условий. Разработана методика для определения нормативного электропотребления АВО в зависимости от двух факторов – температуры окружающей среды и загрузки установки переработки газа. В связи с нелинейными зависимостями от этих факторов проводилась двухфакторная степенная аппроксимация значений. В результате с высокой точностью определена зависимость электропотребления от температуры окружающей среды и загрузки установки по сырью для любого типа АВО.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения; газоперерабатывающее предприятие; потребление электроэнергии; энергоэффективность; нормирование; температура окружающей среды.

Введение. В связи с высокой энергоемкостью [1] одним из приоритетных направлений для всех видов производств в России и мире является сокращение и оптимизация расходов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [2], в том числе электрической энергии [3, 4].

На объектах добычи, транспортировки и переработки газа значительный объем затрат на электрическую энергию определяется работой насосов [5], компрессоров [6], различного тягодутьевого оборудования и АВО [7], которые являются объектами данного исследования, а также их конструктивными особенностями и степенью износа.

Согласно статьям [8, 9, 10], эффективность работы каждого типа АВО не является постоянной в процессе эксплуатации, а характеризуется определенной динамикой, что обусловлено сменой режима работы технологического участка/установки, а также изменением климатических условий.

Целью данного исследования является разработка методики для определения нормативного потребления электроэнергии АВО в зависимости от двух изменяющихся факторов – температуры окружающей среды и загрузки установки переработки газа.

Методика исследования включает решение следующих задач:

– определение наличия исходных данных, таких как технические характеристики и параметры АВО, тепловая нагрузка АВО по результатам предварительного моделирования установки переработки газа;

– расчет массового расхода воздуха через АВО;

– расчет норматива потребляемой мощности АВО с учетом КПД двигателей;

– аппроксимация значений наименьшей полиномиальной функцией нормативного потребления электроэнергии с отклонением аппроксимированного и расчетного значений не более 5%;

– определение коэффициентов двухфакторной аппроксимации для формирования итоговой зависимости норматива потребления электроэнергии АВО от температуры окружающей среды и загрузки установки.

Методы. Исходными данными для расчета являются результаты математического моделирования технологических установок, в состав которых входят АВО. По результатам моделирования определяется тепловая нагрузка АВО при различной производительности установки. По завершении расчета теоретически необходимого объема потребления ТЭР в зависимости от объемов выпуска продукции/переработки сырья и температуры окружающей среды (для АВО – оценка потребления электроэнергии вентиляторами для обеспечения необходимого теплосъема) проводится аппроксимация результатов проведенных расчетов для разработки формул расчета объема потребления без использования специализированных средств.

Результаты. В исследовании проведен расчет режимов работы АВО в 25 точках. Поскольку расчеты являются комплексными, их использование непосредственно на предприятиях в данном виде нецелесообразно. Поэтому была проведена полиномиальная двухфакторная аппроксимация значений потребления электроэнергии АВО. В связи с нелинейными зависимостями как по загрузке установки, так и по температуре окружающей среды, проводилась степенная аппроксимация значений. При этом степень полинома подбиралась минимальная (для сокращения сложности функции), дающая ошибку не более 5 % в любой из расчетных точек.

По результатам сравнения аппроксимирующих кривых и расчетных значений нормативов потребления электроэнергии был сделан вывод об удовлетворительной сходимости аппроксимирующего полинома и расчетных значений (среднеквадратичное отклонение по всем точкам не превышает 1 %). По результатам аппроксимации полученная зависимость будет иметь вид:

$$f(Q, T_{oc}) = (a2.1 \cdot Q^2 + b2.1 \cdot Q + c2.1) \cdot T_{oc}^2 + (a1.1 \cdot Q^2 + b1.1 \cdot Q + c1.1) \cdot T_{oc} + (a0.1 \cdot Q^2 + b0.1 \cdot Q + c0.1), \quad (1)$$

где Q – загрузка сырья, м^3/ч; T_{oc} – температура окружающей среды, ^{o}C; a, b, c – коэффициенты двухфакторной аппроксимации, о.е.

Полученная зависимость позволяет вычислить значение потребления мощности аппаратом воздушного охлаждения в конкретный момент времени. Дополнительно проведен анализ чувствительности модели к входным данным. При проверке модели на основе тестовых значений по загрузке установки (расходу сырья) и изменению температуры окружающей среды для расчетного периода, было выявлено, что при различных комбинациях погрешности в задании температуры окружающей среды на ±2 °C и/или расхода сырья на ±5 % изменение расчетного значения норматива потребляемой мощности составило до 1,5 %.

Обсуждение. Полученное решение может являться основой формирования базы статистических данных для определения норматива потребления электроэнергии и впоследствии использоваться для следующих целей:

– планирование объемов потребления электроэнергии и сокращение энергозатрат в планово-экономических процессах предприятий;

– выявление оборудования и узлов с повышенным потреблением электроэнергии с целью разработки планов по замене, реконструкции и модернизации установок;

– анализ затрат на электрическую энергию в рамках разработки графиков планово-предупредительных ремонтов и будущих программ по энергосбережению и повышению энергоэффективности;

– создание и внедрение на производственных объектах цифровых двойников, моделей прогнозирования потребления электроэнергии и мощности, систем управления энергией с интеграцией IoT-сенсоров и других интеллектуальных устройств.

Заключение. Методика может быть использована сотрудниками газоперерабатывающих предприятий для определения нормативного потребления электроэнергии АВО

при изменяющихся внешних и технологических факторах. Данная методика, разработанная и реализованная в программном комплексе Microsoft Office Excel, позволяет использовать ее административно-техническому и производственному персоналу без применения специализированного оборудования или ПО, что представляло бы собой трудоемкий процесс. В том числе возможно использование методики в программном обеспечении Р7-Офис для предприятий, перешедших на российский пакет офисных приложений.

Дальнейшее направление научно-исследовательской работы заключается в опробовании разработанной методики расчета на предприятиях переработки и/или транспортировки газа, а именно сравнение полученных нормативных значений с реальными статистическими данными, фиксируемыми на предприятии, проведение натурных измерений, оценка факторов, влияющих на потребление электроэнергии и степени их влияния.

По результатам апробации методики на газоперерабатывающих предприятиях могут быть проведены исследования, направленные на разработку методов предиктивной аналитики для выявления признаков износа оборудования на ранней стадии, и разработаны мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, сокращению расходов на электроэнергию.

Благодарности: *выражаю признательность Шорохову Алексею Юрьевичу, руководителю департамента энергоаудита промышленных предприятий ООО «ГЦЭ-энерго», за научное руководство в рамках проведения данного исследования.*

Список литературы

1. Zhukovskiy Y.L., Batueva D.E., Buldysko A.D. et al. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 17. № 5268. DOI: 10.3390/en14175268.
2. Хасанов И.И., Ардуганов А.И. Модернизация вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения на компрессорных станциях магистральных газопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 1-2. С. 29-34. DOI: 10.24412/0131-4270-2022-1-2-29-34.
3. Morenov V. Advances in Oil and Gas Production: A Viewpoint // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 3. № 1379. DOI: 10.3390/en16031379.
4. Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Koshenkova A. et al. A Methodology for Forecasting the KPIs of a Region's Development: Case of the Russian Arctic // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 15. № 6597. DOI: 10.3390/su16156597.
5. Дубинина Н.А., Мичурина О.Ю., Кудрявцева О.В., Кушнер А.А. Основные направления повышения энергоэффективности на предприятиях нефтегазовой отрасли // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 4 (38). С. 80-85. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-38-4-80-85.
6. Пронин В.А., Цветков В.А., Кованов А.В. и др. Аналитический обзор способов регулирования производительности винтовых компрессоров // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2 (79). С. 28-38. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38.
7. Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А. Управление электроприводами установок охлаждения газа с учетом индивидуальных характеристик аппаратов воздушного охлаждения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 567-571. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-8-567-568.
8. Кудина Е.Ф., Приходько И.В., Карпенко В.В., Курицын П.А. Влияние климатических факторов на работоспособность электрооборудования // Горная механика и машиностроение. 2021. № 2. С. 55-64.
9. Хворов Г.А., Юмашев М.В. Анализ энергосберегающих технологий охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром» // Территория «Нефтегаз». 2016. № 9. С. 127-132.
10. Калинин А.Ф., Меркурьева Ю.С., Халлыев Н.Х. Оценка эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения газа нового поколения // Территория «Нефтегаз». 2018. № 9. С. 74-80.

Секция 10. ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО И НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ

УДК 620.92; 620.98; 62-661; 62-664.3

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Аксенов И.И.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, axenov.tsk@yandex.ru

Научный руководитель: Зырянова О.В.
к.т.н., доцент кафедры Химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность данной работы обосновывается ценностью создания алгоритма для оценки энергетических показателей низкосортных твердых минеральных топлив, таких как торф. Предлагаемый алгоритм учитывает морфологию, состав сырья, а также экономико-географические данные конкретных месторождений. Для демонстрации работы алгоритма исследуются образцы торфа месторождений: Греко-Ушаковское и Саккала. Для ускорения проведения технического анализа предлагается использовать расчетный метод определения низшей теплоты сгорания. Результаты, полученные с использованием алгоритма являются комплексными и направлены на снижение издержек при поиске экономически эффективных месторождений. Формулируется гипотеза о том, что наиболее полезен алгоритм будет для исследования топливной базы таких регионов, как Новгородская область и Республика Карелия, где уровень газификации значительно ниже, чем в Ленинградской области.

Ключевые слова: торф; сжигание торфа; газификация; технический анализ; теплота сгорания.

Введение. На территории Российской Федерации размещены значительные запасы торфа – около половины мирового запаса. В нашей стране есть многолетний опыт добычи, переработки и экспорта торфа. На фоне истощения запасов высококачественных твердых топлив актуализируется вопрос расширения сырьевой базы за счет топлива более низкого качества, например, торфа [1-3].

Помимо прямого сжигания торфяного сырья возможно получения из торфа различных продуктов топливно-химической переработки. В результате пиролиза, газификации или механический и комплексных методов переработки возможно получение жидких и газообразных топливных компонентов, коксов, полукоксов и композитных топливных материалов [4-6].

При грамотном и комплексном подходе торфяные запасы могут стать ключом к решению проблем местной энергетики, повышению плодородия пахотных земель, улучшению экологической обстановки в регионах [7].

Северо-Западный регион обладает благоприятными климатическими условиями для торфообразования, что позволило сформироваться значительным запасам сырья. Однако климатические и метеорологические условия региона сказываются на укорочении сезона добычи. Вопросами модернизации технологии добычи торфа с его двухэтапной

сушкой, результатом которой становится расширение сезона добычи в Горном университете занимался д.т.н. Э.А. Кремчеев [8].

В результате замены региональным торфом дальнепривозных углей или мазута произойдет повышение автономии и надежности топливоснабжения станций и снабжения теплом потребителей. Отказ от дорогостоящей логистики в пользу использования местного топлива окажет положительный вклад в экономику региона. Более того, сжигание торфа является еще и более экологичным по количеству кислых газообразных выбросов. Однако в конкуренции с природным газом торф все же уступает [9].

Методы. Для апробации разработанного алгоритма были отобраны образцы торфа двух месторождений Ленинградской области: Греко-Ушаковского (Тосненский район) и Саккала (Приозерский район).

Программа эксперимента включала: анализ картографических данных о газификации районов расположения месторождений, лабораторный технический анализ проб торфа, расчет элементного состава и теплоты сгорания по расчетному методу [10], сравнительный анализ полученных характеристик с требованиями ГОСТ 50902-2011 «Торф топливный для пылевидного сжигания».

Методы исследований: определение степени разложения (ГОСТ 10650-2013), зольности (ГОСТ 11306-2013), массовой доли общей влаги (ГОСТ 11305-83), влагоемкости (ГОСТ 24160-80), выхода летучих веществ (ГОСТ 55660-2013).

Результаты. Технический анализ торфом месторождения Греко-Ушаковское и Саккала показал пригодность сырья для использования в качестве топлива. Определенные значения теплоты сгорания образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Низшая теплота сгорания на рабочее топливо, $Q^r_н$, кДж/кг

Значение по ГОСТ 50902-2011	Торф Греко-Ушаковский	Торф Саккала
не менее 7 900	10 252,1	7 897,5

Обсуждение. Относительно исследованных месторождений Ленинградской области использование торфа нецелесообразно из-за преобладания газовой инфраструктуры в регионе. Тем не менее, торф технически пригоден при условии дополнительного подсушивания и сепарации включений. Рекомендуется использовать алгоритм при анализе месторождений Новгородской области и Республики Карелия.

Заключение. На примере существующих месторождений торфа в Ленинградской области проведена оценка по разработанному алгоритму. Суть предлагаемого алгоритма заключается в оценке обеспеченности в котельном топливе близлежащих к месторождению населенных пунктов, упрощенном техническом анализе образца с расчетным методом определения низшей теплоты сгорания, сравнении полученных результатов с государственным стандартом. Алгоритм анализа учитывает: уровень развития энергетики региона, характеристики сырья и месторождений, результаты технического анализа предполагаемого топлива.

Список литературы

1. Михайлов А.В., Бажин В.Ю., Пиирайнен В.Ю. Анализ перспектив термической конверсии торфяного сырья и его использования в черной металлургии // Черные металлы. – 2024. – № 9 – С. 9-14. DOI: 10.17580/chm.2024.09.02.

2. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами// Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

3. Трушко В.Л. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий / В.Л. Трушко, О.В. Трушко // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 569-577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.

4. Передерин Ю.И., Анзельм Е.Г., Усольцева И.О. Переработка торфа: современное состояние технологии // Ползуновский вестник. – 2024. – № 4. – С. 173-180. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.026.

5. Тимофеева С.С., Караева Ю.В. Термохимическая переработка низкосортного торфа на основе газификации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – № том 13, 2 (50). – С. 15-26. EDN: BDIZHG.

6. Назаренко М.Ю., Салтыкова С.Н. Получение полукокса из горючих сланцев Ленинградского месторождения // Chernye Metally. – 2022. – № 10. – С. 4-8. – DOI: 10.17580/chm.2022.10.01. [на англ. яз.]

7. Кузьмин Г.Ф., Селеннов В.Г., Созинова Л.А. Торфяные месторождения России: геология, экология, разведка, использование. СПб: Свет, 2019. – 386 с.

8. Кремчеев Э.А. Научное обоснование стадийной технологии экскаваторной добычи торфа: диссертация ... доктора технических наук: 25.00.22 / Кремчеев Эльдар Абдоллович. – СПб., 2016. – 389 с.

9. Алпеева Е.А., Гончаров М.С. Торфяная промышленность Российской Федерации: проблемы и перспективы // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 3. – С. 121-130. EDN: LMKKEN.

10. Языков Н.А., Симонов А.Д., Яковлев В.А. Оценка низшей теплоты сгорания растительной биомассы, торфа и ископаемых углей на основе технического анализа // Химия в интересах устойчивого развития. – 2017. – № 25 – С. 465-471. DOI: 10.15372/KhUR20170414.

УДК 544.77.03

УЛЬТРАМИКРОСКОПИЯ КАК ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГА АГРЕГАЦИИ АСФАЛЬТЕНОВ

Анашкин Н.В.
аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина;
младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН,
Москва, Россия, anaschkinnikolai@mail.ru

Научный руководитель: Мохов М.А.
д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Научный консультант: Курьяков В.Н.
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник,
Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследован порог устойчивости (onset point) и кинетика агрегации асфальтенов в модельной системе толуол–гептан с применением ультрамикроскопии и методов рассеяния света. Показана высокая чувствительность ультрамикроскопии для детектирования ранних стадияй агрегации по сравнению с динамическим рассеянием света. Установлено влияние способа добавления осадителя на кинетику роста агрегатов. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для экспресс-диагностики стабильности нефтяных систем.

Ключевые слова: асфальтены, агрегация, порог устойчивости, onset point, ультрамикроскопия, динамическое рассеяние света, нефтяные системы, коллоидная устойчивость, АСПО.

Введение. Проблема агрегации асфальтенов и образования асфальто-смолисто-парафиновых отложений (АСПО) остается одной из ключевых в нефтяной отрасли [1–3]. Несмотря на существование различных методов определения условий начала выпадения асфальтенов из нефтяных систем (onset point), задача повышения чувствительности диагностики начальных стадий агрегации остается актуальной [4, 5]. Целью работы является исследование порога устойчивости и кинетики агрегации асфальтенов с использованием ультрамикроскопии и методов рассеяния света.

Методы. Исследования выполнены на модельной системе толуол–асфальтены–гептан. Порог устойчивости определяли методом титрования осадителем с одновременной регистрацией параметров методами ультрамикроскопии и динамического рассеяния света. Кинетика агрегации изучалась при различных способах добавления осадителя. Анализ данных проводился по зависимостям концентрации и размеров агрегатов от времени, и состава системы.

Метод ультрамикроскопии (нобелевская премия по химии 1925 года, Рихард Зигмонди) благодаря специальному лазерному освещению образца жидкости позволяет визуализировать движение наночастиц в образце, что позволяет измерять их концентрацию, а из анализа их движения в жидкости определять их коэффициент диффузии и размер. Ранее данный метод не применялся для определения начала выпадения асфальтенов из нефтяных систем.

Метод динамического рассеяния света позволяет определить размер частиц в образце жидкости из анализа флуктуаций интенсивности рассеянного света.

Результаты. Показано, что ультрамикроскопия позволяет детектировать onset point при более низких концентрациях гептана (~60 об%), чем метод динамического рассеяния света (~76–77 об%). Установлено, что при единовременном добавлении осадителя наблюдается быстрый рост агрегатов, соответствующий диффузионно-лимитированному механизму. При титровании агрегация протекает медленнее, а рост размеров агрегатов имеет линейный характер.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности ультрамикроскопии к ранним стадиям агрегации асфальтенов. Экспериментально показано, что ультрамикроскопия детектирует начало выпадения асфальтенов в виде наноагрегатов на более ранних стадиях, чем такой высокочувствительный метод, как динамическое рассеяние света.

Различия в кинетике роста агрегатов указывают на существенное влияние гидродинамических условий и способа введения осадителя на механизм агрегации. Это согласуется с современными представлениями о диффузионно- и реакционно-лимитированных процессах [6, 7].

Заключение. Ультрамикроскопия является перспективным методом для определения порога устойчивости нефтяных систем. Детектирование начала агрегации асфальтенов и АСПО в нефтяных системах на более ранних стадиях, благодаря высокой чувствительности метода, позволят эффективнее бороться с образованием АСПО при добыче, транспортировке и переработке нефтяных систем.

Показано влияние способа добавления осадителя на кинетику агрегации асфальтенов.

Результаты могут быть использованы для разработки новых, более чувствительных и эффективных методик контроля стабильности нефтяных систем и предотвращения образования АСПО [8].

Благодарности: *работа выполнена в рамках государственного задания ИПНГ РАН № 125020501404-4.*

Список литературы

1. Ekulu G., Rogalski M., Sadiki A., Bokolo M. Experimental investigation of asphaltenes flocculation threshold in crude oils using different methods: comparative study // Journal of Dispersion Science and Technology. 2013. V. 34. №12. P. 1663–1674. DOI: 10.1080/01932691.2012.762928.

2. Meybodi M.K., Moghadasi J. A novel technique for determination of the onset of asphaltene precipitation using accurate density measurements // Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology. 2016. V. 5. №4. P. 25–35. DOI: 10.22050/ijogst.2016.41573.

3. Shadman M.M., Saeedi Dehaghani A.H., Badizad M.H. How much do you know about the methods for determining onset of asphaltene precipitation? // Petroleum. 2017. V. 3. №3. P. 287–291. DOI: 10.1016/j.petlm.2016.08.011.

4. Xiong R., Guo J., Kiyingi W., et al. Method for judging the stability of asphaltenes in crude oil // ACS Omega. 2020. V. 5. №34. P. 21420–21427. DOI: 10.1021/acsomega.0c01779.

5. Fakher S., Yousef A., Al-Sakkaf A., Eldakar S. Asphaltene onset pressure measurement and calculation techniques: A review // Petroleum. 2024. V. 10. №2. P. 191–201. DOI: 10.1016/j.petlm.2023.04.001.

6. Soleymanzadeh A., Yousefi M., Kord S., Mohammadzadeh O. A review on methods of determining onset of asphaltene precipitation // J. Pet. Explor. Prod. Technol. 2019. V. 9. P. 1375–1396. DOI: 10.1007/s13202-018-0533-5.

7. Mousavi-Dehghani S., Riazi M., Vafaie-Sefti M., Mansoori G. An analysis of methods for determination of onsets of asphaltene phase separations // J. Pet. Sci. Eng. 2004. V. 42. №2–4. P. 145–156. DOI: 10.1016/j.petrol.2003.12.007.

8. Kuryakov V.N., Onset Points and Kinetics of Asphaltene Aggregation in Model Petroleum Systems: Investigation Using Dynamic Light Scattering and Ultramicroscopy // Petroleum Chemistry. 2025. V. 65. № 6. P. 654–658. DOI: 10.1134/S0965544125601024.

ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ КАТАЛИЗАТОРОВ ИЗ ГИДРОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ НИТРАТНО-АММИАЧНОГО И КАРБОНАТНОГО ОСАЖДЕНИЙ

Артюшевский Д.И.
инженер 1 категории,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, artyushevskiy_di@pers.spmi.ru

Научный руководитель: Пягай И.Н.
д.т.н., научный руководитель НЦ «Переработки ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Промышленные катализаторов для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности являются ключевым звеном в превращении сырья в ценные продукты реакции. Активность таких катализаторов напрямую зависит от качества используемых носителей. К качеству носителей предъявляются следующие требования: высокая площадь удельной поверхности, пористость и прочность гранул. Но для синтеза носителей с высокими текстурными свойствами необходим тщательный подход к анализу исходных свойств гидроксидалюминиевого сырья. В данной работе рассматриваются различия между гидроксидами алюминия нитратно-аммиачного и карбонатных осаждений и их влияние на свойства конечного носителя.

Ключевые слова: гидроксид алюминия, бемит, аммонийный даусонит, носители, катализаторы.

Введение. Получение носителей с высокими текстурными свойствами сопряжено с выбором гидроксидалюминиевого сырья, чей состав и свойства напрямую влияют на характеристики алюмооксидного носителя [1-3]. В мировой практике существуют методы анализа свойств гидроксидов алюминия [4], но отсутствует четкая методика количественной оценки фазового состава. В данной работе предлагается оценить фазовый состав гидроксидов алюминия различного синтеза с помощью дериватографического анализа [5].

Методы. Свойства исходных гидроксидов алюминия оценивались с помощью методов рентгенофазового, дериватографического, гранулометрического анализов. Морфологию частиц определялись сканирующей электронной микроскопией. Пористость и удельная поверхность носителей были определены низкотемпературной сорбцией азота с применением методов BET и BJH[1].

Результаты. Используя комбинированный анализ гидроксидалюминиевого сырья, удалось выявить закономерности снижения текстурных свойств носителей на основе нитратно-аммиачного и карбонатных осаждений. Повышение аморфной доли закономерно снижает текстурные параметры готовых носителей, а разнородность фазового состава сильно сказывается на прочности прокаленных гранул.

Обсуждение. При выборе и использовании гидроксида алюминия различных методов получения, определение фазового состава имеет ключевое положение. Влияние состава гидроксидов алюминия сказывается на свойствах носителей, а впоследствии и на свойствах катализатора и его активности. Для получения носителей с предсказуемыми свойствами необходим комплексный и точный анализ сырья. Данные действия увеличат прогнозируемость свойств конечных катализаторов и помогут определению свойств и способа синтеза гидроксидов алюминия при их различных методах получения.

[1] ISO 15901-2:2022(en) Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 2: Analysis of nanopores by gas adsorption

Заключение. Для получения носителей катализаторов с высокими текстурными свойствами определение фазового состава и других характеристик является особо важным для прогнозируемого поведения носителей катализаторов. Использование различных видов сырья, полученных нитратно-аммиачным и карбонатным осаждениями, приводит к закономерному формированию структуры носителя. Для варьирования свойств носителей изменение условий осаждения или синтеза гидроксидов алюминия данная совокупность анализов приведет к обоснованным результатам текстурных свойств.

Список литературы

1. Sato T. Preparation and characterization of aluminium hydroxides and aluminas. – USA : Litavran Literature, 2017. – 300 p.
2. Wagner M. Thermal analysis in practice. – München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017. – 349 p.
3. Lafficher R., Digne M., Salvatori F. et al. Ammonium aluminium carbonate hydroxide NH4Al(OH)2CO3 as an alternative route for alumina preparation: Comparison with the classical boehmite precursor // Powder Technology. 2017. Vol. 320. P. 565–573. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.080.
4. Бебякина А.П. и др. Промышленные гидроксиды алюминия. Сообщение 1. Фазовый состав и текстурные характеристики промышленных гидроксидов/оксидов алюминия // Катализ в промышленности. – 2024. – Т. 24. – № 2. – С. 6-14. DOI: 10.18412/1816-0387-2024-2-6-14.
5. Спецов Е.А. и др. Особенности расчета фазового состава гидроксидов алюминия по данным термического анализа // Цветные металлы. – 2023. – № 5. – С. 37-44. DOI: 10.17580/tsm.2023.05.05.

УДК 665.6:544.6

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ РАСТВОРИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИОНООБМЕННОЙ ОЧИСТКИ ФЕНОЛЬНОЙ СМОЛЫ

Братилов П.С.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s240633@stud.spmi.ru

Научный руководитель: Утенкова Т.Г.
к.т.н., научный сотрудник Научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. Рассмотрены состав фенольной смолы, а также проблемы ее переработки, вызванные присутствием солей. Представлены результаты экспериментальных исследований ионообменной очистки фенольной смолы в органических средах.

Ключевые слова: фенольная смола, кумольный процесс, ионообменные смолы, экстракция, обессоливание.

Введение. Фенольная смола является многотоннажным побочным продуктом производства фенола и ацетона кумольным методом [1-3]. Её выход в зависимости от технологии составляет от 7 до 20% на тонну фенола [4-6]. Фенольная смола представляет собой сложную смесь ароматических соединений [7]. Также в её состав входят минеральные соли, в основном сульфат натрия, в количестве от 0,01 до 3% [8]. Эффективность большинства существующих методов переработки фенольной смолы сильно снижается из-за высокого содержания в ней минеральных солей [4,7]. Соли вызывают коррозию оборудования, отравление катализаторов, образование серосодержащих примесей в продуктах [9]. Также наличие солей делает невозможным использование фенольной смолы в качестве сырья производства технического углерода, так как согласно ГОСТ 11126-2019, содержание ионов Na^+ и K^+ не должно превышать 50 ppm и 5 ppm соответственно. Перспективным методом обессоливания является ионный обмен, однако для его реализации необходимо создать условия, обеспечивающие диссоциацию солей [10]. Ключевую роль при это влияет выбор растворителя. Целью работы является анализ влияния различных растворителей на эффективность удаления ионов K^+ и Na^+ методом ионного обмена.

Методы. Для исследования процесса очистки применялась фенольная смола с исходным содержанием ионов Na^+ в пределах от 1500 до 2000 ppm, K^+ – в пределах от 30 до 50 ppm. Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На 1 этапе была проведена экстрактивная подготовка фенольной смолы с целью удаления основной массы солей. Процесс экстракции солей проводился при температуре 85-95°С в течение 10 минут с использованием в качестве экстрагента дистиллированной воды, подкисленной серной кислотой до pH=1, соотношение фенольная смола:экстрагент составляло 1:1. На 2 этапе подготовленную фенольную смолу с содержанием Na^+ – 127,6 ppm и K^+ – 10,3 ppm смешивали с растворителями (ацетоном, метанолом, метилтретбутиловым эфиром (МТБЭ), изопропиловым спиртом (ИПС)) в соотношении 4:1. Очистку проводили в динамических условиях в ионообменной колонне, наполненной катионитом КУ-2-8. Объем смеси пропускали через катионит с постоянной скоростью 5 раз при температуре 25 °С. Отбор проб проводили после каждого прохождения объема смеси через колонну. Содержание ионов калия и натрия в фенольной смоле определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

Результаты. В таблице 1 представлены минимальные значения содержания ионов K^+ и Na^+, достигнутые в процессе пропускания смеси через ионообменную колонну.

Таблица 1

Минимальные достигнутые значения содержания ионов Na^+ и K^+

Растворитель	Содержание Na^+, ppm	Содержание K^+, ppm
Метанол	36,2	3,2
Ацетон	43,2	2,1
МТБЭ	37,9	3,7
ИПС	44,7	2,7

Обсуждение. На основе полученных данных был сделан вывод о том, что метанол, несмотря на высокую полярность, показал низкую эффективность из-за плохой смешиваемости с фенольной смолой. Ацетон обеспечивал высокое снижение вязкости, однако в пробах наблюдался резкий скачок концентраций ионов металлов, который обусловлен их наличием в ацетоне вследствие того, что он так же, как и фенольная смола, является продуктом кумольного процесса. МТБЭ показал высокую эффективность и хорошую смешиваемость с фенольной смолой, однако он обладает достаточно высокой стоимостью по сравнению с другими растворителями. ИПС показал отличные результаты очистки при относительно высокой его безопасности и низкой стоимости. Таким образом, изопропанол оказался наиболее рациональным растворителем для ионообменной очистки фенольной смолы.

Заключение. Установлено, что природа растворителя оказывает значительное влияние на эффективность ионообменной очистки фенольной смолы. Метанол показал низкую эффективность из-за плохой смешиваемости с фенольной смолой. Ацетон оказался непригодным из-за содержания в нем примесей ионов щелочных металлов. МТБЭ и ИПС продемонстрировали наилучшие результаты, однако ИПС дешевле, поэтому именно он был выбран в качестве рационального растворителя для дальнейших исследований.

Список литературы

1. Рамазанов К.Р. Кумольная технология производства поликонденсационных мономеров (фенол и ацетон): проблемы, пути их решения и перспективы для Казахстана // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2016. – №4. – С. 87-95.
2. Рамазанов К.Р. Севастьянов В.П. Функциональные добавки в полимерные композиты. Технология регенерации фенольной смолы // Вестник СГТУ. – 2013. – № 1 (73). – С. 66-72.
3. Закошанский, В.М. Кумольный процесс получения фенола-ацетона // Нефтехимия. – 2007. – № 4 (47) – С. 301-313.
4. Патент РФ 2056400 С1. Способ переработки фенольной смолы / А.С. Дыкман, В.П. Боярский, Б.И. Горовиц и др. заявл. 19.12.1994; опубл. 20.03.1996. – 6 с.
5. Dai, X., Zhou, W., Yang, S., Sun, F., Qian, J., He, M., Chen, Q. Microchannel process for phenol production via the cleavage of cumene hydroperoxide. Chem. Eng. Sci. 2019, 199: 398-404. DOI: 10.1016/j.ces.2019.01.031.
6. Kharlampidi, Kh.E., Nurmurodov, T.Sh., Ulitin, N.V., Tereshchenko, K.A., Miroshkin, N.P., Shiyan, D.A., Novikov, N.A., Stoyanov, O.V., Ziyatdinov, N.N., Lapteva, T.V., Khursan, S.L. Design of cumene oxidation process. Chem. Eng. Process. 2021, 161: 108314. DOI:10.1016/j.cep.2021.108314.
7. Патент РФ 2083546 С1. Способ переработки фенольной смолы производства фенола и ацетона кумольным методом / А.С. Дыкман, Е.Н. Сарже, В.И. Сарже и др. заявл. 26.12.1995; опубл. 10.07.1997, – 5 с.
8. Закошанский В.М. Альтернативные технологии получения фенола // Российский химический журнал. – 2008. – №4. – С. 53-71.
9. Вафина А.И., Аверина Ю.М., Бобкова Е.С. Переработка фенольной смолы как отхода производства фенола и ацетона кумольным способом // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – № 14 (210). – С. 54-56.
10. Иванов, В.А. 70 лет истории производства ионообменных смол // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2006. – № 1 (6). – С. 5-31.

РАЗДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАТА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ЛЕГКОЙ ГРУППЫ ПРИ КАРБОНАТНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

Галиуллина Л.И.
студент группы ОТ-24-36,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, galeisik@gmail.com

Научный руководитель Сергеев В.В.
к.т.н., доцент. каф. ОФХ,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Эффективное разделение концентрата редкоземельных металлов на индивидуальные соединения обусловлено различной растворимостью и устойчивостью анионных карбонатных комплексных соединений лантана, празеодима, неодима и церия. Представленные решения опробированы с использованием карбонатного концентрата легкой группы РЗМ «СМЗ». Предложенный способ позволит значительно снизить стадии дальнейшего экстракционного разделения с целью получения соединений высокой чистоты.

Ключевые слова: анионные карбонатные комплексы РЗМ, карбонат аммония, выщелачивание, дробная кристаллизация, разделение.

Введение. В то время как производство в США, Австралии, Бразилии, Вьетнаме и Таиланде растет с каждым годом. Доля РФ на рынке составляет меньше 1%, при этом в стране отсутствует промышленное производство индивидуальных соединений редкоземельных элементов, несмотря на значительные запасы [1]. Единственное предприятие в РФ, производящее концентрат РЗМ, является Соликамский магниевый завод «СМЗ», с отсутствием дальнейшего разделения на индивидуальные элементы. Использование экстракционных технологий разделения обладает значительными недостатками (сложность процесса, дороговизна реагентов и импорт зависимость, многоступенчатость процесса), что существенно повышает себестоимость продукции [2,3].

На наш взгляд, использование метода дробной кристаллизации в процессе карбонатного выщелачивания коллективного концентрата РЗМ может значительно уменьшить недостатки существующих технологий. Известно, что образование карбонатных комплексов при растворении концентрата суммы карбонатов легкой группы РЗМ в растворе карбонатов щелочных металлов/карбонате аммония при избытке карбонат иона является самопроизвольным процессом, при этом образуются растворимые комплексы вида $Ln(CO_3)_n^{3-2n}$ различной устойчивости в зависимости от ионного радиуса РЗМ [3-5].

Таким образом целью настоящего исследования является разработка способа разделения коллективного карбонатного концентрата РЗМ легкой группы, основанного на различной растворимости карбонатов РЗМ и устойчивости образующихся карбонатных комплексов при выщелачивании карбонатом аммония.

Методы. В работе изучено разделение смеси карбонатов лантаноидов, идентичной по составу концентрату РЗМ «СМЗ» (таблица), использован метод дробной кристаллизации из карбонатного раствора 3М карбоната аммония. Выщелачивание концентрата и осаждение карбонатов РЗМ осуществляли с использованием автоматических реакторов при постоянных температуре процесса и степени перемешивания. Исходную смесь карбонатов РЗМ предварительно эквимолярно растворили в азотной кислоте для полного растворения и эффективного комплексообразования.

Таблица

Концентрат легкой группы (карбонатный концентрат в пересчете на оксиды по данным предприятия «СМЗ») [*составлено авторами*]

Оксид	Содержание, %	Оксид	Содержание, %
La_2O_3	25,8	Dy_2O_3	0,09
CeO_2	53,8	Tb_2O_3	0,1
Nd_2O_3	13,4	Fe_2O_3	0,001
Pr_6O_{11}	5,0	CaO	0,1
Sm_2O_3	1,08	SrO	0,05
Eu_2O_3	0,09	Na	0,02
Gd_2O_3	0,19	Mn	0,003

Результаты. Установлено, что фактор соосаждения не так значителен для внутригруппового разделения легкой группы:

1. Церий, несмотря на высокое относительное содержание в растворе (более 60% от суммы РЗМ) при разрушение карбонатных комплексов и, соответственно, осаждении карбонатов лантана, празеодима и неодима, полностью остается в растворе и начинает осаждаться после выпадения остальных РЗМ (99 % лантана и, более 90% неодима и празеодима).

2. При выщелачивании 3М карбонатом аммония концентрата РЗМ после выделения церия (55%La, 14%Pr, 31%Nd, соотношение фаз 1:2000, 298K) отмечается высокая степень извлечения лантана в раствор (около 85%) с полным переходом в раствор за две ступени выщелачивания. При этом празеодим и неодим остаются в концентрате более чем на 80%.

3. Из раствора лантан значительно быстрее чем неодим выпадает в осадок, при этом, в случае более высоком мольном соотношении (соотношении фаз) РЗМ: карбонат аммония, разделение также повышается. Предварительно получены раствор неодима (более 90%) и осадки лантана (менее 10% по неодиму).

Обсуждение. Последовательность операций, включая предварительное растворение в азотной кислоте, выделение церия и последующую дробную кристаллизацию остальных РЗМ. Принципиальная схема разделения представлена на рисунке.

1.Церий, с минимальными потерями (менее 5%) целесообразно выделить на последней стадии из карбонатного раствора после предварительно извлечения лантана, празеодима и неодима. Эффективность разделения обусловлена наибольшей устойчивостью карбонатного комплекса церия и отсутствием факта соосаждения с другими РЗМ. Церий также можно выделить и в случае выщелачивания карбонатом аммония из концентрата, но степень извлечения будет существенно меньше.

2. Соединения лантана ввиду высокой растворимости относительно других РЗМ легкой группы целесообразно выделять в раствор из группового концентрата после выделения церия на стадии карбонатного выщелачивания, при минимальных потерях за счет растворения неодима и празеодима в растворе с высоким содержанием карбонат иона. Учитывая значительные различия в кинетике осаждения лантана, возможно получение индивидуального карбоната лантана при ступенчатом осаждении.

3. Празеодим на стадии осаждения из раствора подобен лантану, но, учитывая на порядок меньшее исходное содержание относительно лантана, частично остается в растворе неодима. Увеличение соотношения фаз, повышение температуры и времени контакта фаз способствует более полному выщелачиванию неодима и празеодима в раствор. Необходим дальнейший поиск, оптимизация условий их максимального разделения. Очистка возможна путем дробной/ступенчатой кристаллизации. Данные операции могут понизить количество стадий дробной кристаллизации и уменьшить потери.

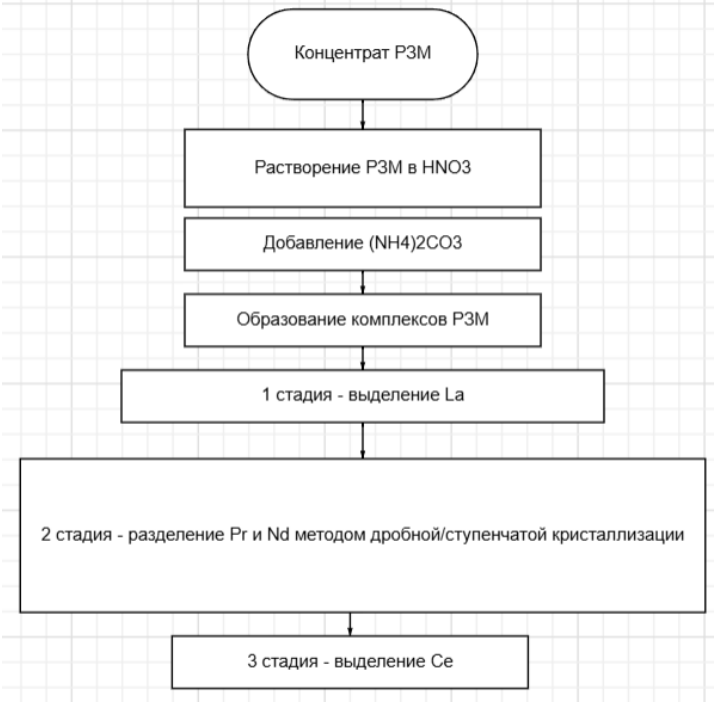


Рисунок – Схема разделения карбонатов РЗМ легкой группы

Заключение. Таким образом различная растворимость карбонатов РЗМ и устойчивость карбонатных комплексов являются основными факторами разделения на индивидуальные соединения в процессе дробной кристаллизации. Полученные результаты являются перспективными для разработки и оптимизации технологических решения по разделению концентратов РЗМ на индивидуальные соединения с минимальными потерями в процессе карбонатного выщелачивания без использования дополнительных реагентов и стадий окисления и восстановления, что значительно снизит себестоимость экстракционных технологий разделения для получения продуктов высокой чистоты.

Благодарности: *автор выражает благодарность научному центру «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» и кафедре ОФХ Санкт-Петербургского горного университета за помощь в проведении экспериментов и интерпретации полученных результатов.*

Список литературы

1. Ping Chen, Eugene S. Ilton, Zheming Wang, Kevin M. Rosso, Xin Zhang. Global rare earth element resources: A concise review, Applied Geochemistry, Volume 175, 2024, 106158, ISSN 0883-2927, https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106158.
2. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.21.
3. Dynamic simulation of industrial-scale gibbsite crystallization circuit / V.O. Golubev, T.E. Litvinova // Journal of Mining Institute.– 2021. – Volume 247. – Issue 1. – P. 88-101. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.10.
4. The kinetic aspects of the dissolution of slightly soluble lanthanoid carbonates / R.R. Kashurin, S.A. Gerasev, I.T. Zhadovskiy, T.E. Litvinova // Metals. – 2021. – Volume 11. – Issue 11. – P. 1793. DOI: 10.3390/met11111793.
5. Litvinova, T.; Gerasev, S.; Sergeev, V.; Lidanovskiy, E. Rare Earth Metal Ion-Associates in Ln3+—CO32−—H2O System. Metals 2025, 15, 239. https://doi.org/10.3390/met15030239.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ИЗОТРОПНЫХ КОКСОВ ПУТЕМ КОКСОВАНИЯ ПОЛИМЕРМОДИФИЦИРОВАННОГО ОСТАТОЧНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Говкелевич К.Ю.[1], Габдулхаков Р.Р.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, ksushevich0208@gmail.com
[2] к.т.н., ведущий научный сотрудник, Научный центр «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Gabdulkhakov_RR@pers.spmi.ru

Научный руководитель: Габдулхаков Р.Р.
к.т.н., ведущий научный сотрудник, Научный центр «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Было проведено исследование влияния полиакрилонитрильной модификации нефтяного и угольного сырья коксования на физико-химические свойства углеродного материала. Введение добавки модификатора в остаточное углеводородное сырье позволяет получать малосернистый малозольный изотропный кокс с повышенной прочностью, что позволяет рассматривать возможность его применения в качестве наполнителя для конструкционного графита.

Ключевые слова: полимермодифицированное сырье, нефтяной и пековый кокс, изотропная структура, статическая прочность, конструкционный графит.

Введение. Для производства широкого ассортимента продукции на основе конструкционного графита требуется изотропный кокс с малым содержанием серы и зольности, в качестве которого до середины 1990-х гг. использовался кокс марки КНПС [1, 2]. Производимый в настоящее время в качестве его замены пековый кокс не удовлетворяет требованиям по микроструктуре и прочности, что создает потребность в разработке альтернативных технологий по получению изотропного кокса [3]. Целью работы является установление влияния добавки полиакрилонитрила в нефтяное и угольное сырье коксования на показатели качества получаемого углеродного материала и возможности его применения в качестве наполнителя для конструкционного графита.

Методы. В ходе исследования в лабораторных условиях было проведено коксование тяжелого газойля каталитического крекинга и каменноугольного пека, в том числе модифицированных добавкой полиакрилонитрила [4]. Были определены физико-химические свойства и статическая прочность полученных коксов, оценена микроструктура с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии и сделан вывод о влиянии полимерной добавки в сырье коксования на структуру и качественные характеристики углеродного материала.

Результаты. Модификация тяжелого газойля каталитического крекинга добавлением полиакрилонитрила приводит к увеличению выхода углеродного материала и снижению доли образующихся дистиллятных фракций. В результате полимерной модификации нефтяного сырья понижается действительная плотность коксов с 2,12 до 2,02 г/см^3 при добавлении 20% масс. полимера. Модифицирование нефтяного сырья приводит к возрастанию в шесть раз статической прочности кокса с 2,2 до 12,6 МПа, о чем свидетельствует максимум прочности образца, полученного при коксовании тяжелого газойля каталитического крекинга с добавлением 15% масс. полиакрилонитрила.

Коксование полимермодифицированного каменноугольного пека приводит к снижению действительной плотности коксов с 2,08 до 2,04 г/см^3 при внесении 20% масс. полиакрилонитрила. Статическая прочность коксов увеличивается в два раза с 5,2 до

10,3 МПа при коксовании угольного сырья с добавлением 15% масс. полимера, при дальнейшем увеличении количества модификатора прочность коксов понижается.

Полимермодифицирующая добавка оказывает значительное влияние на микроструктуру получаемых нефтяных и пековых коксов. Для немодифицированного нефтяного кокса характерна струйчато-круговая анизотропия с общим баллом микроструктуры 5,3. Кокс, полученный при коксовании немодифицированного каменноугольного пека, обладает переходной между губчатой и мозаичной структурой с общим баллом микроструктуры 2,7. Для модифицированных нефтяных и пековых коксов характерна нетипичная микроструктура с наличием карбонизованных частиц полимера, которые действуют как частицы мелкодисперсной добавки, детерминирующие развитие мезофазы, что повышает степень изотропии углеродного материала и отражается при исследовании микроструктуры опытных образцов увеличением доли участков сферолитовой структуры [5, 6].

Добавление модификатора в исходное сырье не влияет на зольность как для нефтяных, так и для пековых коксов, при этом содержание серы незначительно снижается.

Обсуждение. Результаты экспериментов свидетельствуют о существенном влиянии модификации сырья полиакрилонитрилом на свойства получаемого углеродного материала, что проявляется в понижении действительной плотности, повышении статической прочности и возрастании степени изотропности кокса. Описанные изменения свойств углеродного материала может быть связано с привнесением в коксующуюся систему мелкодисперсной добавки, препятствующей росту кристаллов мезофазы и способствующей формированию изотропной структуры кокса, обуславливающей его низкую графитируемость и повышенную прочность [7, 8].

Заключение. Совместное коксование полиакрилонитрила и остаточного нефтяного и угольного сырья приводит к повышению степени изотропности структуры и значительному увеличению прочности получаемых коксов, что позволяет рассматривать данный способ получения изотропных коксов повышенной прочности как один из возможных для производства наполнителя для конструкционного графита [9, 10].

Список литературы

1. Moskalev, I.V. Formation of Isotropic Coke Microstructure. 1. Production of Isotropic Coke from Mixtures of the Anthracene Fraction and Coal Pitch / I.V. Moskalev, D.M. Kiselkov, A.L. Abaturov // Coke and Chemistry. – 2020. – Vol. 63. – № 2. – P. 481–494. – DOI: 10.3103/S1068364X20100038.
2. Gurovich, B.A. Fractographic studies and tensile strength of MPG-6 graphite based on uncalcined coke, neutron-irradiated at a high temperature / B.A. Gurovich, D.A. Kuleshov, D.A. Maltsev, N.V. Eliseev // Nuclear materials and energy. – 2023. – Vol. 35. – № June. – DOI:10.1016/j.nme.2023.101453.
3. Nazarenko, M.Yu. Production of Isotropic Coke from Shale Tar at Various Parameters of the Delayed Coking Process. – 2021. – Vol. 6. – № 34. – P. 22173-22179. – DOI: 10.1021/acsomega.1c02842.
4. ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. Способ получения изотропного кокса. Заявка на патент РФ № 2025137263. Дата регистрации 22.12.2025.
5. Ahmad R. Synergistic mechanochemical and thermal treatment for enhancing the structure and textural properties of petroleum coke-derived carbon materials / R. Ahmad, S. Kaushal [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2026. – Vol. 162. – № February. – DOI:10.1016/j.diamond.2026.113318.
6. Liu, J. Effect of raw material composition on the structure of needle coke / J. Liu, X. Shi [et al.] // Journal of Fuel Chemistry and Technology. – 2021. – Vol. 49. – № 4. – P. 546-553. – DOI: 10.1016/S1872-5813(21)60026-9.
7. Лаврова А.С. Коксование композиционного нефтяного остаточного сырья. / А.С. Лаврова, А.Н. Нечаев, В.В. Васильев [и др.] // Кокс и Химия. –2021. – №2. – С. 29–33.
8. Ginsparg, A.R. Characterization of thermally heat-treated polyacrylonitrile carbon fibers / A.R. Ginsparg, J.L. Watts [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2025. – Vol. 159. – № November. – DOI: 10.1016/j.diamond.2025.112875.surfa.2024.134971.
9. Zhao, L. A review of the coefficient of thermal expansion and thermal conductivity of graphite / L. Zhao, J. Tang, M. Zhou, K. Shen // New Carbon Materials. – 2022. – Vol. 37. – №3. – P. 544-555. – DOI: 10.1016/S1872-5805(22)60603-6.
10. Tan, J. Enhanced self-sintering mechanical strength of carbon blocks via removal of light molecular-weight compound in green petroleum coke / J. Tan, P. Liu [et al.] // Fuel. – 2023. – Vol. 343. – № July. – DOI:10.1016/j.fuel.2023.127912.

УДК 665.766.4:004.942

ПОИСК ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЗЛА ПЕРЕРАБОТКИ ФЕНОЛЬНОЙ СМОЛЫ КУМОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПОТОКОВ

Гринвальд Д.Е.
инженер 1 категории,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
НЦ «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербург, Россия Федерация, Grinvald_DE@pers.spmi.ru

Научный руководитель: Габдулхаков Р.Р.
к.т.н., ведущий научный сотрудник,
Санкт-Петербургский горный университет императрица Екатерины II,
НЦ «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается исследование путей оптимизации и модернизации узла переработки фенольной смолы существующего кумольного производства с целью улучшения качества получаемых продуктов, а также наращивания производственных мощностей.

Ключевые слова: Фенольная смола, фенол, кумольный процесс, модернизация, оптимизация, Aspen HYSYS, модель.

Введение. Современное состояние отечественного производства фенола и ацетона кумольным методом [1, 2] характеризуется ежегодным выпуском около 260 тыс. тонн фенола и 190 тыс. тонн ацетона [3]. Значительная часть производственных мощностей эксплуатируется более полувека. В процессе длительной эксплуатации под влиянием ужесточения природоохранных норм, трансформации экономических условий и развития технических подходов возникает объективная потребность в оптимизации и модернизации технологических схем. Целями таких преобразований выступают приведение процесса в соответствие с актуальными требованиями, повышение качества целевой продукции, а также увеличение производственной мощности.

Хотя кумольный метод получения фенола и ацетона известен более 80 лет и детально описан в научно-технической литературе [4, 5], проблемы, возникающие на конкретных предприятиях, нередко имеют специфический характер, обусловленный особенностями аппаратурно-технологического оформления. В связи с этим требуется разработка специализированных решений, учитывающих индивидуальные условия эксплуатации.

Ключевой целью данной работы является разработка научно-технических и конструкционных решений для повышения эффективности текущей работы узла переработки фенольной смолы кумольного производств на действующем предприятии.

Методы. В качестве лабораторных методов определения состава сырья и продуктов использовалась газовая хроматография, а также газовая хромато-масс-спектрометрия [6, 7]. Физико-химические свойства, такие как плотность, вязкость, содержание серы и фракционный были определены гостированными методиками, а также с использованием специализированного оборудования. Для построения компьютерной модели использовалась программа Aspen HYSYS с применением в качестве модели активности пакета NRTL. Эмпирические данные по определённым компонентам и их взаимодействия были взяты на основе научно-справочной информации и базы данных Aspen HYSYS.

Построение модели основывалось на регламентных данных предприятия, включая характеристики материальных потоков, технологические режимы, также конструкционные параметры ректификационных колонн и аппаратного оформления.

Исследование по оптимизации работы колонны разделения фенольной смолы и внедрению нового технологического оформления проводилось с учётом лимитирующих ограничений, связанных с настоящими технологическими возможностями предприятия, выявленными в результате проведения опытно промышленного пробега.

Результаты и их обсуждение. На основании разработанной модели узла в среде Aspen HYSYS (рисунок 1), была проведёна его верификация на соответствие проектным данным. Далее был проведён расчёт его функционирования в условиях повышенной относительно проектной нагрузки, исследование работы при различных технологических режимах и влияние состава сырья. На основе полученных результатов проведено дальнейшее рассмотрение различных вариантов технологических решений с целью определения наиболее эффективного способа повышения степени очистки получаемых продуктов.

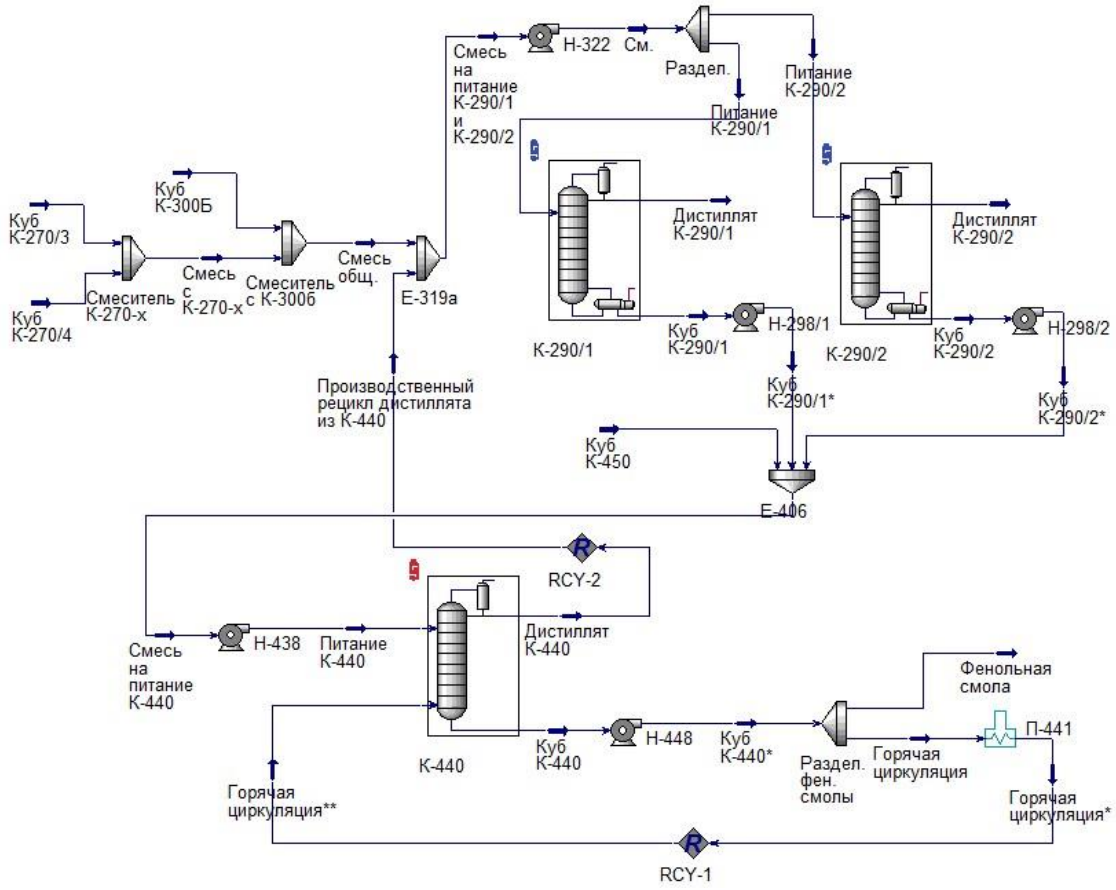


Рис. 1. Производственная технологическая схема узла очистки смол фенольной в программе Aspen HYSYS (*составлено авторами*)

В рамках проведённого исследования выполнены следующие основные задачи:

1. С применением методов газовой хроматографии на основании изучения органического состава и физико-химических свойств сырья и материальных потоков установлены отклонения компонентного состава от регламентированных значений. Установлено повышенное содержание тяжёлых примесей в дистиллятом потоке, таких как ацетофенон и диметилфенилкарбинол, а также избыточная концентрация фенола в смоле фенольной. Выявлены причины возникновения указанных загрязнений и их влияние на эффективность технологического процесса.

2. На основе исследования реальных смесей предприятия и методов моделирования проведён анализ возможных сценариев модернизации ректификационной колонны узла переработки фенольной смолы. Рассмотрены различные варианты оптимизации технологических параметров как существующей колонны, так и технологической схемы в целом, включая варианты с введением в схему дополнительного ректификационного оборудования.

Заключение. Реализованная методология, основанная на интеграции экспериментальных данных лабораторного анализа физико-химических свойств и углеводородного состава основных потоков с результатами компьютерного моделирования в среде Aspen HYSYS, позволила определить наиболее действенные способы повышения показателей эффективности узла переработки фенольной смолы. Показано снижение массовой доли тяжёлых примесей (ацетофенона и диметилфенилкарбинола) в дистилляте с практических 40% до 10% масс. Содержание фенола в кубовом продукте сокращено с проектных 4% и фактических 14% до 3% масс. Достигнуто увеличение производительности узла по исходному сырью более чем в 2 раза – с 4191,4 кг/ч до 10000 кг/ч.

Список литературы

1. Srivastava, P. Compact process for cumene manufacture: Synthesis, design and control / P. Srivastava, A. Gupta, N. Kaistha // Chemical Engineering Research and Design. – 2023. – Vol. 190. – P. 220-232. – DOI 10.1016/j.cherd.2022.12.026. – EDN HHWZQU.
2. Development of the cumene oxidation process: Rigorous design, optimization, and control / Sh.J. Shen, An.H. Tseng, Ch.Ch. Shi, B.Y. Yu // Chemical Engineering Research and Design. – 2023. – Vol. 200. – P. 602-614. – DOI 10.1016/j.cherd.2023.11.025. – EDN PADIIG.
3. Ананьева Е.А., Егорова Е.В., Ларин Л.В. Современное состояние и перспективы развития процессов получения фенола. Обзор рынка и современное состояние процессов получения фенола // «Вестник МИТХТ». 2007. Т. 2, № 2. С. 27–43. – EDN JSIHZH.
4. Закошанский, В.М. Альтернативные технологии получения фенола и ацетона / В.М. Закошанский // Российский химический журнал – 2008. – Т. 52, № 4. – С. 53 – 71. – EDN JTFELV.
5. Закошанский В.М. Кумольный процесс получения фенола-ацетона // Нефтехимия. 2007. Т. 47, № 4. С. 301–313. – EDN IAQRKX
6. Патент № 2783483 C1 Российская Федерация, МПК G01N 30/06. Способ идентификации полярных соединений нефтепродуктов : № 2022103284 : заявл. 10.02.2022 : опубл. 14.11.2022 / И.И. Ефимов, В.Г. Поваров, В.А. Рудко ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – EDN SMHBAY.
7. Zhang, H. GC–MS and ESI FT-ICR MS characterization on two type crude oils from the Dongying depression / H. Zhang, S. Li // Fuel. – 2023. – Vol. 333. – P. 126408. – DOI 10.1016/j.fuel.2022.126408. – EDN NDQFAL.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ СПЕКА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В ХОДЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СПЕКАНИЯ ФГ С СЕРНИСТЫМ КОКСОМ, СОЛЯНОЙ КИСЛОТОЙ

Зайцев И.В.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, ignatijzajcev@gmail.com

Научный руководитель: Зубкова О.С.
кандидат тех. наук, старший научный сотрудник НЦ «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В настоящей работе представлены данные, полученные в ходе обработки спека раствором соляной кислоты концентрацией 7,7 моль-экв/л, образованного высокотемпературным спеканием фосфогипса с сернистым коксом. В работе предложен способ перевода сульфид-ионов и оксидов кальция и стронция из твердой фазы в жидкую в виде хлорид-анионов с помощью соляной кислоты с целью дальнейшего выделения соединений стронция.

Ключевые слова: стронций, фосфогипс, утилизация, кокс, извлечение.

Введение. Проблема утилизации масштабных отходов химической промышленности, в частности фосфогипса (ФГ), сохраняет высокую актуальность как в глобальном масштабе, так и для Российской Федерации [1]. Основная сложность связана с необходимостью изъятия значительных земельных ресурсов под размещение данных отходов. Фосфогипс представляет собой преимущественно гипс, содержащий широкий спектр примесей, включая соединения Sr, Ce, Ti, Fe, Si, а также редкоземельных металлов [2–4]. Указанные металлы присутствуют главным образом в форме сульфатных соединений.

В современной России добыча стронция полностью прекращена, несмотря на наличие достаточных запасов минерального сырья для его производства. В настоящее время практически весь объем потребляемого стронция импортируется из Китая. Возобновление собственного производства стронция является важной государственной задачей, поскольку данный элемент находит широкое применение в различных отраслях: он используется для нейтрализации вредного излучения электронно-лучевых трубок, входит в состав буровых растворов, применяется при производстве недорогих керамических ферритовых магнитов, а также в пиротехнических составах [5–7].

Существующие технологии переработки фосфогипса направлены на получение концентратов редкоземельных металлов и стронция и основаны преимущественно на выщелачивании серной или азотной кислотами, а также на карбонизации карбонатом натрия [8–10]. Однако поведение стронция в условиях высокотемпературного восстановления углеродом (коксом) до настоящего времени не исследовано.

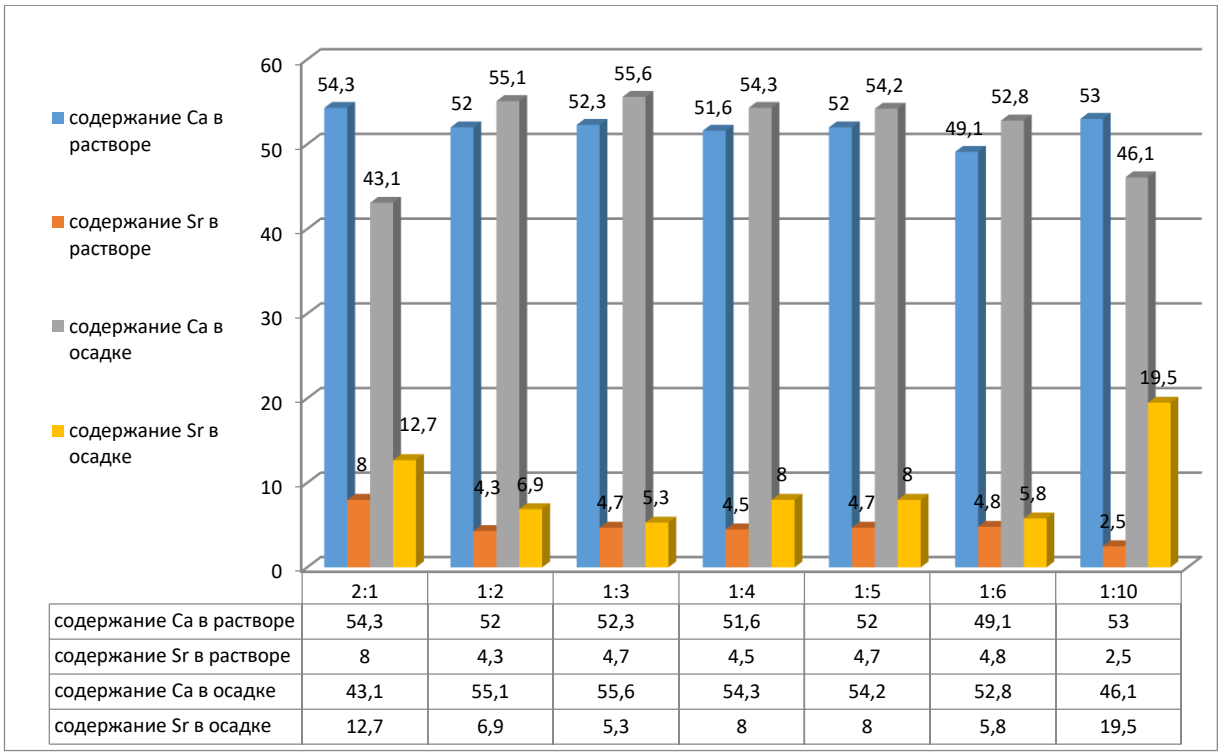
Материалы и методы исследования. Для отделения стронция из фосфогипса, ранее был изучен способ термического восстановления фосфогипса кокосом. Кокс использовался сернистый нефтяной с содержанием серы 2,9%. После спекания полученный спек подвергся воздействую раствору соляной кислотой с концентрацией $C_N(HCl) = 7{,}7\,\frac{\text{моль}-\text{экв}}{\text{л}}$.

- Постоянными параметрами является: концентрация $C_N(HCl) = 7{,}7\,\frac{\text{моль}-\text{экв}}{\text{л}}$.

- Переменными параметрами является: весовой состав шихты (1:2; 1:3; 1:4; 1:5; 1:6, 2:1, 1:10).

Результаты и их обсуждение. В результате восстановления ФГ коксом при температуре 1200 °С образуются спек содержащий сульфиды и оксиды Sr и Ca (SrS, CaS, (Ca,Sr)O), а также не прореагировавший $(Ca,Sr)SO_4$.

Для анализа результатов второго эксперимента были выполнены с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра PANalytical Epsilon 3. Для анализа проб использовался программный модуль Omnian. По результатам этих измерений были составлены рис. 1.



	2:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:10
содержание Ca в растворе	54,3	52	52,3	51,6	52	49,1	53
содержание Sr в растворе	8	4,3	4,7	4,5	4,7	4,8	2,5
содержание Ca в осадке	43,1	55,1	55,6	54,3	54,2	52,8	46,1
содержание Sr в осадке	12,7	6,9	5,3	8	8	5,8	19,5

Рис. 1. Диаграмма состава раствора и осадка после обработки HCl

Опираясь, на исследования можно сделать вывод, что лучше всего стронций перешел в раствор (8 масс %) в шихте с массовым соотношением кокса и ФГ 2:1. Больше всего стронция (19,5 масс %) осталось в осадке после обработки соляной кислоты шихты с массовым соотношением кокса и ФГ 1:10.

Заключение. Для эффективного отделения стронция из фосфогипса методом термического восстановления с последующим кислотным выщелачиванием наиболее перспективным является соотношение кокс : ФГ = 2 : 1. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию температурного режима, с помощью добавления катализаторов, а также на изучение влияния других параметров на степень извлечения стронция.

Список литературы

1. Недбаев И.С. Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса / И.С. Недбаев, Н.В. Цывкунова, Е.Ю. Елсукова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. – 14. – № 4

2. Kapustin F. Composition, Properties and Using Fields of Prod-uct of Phosphogypsum Recycling / F. Kapustin, N. Mityushov, S. Bednyagin // KnE Materials Science. – 2020. – Vol. 6. – № 1. – P. 344-351. – DOI: 10.18502/kms.v6i1.8060

3. Jia W. Research advances in phosphogypsum flotation purification: Current status and prospects / W. Jia, J. Li, C. Shen. // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 354. – P. 129244. – DOI: 10.1016/j.seppur.2024.129244

4. Pyagai I. Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum. Materials / I. Pyagai, O. Zubkova, R. Babykin, M. Toropchina, R. Fediuk, – 2022. – Vol. 15, – Iss. 12. – Art. 4335. DOI: org/10.3390/ma15124335.

5. Ma D. Copper slag assisted coke reduction of phosphogypsum for sulphur dioxide preparation / D. Ma, Q. Wang // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 65. – P. 43-53. – DOI: 10.1016/j.cjche.2023.08.015

6. Wang J. Utilization effects and environmental risks of phosphogypsum in agriculture: A review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 276. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123337.

7. Литвинова Т.Е. Химически осажденный фосфомел ($CaCO_3$) как полезный продукт утилизации фосфогипса / Т.Е. Литвинова, Д.В. Сучков, С.А. Герасёв // Управление техносферой: электрон, 2023. – Т. – 6, вып. – 3. – С. 435–450. DOI: 10.34828/UdSU.2023.70.83.010.

8. Черемисина О.В. Попутное извлечение тяжёлых редкоземельных металлов при переработке фосфатного сырья / О.В. Черемисина, В.В. Сергеев, А.Т. Фёдоров, Е.С. Лукьянцева // Обогащение руд. – 2019. – № 5. – С. 29–35. DOI: 10.17580/or.2019.05.06.

9. Патент № 833475 СССР, МПК C01B 17/00. Способ получения сульфида стронция : № 2737705/23-26 : заявл. 06.03.79 ; опубл. 30.05.81 / Кошкарова М.Е., Карапетьянц В.Н., Пушкарев Ф.Д., Гимаев Р.Н., Кошкаров В.Я.; заявитель «Уфимский нефтяной институт». – 2 с.

10. Литвинова Т.Е. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса / Т.Е. Литвинова, Д.В. Сучков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022.– № 6–1. – С. 331–348. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_331.

КЛЮЧЕВЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦЕОЛИТОВ

Здрецов И.М.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, iv.zdretsow@yandex.ru

Научный руководитель: Герасимов А.М.
кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Разработка физически корректной кинетической модели кристаллизации цеолитов уже долгое время остаётся нерешённой задачей. Для того чтобы найти способы её решения мы выполнили литературный обзор, где систематизировали и скрупулёзно рассмотрели все существующие уравнения и их выводы. В результате было выявлено две ключевые задачи и пять перспективных методологических подхода для моделирования кинетики кристаллизации цеолитов. Эти выводы могут стать опорой для будущих исследований в данной предметной области и обеспечить однородность накопляемых в литературе экспериментальных данных.

Ключевые слова: Цеолиты, нуклеация, рост кристаллов, кристаллизация, кинетика, математическое моделирование.

Введение. Общая физически корректная кинетическая модель кристаллизации цеолитов необходима из-за её фундаментальной и прикладной ценности. Она должна быть выведена на основе механизма реакции, составленного исходя из представлений о сути процесса. Эти представления была сформулированы в знаковом обзоре Канди и Кокса и заключаются в образовании геля и его упорядочивании за счёт обратимой поликонденсации вокруг катионов металла или органического структурообразующего агента:

$$\equiv \mathrm{T} - \mathrm{O}^{-} + \mathrm{HO} - \mathrm{T} \equiv \rightleftarrows \equiv \mathrm{T} - \mathrm{O} - \mathrm{T} \equiv + \mathrm{OH}^{-}, \quad (1)$$

$$\equiv \mathrm{T} - \mathrm{OH} + \mathrm{HO} - \mathrm{T} \equiv \rightleftarrows \equiv \mathrm{T} - \mathrm{O} - \mathrm{T} \equiv + \mathrm{H_2O}, \quad (2)$$

где T – тетраэдрический атом [1]. Несмотря на простоту идеи она до сих пор не была формализована ввиду несовершенства методологических подходов для описания подобных реакций. Вместе с тем существует множество моделей, полностью или частично описывающих кинетическую кривую кристаллизации цеолитов, но не опирающихся на физически корректный механизм. Поэтому мы выполнили литературный обзор, нацеленный на систематизацию и подробное рассмотрение существующих теорий, а также выявление ключевых задач и перспективных методологических подходов для изучения кинетики кристаллизации цеолитов.

Методы. В литературном обзоре использовались статьи из рецензируемых журналов, входящих в международные наукометрические базы данных. Выводы всех уравнений были самостоятельно воспроизведены для проверки корректности математических операций.

Результаты. Все кинетические модели кристаллизации цеолитов были разбиты на несколько групп: уравнение Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова, уравнения на основе механизмов с участием условных частиц, модели с неограниченным ростом и эмпирические уравнения.

Уравнение Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова имеет вид

$$\alpha = 1 - \exp(-kt^n), \tag{3}$$

где α – степень превращения; t – время; k, n – коэффициенты [2]. Теория Пелленса и теория многоступенчатой нуклеации Алнатта и Джейкобса допускают, что n положительно кратно 1/2 [3, 4]. Тем не менее, экспериментально полученные значения зачастую не удовлетворяют этому условию [5–7].

Среди уравнений на основе механизмов с участием условных частиц наиболее приближенным к корректному описанию сути процесса является модель Дэвиса и др., представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений [8]. Наиболее простой является модель Финке-Ватцки:

$$\alpha = 1 - \frac{k_1 + k_2'}{k_2' + k_1 \exp[(k_1 + k_2')t]}, \tag{4}$$

где k_1, k_2' – коэффициенты [9].

Если предыдущие модели описывали сигмоидную кинетическую кривую, то модели с неограниченным ростом пригодны только для аппроксимации начального участка, так как их вывод предполагает постоянную концентрацию мономеров в растворе. К этому типу относится уравнение Варживоды-Томпсона:

$$\alpha = \frac{a}{3}\left(\exp(bt) + 2\exp\left(-\frac{bt}{2}\right)\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}bt\right) - 3\right), \tag{5}$$

где a, b – коэффициенты [10].

Примером чисто эмпирической модели является формула Ху и Ли, выраженная через мольные отношения компонентов реакционной смеси, состав которой выражен в оксидной форме:

$$R_\text{n} = k_\text{n}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)^a(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)^b(\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})^c, \tag{6}$$

где R_n – скорость нуклеации, определяемая как обратное время индукционного периода; k_n, a, b, c – эмпирические коэффициенты [11].

Общим для всех уравнений является то, что коэффициенты проявляют зависимость от концентраций реагентов. Недостатками работ в данной области является отсутствие экспериментально определённых скоростей нуклеации и роста для проверки значений коэффициентов на соответствие их физическому смыслу, а также игнорирование погрешностей эксперимента [12–14].

Обсуждение. Уравнения Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова и выведенные на основе механизмов с участием условных частиц наиболее перспективны, поскольку описывают сигмоидную кривую, но имеют проблемы, связанные с интерпретируемостью коэффициентов и ограниченностью использования, т. е. пригодны только для вычисления времени кристаллизации, но не подходят, например, для конструирования функций нуклеации и роста для составления уравнения популяционного баланса. В связи с этим можно сформулировать две ключевые задачи:

1) химически обосновать статистический подход для описания нуклеации;
2) выявить обоснованный критерий, позволяющий разграничивать нуклеацию и рост.

Кроме того, обзор позволил выявить четыре перспективных методологических подхода:

1) сделать экспериментальное определение скорости нуклеации и роста стандартной частью исследования в данной предметной области;
2) выносить концентрации реагентов из коэффициентов в уравнениях;

3) приводить уравнения, записанные через общепринятую в данной предметной области формулу реакционной смеси;

4) использовать коллекцию моделей, собранную в настоящем исследовании, в качестве аналитического инструментария для выявления общих кинетических закономерностей кристаллизации цеолитов на основе накопленных в литературе данных;

5) приводить погрешности точек кинетической кривой.

Заключение. Выполнение поставленных в настоящем исследовании ключевых для предметной области задач является необходимым условием для вывода физически корректной кинетической модели кристаллизации цеолитов. Выявленные методологические подходы могут стать полезными инструментами для моделирования, а также обеспечить однородность накопляемых в литературе данных для их последующего анализа.

Благодарности: *авторы благодарят исследователей, любезно предоставивших полные тексты своих статей.*

Список литературы

1. Cundy C.S., Cox P.A. The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors, intermediates and reaction mechanism // Microporous and mesoporous materials. – 2005. – V. 82. – No. 1-2. – P. 1-78. – DOI: 10.1016/j.micromeso.2005.02.016.

2. Колмогоров А.Н. К статистической теории кристаллизации металлов // Известия Академии наук СССР. Серия математическая. – 1937. – Т. 1. – № 3. – С. 355–359.

3. Pellens N. et al. A zeolite crystallisation model confirmed by in situ observation // Faraday Discussions. – 2022. – V. 235. – P. 162-182. – DOI: 10.1039/D1FD00093D.

4. Allnatt A.R., Jacobs P.W.M. Theory of nucleation in solid state reactions // Canadian Journal of Chemistry. – 1968. – V. 46. – P. 111-116. – DOI: 10.1139/v68-021.

5. Corregidor P.F., Acosta D.E., Destéfanis H.A. Kinetic Study of Seed-Assisted Crystallization of ZSM-5 Zeolite in an OSDA-Free System Using a Natural Aluminosilicate as Starting Source // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2018. – V. 57. – No. 41. – P. 13713–13720. – DOI: 10.1021/acs.iecr.8b03487.

6. Nakhaei Pour A., Mohammadi A. Effects of Synthesis Parameters on Organic Template-Free Preparation of Zeolite Y // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. – 2021. – V. 31. – P. 2501–2510. – DOI: 10.1007/s10904-021-01926-1.

7. Chen Y.-H., Han D.-M., Zhang Q. Seed-induced synthesis of hierarchical architectures of ZSM-5 nanocrystalline aggregates by the solid state crystallization // Advanced Powder Technology. – 2022. – V. 33. – No. 8. – P. 103666. – DOI: 10.1016/j.apt.2022.103666.

8. Davis T.M. et al. Mechanistic principles of nanoparticle evolution to zeolite crystals // Nature Materials. – 2006. – V. 5. – P. 400-408. – DOI: 10.1038/nmat1636.

9. Finney E.E., Finke R.G. Is there a minimal chemical mechanism underlying classical avrami-Erofe'ev treatments of phase-transformation kinetic data // Chemistry of Materials. – 2009. – V. 21. – P. 4692-4705. – DOI: 10.1021/cm9018716.

10. Warzywoda J., Thompson R.W. Analysis of zeolite crystallization with autocatalytic nucleation // Zeolites. – 1989. – V. 9. – P. 341-345. – DOI: 10.1016/0144-2449(89)90082-1.

11. Hu H.C., Lee T.Y. Synthesis kinetics of zeolite A // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1990. – V. 29. – P. 749-754. – DOI: 10.1021/ie00101a007.

12. Wu H. et al. Facile active gel–enhanced synthesis of molecular-sieving membranes with record-breaking performance // Science Advances. – 2026. – V. 12. – No. 1. – P. eadz9934. – DOI: 10.1126/sciadv.adz9934.

13. Zapelini I.W., de Paula G.M., Cardoso D. Crystallization kinetics as a tool to fine-tune the catalytic activity of Na-LTA zeolite precursors in the transesterification of glycerol to glycerol carbonate // Catalysis Today. – 2025. – V. 444. – P. 115013. – DOI: 10.1016/j.cattod.2024.115013.

14. Liu W. et al. Seed-assisted synthesis route for hierarchical EUO zeolite and its catalytic performance in m-xylene isomerization // Materials Today Sustainability. – 2024. – V. 25. – P. 100684. – DOI: 10.1016/j.mtsust.2024.100684.

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В НЕФТЯНОМ И БИОДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДЕПРЕССОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩИМИ ПРИСАДКАМИ

Кузьмин К.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, kuzmin.ka01@gmail.com

Научный руководитель: Рудко В.А.
к.т.н., исполнительный директор НЦ «Переработки ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследовано комбинированное воздействие композиционной депрессорной присадки (на основе сополимеров малеинового ангидрида с α-олефинами и этилена с винилацетатом) и биодобавки (смесь этилолеата и этилпальмитата) на низкотемпературные характеристики дизельного топлива. Результаты показали, что эффективность обусловлена синергетическим взаимодействием компонентов: насыщенные эфиры (этилпальмитат) служат центрами кристаллизации, снижая размер образующихся парафиновых кристаллов, а ненасыщенные эфиры (этилолеат) адсорбируются на их поверхности, препятствуя коагуляции. Совместное применение присадки и биодобавки, содержащей от 18 до 25 мас.% этилпальмитата, позволяет снизить предельную температуру фильтруемости топлива до –24 °С. Полученные данные подтверждают перспективность использования биодобавок для создания дизельных топлив с улучшенными низкотемпературными свойствами.

Ключевые слова: дизельное топливо, биодобавки, депрессорные присадки, низкотемпературные свойства, кристаллизация парафинов, этилпальмитат, этилолеат.

Введение. Актуальность работы обусловлена сохраняющейся значимой ролью дизельного топлива в мировой энергетике и на транспорте, особенно в условиях холодного климата [1, 2]. Ключевой проблемой эксплуатации является кристаллизация н-парафинов при понижении температуры, приводящая к ухудшению фильтруемости и текучести топлива [3, 4]. Традиционные методы улучшения низкотемпературных свойств, такие как депарафинизация и компаундирование, энергоёмки и могут снижать качество топлива. В связи с этим применение депрессорных присадок (ДП) остаётся наиболее эффективным и экономичным решением [5, 6]. При этом их эффективность может быть существенно повышена за счёт синергетического действия с биодобавками на основе эфиров жирных кислот (ЭЖК) [7, 8]. Целью данной работы являлось исследование механизма совместного влияния композиционной депрессорной присадки (на основе сополимеров малеинового ангидрида с α-олефинами и этилена с винилацетатом) и модельной биодобавки: смеси этилпальмитата и этилолеата, на фазообразование и низкотемпературные характеристики дизельного топлива.

Методы. Методология исследования включала определение низкотемпературных свойств по показателю предельной температуры фильтруемости (ПТФ) и анализ морфологии кристаллов парафинов с помощью поляризационно-оптической микроскопии. В качестве базового топлива использовались дизельная фракция гидрокрекинга с высоким содержанием н-парафинов (28,1% масс.). Изучалось влияние состава биодобавки с вариацией содержания этилпальмитата от 5 до 42,4% масс. на эффективность композиционной ДП [9], вводимой в концентрации 1000 ppm.

Результаты. Эффективность действия депрессорной присадки значительно возрастает при совместном введении в топливо с биодобавкой, содержащей насыщенные ЭЖК. Максимальное снижение предельной температуры фильтруемости на 19 °С (до значения -24 °С) было достигнуто при содержании в топливе 23,2% масс. этилпальмитата в составе биодобавки.

Обсуждение. Микроскопический анализ позволил выявить механизм синергетического действия компонентов. Этилпальмитат, обладая высокой температурой плавления, кристаллизуется первым, формируя множество мелких центров нуклеации для н-парафинов. Это приводит к более раннему и равномерному началу кристаллизации, увеличению количества и уменьшению размера образующихся парафиновых кристаллов (средний размер снизился с 8 до 4 мкм). Этилолеат, оставаясь в жидкой фазе в исследуемом температурном диапазоне, адсорбируется на поверхности растущих кристаллов благодаря наличию алкильных групп. Это создаёт стерический и электростатический барьер, эффективно препятствующий коалесценции кристаллов и образованию пространственной сетки, ухудшающей текучесть топлива. Таким образом, насыщенные ЭЖК действуют по нуклеационному механизму, модифицируя процесс кристаллизации, а ненасыщенные ЭЖК – по адсорбционному механизму, стабилизируя образующуюся дисперсную систему. Композиционная ДП, адсорбируясь на увеличенном количестве более мелких кристаллов, эффективнее ингибирует их рост, что в совокупности и приводит к значительному улучшению низкотемпературных свойств топлива [10].

Заключение. Выявленный механизм синергии создает возможности повышения эффективности технологий производства дизельного топлива с улучшенными низкотемпературными свойствами. Дальнейшие исследования будут направлены на термодинамическое моделирование фазового поведения и анализ влияния эфиров жирных кислот на различных спиртах на низкотемпературные характеристики дизельного топлива.

Благодарности: *исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00088, https://rscf.ru/project/25-19-00088/. Автор выражает свою искреннюю благодарность профессору Наталье Константиновне Кондрашевой за ее неоценимую помощь в определении направления исследования.*

Список литературы

1. Burov E.A. и др. Influence of Group Hydrocarbon Composition of Diesel Fuels on Depressant Additive Efficiency // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2020. Т. 56, № 2. С. 149–156.
2. Alves B.F. и др. Composites of EVA and hydrophobically modified PAMAM dendrimer: Effect of composition on crystallization and flow assurance of waxy systems // Fuel. Elsevier Ltd, 2023. Т. 332.
3. Wang L. и др. The effect of ethylene-vinyl acetate copolymer on the formation process of wax crystals and hydrates // Chin. J. Chem. Eng. Elsevier BV, 2024.
4. Pucko I. и др. Effect of polymethacrylate additive functionalization on low-temperature properties of diesel fuel // J. Therm. Anal. Calorim. Springer Science and Business Media B.V., 2024.
5. Камешков А.В., Гайле А.А., Получение дизельных топлив с улучшенными низкотемпературными свойствами (обзор) // Известия СПбГТИ (ТУ). 2015. №29 (55).
6. Iovleva E.L., Borisov A.A., Stepanov P.A. Development of Arctic Diesel Fuel with Optimal Composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing, 2020. Т. 459, № 5.
7. Pucko I., Anelić R., Faraguna F. Methacrylate terpolymers with short-chain comonomers as pour point depressants for diesel fuel and blends with biodiesel // J. Therm. Anal. Calorim. Springer Science and Business Media B.V., 2023. Т. 148, № 23. С. 13363–13373.
8. Cui L. и др. Effects of purified Ginkgo biloba L. leaf extract on the oxidative stability and cold flow properties of biodiesel-diesel blends // Ind. Crops Prod. Elsevier B.V., 2024. Т. 212.
9. Патент РФ №2836130. Депрессорная присадка к дизельному топливу: №2836130 заявл. 10.07.2024, опубл. 11.03.2025: / Кузьмин К.А., Рудко В.А.
10. Kuzmin K.A. и др. The mechanism of joint action of fatty acid esters and a compositional pour point depressant on phase formation in diesel fuel // Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2026. Т. 732. С. 139229.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ КВАРЦЕВОГО КОНЦЕНТРАТА

Мищенко А.В.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s255067@stud.mail.ru

Научный руководитель: Карапетян К.Г.
д.т.н, заведующий кафедрой химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены современные технологические подходы к глубокой очистке кварцевых концентратов. Показана ключевая роль термической обработки для вскрытия газово-жидких и твердых включений. Обоснована необходимость применения рентгенофазового анализа (РФА) для контроля фазовых переходов и оценки эффективности удаления примесей на всех этапах обогащения. Сделан вывод о приоритетности комбинированных термохимических схем для достижения высокой чистоты конечного продукта.

Ключевые слова: высокочистый кварц, термическая обработка, рентгенофазовый анализ (РФА), обогащение, кислотное выщелачивание, фазовые переходы, минеральные включения.

Введение. Производство высокочистых кварцевых концентратов (с содержанием SiO_2 более 99,99%) является критически важным для развития микроэлектроники, фотоэнергетики и производства оптического волокна [1]. Основная технологическая сложность заключается в удалении примесей, находящихся в различных формах: свободные минеральные фазы, твердые и газово-жидкие включения, структурные дефекты [2]. Наибольшие трудности вызывает очистка от включений, не удаляемых механическими методами. Целью работы является исследование эффективности метода термической активации кварцевого сырья, а также определение аналитических возможностей рентгенофазового анализа (РФА) в качестве метода контроля процессов его очистки.

Методы. Теоретическую базу исследования составил анализ современной научно-технической литературы, посвященной вопросам обогащения кварцевых материалов. В работе рассмотрены технологии термической активации [3] и кислотного выщелачивания [4]. Особое внимание уделено оценке потенциала рентгенофазового анализа как метода идентификации полиморфных модификаций диоксида кремния (в частности, α-β перехода и кристаллизации кристобалита), а также определения остаточных минеральных роли примесей [5].

Результаты. Проведенный анализ литературных данных свидетельствует о том, что эффективность удаления примесных элементов в значительной степени обусловлена предварительной структурной активацией материала. Ключевую роль в данном процессе играет термическая обработка. Установлено, что высокотемпературный обжиг в интервалах фазовых переходов кварца (при 573°C, соответствующем α-β переходу, и выше 1050°C, ведущем к образованию кристобалита) индуцирует возникновение термических напряжений и развитие сети микротрещин преимущественно в зонах локализации минеральных включений [6, 7]. Последующее охлаждение приводит к раскрытию газово-жидких вакуолей и делает включения доступными для выщелачивающих реагентов [8]. Применение рентгенофазового анализа на различных этапах обработки позволяет объективно контролировать эти процессы: фиксировать момент фазового перехода, выявлять появление новых фаз (например, при переходе кварца в кристобалит при перекале), а также идентифицировать остаточные примесные минералы, неразличимые при оптическом анализе.

Обсуждение. Проведенный анализ показывает, что не все методы термической обработки равно эффективны для различных типов сырья, однако в рамках данной работы

не ставилась задача сравнительного исследования кварца различного генезиса. Основной акцент сделан на универсальности подхода, сочетающего термоактивацию и последующее выщелачивание. Именно термическая обработка является «узловым» этапом, определяющим эффективность всей дальнейшей химической очистки. Рентгенофазовый анализ, в свою очередь, выступает не просто как метод контроля, а как инструмент технологической минералогии, позволяющий оптимизировать температурные режимы обжига для конкретного типа сырья и предотвратить нежелательные фазовые превращения, снижающие качество концентрата. Комбинирование обжига с ультразвуковым и микроволновым воздействием позволяет дополнительно интенсифицировать процесс вскрытия включений [9, 10].

Заключение. Современные технологии получения высокочистых кварцевых концентратов должны базироваться на комбинированных термохимических схемах, где термическая обработка играет роль ключевого активационного этапа. Обязательным элементом контроля таких процессов является применение рентгенофазового анализа для отслеживания фазовых переходов и полноты удаления примесных минералов. Дальнейшее развитие методов очистки должно быть направлено на совершенствование режимов термообработки и поиск эффективных способов интенсификации выщелачивания.

Список литературы

1. Zhan L., Wang Q., Ku J., Shang H., Shen Z. Purification Technologies for High-Purity Quartz: From Mineralogy to Applications // Separation and Purification Reviews. 2025. Vol. 54. P. 1–18. DOI: 10.1080/15422119.2025.2494076.
2. Pan X., Li S., Li Y., Guo P., Zhao X., Cai Y. Resource, characteristic, purification and application of quartz: A review // Minerals Engineering. 2022. Vol. 183. P. 107600. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107600.
3. Ma Y., Li J., Wu Z., Zhang H., Tan X., Yi Y., Tan Q., Liu Q. Characteristics of high-purity quartz raw materials for crucibles and exploration of key purification technologies // Minerals Engineering. 2025. Vol. 231. P. 109446. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109446.
4. Zhang R., Tang C., Ni W., Yuan J., Zhou Y., Liu X. Research Status and Challenges of High-Purity Quartz Processing Technology from a Mineralogical Perspective in China // Minerals. 2023. Vol. 13(12). P. 1505. DOI: 10.3390/min13121505.
5. Jiao L., Huang Y., Zhang Y., Li S., Liu Y., Wei G., Wei L. Preparation of High-Purity Quartz by Roasting–Water Quenching and Ultrasound-Assisted Acid Leaching Process // Minerals. 2025. Vol. 15. P. 1028. DOI: 10.3390/min15101028.
6. Wang C., Li G., Lin X., Gao T., Pang Z., Sun C., Gao W., Zhang R., Xiao H., Xu Q. Research on the Purification Technology of Quartz from a Mining Area in Jiangxi by Acid Leaching // Minerals. 2025. Vol. 15. P. 1200. DOI: 10.3390/min15111200.
7. Xie Y., Xia M., Yang X., Khan I., Hou Z. Research on 4N8 high-purity quartz purification technology prepared using vein quartz from Pakistan // Minerals. 2024. Vol. 14(10). P. 1049. DOI: 10.3390/min14101049.
8. Liu C., Wang W., Wang H., Zhu C., Ren B. A Review on Removal of Iron Impurities from Quartz Mineral // Minerals. 2023. Vol. 13(9). P. 1128. DOI: 10.3390/min13091128.
9. Song W., Jiang X., Chen C., et al. Purification of quartz via low-temperature microwave chlorinated calcination combined with acid leaching and its mechanism // Silicon. 2023. Vol. 15. P. 971–981. DOI: 10.1007/s12633-022-01749-w.
10. Yu Z., Luo D., Zhao K., Rong K., Deng J., Gao Z. High-purity quartz sand from mineral purification: A review on process, mechanism, and environmental strategies // Minerals Engineering. 2026. Vol. 235. P. 109801. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109801.

УДК 544.478.02

ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ, СТИМУЛИРОВАННАЯ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Поплавский А.В.[1], Чистяков А.В.[2], Есипович А.Л.[3]
[1] инженер-исследователь, Институт органической химии имени Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия; младший научный сотрудник, Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия, aleksanderpoplavskiy@mail.ru
[2] технический директор, ООО «Меридиан Экосистема», Москва, Россия
[3] старший научный сотрудник, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Научный руководитель: Кустов А.Л.
кандидат химических наук, заместитель заведующего кафедрой общей химии, доцент, старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; научный сотрудник, лаборатория №14 «Лаборатория разработки и исследования полифункциональных катализаторов», Институт органической химии имени Н.Д. Зелинского РАН

Аннотация. В работе методом микроволнового пиролиза переработана была биомасса различного происхождения (лигноцеллюлозная биомасса и биомасса микроводорослей). В результате её конверсии были получены твёрдые, жидкие и газообразные продукты, которые охарактеризованы комплексом физико-химических методов. Показано, что углеродные материалы на основе лигноцеллюлозной биомассы обладают лучшими текстурными характеристиками по сравнению с углеродными материалами на основе биомассы микроводорослей. Для решения этого недостатка изучена возможность получения модифицированного азотом углеродного материала методом совместного пиролиза биомассы различного происхождения. На основе полученных углеродных материалов методом пропитки по влагоёмкости получены монометаллические каталитические системы, содержащие железо, никель и медь для гидрирования различных субстратов.

Ключевые слова: Биомасса, лигнин, микроводоросли, углеродные материалы, микроволновый пиролиз, катализаторы, гидрирование.

В настоящее время в связи с изменившимся мировым потреблением энергии, а также истощением запасов ископаемых углеводородов, увеличивается интерес к альтернативным источникам энергии, а также развитию технологий по их переработке.

Возможной альтернативой традиционным энергоносителям, к которым относятся уголь, нефть и газ, является биомасса. Она по элементному составу в основном содержит углерод, водород и кислород. Основными преимуществами биомассы являются большой объём доступных ресурсов и отсутствие влияния на баланс углекислого газа в атмосфере.

Наибольший интерес для переработки представляет собой лигноцеллюлозная биомасса, состоящая из лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы, и её неперерабатываемые отходы. На данный момент только целлюлоза полностью перерабатывается с получением востребованных продуктов, в то время как лигнин является крупнотоннажным отходом деревообрабатывающей промышленности. Кроме того, он является единственным возобновляемым природным полимером, являющимся источником ароматических углеводородов [1]. Однако лишь незначительная часть лигнина на данный момент перерабатывается с получением ценных химических продуктов, а остальная часть

сжигается, что объясняется сложностью «разрушения» полимерно-сшитой устойчивой молекулярной структуры [2].

Ещё одним привлекательным объектом исследования является биомасса микроводорослей, которая обладает высокой скоростью роста в различных средах. В отличие от лигноцеллюлозной биомассы она преимущественно состоит из липидов, углеводов и белков. Наличие последнего компонента обуславливает высокое содержание азота в микроводорослях [3].

Важнейшей задачей, стоящей перед научным сообществом и промышленностью, является создание эффективных подходов по переработке биомассы в энергоносители, а также топливо и ценные химические продукты. В последнее время при разработке различных методов конверсии отдельное внимание уделяется использованию микроволнового излучения (МВИ).

Объектами исследования в данной работе стала лигноцеллюлозная биомасса - скорлупа грецкого ореха, а также биомасса микроводорослей *Chlorella Vulgaris*. Эксперименты по превращению биомассы проводили в среде диоксида углерода и аргона (скорость 10-60 $см^3$ в минуту) на оригинальной лабораторной установке, состоящей из магнетрона, генерирующего бегущую волну с частотой 2,45 ГГц, волновода, кварцевого реактора и камеры поглощения остаточного излучения. Сырьё загружали в кварцевый реактор и смешивали вместе с поглотителем микроволнового излучения (берёзовый активированный уголь, БАУ-А) в массовом соотношении от 1-20% к исходной биомассе, поскольку она обладает низкой способностью к поглощению МВИ.

Газообразный продукт, содержащий углеводороды C_1-C_5, а также водород, моно- и диоксид углерода анализировали в режиме *online* методом газовой хроматографии. В результате СВЧ-пиролиза выход газообразного продукта составляет до 75%. Полученные твёрдые (15-20%) и жидкие продукты (10-30%) были охарактеризованы комплексом физико-химических методов, включающих низкотемпературную адсорбцию азотом, CHNS-анализ, инфракрасную спектроскопию, сканирующую электронную микроскопию с элементным картированием, энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию и газовую хромато-масс-спектрометрию.

При увеличении содержания поглотителя в исходном сырье в случае переработки лигноцеллюлозной биомассы выход жидкого продукта снижается, при это увеличивается выход газообразных продуктов.

Важным направлением является исследование свойств полученных углеродных материалов на основе биомассы и области их применения. Модификация полученного углеродного материала на основе скорлупы грецкого ореха в данной работе осуществлялась с помощью смешивания с N-содержащих прекурсором – биомассой микроводорослей *Chlorella Vulgaris* в различных соотношениях. Грецкий орех был выбран в качестве основы модифицированных углеродных материалов, поскольку углеродные материалы на основе микроводорослей *Chlorella Vulgaris*, полученные методом СВЧ-пиролиза, имеют невысокое значение удельной поверхности = 2 $м^2/г$, что обусловлено отсутствием лигнина в составе. Биоуголь на основе скорлупы грецкого ореха имеет значительно лучшие характеристики удельной поверхности = 344 $м^2/г$ при том же времени переработки. Биомассу микроводорослей смешивали, как непосредственно с исходной биомассой, так и с полученным карбонизированным углеродным материалом на основе скорлупы грецкого ореха в различных массовых соотношениях. Эффективность «внедрения» азота в зависимости от соотношения различной биомассы в структуру углеродного материала исследовали с помощи метода инфракрасной спектроскопии. Микрофотографии полученных материалов показаны на рисунке 1.

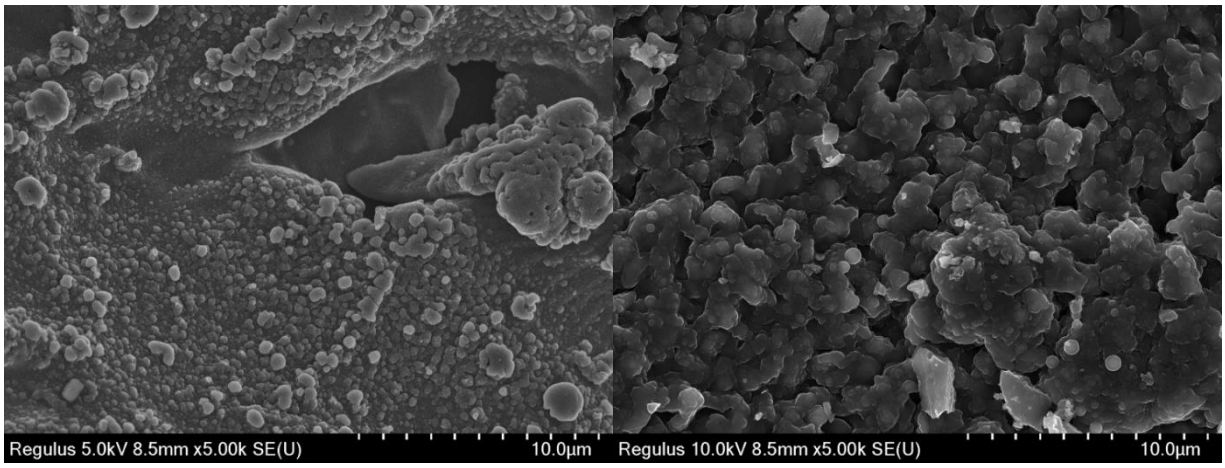


Рис. 1. Микрофотографии углеродных материалов,
полученные методом сканирующей электронной микроскопии,
на основе скорлупы грецкого ореха (слева) и биомассы микроводорослей *Chlorella Vulgaris* (справа)

Допирование углеродных материалов азотом является альтернативным направлением модифицирования углеродных носителей для улучшения свойств монометаллических каталитических систем [4]. На основе полученных углеродных материалов были синтезированы 10%-Fe, Ni и Cu-содержащие каталитические системы для гидрирования различных субстратов. Катализаторы основе получали методом пропитки по влагоёмкости при помощи нитратов соответствующих металлов. Затем материалы высушивали в течение 12 часов при 80 ^{o}C, а после – прокаливали в токе аргона при 500 ^{o}C в течение 5 часов [5].

Список литературы

1. Арапова О.В. и др. Лигнин – возобновляемый ресурс углеводородных продуктов и энергоносителей (обзор) // Нефтехимия, 2020, № 3 (60). С. 251-269. DOI: 10.31857/S0028242120030041.
2. Wang Y. et al. Review of microwave-assisted lignin conversion for renewable fuels and chemicals // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, №119, p. 104-113. DOI:10.1016/j.jaap.2016.03.011.
3. Esipovich A.L. et al. Processing of lipid-enriched microalgae chlorella biomass into biofuels and value-added chemicals // Fuel, 2025, № 381. pp. 133484. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133484.
4. Юрпалова Д.В. и др. Синтез и свойства палладиевых катализаторов, нанесённых на N-модифицированный углеродный материал сибунит, в реакции селективного гидрирования ацетилена // Катализ в промышленности, 2024, № 6 (24), С. 79-89. DOI: 10.18412/1816-0387-2024-6-79-89.
5. Strekalova A.A. et al. Microwave synthesis of Transition Metal (Fe, Co, Ni)-Supported Catalysts for CO2 hydrogenation // Catalysts, 2026, № 16 (1). DOI: 10.3390/catal16010111.

УДК 543.86

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАМЕЩЕННЫХ ТИОФЕНОВ В НЕФТЕПРОДУКТАХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Стебляк В.А.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, v.steblyak@gmail.com

Научный руководитель: Поваров В.Г.
д.х.н., научный руководитель проекта научного центра «Экосистема», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Сернистые соединения являются источниками каталитических ядов для процессов крекинга, а также источниками химического загрязнения атмосферного воздуха. Целью работы является описание методологии и алгоритма идентификации сернистых соединений с использованием коэффициентов распределения, рассчитанных теоретически по модели UNIFAC. Исследованные методом распределительной газовой хроматографии – масс-спектрометрии сернистые соединения нефти показали расхождения полученных экспериментально коэффициентов распределения с теоретическими не более 35%, что в дальнейшем можно использовать в качестве дополнительного идентификационного признака. Обсуждаются перспективы расширения предложенного подхода для идентификации других классов органических соединений.

Ключевые слова: Сернистые соединения, нефтепродукты, UNIFAC, ГХ-МС анализ, идентификация, коэффициент распределения, хромато-распределительный метод.

Введение. Сернистые соединения во все больших количествах встречаются в добываемых в России нефтях. Находясь в продуктах переработки нефти, сераорганические соединения ухудшают ряд их эксплуатационных свойств, вызывают коррозию оборудования переработки и транспорта нефтепродуктов и вызывают смолообразование [1], а также являются источниками каталитических ядов для процессов крекинга [2]. Также при сгорании сераорганических веществ образуется диоксид серы, являющийся загрязняющим веществом и источником химического загрязнения атмосферного воздуха [3-4].

Определение и идентификация сераорганических соединений методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии (ГХ-МС) могут быть затруднены наличием в исследуемых нефтепродуктах сторонних веществ с индексами удерживания, близкими к искомым соединениям. Обычно это неполярные органические соединения, например алифатические и ароматические углеводороды.

Целью исследования является описание метода идентификации сернистых соединений, основанного на использовании хромато-распределительного метода в сочетании с теоретическим расчетом коэффициентов распределения компонентов в системе гексан-ацетонитрил по модели UNIFAC в качестве дополнительного идентификационного признака.

Методы. В работе для определения сераорганических веществ используется хромато-распределительный метод. Метод основан на распределении вещества между двумя ограниченно растворимыми жидкостями (для данной работы – гексан и ацетонитрил). При использовании данного метода в работе в качестве дополнительного идентификационного признака выступает коэффициент распределения данного вещества в системе гексан-ацетонитрил:

$$K_p = \frac{C_{hexane}}{C_{AcCN}} \quad (1)$$

где C_{hexane} – концентрация вещества в фазе, богатой гексаном, моль/л; C_{AcCN} – концентрация вещества в фазе, богатой ацетонитрилом, моль/л.

Коэффициенты распределения веществ могут быть определены теоретически с использованием групповых моделей реальных растворов, например UNIFAC. Алгоритм расчета коэффициентов активности описан в литературе [5-6].

В состоянии термодинамического равновесия химические потенциалы распределяемого вещества в фазах становятся равными друг другу, что достигается при равенстве активностей веществ:

$$a_1 = a_2 \Rightarrow \gamma_1 X_1 = \gamma_2 X_2 \quad (2)$$

где γ – коэффициент активности; X – мольная доля.

В разбавленных растворах коэффициент активности практически не зависит от концентрации, поэтому будет справедливым выражение, по которому на основе рассчитанных по модели UNIFAC коэффициентов активности рассчитывается коэффициент распределения:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{\gamma_2^{\infty}}{\gamma_1^{\infty}} = K_p^x \quad (3)$$

Полученный коэффициент распределения выражен в мольных долях, но часто на практике используется коэффициент распределения, выраженный через молярные концентрации. Пересчет коэффициента распределения в концентрационный производится по формуле:

$$K_p^C = K_p^x * \left(\frac{V_{m_2}}{V_{m_1}}\right) \quad (4)$$

где $V_{m_{1,2}}$ – молярные объемы фаз.

Экспериментально в хроматографии и ГХ-МС анализе вещества его коэффициент распределения определяется как соотношение площадей пиков, соответствующих данному веществу, в фазах двухкомпонентной системы распределения [7]. Для системы гексан-ацетонитрил будет справедливо выражение:

$$K_{p_{exp}} = \frac{S_{hexane}}{S_{AcCN}} * \alpha \quad (5)$$

где $S_{hexane,AcCN}$ – площади пиков вещества в фазах, богатых гексаном и ацетонитрилом соответственно, у.е.; α – обратное соотношение вводимых объемов в испаритель хроматографа.

Результаты. В работе при помощи распределительной газовой хроматографии – масс-спектрометрии была проведена идентификация ряда сераорганических соединений в нефти. В таблице 1 предоставленные полученные характеристики веществ

Таблица 1

Характеристики идентифицированных сераорганических веществ в нефти

Время выхода, мин.	**Компонент**	S_{hexane}, у. е.	S_{AcCN}, у. е.	$\frac{S_{hexahe}}{S_{AcCN}}$	$K_{p_{exp}}$	$K_{p_{UNIFAC}}$	ΔK_p, %
19.413	Бензо[b]тиофен, 2,5,7-триметил-	91732	33504	2,727	1,208	1,573	24
22.746	Нафто[2,3-b]тиофен	93727	67759	1,383	0,613	0,684	11
24.091	Дибензотиофен, 4-метил	77857	53592	1,453	0,644	0,822	22
24.345	Дибензотиофен, 4-метил	51251	37461	1,368	0,606	0,822	27
25.937	1,7-диметилдибензотиофен	38452	25958	1,481	0,656	0,957	32

Обсуждение. Углеводородная компонента нефтей концентрируется в гексановой фазе, а в ацетонитрильной фазе концентрируются сернистые соединения. Это позволяет провести их первичную идентификацию, для уточнения которой используются коэффициенты распределения.

Отношения площадей пиков следует пересчитать в коэффициенты распределения при помощи параметра α, который высчитывается путем сопоставления измеренных и расчетных коэффициентов распределения нескольких надежно идентифицированных веществ. В нашем случае для ряда метилнафталинов было получено значение $\alpha = 0{,}443$. Для учета особенности метода полученное отношение площадей следует умножить на него.

Сопоставление экспериментальных и теоретических коэффициентов распределения показывает расхождение не более, чем в 32%. В подавляющем большинстве случаев это позволяет исключить все другие варианты веществ со сходными масс-спектрами, поскольку их теоретические коэффициенты распределения различаются в 2-100 раз от экспериментальных.

Заключение. На основании проведенной работы можно сделать следующее заключение: для сернистых соединений расхождение экспериментального и теоретического коэффициентов распределения данного вещества на уровне 40% или меньше, является его дополнительным идентификационным признаком, который может быть использован при ГХ-МС анализе сераорганических соединений. Теоретически возможно использование данного метода для исследования других классов органических соединений.

Список литературы

1. Катасонова О.Н., Савонина Е.Ю., Марютина Т.А. Экстракционные методы выделения серы и ее соединений из нефти и нефтепродуктов (обзор) // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94, вып. 4. С. 411–439. DOI 10.31857/S0044461821040010.
2. Зиннуров, Р.Р. Испытание катализатора Phenom-490 на установке крекинга в ООО «Газпром нефтехим Салават» / Р.Р. Зиннуров, Р.Ф. Губайдуллин, А.А. Недоспасов, Э.А. Титух, А.В. Максимов, Р.З. Буянова, А.В. Семибратченко // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2023. – № 7-8. – С. 76–80.
3. Людчик А.М., Мельник Е.А., Павленко П.Н., Гуляева С.И. Влияние диоксида серы на приземный озон в Беларуси // Природные ресурсы. 2021. № 2. С. 22–29.
4. Натыров А.К., Диёрова М.Х., Холикова С.Н. Влияние сернистых газов на микробиологические процессы в почвах // Сельское хозяйство и экосистемы в современном мире: региональные и межстрановые исследования. 2022. Т. 1, № 1. С. 71–76. DOI: 10.53315/2949-1231-2022-1-1-71-76.
5. Поваров В.Г., Жданова М.А., Исидоров В.А. Расчет коэффициентов распределения органических соединений в системе гексан-ацетонитрил с использованием групповой модели растворов UNIFAC // Вестник СПбГУ, сер. 4, 2003, вып. 4 (№28). С. 75–80.
6. Морачевский А.Г., Смирнова Н.А., Балашова И.М. и др. Термодинамика равновесия жидкость-пар. Л., 1989.
7. Поваров В.Г., Ефимов И.И. Применение модели UNIFAC в расчете физико-химических свойств экотоксикантов для технологических и экоаналитических целей // Записки Горного института. 2023. Т. 260.

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ПОПУТНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Степанов А.Д.
аспирант, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко», Оренбург, Россия, artema437@mail.ru

Научный руководитель: Пояркова Е.В.
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики материалов, конструкций и машин «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко», Оренбург, Россия

Аннотация. Исследована эффективность процесса электрохимического обезвреживания сероводорода в высокоминерализованных (до 150 г/л) попутных водах нефтепромыслов. Предложен метод повышения коррозионной стойкости анодов путем формирования на поверхности железосодержащих электродов активного оксидно-гидроксидного слоя ($FeOOH/Fe_2O_3$). Установлено, что направленная модификация поверхности позволяет интенсифицировать каталитическое окисление сульфид-ионов и снизить скорость анодного растворения материала в агрессивных хлоридных средах. Применение разработанных электродов обеспечивает стабильность работы реакторов в гальваностатическом режиме, сокращение удельных энергозатрат и минимизацию выхода вторичного шлама.

Ключевые слова: сероводород, электрохимическое обезвреживание, железосодержащий анод, высокоминерализованная вода, модификация электродов, попутные воды, сульфид-ионы, защита от коррозии.

Введение. Сероводород (H_2S) является одним из наиболее опасных загрязнителей попутных вод нефтепромыслов: он токсичен, вызывает интенсивную коррозию трубопроводов и оборудования, а его предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет всего 0,008 мг/м³ [1]. Высокое солесодержание (до 200 г/л хлоридов) попутных вод существенно снижает эффективность традиционных методов очистки химических осадителей и биологических систем. Электрохимические методы обладают рядом преимуществ: управляемостью процесса, компактностью установок и отсутствием необходимости введения внешних реагентов [2]. Однако главным ограничением является быстрая пассивация и коррозионное разрушение анодов в агрессивных минерализованных средах. Цель настоящего исследования заключается в повышении эффективности электрохимического обезвреживания сероводорода путём разработки методов модификации железосодержащих анодов.

Методы. В качестве объекта исследования выбран процесс электрохимического обезвреживания сероводорода в модельных высокоминерализованных водах, имитирующих состав попутных нефтепромысловых вод (концентрация NaCl до 150 г/л, содержание H_2S от 50 до 500 мг/л). В роли анодных материалов используются низкоуглеродистая сталь и железосодержащие электроды с легирующими добавками, поверхность которых подвергается целенаправленной модификации – формированию активного оксидно-гидроксидного слоя ($FeOOH/Fe_2O_3$) и нанесению защитных каталитических покрытий. Электрохимическая обработка проводится в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока от 5 до 50 мА/см². Контролируемые параметры: степень удаления сероводорода (иодометрическое титрование), концентрации сульфид- и сульфат-ионов (потенциометрия).

Результаты. Анализ научно-технической и патентной литературы показал, что среди электрохимических методов наибольшее распространение получили электрокоагуляция, прямой электролиз и электроокисление [3]. Установлено, что эффективность прямого анодного окисления сероводорода определяется двумя конкурирующими реакциями:

образованием элементарной серы ($H_2S \rightarrow S + 2H^+ + 2e^-$) и её дальнейшим окислением до сульфатов ($H_2S + 4H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^-$). Анализ литературных источников выявил недостаточную проработанность вопросов долговременной устойчивости анодов именно в высокоминерализованных средах [4, 5]. В ходе серии предварительных экспериментов в гальваностатическом режиме установлено, что формирование на поверхности стальных анодов активного слоя состава $Fe_xO_y(OH)_z$ с толщиной от 2,5 до 4,0 мкм обеспечивает стабильную работу системы в агрессивных хлоридных средах. Сравнительный анализ показал снижения скорости растворения модифицированных электродов в 1,9 ± 0,2 раза относительно необработанных образцов из стали Ст3. При плотности анодного тока 25 мА/см^2 и начальной концентрации сероводорода 300 мг/л достигнута степень обезвреживания 92 % в течение 20 минут электролиза.

Обсуждение. Результаты проведенного исследования подтверждают гипотезу о том, что целенаправленная модификация поверхности железосодержащих анодов является определяющим фактором повышения эффективности электрохимического обезвреживания сероводорода. Формирование активного оксидно-гидроксидного слоя толщиной 2,5–4,0 мкм переводит процесс из режима традиционной электрокоагуляции, сопряженной с избыточным шламообразованием, в режим селективного электроокисления. Полученные данные коррелируют с фундаментальными принципами электрохимического извлечения серы из сульфидсодержащих сред [6], где наличие каталитически активных фаз на поверхности анода способствует снижению перенапряжения реакции. В отличие от стандартных стальных электродов, модифицированная поверхность (магнетит/лепидокрокит) функционирует как стабильная матрица для непрямого окисления сульфид-ионов, что минимизирует пассивацию и обеспечивает стабильность работы системы в гальваностатическом режиме. Это имеет критическое значение для обеспечения промышленной безопасности установок подготовки нефти, эксплуатируемых в условиях агрессивного воздействия сероводорода [7].

Особый научно-практический интерес представляет выявленный эффект снижения удельных энергозатрат при росте минерализации обрабатываемой среды. В условиях экстремально высокого содержания хлоридов (до 200 г/л), характерных для пластовых вод нефтепромыслов, кратное повышение электропроводности раствора позволяет снизить рабочее напряжение на ячейке до минимальных значений (2,5–2,8 В). Данный факт подтверждает современные представления об оптимизации процессов электроокисления высокоминерализованных стоков [8, 9], согласно которым высокая ионная сила раствора из лимитирующего фактора превращается в технологическое преимущество, обеспечивая энергетическую эффективность метода. При этом сформированный защитный слой эффективно противодействует питтинговой коррозии в хлоридных средах, что значительно увеличивает ресурс работы анодных материалов. В перспективе, учитывая успешный мировой опыт внедрения электрохимических модулей в интегрированные системы очистки попутных вод [10], разработанные аноды могут быть использованы в качестве основы для создания отечественных компактных проточных реакторов, способных функционировать в условиях непрерывной эксплуатации на реальных объектах недропользования.

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что направленное формирование функциональных оксидно-гидроксидных структур на поверхности железосодержащих анодов представляет собой эффективное технологическое решение для интенсификации процесса электрохимического обезвреживания сероводорода в высокоминерализованных стоках.

Достигнутые показатели по степени деструкции загрязнителя (до 92%) и коррозионной устойчивости материала находятся в удовлетворительном соответствии с результатами исследований других авторов [6], подтверждая гипотезу о возможности протекания селективного электроокисления сульфид-ионов на каталитически активных оксидных

поверхностях. Установленная корреляция между высокой ионной силой раствора и снижением удельных энергозатрат служит фундаментальной основой для разработки малогабаритных проточных электрохимических реакторов, адаптированных к условиям нефтепромысловой подготовки воды.

В качестве **перспективного направления дальнейших исследований** выделяется прецизионная оптимизация режимов модификации поверхности для обеспечения воспроизводимости свойств при масштабировании технологии. Особое значение приобретает оценка эксплуатационного ресурса разработанных анодов в условиях непрерывного технологического цикла на реальных объектах недропользования.

Список литературы

1. Идентификация и приоритизация источников неприятных запахов в атмосферном воздухе населённых мест на основе метода системного гибридного анализа и нечёткой логики / Н.В. Зайцева, М.А. Патяшина, С.В. Клейн [и др.] // Гигиена и санитария. – 2025. – Т. 104, № 12. – С. 1589–1597. – DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-12-1589-1597.
2. Норина, Н.В. Разработка методов и технических средств нейтрализации серосодержащих соединений / Н.В. Норина, А.Г. Исаевич // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 550–557.
3. Степанов, А.Д. Анализ методов электрохимического обезвреживания сероводорода / А.Д. Степанов, А.В. Симонова, Е.В. Пояркова // Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации : материалы Всероссийской научно-методической конференции, посвящённой 70-летию Оренбургского государственного университета, Оренбург, 17–20 сентября 2025 года. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2025. – С. 244–251.
4. Surface modification of stainless steel to control the thickness and composition of oxidation film for in-situ anodic hydrogen sulfide removal in aqueous media / R. Qi, X. Zhang, A. Wu, K. Sheng, H. Lin // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 389. – Art. 136076. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136076.
5. Sergienko, N. (Electro)catalytic oxidation of sulfide and recovery of elemental sulfur from sulfide-laden streams / N. Sergienko, E. C. Lumbaque, J. Radjenovic // Water Research. – 2023. – Vol. 245. – Art. 120651. – DOI: 10.1016/j.watres.2023.120651.
6. Fornés, J.P. Electrochemical production of colloidal sulphur by oxidation of sulphide ion at lead coated-2- and -3-dimensional rotating cylinder anode surfaces / J.P. Fornés, J.M. Bisang // Electrochimica Acta. – 2017. – Vol. 243. – P. 90–97. – DOI: 10.1016/j.electacta.2017.05.040.
7. Галлямова, Э.И. К вопросу обеспечения промышленной безопасности установок подготовки нефти с содержанием сероводорода / Э.И. Галлямова, Р.Х. Идрисов, Н.Х. Абдрахманов // Нефтегазовое дело. – 2023. – № 2. – С. 6–18.
8. Principles, challenges and prospects for electro-oxidation treatment of oilfield produced water / V. de Aguiar Pedott [и др.] // Journal of Environmental Management. – 2024. – Vol. 370. – Art. 122638. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122638.
9. Al-Ameri, W. Optimization of electro-oxidation and electro-Fenton techniques for the treatment of oilfield produced water / W. Al-Ameri, A. Elhassan, R. Maher // Water and Environment Journal. – 2023. – Vol. 37, № 1. – P. 126–141. – DOI: 10.1111/wej.12823.
10. Implementation of electrochemical treatment unit in an integrated offshore produced water treatment system / E. E. Schneider [и др.] // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2026. – Vol. 23, № 3.

СИНТЕЗ НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ЦЕОЛИТОВ ТИПА А И Х ИЗ ЖИДКОГО СТЕКЛА НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО КРЕМНЕГЕЛЯ

Титова М.Е.
младший научный сотрудник,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, marina-titova-2000@mail.ru

Научный руководитель: Пягай И.Н.
д.т.н., научный руководитель НЦ «Переработки ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе разработана методика синтеза низкомодульных цеолитов типа А (LTA) и Х (FAU) из жидкого стекла, полученного из побочного продукта производства фторида алюминия - кремнегеля. Предварительная кислотная обработка сырья удаляет большую часть примесей фтора и алюминия, тем самым делая сырье пригодным для получения высококачественных цеолитных материалов. Оптимальные условия синтеза обеспечивают формирование кристаллических фаз заданной структуры, подтверждаемой рентгенофазовым и энергодисперсионным рентгеновским анализами, сканирующей электронной микроскопией и методом BET. Полученные цеолиты не уступают по характеристикам аналогам из традиционных кремнийсодержащих источников, при этом снижается их себестоимость за счет утилизации техногенного сырья.

Ключевые слова: техногенное сырье, кремнегель, жидкое стекло, синтетические цеолиты, ионообменная емкость, адсорбенты.

Введение. Синтетические цеолиты представляют собой высокоэффективные алюмосиликатные материалы, широко востребованные в процессах адсорбции, ионного обмена и катализа [1-3], однако их промышленное производство часто ограничено стоимостью исходных реагентов. В связи с этим актуальным направлением современных исследований становится вовлечение в переработку техногенного сырья, что позволяет не только снизить себестоимость продукции, но и решить экологические проблемы утилизации промышленных отходов [4, 5]. В данной работе проблема рассматривается на примере техногенного кремнегеля – побочного продукта производства фторида алюминия, который содержит до 93 масс.% аморфного диоксида кремния, но требует предварительной очистки от примесей фтора и алюминия [6]. Целью исследования стала разработка методики синтеза низкомодульных цеолитов типа А и Х методом гидротермального синтеза с использованием жидкого стекла (раствора силиката натрия), приготовленного на основе очищенного промышленного кремнегеля.

Методы. Свойства исходного сырья исследовали с помощью методов рентгенофазового, энергодисперсионного рентгеновского анализа и инфракрасной спектроскопии. Синтез цеолитов проводили путем смешения алюминатного раствора и раствора силиката натрия, полученного на основе предварительно очищенного от примесей кремнегеля, с последующей кристаллизацией алюмосиликатного геля в гидротермальных условиях. Характеризацию синтезированных образцов осуществляли с помощью рентгенофазового анализа для определения присутствующих фаз, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для изучения морфологии частиц и метода BET для анализа пористой структуры.

Результаты. В результате проведенных исследований удалось установить оптимальные условия синтеза, при которых формируются кристаллические структуры как цеолитов типа А (LTA), так и типа Х (FAU). Показано, что предварительная кислотная очистка кремнегеля эффективно удаляет примесные соединения, делая вторичное сырье пригодным для получения жидкого стекла и качественных цеолитных материалов на его

основе. Изменение состава исходной смеси, условий старения геля и температурных режимов оказало существенное влияние на кристалличность образцов и формирование целевых фаз.

Обсуждение. Исследования показали, что кремнегель, используемый в качестве кремнийсодержащего компонента для синтеза цеолитов, не уступает по эффективности традиционному сырью, при этом значительно уменьшаются энергозатраты на получение жидкого стекла и различных типов цеолитов, а также снижается нагрузка на окружающую среду. Варьирование параметров процесса позволяет целенаправленно получать цеолиты заданной структуры, что расширяет потенциальные сферы применения синтезированных материалов.

Заключение. Для получения цеолитов заданной фазы с высокими адсорбционными свойствами и развитой пористой структурой важным остается определение оптимальных параметров проведения синтеза при использовании альтернативных сырьевых кремнийсодержащих материалов, качество которых может напрямую повлиять на характеристики получаемого продукта. Дальнейшие исследования будут направлены на определение оптимальных условий гранулирования полученных цеолитов и исследование их адсорбционных свойств.

Список литературы

1. Xue Z. et al. Effective removal of Mg^{2+} and Ca^{2+} ions by mesoporous LTA zeolite // Desalination. – 2014. – Vol. 341. – P. 10-18. DOI: 10.1016/j.desal.2014.02.025.
2. Kiwaan H.A. et al. Experimental and electrical studies of Na-X zeolite for the adsorption of different dyes // Journal of Molecular Liquids. – 2021. – Vol. 332. – P. 115877. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115877.
3. Krachuamram S., Chanapattharapol K.C., Kamonsutthipaijit N. Synthesis and characterization of NaX-type zeolites prepared by different silica and alumina sources and their CO_2 adsorption properties // Microporous and Mesoporous Materials. – 2021. – Vol. 310. – P. 110632. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110632.
4. Marinina O. et al. Recycling of coal fly ash as an example of an efficient circular economy: A stakeholder approach // Energies. – 2021. – Vol. 14. – № 12. – P. 3597. DOI: 10.3390/en14123597.
5. Zdretsov I.M., Gerasimov A.M. Green and low-cost synthesis of zeolites from kaolin: a promising technology or a delusion? // Reaction Chemistry & Engineering. – 2024. – Т. 9. – № 8. – С. 1994-2027. DOI: 10.1039/D4RE00115J.
6. Pyagay I. N. et al. Determination of zeolite NaA (LTA) synthesis parameters from technogenic silica gel for water softening // Silicon. – 2024. – Vol. 16. – № 18. – P. 6499-6514. DOI: 10.1007/s12633-024-03177-4.

УДК 665.775.4: 658.567.1

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Чудов М.А.
студент, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Республика Беларусь, u.bylavka@psu.by

Научный руководитель: Булавка Ю.А.
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования переработки нефти и газа, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. В исследовании изучен способ вторичного использования полимеров, полученных в результате переработки ТБО, в производстве битумных материалов для достижения двенадцатой цели устойчивого развития ООН «Ответственное производство и потребление». Определено, что вовлечение полимерных отходов, растворенных в отработанном индустриальном масле, в битумное вяжущее позволяет повысить его теплостойкость и морозоустойчивость, в целом расширяется интервал пластичности битума. Подтверждена потенциальная возможность использования полимерных отходов в производстве битумных материалов для неответственных объектов строительства.

Ключевые слова: устойчивое развитие, полимерный отход, битумный материал.

Введение. Реализация 12 цели устойчивого развития ООН рассматривается как одна из первоочередных для большинства стран [1, 2, 3]. Глобальное производство пластмасс составляют более 410 млн. тонн в год. Около 40 % полимерных отходов подвергается рациональному повторному использованию, а 60% уничтожается путем открытого сжигания, сваливается на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) либо попадает в окружающую среду, нанося ей непоправимый урон [4, 5]. Но вторичные пластмассы можно рассматривать и как ценное сырье, в том числе для производства битумных материалов [6, 7, 8]. Целью данного исследования является поиск рациональных путей использования полимерных отходов для модифицирования свойств битумных материалов.

Методы. Для получения комбинированной добавки использовали полимеры из ТБО, а именно: вспененный полиэтилен; полиэтиленовую пленку; вспененный полипропилен. Получены композиции в соотношении 3,5:10:86,5 соответственно – полимера: отработанного индустриального масла И-20А (пластификатора для растворения полимера): дорожного битума марки БНД 50/70, производства ОАО «Нафтан». Предварительно растворенные в пластификаторе измельченные полимерные отходы смешали с битумным вяжущим и при постоянном перемешивании мешалкой якорного типа подвергали термообработки при температуре 120-130°С в течение 2 часов. Тестирование основных свойств нефтяных битумов осуществляли по таким показателям качества как: температуры размягчения и хрупкости, глубина проникания иглы, растяжимость, адгезия по песчано-гравийной смеси, интервал пластичности и индекс пенетрации, а также стойкость к затвердеванию.

Результаты. Результаты тестирования основных эксплуатационных свойств битумных материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Эксплуатационные свойства битумных материалов

Основные показатели	Фактическое значение БНД 50/70	Композиции 3,5%:10%:86,5% полимера: масла И-20А: битума БНД 50/70		
		вспененный полиэтилен	полиэтиленовая пленка	вспененный полипропилен
Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25°С	48,9	150	158	116
Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С	47	52	48	42
Растяжимость, см, при 25°С	68	67	25	56
Температура хрупкости, °С	-7	-16,5	-13	-8,5
Интервал пластичности	54	54	61	51
Индекс пенетрации	-2,018	2,786	1,851	-1,346
Стойкость к затвердеванию при 163 °С:				
- остаточная пенетрация, %	13	54	56	59
– увеличение температуры размягчения, °С	2	22	13	2

Обсуждение. В результате исследований установлено, что вовлечение полимерных отходов, растворенных в отработанном индустриальном масле, в битумное вяжущее позволяет повысить его теплостойкость (растет температура размягчения (кроме полипропилена)) и морозоустойчивость (снижается температура хрупкости), в целом расширяется интервал пластичности битума. Вместе с тем, существенно ухудшается стойкость к старению (затвердеванию при 163 °С) модифицированных битумов и адгезия по песчано-гравийной смеси. Рост глубины проникания иглы, и как следствие, повышение мягкости модифицированного битума связан с высоким содержанием отработанного индустриального масла (10% масс.).

Заключение. Проведенные исследования потвердели потенциальную возможность вторичного использования полимерных отходов в производстве битумных материалов для неответственных объектов строительства.

Список литературы

1. Завьялов Д.В., Сагинова О.В., Завьялова Н.Б Ответственное потребление: восприятие молодых потребителей // Человеческий капитал и профессиональное образование. 2022. № 4 (42). С. 15-20.
2. Кузнецов Е.А., Сәбит Ш.С., Минжанова Г.М., Хамитова К.К. Оценка эффективности системы управления твердыми бытовыми отходами в Алматы с учетом международного опыта // Гидрометеорология и экология. 2025. № 1 (116). С. 77-90.
3. Таскин Ф.А. Достижение целей устойчивого развития в Германии // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2022. № 10. С. 195-203.
4. Бракк Д.Г. Обеспечение экологической безопасности в аспекте воздействия утилизации пластиковых отходов на здоровье населения и окружающую среду // Экономическая безопасность. 2022. Т. 5. № 2. С. 673-694.
5. Гавриленко В.А. Пластпереработка: состояние и перспективы // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 3 (99). С. 24-28.
6. Булавка Ю.А., Гришанин К.А., Слепенков В.С., Стельмах Е.А. Модифицирование битумных вяжущих отходами нефтехимии // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2023. № 2 (48). С. 75-79. doi.org/10.52928/2070-1616-2023-48-2-75-79.
7. Lebedzeva T.I., Bulauka. Y.A. Polymer-modifier for the road bitumen manufacture of the fourth generation // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, 2020. London .Vol. 2. P.546-552. doi.org/10.1201/9781003014638-10.
8. Булавка Ю.А., Вишнякова. Ю.В., Ляхович В.А., Москаленко А.С. Получение на основе нейтрализованных кислых гудронов нефтехимических предприятий битумных материалов / Ю.А. Булавка, // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 108-111.

Секция 11. МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ВОДИТЕЛЕЙ ПО МАРШРУТАМ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Багиров Т.Р.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, bagirovtimur21@gmail.com

Научный руководитель: Менухова Т.А.
к.т.н., доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения безопасности пассажирских автобусных перевозок. Основная идея заключается в разработке системы, которая устанавливает соответствие между сложностью маршрута и уровнем профессиональной подготовки водителя. В ходе исследования проведен анализ научных подходов, сформирована и обоснована система критериев сложности маршрута, сгруппированных в пять категорий, сформирована система оценки профессиональных навыков водителя. Предложенный подход позволит обоснованно распределять кадровые ресурсы, управлять профессиональным ростом водителей и, как следствие, снизить аварийность на маршрутах.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, безопасность дорожного движения, безопасность перевозок, сложность маршрута, категорирование маршрутов, профессиональная пригодность водителя, профессиональное мастерство водителя.

Введение. Обеспечение безопасности пассажирских перевозок является приоритетной задачей транспортных предприятий. Анализ аварийности показывает, что безопасность движения на маршруте во многом зависит от соответствия опыта водителя дорожным условиям и особенностям маршрута. В настоящее время в СПб ГУП «Пассажиравтотранс» отсутствует единая методика объективной оценки сложности маршрутов и сопоставления её с профессиональными компетенциями водителей. Цель исследования – разработка системы категорирования маршрутов по сложности [1…3] и методики оценки навыков водителей [4] для повышения безопасности перевозок.

Методы. В ходе проведения исследования были применены анализ, синтез, обобщение, метод экспертных оценок, интервьюирование водителей. В качестве материалов использованы научные труды [5…7], данные о маршрутах СПб ГУП «Пассажиравтотранс» и результаты анкетирования водительского состава предприятия и экспертного опроса.

Результаты. Сформирована система из 23 критериев оценки сложности маршрутов, разбитых на 5 групп, учитывающих характеристики маршрута и особенности остановочных пунктов [8], особенности трассы маршрута, условия движения, параметры пассажиропотока [9], класс эксплуатируемых автобусов. Экспертная оценка подтвердила значимость этих критериев, определены весовые коэффициенты. Интегральный показатель позволяет отнести маршрут к одной из четырёх категорий сложности.

Сформирована система из 10 критериев для определения уровня профессионального мастерства водителей. Разработана шкала профессиональных навыков водителей, что обеспечивает соответствие квалификации водителя категории маршрута.

Обсуждение. Предложенный подход объединяет множество критериев [10]. Экспертная оценка позволила установить весовые коэффициенты, отражающие реальную

значимость факторов для безопасности перевозок на автобусных маршрутах городского пассажирского транспорта. Внедрение принципа соответствия маршрута и водителя позволит оптимизировать кадровые ресурсы и снизить аварийность.

Заключение. Итогом исследования стала научно обоснованная система категорирования маршрутов и водительского состава. Её внедрение в систему планирования перевозок автотранспортными предприятиями позволит распределять водителей по маршрутам, выстраивать траектории профессионального развития кадров и снижать аварийность.

Автор выражает благодарность СПб ГУП «Пассажиравтотранс» за предоставленные данные и содействие в проведении исследования.

Список литературы

1. Исследование городских автобусных маршрутов на предмет определения категории условий эксплуатации и категории их сложности / В.В. Курмачев, К.А. Фомин, Д.А. Устьянцев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 6. – С. 71-76. – EDN JJYMUO.

2. Конин И.В. Разработка метода оценки сложности автобусных маршрутов: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Конин Игорь Валентинович. – Москва, 1994. – 24 с. – EDN ZKYSQB.

3. Якунин Н.Н., Минатуллаев Ш.М., Анянова Э.М. Методика оценки сложности междугородных автобусных маршрутов // Инновационная наука. – 2021. – № 7. – С. 61-64. – EDN KSWQMC.

4. Чаловская Е.К., Каверзнева Т.Т. Оценка внимательности водителей пассажирского транспорта // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 287-289. – EDN ZKLIVO.

5. Щеглов В.А. Формирование модели оценки сложности пассажирского маршрута // V международный Балтийский морской форум: материалы форума, Калининград, 21–27 мая 2017 года / Составитель Кострикова Н.А. – Калининград: Обособленное структурное подразделение «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет», 2017. – С. 1186-1192. – EDN YRSRAQ.

6. Постникова А.А. Совершенствование оценки сложности городских автобусных маршрутов // Управление качеством в транспортной и социальной сферах: Сборник научных трудов транспортного факультета по материалам XLI студенческой научной конференции ОГУ, Оренбург, 02–09 апреля 2019 года / Под редакцией В.И. Рассохи. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. – С. 123-128. – EDN IDQDVF.

7. Горбачев С.В., Фаттахова А.Ф. Оценка сложности автобусных городских маршрутов // Совершенствование автотранспортных систем и сервисных технологий: Сборник научных трудов по материалам XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 95-летнему юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Фёдора Николаевича (1923-1996), Саратов, 01–03 ноября 2018 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2018. – С. 122-128. – EDN VZGLOK.

8. Менухова Т.А. Методика определения потенциального пассажиропотока в новых микрорайонах города Санкт-Петербурга после заселения жилых комплексов / Т.А. Менухова, А.А. Сивов, М.В. Богданов // Транспортное дело России. – 2025. – № 3. – С. 67-71. – EDN JGNCFH.

9. Менухова Т.А. Анализ современных решений, используемых при оборудовании остановочных пунктов городского пассажирского транспорта, с учетом общественного мнения / Т.А. Менухова, В.А. Киптева, Т.С. Никитцына // Транспортное дело России. – 2023. – № 2. – С. 108-112. – DOI 10.52375/20728689_2023_2_108. – EDN OTGPYK.

10. Матвеев А.Г. Подход по учету параметров при применении методов выбора альтернатив в условиях неопределенности / А. Г. Матвеев, Т. А. Менухова // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 1-1(80). – С. 119-124. – DOI 10.33979/2073-7432-2023-1(80)-1-119-124. – EDN FJBOSV.

УДК 622.7

СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ КОНУСНОЙ ЭКСЦЕНТРИКОВОЙ ДРОБИЛКИ КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ

Бодров И.Д.
студент механико-машиностроительного факультета,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, johnsteel1800@gmail.com

Научный руководитель: Голиков Н.С.
доцент кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе обозначена актуальность рассматриваемой темы. Произведен сопоставительный обзор публикаций отечественных и зарубежных авторов, посвященных методам профилирования рабочей камеры конусных эксцентриковых дробилок крупного дробления. Публикации классифицированы по факторам, учитываемым авторами при построении контура профиля, и конечным технологическим и технико-эксплуатационным показателям работы дробилки, на которые влияет форма профиля ее рабочей камеры. Дано краткое описание методик профилирования, рассматриваемых в отмеченных публикациях. Сформулированы выводы и тенденции развития методик профилирования.

Ключевые слова: конусная дробилка крупного дробления; профилирование рабочей камеры; математическое моделирование; DEM-моделирование.

Развитие горнодобывающей промышленности, продиктованное необходимостью постоянного наращивания производственных мощностей и снижении затрат при эксплуатации и обслуживании технологических машин, приобретает особое значение начиная со второй половины 20-го века. Это приводит к постоянной необходимости внедрений новых технологий и рационализации производственных процессов внутри отрасли, роль которой в мировой экономике является определяющей. Так, например, на технологический процесс дезинтеграции твердых полезных ископаемых, обращаясь к работам затрагивающим данную тему, затрачивается порядка одной восьмой всей генерируемой на планете энергии, а в самой горнодобывающей отрасли – до 50% и более [1]. При этом КПД процессов дезинтеграции составляет порядка 0,1%. Отсюда становится очевидной необходимость совершенствования существующего оборудования и технологий.

Низкий ресурс футеровок рабочей камеры конусных дробилок, их преждевременный выход из строя, а также высокие затраты на обслуживание этого вида машин и уменьшение коэффициента технического использования в значительной степени определяются формой профиля брони подвижного и неподвижного конусов.

Установлением взаимосвязи между техническими показателями работы дробилки и профилем ее рабочей камеры учёные и исследователи занимались ещё с 50-х годов прошлого века. Однако потребность в максимально комплексном учете влияющих факторов, обусловленная все более широким внедрением автоматизации и цифровизации, и необходимость удовлетворять быстроменяющиеся потребности производства, а также появившиеся в последнее время возможности компьютерного моделирования, позволяющие более полно учитывать свойства дробимой породы и моделировать кинематику движения и взаимодействия отдельных частиц материала, сохраняют актуальность рассматриваемого вопроса.

Предлагаемые к рассмотрению в данной работе методики реализуют комплексный подход к моделированию геометрии рабочей камеры.

Цели и задачи исследования:

1. Определение перечня показателей работы дробилки, зависящих от формы профиля её рабочей камеры.
2. Определение перечня факторов, связанных с геометрией и кинематикой рабочей камеры и влияющих на отмеченные выше.
3. Произвести обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных методикам профилирования рабочей камеры дробилки и учитывающих связь между отмеченными факторы и показателями.

Основой работ, вошедших в данный обзор, является установление эмпирической или теоретической зависимости между геометрическими параметрами рабочей камеры и технико-эксплуатационными показателями работы дробилки (производительностью, линейным износом футеровок, гранулометрическим составом выходного продукта и др.) и решение, как правило, вариационной задачи методом нахождение экстремума функции связи или повариантным перебором её значений. К подобному выводу также приходят труды разных авторов, целью которых является обзор поставленной темы [2].

Так, например, имеются методики, делающие упор на анализ гранулометрического состава продукта [3-5]. В таких математических моделях главное место занимает аналитика качества продукта и его взаимосвязь с геометрическими параметрами камеры дробления. Как правило, в данных работах параметр производительности, общая степень дробления и массовое распределение продукта дробления подвергаются эмпирической аппроксимации с геометрическими параметрами камеры дробления. А нахождение оптимальных параметров введённой зависимости находится либо повариантным перебором выходных значений, либо нахождением экстремума этой самой зависимости математическими методами анализа.

Наряду с вышеописанными, имеют место методики, сосредоточенные на анализе энергетической составляющей процесса дробления [6, 7], в которых устанавливается комбинированная (полуэмпирическая) взаимосвязь между удельной энергоёмкостью (в т.ч. производительностью) и параметрами профиля камеры дробления.

Существует математические модели, построенные вокруг критерия износостойкости и параметра износа броней [8, 9]. Здесь геометрические параметры профиля камеры дробления также поддаются комбинированной взаимосвязи с параметрами линейного износа. Либо производится решение вариационной задачи при наличии сразу нескольких внутренних параметрических условий (так например можно задаваться таким условием, чтобы производительность была неизменной), либо повариантный перебор значений для нахождения оптимальных выходных значений функции.

Последним выделяемым типом математических моделей можно назвать работы с применением DEM-моделирования [10, 11]. Во многом данные исследования повторяют алгоритм работ, основанных на анализе гранулометрических и энергетических параметров. Однако выделяются подобные труды применением метода дискретных элементов, реализованного с помощью компьютерного моделирования, позволяющего анализировать поток сырья, состоящего из тысяч объектов, одновременно проходящих все стадии дробления. Данная технология получила широкое применение при планировании качества выходного продукта.

Заключение. Методики профилирования рабочих камер с каждым годом совершенствуются – учитывают все большее количество факторов и показателей, по которым может быть произведена оптимизация, а также используют более сложный математический аппарат. Начиная с 80-х годов методики профилирования опираются на численное моделирование средствами ЭВМ (электронно-вычислительных машин), а уже начиная ориентировочно с 2010 года – на метод дискретных элементов (DEM-моделирование). Все это позволяет заключить, что развитие методов моделирования со временем будет всё более точно отражать прогнозируемые показатели работы дробилок.

Список литературы

1. Голиков Н.С., Шашурин Н.С., Михалченков Е.В., Крепов К.С., Деревянко А.А., Соколов М.В. Обзор современных систем автоматизированного дистанционного мониторинга износа футеровок горнотранспортных и горно-перерабатывающих машин и оборудования // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2025, 34, – 112-121 с., https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-34-112-121.
2. Ливина К.А., Крепов К.С., Соколов М.В. Разработка математической модели конусной дробилки с целью оценки её технологических и технико-эксплуатационных показателей работы // Материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, Тула, 6-7 ноября 2024 года. Тула: Издательство ТулГУ, 2024, 361 с.
3. Evertsson C.M., Modelling of flow in cone crushers, Minerals Engineering, 1999, 12, 1479-1499, https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00136-3.
4. Evertsson C.M., Cone crusher performance, 2000. – 1 p. – EDN EXXLPL.X
5. Bhadani K., Asbjörnsson G., Hofling K., Hulthén E., Evertsson M., Application of design of experiments (DoE) in evaluating crushing-screening performance for aggregates production, Minerals Engineering, 2024, 209, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108616.
6. Червяков С.Ю., Обоснование конструктивных и режимных параметров энергосберегающих конструкций конусных дробилок. Диссертация на сосискание учёной степени кандидата технических наук. ГОУ ВПО Уральский государственный университет, Екатеринбург, 2004 г. – 176 с.
7. Лагунова Ю.А., Исследование характеристики дробимости горных пород и разработка модели потребления мощности дробилки. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Уральская государственная горно-геологическая академия, Екатеринбург, 1998 г. – 171 с.
8. Шестаков А.М., Профилирование камеры дробления конусных дробилок по критериям износа броней. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. КГРИ (ныне КНУ), Кривой Рог, 1987 г. – 195 с.
9. Zhang Z.*, Ren T., Cheng J., Constant Wear Criterion for Optimization of the Crushing Chamber of Cone Crushers. 2022, 12, 807. https://doi.org/10.3390/min12070807.
10. Li H., McDowell G., Lowndes L., Discrete element modelling of a rock cone crusher, Powder Technology, 2014, 263,151-158, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.004.
11. Quist J., Evertsson C.M., Cone crusher modelling and simulation using DEM, Minerals Engineering, 2016, 85, 92-105, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.11.004.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАРИФОВ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

Гайнутдинова А.И.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, aminagajnutdinova@yandex.ru

Научный руководитель: Сафиуллин Р.Н.
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, safravi@mail.ru

Аннотация. Представлена методика построения автоматизированной системы определения тарифов на пассажирском транспорте, позволяющая устранить ручной труд и обеспечить объективность тарифообразования. На основе анализа маршрутов Ленинградской области выявлены недостатки существующего ручного подхода к зонированию и расчёту тарифов: высокие временные затраты и необходимость привлечения большого числа специалистов. Разработана блок-схема алгоритма функционирования системы, включающая сбор данных, автоматическое зонирование, расчёт тарифов и обработку нештатных ситуаций. Предлагаемое решение позволяет сократить время расчёта с 15 минут до 10–15 секунд на маршрут, снизить трудозатраты и обеспечить прозрачность формирования стоимости проезда.

Ключевые слова: автобусные перевозки, автоматизированные системы оплаты проезда, городской пассажирский транспорт, тарифообразование, зональный тариф, блок-схема.

Введение. В Ленинградской области функционируют автоматизированные системы оплаты проезда (АСОП), обеспечивающие сбор данных о поездках. Однако сам процесс расчёта тарифов до сих пор остаётся ручным: специалисты вносят данные об остановках, определяют границы тарифных зон и формируют тарифную сетку вручную [1, 2]. На обработку одного маршрута уходит 10–15 минут, а общая трудоёмкость по региону составляет около 166 человеко-часов. При таком подходе сложно оперативно реагировать на изменение внешних факторов, таких как цены на топливо, инфляция и др. Из-за чего происходит противоречие между интересами перевозчиков и доступностью транспорта для населения. Цель исследования – разработать методику построения автоматизированной системы определения тарифов, которая исключила бы ручной труд, сократила время расчёта и сделала тарифообразование более объективным [3].

Методы. Для построения алгоритма использован метод блок-схем (дерево решений), позволяющий наглядно представить последовательность операций от сбора исходных данных до формирования итоговой тарифной сетки. В основе алгоритма лежат данные из ГЛОНАСС (геометрия маршрута, расстояния между остановками, наличие «крюков») и сведения из реестров остановочных пунктов Ленинградской области [4].

Результаты. Разработана блок-схема, включающая следующие этапы:

1. Сбор и проверка исходных данных. Из АСОП поступают сведения о времени и координатах посадки и высадки пассажиров, а также об интенсивности пассажирообмена и категориях пассажиров [2]. Из ГЛОНАСС берутся данные о геометрии маршрута, фактических расстояниях и отклонениях от маршрута («крюках»). Также учитываются нормативные параметры и внешние факторы [4, 5, 6].
2. Автоматическое определение границ тарифных зон по данным АСОП и ГЛОНАСС.
3. Расчёт тарифной сетки с учётом регулируемых параметров (стоимость топлива, инфляция, нормативная рентабельность).
4. Пересчёт тарифов при изменении внешних факторов.
5. Обработка нештатных ситуаций (изменение маршрута, закрытие остановок).

Таким образом, автоматизируется полный цикл тарифообразования: от сбора исходных данных до формирования итоговой тарифной сетки.

В качестве примеров рассмотрены ситуации, которые в ручном подходе приводят к некорректному расчёту стоимости проезда. При несимметричном расположении остановочных пунктов расстояние проезда в прямом и обратном направлениях различается. Чтобы стоимость между одними и теми же остановками была одинаковой в обоих направлениях, расстояния усредняются. Предложенный алгоритм автоматически выполняет расчёт на основе данных ГЛОНАСС, исключая ручной труд. Кроме того, при движении по городу с фиксированным тарифом отсчёт зонального участка начинается с момента въезда в область, а не с момента посадки пассажира. Это позволяет корректно рассчитывать стоимость для пассажиров, севших после города, минимизируя некорректности ручного зонирования [7].

Обсуждение. Предложенная методика позволяет перейти от ручного расчёта тарифов к автоматизированному. Алгоритмическое зонирование исключает субъективный фактор, а автоматический пересчёт при изменении внешних факторов обеспечивает оперативность тарифообразования [8]. Использование данных ГЛОНАСС и АСОП обеспечивает единую объективную базу для расчётов [9,10].

Заключение. Разработанная методика построения автоматизированной системы определения тарифов позволяет автоматизировать расчёт тарифов, сократить время расчёта и повысить объективность тарифообразования. В дальнейшем на основе блок-схемы может быть разработана программа для автоматического расчёта тарифов Ленинградской области. Также методику можно адаптировать для других регионов при наличии сопоставимых данных АСОП и ГЛОНАСС.

Автор выражает благодарность ГКУ ЛО «Леноблтранс» за предоставленные данные и информационную поддержку.

Список литературы

1. Рязанова А.В. Автоматизированные системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2018. 92 с.
2. Шевченко И.Н., Кравченко А.В. Целесообразность внедрения автоматизированной системы оплаты и контроля проезда на транспорте в Республике Беларусь // Современные тенденции развития транспортной отрасли: материалы Международной научно-практической конференции (Нижний Новгород, 2024). Самара: СамГУПС, 2024. С. 555–557.
3. Сафиуллин Р.Н., Афанасьев А.С., Решетников Д.А. Обоснование параметров автобусных маршрутов в крупных городах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17. № 2. С. 255–264.
4. Андреев К.П., Терентьев В.В. Технологии ГЛОНАСС на городском пассажирском транспорте // Наука и современное общество: взаимодействие и развитие. 2016. № 1. С. 118–120.
5. Сафиуллин Р.Н., Решетников Д.А., Афанасьев А.С. Методика определения рациональных маршрутов городского пассажирского транспорта // Транспортное дело России. 2019. № 6. С. 46–49.
6. Менухова Т.А., Бородина Ю.В. Показатели комфортности транспортного обслуживания в городских автобусах // Транспортное дело России. 2019. № 1 (140). С. 237–241.
7. Пильникова И.Ф. Автоматизация оплаты проезда на общественном транспорте: опыт и перспективы // Электронный научный журнал. 2022. URL: https://elibrary.ru (дата обращения: 24.03.2026).
8. Моисеева М.А. Системы тарификации оплаты проезда в городском пассажирском транспорте // Актуальные проблемы транспорта. 2015. № 4. С. 112–117.
9. Сулейманов Э.С. Методика расчёта оптимального тарифа на пассажирском транспорте с учётом зонирования // Вестник транспорта. 2025. № 2. С. 45–51.
10. Козлов В.В. Цифровизация управления пассажирскими перевозками на региональном уровне // Транспортное дело России. 2023. № 5. С. 56–62.

УДК 621.763

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКСТРУЗИОННЫХ МАТРИЦ ИЗ СТАЛИ 40Х13

Гильвитинов М.О.
Университет науки и технологий МИСИС,
Москва, Россия, mgilvitinov@mail.ru

Научный руководитель: Чернышихин С.В.
PhD, заведующий лабораторией аддитивного производства,
Университет науки и инноваций МИСИС, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматривается проблема оптимизации технологических параметров селективного лазерного плавления для стали 40Х13 с целью изготовления экструзионных матриц. Экспериментально исследовано влияние мощности лазерного излучения и скорости сканирования на относительную плотность синтезированных образцов, установлены закономерности формирования приповерхностной пористости. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических регламентов производства СЛП-изделий из рассматриваемого материала.

Ключевые слова: аддитивные технологии, синтез изделий из металлических порошков, селективное лазерное плавление, экструзионная оснастка, 40Х13.

В условиях активного роста импортозамещения и развития цифровизации производства все большее внимание уделяется применению аддитивных технологий [1]. Одним из наиболее перспективных и востребованных методов является технология селективного лазерного плавления (СЛП), основанная на послойном сплавлении металлического порошка лазерным излучением [2].

СЛП позволяет изготавливать изделия сложной формы, сокращать количество технологических операций и в целом уменьшать трудоемкость производства [3]. Данные преимущества становятся особенно актуальными для производителей экструзионной оснастки, поскольку производство одной экструзионной матрицы занимает от 6 месяцев, а применение СЛП способно снизить затраты по времени почти в 2 раза [4].

Одним из материалов, представляющих интерес для изготовления матриц, является сталь 40Х13. Первые изготовленные опытные образцы из данногпродемонстрировали ряд недостатков, одним из которых является низкая относительная плотность $\rho_{\text{отн}}$. В этой связи целью данной работы является оптимизация технологических параметров СЛП для обеспечения минимального количества дефектов.

Для исследования было изготовлено 30 образцов (куб со стороной равной 5 мм) из металлопорошковой композиции 40Х13 на установке *ONSINT AM150*. При изготовлении варьировались следующие параметры: мощность лазера P (300-400 Вт), скорость сканирования v (500-1850 мм/с); неизменными оставались шаг платформы построения t = 30 мкм и параметры перекрытия h = 80 мкм. Выбор данных диапазонов значений параметров обусловлен анализом работы [8]. Далее для каждого образца была найдена плотность металлографическим методом. Для изучения морфологии пор и их пространственного распределения проведена микрокомпьютерная томография образцов на установке *nanoVoxel* 1000 при размере вокселя в 10 мкм.

Наибольшая относительная плотность $\rho_{\text{отн}}$ = 99,95% была достигнута при P = 400 Вт, v = 1400 мм/с. Исходя из контурной диаграммы, представленной на рисунке 1, можно утверждать, что наибольшее влияние на $\rho_{\text{отн}}$ оказывает изменение скорости сканирования. Микрокомпьютерная томография выявила закономерность в расположении дефектов: большинство пор расположены в приповерхностном объеме образца, т.е. вблизи к его боковым (относительно направления синтеза) границам.

Получившийся результат демонстрирует, что при скоростях сканирования выше 1250 мм/с возникает режим проводимости, т.е. металлический порошок получает оптимальное количество тепловой энергии, при котором в ванне расплава не происходит интенсивного кипения. Установившееся граница режимов, вероятно, обусловлена физико-химическими особенностями материала (теплопроводность, плотность, теплоемкость). Распределение пор в приповерхностной области возможно объяснить изменением условий теплоотвода на краях системы «металлический порошок – сплавленный металл»: внутри объема детали происходит равномерная диссипация тепла, в то время как на границах возникает более сильный нагрев, что может приводить к формированию ванны расплава в форме замочной скважины, с последующим образованием газовых пор.

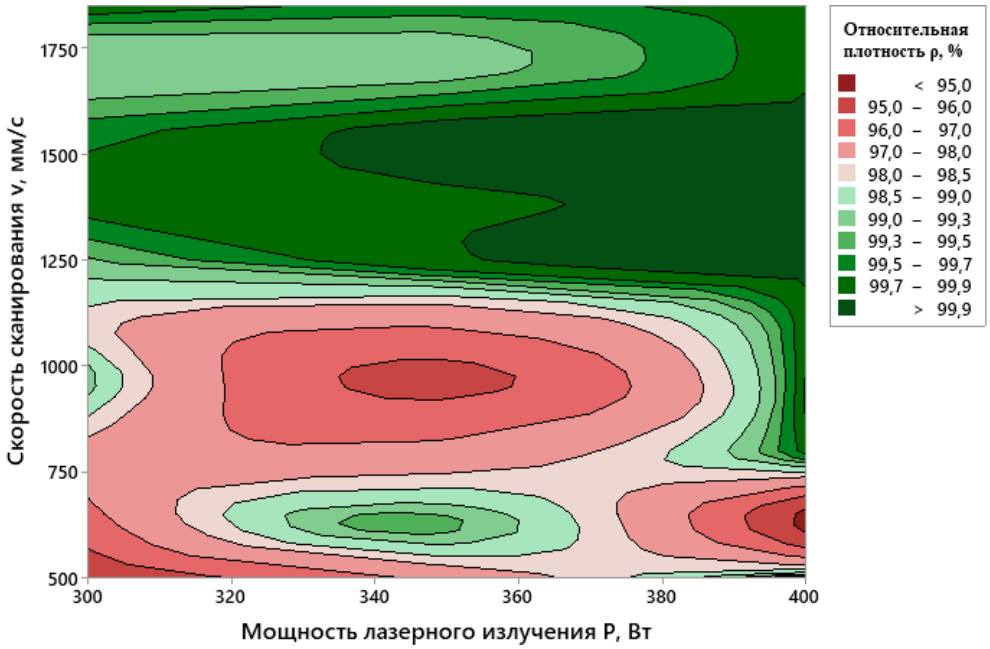


Рис. 1. Контурная диаграмма зависимости относительной плотности от параметров СЛП

В ходе выполненного исследования установлены оптимальные технологические параметры СЛП, обеспечивающие достижение высоких показателей относительной плотности. Предложенные режимы могут быть непосредственно использованы при изготовлении оснастки для экструзионного производства.

Направление будущих исследований предполагает изучение влияния термической обработки на структурно-фазовые превращения и механические свойства синтезированного материала, а также разработку стратегий сканирования, направленных на минимизацию приповерхностной пористости за счет оптимизации контурных проходов и предварительного подогрева платформы.

Список литературы

1. Ляпков А.А. Полимерные аддитивные технологии : учебное пособие для СПО / А.А. Ляпков, А.А. Троян. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 120 с.

2. Рэдвуд Б., Шофер Ф., Гаррэт Б. 3D-печать. Практическое руководство / пер. с анг. М.А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 220 с.

3. Haghdadi, N., Laleh, M., Moyle, M. et al. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. J Mater Sci 56, 64–107 (2021). https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0.

4. Cunha, Â., Marques, A., Silva, M.R. et al. Laser powder bed fusion of the steels used in the plastic injection mould industry: a review of the influence of processing parameters on the final properties. Int J Adv Manuf Technol 121, 4255–4287 (2022). https://doi.org/10.1007/s00170-022-09588-0.

5. Liverani, E., Fortunato, A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions. Int J Adv Manuf Technol 117, 809–821 (2021). https://doi.org/10.1007/s00170-021-07639-6.

УДК 621.9.02

СПОСОБЫ МОДЕРНИЗАЦИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НАРУЖНОЙ ОБРАБОТКИ

Голец Е.А., Турчина В.С.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, goletsss@mail.ru

Научные руководители: Халимоненко А.Д., Ефимов А.Е.
доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Данная статья посвящена влиянию различных конструкций режущего инструмента на вибрации, возникающие в процессе токарной обработки. Рассматриваются существующие способы модернизации токарных резцов, которые систематизированы по двум основным конструктивным элементам – державочной и рабочей части. Рассмотрены патентные документы РФ, научные публикации отечественных и зарубежных авторов, посвященные совершенствованию токарного инструмента. Проанализированы конструктивные решения с применением композиционных и полимерных вставок, демпфирующих материалов различного типа, пассивных фрикционных и сыпучих демпферов.

Ключевые слова: режущий инструмент, снижение вибраций, демпфирование, жёсткость, модернизация.

Современное машиностроение предъявляет все более жесткие требования к точности размеров, форме обрабатываемых поверхностей и качеству поверхностного слоя деталей. Модернизация режущего инструмента для точения является ключевым фактором повышения эффективности и конкурентоспособности. Достижение этих показателей невозможно без внедрения инновационных технологий, которые в сфере механической обработки находят свое применение в проектировании принципиально новых, более производительных режущих инструментов [1].

Актуальной задачей является модернизация существующих конструкций режущего инструмента. Целесообразно рассматривать этот процесс дифференцированно, выделяя две основные функциональные зоны: державку, обеспечивающую базирование и передачу усилий, и рабочую часть (режущую головку или пластину), непосредственно контактирующую с заготовкой.

В данной статье в качестве базовых характеристик выбраны жесткость и демпфирующая способность инструмента. Токарный резец функционирует не изолированно, а как неотъемлемый элемент упругой технологической системы механической обработки (ТСМО). В этой системе жесткость инструмента определяет его способность сохранять заданное положение под действием сил резания, а демпфирование – его способность гасить возникающие в процессе резания колебания. От того, насколько успешно конструкция резца справляется с этими задачами, напрямую зависят точность обработки, качество поверхности и стойкость режущей кромки [2].

Проведенный анализ патентной литературы и научных публикаций позволил выявить существующие методы модернизации, которые можно рассматривать применительно к державочной и рабочей частям инструмента, а также в их взаимосвязи (Рис. 1).

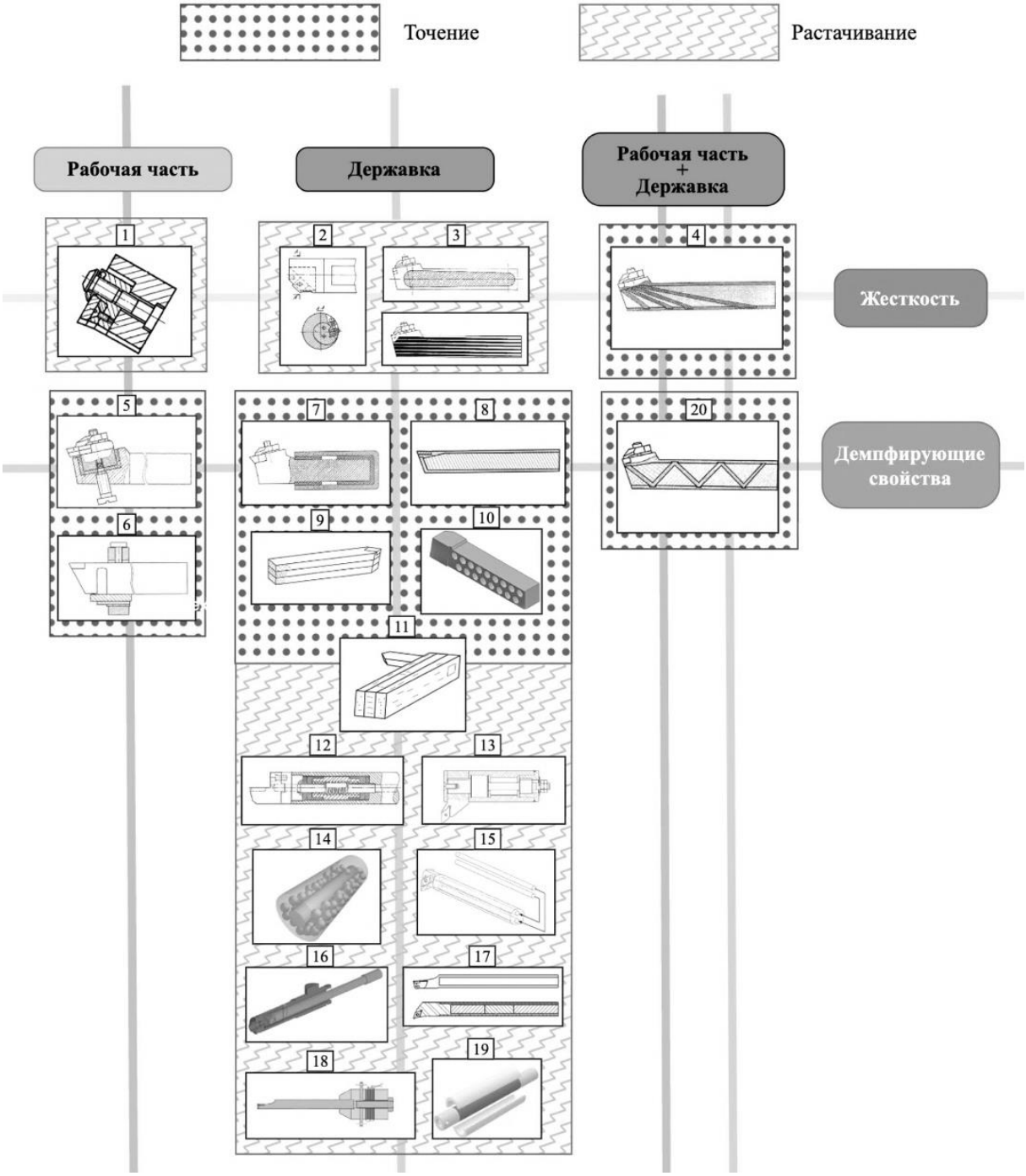


Рис. 1. Способы модернизации токарного и расточного инструмента

Часть решений направлена на совершенствование рабочей части, непосредственно связанной с зоной резания и креплением режущей пластины. К таким способам относится применение демпфирующих материалов в зоне крепления режущей части (Рис.1, п.5), а также использование специальной опоры для режущей части (Рис.1, п.6), которая позволяет разгрузить основной корпус резца и оптимизировать передачу усилий от режущей кромки.

Значительная часть технических решений предлагает использование различных вставок, интегрируемых в корпус державки. Предлагаются решения с использованием демпфирующих материалов, заполняющих полости державки. Описываются различные варианты заполнения внутренних полостей вязкоупругими полимерами либо сыпучими материалами, например металлическими шариками или песком, работающими

по принципу сухого трения (Рис.1, п.8, 9, 11) [3]. При колебаниях инструмента частицы материала соударяются друг с другом и со стенками полости, преобразуя механическую энергию колебаний в тепловую.

Стоит отметить следующий патент на демпфирующую вставку (Рис.1, п.7), которая размещается в специально выполненных полостях державки и может быть выполнена из материалов с высоким внутренним трением либо иметь специальную геометрию, обеспечивающую трение между вставкой и стенками полости для диссипации энергии. Среди геометрических методов модернизации державки выделяется способ создания горизонтальных отверстий (Рис.1, п.10). Перфорация позволяет сместить собственные частоты колебаний державки относительно резонансных зон, при этом метод реализуется обычным сверлением и не требует применения специальных материалов или сложных конструктивных элементов [1].

Отдельную группу составляют конструктивные решения, направленные на повышение жесткости державочной части за счет изменения ее геометрии или введения дополнительных опорных элементов. К ним относится использование укосин (Рис.1, п.4), которые укрепляют переходную зону между державкой и режущей головкой, снижая концентрацию напряжений и упругие деформации [4]. Поскольку укосины располагаются именно на границе державочной и рабочей частей, они влияют на жесткость и напряженное состояние обеих зон одновременно, что позволяет отнести это решение к методам общего характера, затрагивающим инструмент в целом. Отдельного внимания заслуживает конструкция с комбинированной державкой, состоящая из металлических слоев (верхнего и нижнего), между которыми интегрирована укосина, выполненная в виде изогнутой гармошкой металлической пластины, формирующей элементы фермы по всей длине инструмента (Рис.1, п.20). Здесь повышается жесткость конструкции за счет выполнения укосины в виде элементов фермы, расположенных по всей длине державки под различными углами, что обеспечивает равномерное распределение нагрузок и сопротивление деформациям в продольном направлении [5].

Таким образом, проведенный анализ показывает, что существующие методы модернизации токарных резцов охватывают широкий спектр решений. Часть из которых нацелена на рабочую часть инструмента. Однако стоит заметить, что большая часть предоставленных источников направлена на модернизацию державочной части, это подтверждает, что она играет ключевую роль в обеспечении жесткости и виброустойчивой инструмента. Данная работа создает направление для дальнейшего изучения и анализа эффективности режущих инструментов, а также способствует выбору наиболее перспективных направлений для совершенствований.

Список литературы

1. Рогов В.А., Горбани С. Вибрационное исследование державок резцов при чистовой обработке // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: инженерные исследования. 2014. С.16-22. EDN: RTSGD.
2. С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, М.Д. Романец. Применение упругих демпфирующих вставок, образованных полувставками с различными жесткостями, в конструкциях токарных резцов // Провинциальные научные записки. 2021, №2 (14). С.61-65.
3. Патент РФ 2281196, МПК B23P 27 /00 и B23B 27/00 Способ изготовления токарного резца / Васин С.А., Васин Л.А., Бородкин Н.Н. Опубл. 10.08.2006. Бюл. No 22.
4. Патент РФ 2217267, МКИ В 23 В 27/ 00 Резец. / Васин С.А, Васин Л.А., Бородкин Н.Н.; заявитель ТулГУ.- Опубл. 27.11. 2003. Бюл. № 33.
5. Патент 2280542, Российская Федерация, МПК В 23 В 27/ 00. Резец / Васин С.А., Васин Л.А., Бородкин Н.Н.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. – №2005112363/02; заявл. 25.04.2005; опубл. 27.07.2006, Бюл. №21. – 5 с.: ил.

УДК 622.7

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ РАБОТЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Гришин К.А.
студент механико-машиностроительного факультета,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, grishinkirill300@gmail.com

Научный руководитель: Голиков Н.С.
доцент кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматривается задача оценки эффективности работы конусных дробилок крупного дробления, для которой на практике обычно используются отдельные, не связанные между собой показатели. Такой подход не позволяет объективно и точно оценить работу оборудования. В связи с этим предложен подход к формированию комплексного безразмерного показателя, основанный на принципах квалиметрии и учитывающий совокупность ключевых технологических и эксплуатационных параметров. Разработанный алгоритм включает выбор системы показателей, их приведение к сопоставимому виду, определение относительной значимости и последующее объединение в единый критерий. Использование комплексного показателя позволяет формализовать процесс оценки эффективности работы дробилки и повысить обоснованность принимаемых эксплуатационных решений.

Ключевые слова: конусная дробилка крупного дробления; комплексный показатель; квалиметрия; многопараметрическая оптимизация; нормирование показателей; весовые коэффициенты.

Оценка эффективности работы конусных дробилок крупного дробления в настоящее время, как правило, осуществляется на основе отдельных показателей, таких как производительность, энергопотребление, степень дробления и другие. При этом указанные параметры рассматриваются изолированно, без учёта их взаимосвязи и совокупного влияния на работу оборудования, что затрудняет получение объективной оценки эффективности функционирования дробилки. Кроме того, отсутствие обобщающего показателя ограничивает возможность применения методов многопараметрической оптимизации режимов работы. В связи с этим, разработка комплексного показателя, учитывающего совокупность ключевых параметров процесса дробления, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является определение научно-методической основы для разработки комплексного показателя оценки эффективности работы конусной дробилки крупного дробления. Идея работы заключается в повышении точности и объективности оценки за счёт перехода от использования разрозненных единичных критериев к комплексному показателю, интегрирующему ключевые технологические и эксплуатационные параметры. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ существующих методов и алгоритмов построения комплексных критериев; исследование методов выбора и обоснования номенклатуры единичных показателей, входящих в комплексный критерий; анализ математических аппаратов, применяемых для получения эмпирической зависимости комплексного критерия.

В настоящее время существует большое количество методик по построению комплексных критериев, основное влияние в этой сфере имеет наука квалиметрия, основы и методологии которой изложены в пособии [1]. Данная наука включает в себя

достаточно проработанный алгоритм разработки комплексного критерия для оценки качества любого объекта живой и неживой природы. Квалиметрия предоставляет все необходимые инструменты для создания комплексного критерия оценки работы конусной дробилки крупного дробления.

На данную науку ссылаются некоторые научные работы по исследованию качества промышленных продуктов с помощью разработки комплексного критерия, но для полной обоснованности необходимо следовать пунктам следующего алгоритма, собранного на базе знаний квалиметрии.

1. Формирование номенклатуры показателей.

Данный этап является первым и достаточно важным, ведь все последующие операции будут проводиться именно над теми единичными показателями, которые будут выбраны здесь. При выборе необходимо ответить на вопрос «какие параметры работы конусной дробилки нужно учитывать, чтобы оценить её качество?» и выбрать именно те, которые действительно влияют на качество работы оборудования. Примером исходных данных для определения таких параметров может послужить работа [2], где описана математическая модель конусной дробилки крупного дробления.

Первым шагом является определение параметров, которые измеряются системой мониторинга, фиксируются при техническом обслуживании и влияют на эффективность работы дробилки.

Вторым шагом является устранение дублирования: если два параметра являются зависимыми друг от друга или коэффициент корреляции между ними достаточно высок, то один из таких показателей необходимо исключить.

Третьим шагом является проверка на измеримость. Необходимо убедиться, что каждый оставшийся параметр можно измерить – либо прямыми приборами (датчиками), либо расчетным путем, либо экспертными оценками. Примером реализации системы мониторинга с применением датчиков износа может послужить работа [3], где описана система контроля состояния футеровки конусной дробилки. Если параметр невозможно измерить с приемлемой точностью, включать его в перечень не стоит. Измеримость должна быть объективной и научно обоснованной.

2. Нормирование показателей (приведение к единой шкале).

Достаточно большой объем квалиметрии описывает квалиметрические шкалы. Все единичные показатели имеют разную размерность и численность, и для последующих операций по принятию решений необходимо привести значения всех показателей, а в последствии и значение комплексного показателя, к определенному виду – например, в диапазон от 0 до 1 или в проценты от 0 до 100.

Следующим шагом является выбор эталона. Исходя из основ квалиметрии, выбор и последующее внедрение эталона в формулы является обязательным шагом. На примере оценки состояния брони конусной дробилки эталоном могут стать паспортные данные и первоначальное состояние футеровки до начала эксплуатации.

Третьим и заключительным шагом данного этапа является выбор предельных значений выбранных показателей. Оценка предельных состояний важна для внедрения единичных показателей в комплексный критерий, ведь именно при этих значениях комплексный показатель будет принимать значение, являющееся переходным при выборе какого-либо решения по отношению к рассматриваемому объекту.

3. Формирование комплексного показателя.

Первым шагом является выбор метода агрегирования показателя, при котором будет выбран математический аппарат, с помощью которого будет вычислен комплексный показатель.

Правильная интеграция всех выбранных ранее критериев является следующим шагом и позволяет провести расчеты и получить значение, которое в последствии будет использовано для принятия решений.

После получения значения на основах знаний квалиметрии нужно определить способ оценки полученного результата. К примеру, может быть написан регламент, в котором будут описаны все возможные решения для определенных диапазонов значений полученного комплексного показателя.

Предложенный алгоритм построен на классических принципах квалиметрии и позволяет уйти от субъективных решений, которые сейчас принимает персонал, к формализованной количественной оценке состояния футеровки. Такой подход даёт более целостную картину того, что происходит с оборудованием, и может использоваться как основа для дальнейшей многопараметрической оптимизации – например, для выбора оптимального момента замены броней. В итоге получился рабочий алгоритм, который опирается на методологию квалиметрии и вполне применим для оценки работы конусной дробилки крупного дробления.

Список литературы

1. Федюкин В.К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2013. – 316 с. – EDN ZAFVFR.

2. Ливина К.А., Крепов К.С., Соколов М.В. / Разработка математической модели конусной дробилки с целью оценки ее технологических и технико-эксплуатационных показателей работы // 14-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее»: материалы конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024, с 78-81.

3. Голиков Н.С., Шашурин Н.С., Михалченков Е.В., Крепов К.С., Деревянко А.А., Соколов М.В. Обзор современных систем автоматизированного дистанционного мониторинга износа футеровок горно-транспортных и горно-перерабатывающих машин и оборудования // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – № 34. – С. 112-121. https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-34-112-121.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР ВИЗУАЛЬНОГО ОСМОТРА КОНТЕЙНЕРНОГО ПАРКА

Грушихин Д.П.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, dm.grush5@yandex.ru

Научный руководитель: Менухова Т.А.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается опыт применения нейросетевых технологий в составе специализированного программного обеспечения для автоматизации процедур визуального осмотра контейнерного парка. Разработан прототип веб-приложения на Python, интегрирующий нейросетевые модули для детекции контейнеров, дефектов (трещин, вмятин, коррозии) и распознавания идентификационных номеров контейнерного парка. Система обеспечивает мгновенную обработку изображений, формирование структурированных отчётов и сохранение полученной информации для последующей конвертации и отправки в базы данных. Апробация прототипа подтвердила высокую эффективность автоматизации, устраняющую субъективность ручного контроля и ускоряющую операции. Полученные результаты имеют практическую ценность для цифровизации процессов анализа технического состояния контейнеров в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: контейнерный парк, визуальный осмотр, нейросетевые технологии, YOLO, EasyOCR, автоматизация логистики, компьютерное зрение, дефекты контейнеров.

Введение. Контейнерные перевозки, стремительно развиваясь в последние годы как в мире, так и в России, формируют основу современных логистических систем. Рост объёмов контейнерооборота на терминалах усиливает потребность в оперативном и точном контроле технического состояния контейнерного парка. Однако до сих пор многие процедуры визуального осмотра контейнерного парка выполняются вручную, без применения современных цифровых технологий [1…3], основываясь на субъективной оценке специалистов, что повышает риск неверной оценки технического состояния контейнеров. Целью данного исследования является рассмотрение принципа работы прототипа программного обеспечения на базе нейросетевых технологий для автоматизации процедур визуального осмотра контейнерного парка (далее – программное обеспечение), а также анализ результатов его апробации в реальных условиях работы специализированного контейнерного перевозчика.

Методы. Методологическая основа исследования объединяет общенаучные и специальные методы. Для сбора и обработки данных, полученных в результате апробации программного обеспечения, использовались сравнительный анализ, социометрия и экспериментальные подходы [4, 5]. Прототип программного обеспечения разработан с использованием структурно-функционального анализа и алгоритмизации.

Результаты. В ходе исследования рассмотрен прототип программного обеспечения, созданный на языке Python и предназначенный для автоматизированного анализа технического состояния контейнерного парка по фотоизображениям. Система обеспечивает идентификацию контейнеров, обнаружение поверхностных повреждений, таких как: пробоины, вмятины, повреждения лакокрасочного покрытия и коррозия, а также извлечение данных и подготовку унифицированного отчёта для последующей отправки в базы данных. Для обнаружения контейнеров и локализации дефектов в прототипе используется сверточная нейронная сеть [6] семейства YOLO (You Only Look Once), дообученная

на фотоизображениях транспортных контейнеров. Нейросетевой модуль распознавания визуальной информации выполняет несколько задач: сначала определяет сам контейнер, затем идентифицирует и классифицирует имеющиеся повреждения. Дополнительно задействован нейросетевой модуль распознавания текстовой информации [7] EasyOCR, который извлекает из фотоизображения код владельца, серийный номер и контрольные символы с последующей проверкой формата цифр.

Пользователем программного обеспечения выступает специалист визуального контроля (в частном случае им может быть водитель) [8], который начинает работу с авторизации в веб-приложении. В личном кабинете пользователь может либо сделать фотографии контейнера в режиме реального времени, либо прикрепить уже готовые фотоматериалы.

После загрузки фотоизображения серверная часть выполняет автоматическую предобработку (выполняет сжатие фотографии под требуемый размер и формат), затем запускает нейросетевые модули: YOLO локализует контейнер и дефекты, EasyOCR определяет номер контейнера. Результаты обработки визуализируются в интерфейсе в виде фотоматериалов с отмеченными повреждениями и текстовым отчетом. Параллельно данные конвертируются в требуемые форматы (Oracle, JSON, CSV) и отправляются в базу данных транспортной компании [9].

Обсуждение. Разработанный прототип программного обеспечения обладает высокой практической значимостью для транспортной отрасли [10, 11], существенно повышая эффективность операций оценки технического состояния контейнеров. Данная разработка устраняет ключевые недостатки осмотра контейнера специалистом без дополнительного цифрового анализа, такие как субъективность оценки внешних повреждений, продолжительность проведения осмотра контейнера, зависимость от опыта и навыков специалиста.

В январе 2026 г. прототип был апробирован в работе специализированного контейнерного перевозчика в г. Санкт-Петербурге. После проведения замеров времени сделан вывод, что с помощью внедрения разработки удалось добиться экономии времени специалистов компании при работе с контейнерами при погрузочно-разгрузочных операциях. По результатам наблюдения среднее время, которое водитель тратит на осмотр контейнера и фиксирование его состояния, сократилось на 38% с 24 до 15 минут, при этом удалось добиться снижения операционных затрат в среднем на 180 тыс. руб. в год.

Заключение. Практическая значимость разработки:

1. Внедрение предложенного программного обеспечения ускоряет оценку технического состояния контейнеров за счёт цифровой обработки фотографий и формирования отчётов с результатами осмотра, сокращая простои техники на погрузочно-разгрузочных пунктах и сокращая время работы специалистов.
2. Использование предложенного программного обеспечения повышает безопасность перевозок за счет снижения рисков при эксплуатации повреждённых контейнеров.
3. Собранные данные о техническом состоянии контейнеров позволят сформировать единую базу для учёта контейнерного парка и планирования его ремонта и своевременного обслуживания. Интеграция с существующим программным обеспечением терминалов обеспечит непрерывный обмен данными, заложит основу для аналитики и статистического учета.

Данное программное обеспечение может быть адаптировано для различных типов укрупненных грузовых единиц. Прототип можно в дальнейшем совместить не только с мобильным телефоном, но и с другими фото или видео устройствами (например, видео регистратором).

Список литературы

1. Вьюшкова А.А., Терентьев А.В., Менухова Т.А. Методологический аспект при выборе оптимальной схемы доставки груза // Инновации на транспорте и в машиностроении. сборник трудов IV международной научно-практической конференции. 2016. С. 36-37. EDN: XFGWIP.
2. Сафиуллин Р.Н. Системный подход к эффективному применению интеллектуальных транспортных технологий в функциональной диагностике элементов и устройств транспортных средств / Р.Н. Сафиуллин, А. Ф. Залюбовский, К. В. Сорокин // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2024. – № 2(68). – С. 56-63. – EDN BLEPZY.
3. Менухова Т.А. Автоматизация оперативного управления междугородными грузовыми автомобильными перевозками // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 80-85. EDN: RRLAUM.
4. Radushinsky D.A., Zamyatin, E.O., Radushinskaya, A.I., Sytko, I.I., Smirnova, E.E. (2024). The Performance and Qualitative Evaluation of Scientific Work at Research Universities: A Focus on the Types of University and Research. Sustainability (Switzerland), 16(18), https://doi:10.3390/su16188180
5. Асафьева, Н.В. Планирование теоретического и эмпирического исследования: Методические указания для магистров направления подготовки 37.04.01 – «Психология» / Н.В. Асафьева, Е.В. Ахмадеева. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – 44 с. – EDN HFWZPH.
6. Alekseeva E.E. Creation and training of a neural network for spot detection in a photo / E.E. Alekseeva, A.V. Panitevskiy, Yu.N. Tyschuk // Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies. – 2025. – No. 4. – P. 385-390. – EDN WIZDWY.
7. Кондаков В.С. Применение нейронных сетей для обработки неструктурированной информации / В.С. Кондаков // Международная научная школа «Zero Waste» для молодых ученых, аспирантов и студентов: Тезисы докладов, Новочеркасск, 27 мая – 01 2024 года. – Новочеркасск: Издательство «НОК», 2024. – С. 48-52. – EDN LORTOW.
8. Царегородцева Е.Ю. Взаимодействия логистических центров с различными видами транспорта при организации контейнерных перевозок / Е.Ю. Царегородцева, Н.В. Власова // Экономика железных дорог. – 2024. – № 8. – С. 49-55. – EDN DCVOFS.
9. Борисов И.С. Многопроцессорные системы в наше время / И.С. Борисов // Информационные технологии в конструировании ЭС: Межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2025. – С. 50-54. – EDN FTCQDM.
10. Еременко Г.А. Производство контейнерного оборудования как цепи логистических услуг / Г.А. Еременко // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2024. – № 2(47). – С. 66-71. – EDN RUTTPX.
11. Иванов А.П. Развитие контейнерных сервисов и перспективы их дальнейшего совершенствования / А.П. Иванов // Транспортное дело России. – 2025. – № 6. – С. 218-221. – EDN IQOQZI.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОПЛАТЫ ПРОЕЗДА НА ОБЩЕСТВЕННОМ ТРАНСПОРТЕ В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПОМЕХ

Должанская С.А.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, dolzhanskaya.s@mail.ru

Научный руководитель: Менухова Т.А.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. В работе рассмотрена проблема сбоев в работе систем оплаты проезда на маршрутах Ленинградской области, возникающих под воздействием радиоэлектронных помех. Актуальность темы связана с необходимостью корректного списания средств в зависимости от реально пройденного пассажиром расстояния. Цель – выработать рекомендации по повышению помехоустойчивости системы оплаты. Предложен ряд технических и организационных решений, позволяющих минимизировать сбои и сохранить точность тарификации.

Ключевые слова: радиоэлектронные помехи, система оплаты проезда, спутниковая навигация, общественный транспорт, устойчивость навигационного оборудования.

Введение. В Ленинградской области стоимость проезда на общественном транспорте зависит от расстояния, которое пассажир фактически преодолел. Однако радиоэлектронные помехи (РЭБ) способны нарушать работу навигационного оборудования, из-за чего списание средств происходит некорректно.

Специфика эксплуатации автобусов [1] и конфигурация маршрутной сети региона [2] лишь усугубляют ситуацию. Данные о транспортном поведении жителей [3, 4] свидетельствуют о высокой доле безналичных платежей, а зарубежные исследования [5–8] подтверждают необходимость защиты систем оплаты от внешних воздействий.

При этом проблема обеспечения бесперебойной работы тарифных систем в условиях РЭБ остаётся проработанной недостаточно. В основу работы положен подход к выбору решений в неопределённых условиях [9].

Цель – разработать предложения по повышению устойчивости системы оплаты проезда к радиоэлектронным помехам на маршрутах Ленинградской области.

Методы. Для решения поставленной задачи применялся комплексный подход. Анализировались жалобы граждан. Это позволило выявить типичные сбои при оплате проезда. Изучались данные комитета по транспорту Ленинградской области и проводился опрос перевозчиков, чтобы оценить реальные последствия воздействия РЭБ на бортовое оборудование. На основе собранной информации сформирован перечень мер, направленных на обеспечение бесперебойной работы системы оплаты.

Результаты. В итоге сформулирован ряд предложений, повышающих помехоустойчивость системы оплаты проезда. Одно из них – использование инерциальных навигационных систем (INS). Они определяют местоположение автобуса даже при полной потере спутникового сигнала. На случай глушения сотовой связи предусмотрен альтернативный маршрут передачи данных: сигнал с ГЛОНАСС поступает на терминал оплаты через бортовой комплекс. Кроме того, предлагается применять сотовую геолокацию (LBS) для ориентировочного определения координат автобуса в зонах радиоглушения. Для водителя на терминале при попадании в зону помех автоматически появляется кнопка «следующая остановка». Нажатие на кнопку позволяет вручную фиксировать завершение поездки. Дополнительно предлагается внедрить фильтрацию координат

на основе алгоритма, отсекающего некорректные значения, не соответствующие заданной траектории движения по маршруту.

Обсуждение. Перечисленные способы помогают сохранить корректность списания средств даже в тех участках маршрутной сети, где уровень радиоэлектронных помех высок. Сформулированные рекомендации учитывают структуру эксплуатации автобусов, распределение пассажирских корреспонденций и степень оснащённости остановочных пунктов [10]. Эти выводы могут быть полезны и для других регионов со схожими проблемами.

Заключение. Проведённое исследование позволило установить основные причины сбоев системы оплаты проезда на маршрутах Ленинградской области. Они связаны с воздействием радиоэлектронных помех. Предложен комплекс технических и организационных мер, обеспечивающих бесперебойную работу системы при потере спутникового сигнала или глушении сотовой связи. Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные решения могут быть внедрены как в Ленинградской области, так и в других регионах. В перспективе предстоит оценить экономическую эффективность предлагаемых мер и провести их апробацию в реальных условиях.

Автор выражает благодарность ГКУ ЛО «Леноблтранс» за предоставленные данные и поддержку.

Список литературы

1. Матвеев А.Г., Менухова Т.А. Подход по учету параметров при применении методов выбора альтернатив в условиях неопределенности // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1-1 (80). С. 119-124.

2. Hensher D.A., Wei E., Liu W. Systematic assessment of push and pull initiatives in behavioural responses associated with public transport fares, service frequency, car-related tolls, distance-based road user charges, and parking charges // Case Studies on Transport Policy. 2026. Vol. 23. 101656. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101656.

3. Barabino B., Ventura R. Comparing fare evasion severity by econometric and artificial intelligence models: An Italian case study // Transport Policy. 2026. Vol. 178. P. 103971. DOI: 10.1016/j.tranpol.2025.103971.

4. Currie G., Fournier N. Why most DRT/Micro-Transits fail -- What the survivors tell us about progress // Research in Transportation Economics. 2020. Vol. 83. 100895. DOI: 10.1016/j.retrec.2020.100895.

5. Shaik M.E., et al. Urban transport planning in Saudi Arabia: A systematic review of challenges and smart mobility pathways // Case Studies on Transport Policy. 2026. Vol. 23. 101674. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101674.

6. Менухова Т.А., Сивов А.А., Богданов М.В. Исследование транспортного поведения жителей Санкт-Петербурга // Транспортное дело России. 2025. № 3. С. 71-78.

7. Старшов Е.Д., Соколова Е.В. Факторы формирования транспортного поведения горожан (на примере Санкт-Петербурга) // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2021. № 2 (65). С. 123-135. DOI: 10.52897/2411-4588-2021-2-123-135.

8. Менухова Т.А., Киптева В.А., Никитцына Т.С. Анализ современных решений, используемых при оборудовании остановочных пунктов городского пассажирского транспорта, с учетом общественного мнения // Транспортное дело России. 2023. № 2. С. 108-112. DOI: 10.52375/20728689_2023_2_108.

9. Фадеев А.И., Ильянков А.М., Укадеров В.В. Распределение корреспонденций по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом общего пользования // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20, № 3(91). С. 362-386. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386.

10. Литвинов А.А. Анализ структуры эксплуатации автобусов на маршрутах городского транспорта в Санкт-Петербурге // Магистратура – автотранспортной отрасли. Материалы VIII Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». Санкт-Петербург, 2024. С. 60-65. EDN: WCBJFH.

УДК 621.763

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ Zn И Ca НА ПРОЦЕСС СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Епифанова А.А.
Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, anna_epifanova1@mail.ru

Научный руководитель: Чернышихин С.В.
PhD, заведующий лабораторией аддитивного производства, Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия.

Аннотация. Традиционный сплав AlSi10Mg для селективного лазерного плавления (СЛП) обладает относительно низкой теплопроводностью, что ограничивает создание высокоэффективных теплообменников. В работе исследована перспективная система легирования Zn и Ca, направленная на улучшение теплофизических свойств материала для теплообменников. Изучено влияние легирующих элементов на дефектообразование, микроструктуру и микротвердость. Показано, что легирование Ca способствует увеличению микротвердости до 280 HV0,1, однако при СЛП в структура материала характеризуется большим количеством дефектов. Напротив, сплав Al6Zn отличается высокой плотностью (более 99 %) при микротвердости 40 HV0,1.

Ключевые слова: аддитивные технологии, синтез изделий из металлических порошков, селективное лазерное плавление, теплообменники, Al-Zn, Al-Ca.

В современном машиностроении особое внимание уделяется повышению эффективности и надежности систем терморегулирования, определяющих работоспособность многих видов оборудования. Селективное лазерное плавление открывает возможности для создания теплообменников нового поколения с развитой поверхностью теплообмена. Однако традиционные алюминиевые сплавы для СЛП, например AlSi10Mg, обладают относительно низкой теплопроводностью (100–140 Вт/(м·К) в исходном состоянии). Перспективным решением является разработка новых алюминиевых сплавов, легированных цинком и кальцием, способных обеспечить требуемый комплекс функциональных и механических свойств.

Выбор легирующих элементов обусловлен их функциями: цинк имеет высокую растворимость в алюминии, вследствие чего обеспечивается упрочнение за счет твердого раствора и диспергирование структуры; кальций образует упрочняющую эвтектику Al-Al4Ca, увеличивает коррозионную стойкость и препятствует испарению легкоплавких элементов при лазерном синтезе. Целью работы является установление закономерностей раздельного влияния легирующих элементов Zn и Ca на дефектообразование, микроструктуру и микротвердость сплавов, получаемых методом СЛП.

Исходный порошок для СЛП бинарных сплавов Al-Zn и Al-Ca содержал 6 масс. % легирующих компонентов. Лазерный синтез образцов размером 5×5×5 мм проводился на установке AddSol D50. Параметры СЛП варьировались в широком диапазоне скоростей сканирования (300 – 2300 мм/с) для выявления технологического окна условий лазерного синтеза при постоянной мощности лазера 350 Вт.

При СЛП сплава Al6Zn достигнута относительная плотность 99,9% при отсутствии видимых дефектов при скорости сканирования 1100 – 1500 мм/с (Рисунок 1а). Напротив, в сплаве Al6Ca после СЛП наблюдалось большое количество трещин, ориентированных в различных направлениях (Рисунок 1б) Однако, при повышении объемной плотности энергии (более 400 Дж/мм^3) наблюдалось снижение дефектов и увеличение относительной плотности до 99 %.

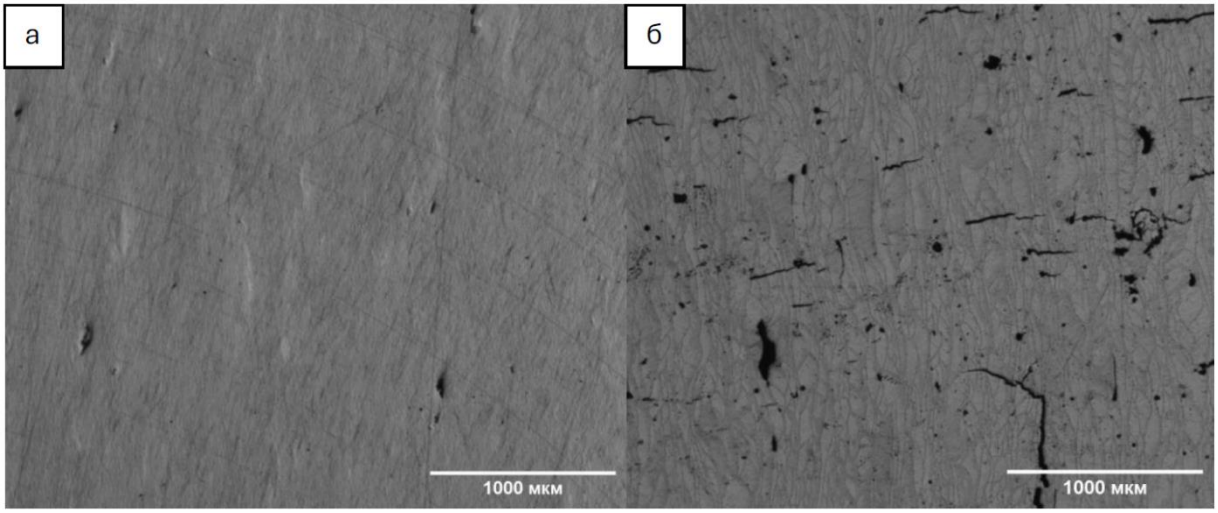


Рис. 1. Микроструктура сплавов, а – Al6Zn и б – Al6Ca после СЛП

Выявлено, что сплав с содержанием 6 масс. % Ca в составе алюминия обладает микротвердостью более 250 HV0,1. При этом с изменением условий синтеза этот параметр изменяется, как проиллюстрировано на рисунке 2. Микротвердость сплава Al6Ca изменяется от 280 до 120 HV0,1 с увеличением объемной плотности энергии до 1000 Дж/мм^3. Повышение объемной плотности энергии сопровождается разогреванием ванны расплава и увеличением длительности ее существования и, как следствие снижением скоростей кристаллизации. Таким образом эффект разупрочнения сплава может свидетельствовать о выделении Ca из твердого раствора, что закономерно снижает микротвердость. Однако для точного утверждения требуются дополнительные исследования.

В случае сплава Al6Zn не наблюдалась зависимость микротвердости от условий синтеза, а среднее значение составило ~ 40 HV0,1 (рисунок 3). Это связано с высокой растворимостью Zn в твердом растворе алюминия, вследствие чего температурная история синтеза или термообработка значительно меньше сказывается на результирующих значениях микротвердости.

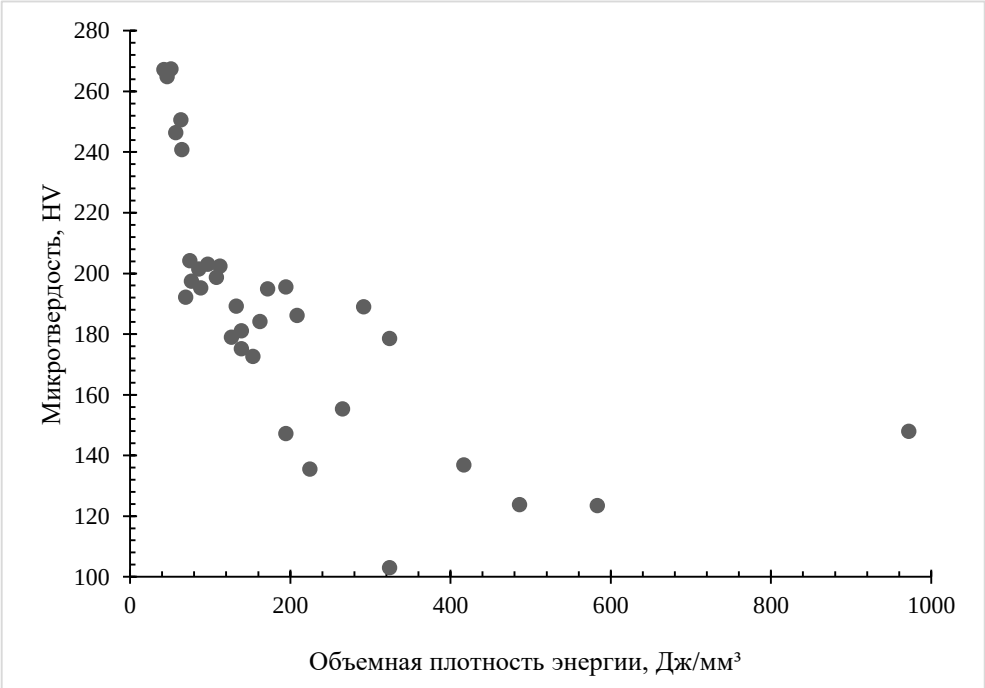


Рис. 2. Зависимость микротвердости сплава Al6Ca от объемной плотности энергии

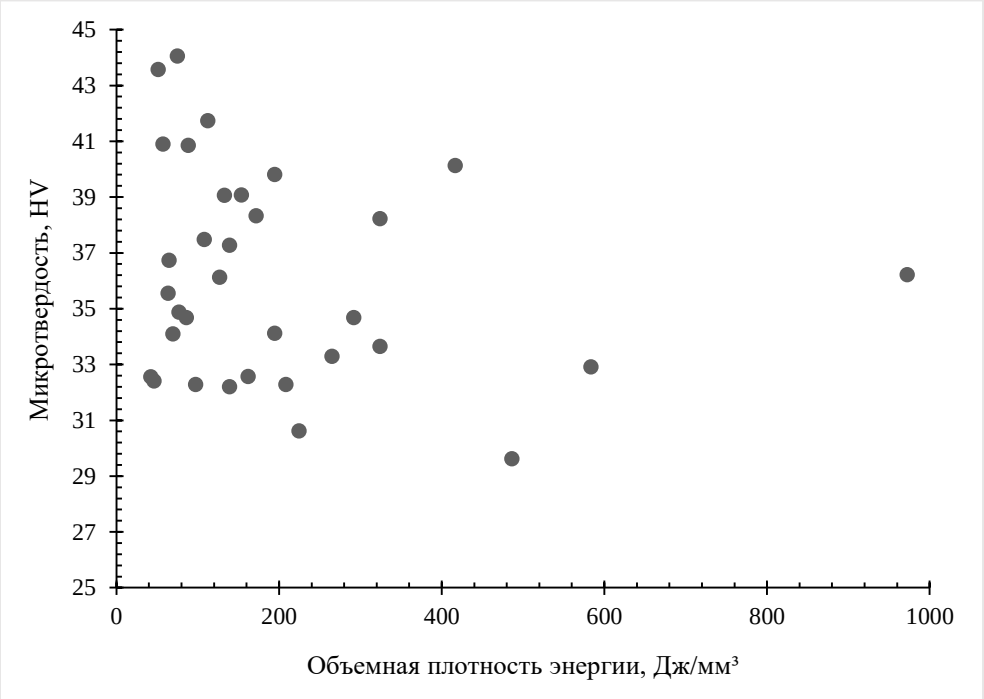


Рис. 3. Зависимость микротвердости сплава Al6Zn от объемной плотности энергии

В дальнейшей работе планируется исследование функциональных свойств полученных сплавов, а также исследование механизма трещинообразования в сплаве Al6Ca, изготовленного методом СЛП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01744, https://rscf.ru/project/25-29-01744.

Список литературы

1. Anwajler B. Potential of 3D Printing for Heat Exchanger Heat Transfer Optimization—Sustainability Perspective // Inventions. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024. Vol. 9, № 3.

2. Mahmoud D. et al. Enhancement of heat exchanger performance using additive manufacturing of gyroid lattice structures // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. Vol. 126, № 9–10. P. 4021–4036.

3. Catchpole-Smith S. et al. Thermal conductivity of TPMS lattice structures manufactured via laser powder bed fusion // Addit Manuf. Elsevier B.V., 2019. Vol. 30.

4. Martínez-Maradiaga D., Mishin O. V., Engelbrecht K. Thermal Properties of Selectively Laser-Melted AlSi10Mg Products with Different Densities // J Mater Eng Perform. Springer, 2020. Vol. 29, № 11. P. 7125–7130.

5. Ghasemi A. et al. Unraveling the low thermal conductivity of the LPBF fabricated pure Al, AlSi12, and AlSi10Mg alloys through substrate preheating // Addit Manuf. Elsevier B.V., 2022. Vol. 59.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ СМАЗКИ ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ МАСЛЯНЫХ БАКОВ

Иванова Е.С.
аспирант кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, zhienia.ivanova.01@mail.ru

Научный руководитель: Иванов С.Л.
д.т.н., профессор кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос повышения надежности дробильно-размольного оборудования (ДРО) за счет совершенствования циркуляционных систем жидкой смазки. Проанализированы распространенные конструкции масляных баков, выявлены их ключевые недостатки: недостаточная глубина очистки масла, сложность обслуживания, высокие энергозатраты. Предложена новая конструкция масляного бака в виде цилиндрического резервуара с пакетом пластин-сепараторов, размещенных в лабиринтном канале, обеспечивающая многоступенчатую сепарацию и ламинарный режим течения. Показано, что внедрение решения позволяет снизить износ узлов, увеличить межремонтный период и сократить эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: дробильно-размольное оборудование, циркуляционные системы жидкой смазки, масляный бак, сепарация, мелкодисперсные примеси, смазочный материал, трение.

Введение. В современной практике эксплуатации горных и горно-обогатительных машин одной из актуальных проблем остается износ деталей, возникающий вследствие контактного взаимодействия соприкасающихся и движущихся элементов оборудования. Это неизбежный процесс при работе любого оборудования, который приводит к постепенному разрушению поверхностей соприкасающихся и движущихся деталей. Он не только сокращает срок службы узлов и агрегатов горных и горно-обогатительных машин, но и снижает общую эффективность их работы, приводя к простоям оборудования [1].

Актуальность решения проблемы изнашивания деталей горных и горно-обогатительных машин обусловлена потерями от выхода оборудования из строя, затратами на внеплановые ремонты и замену изношенных деталей.

Для продления ресурса горных и горно-обогатительных машин широко применяются смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС). Их введение в зоны контакта трущихся поверхностей позволяет снизить коэффициент трения, отвести выделяющееся при трении тепло, снижая интенсивность изнашивания, предотвратить заедания, убрать из рабочей зоны продукты изнашивания и схватывание поверхностей [2].

Эффективность работы СОТС напрямую зависит от рациональности конструкции и качества эксплуатации систем смазки, которые должны обеспечивать своевременную подачу смазочного материала и его равномерное распределение по поверхностям трения, поддержание рационального количества смазочного материала в зоне контакта, а также его очистку, сепарацию и дегазацию [3, 4].

Таким образом, разработка систем смазки представляют собой важнейшее направление повышения надежности и энергоэффективности горных и горно-обогатительных машин. Цель данного исследования – рассмотреть современные подходы к проектированию систем смазки и выявить тенденции усовершенствования этих систем.

Анализ конструкций масляных баков циркуляционной системы жидкостной смазки. Дробильно-размольное оборудование (ДРО) работает в экстремальных условиях, которые характеризуются высокими динамическими нагрузками, абразивной

средой, интенсивным тепловыделением в зоне соприкасающихся и движущихся элементов [5]. Для уменьшения негативного воздействия экстремальных условий работы в ДРО применяются циркуляционные системы жидкой смазки [6, 7]. Без эффективной работы таких систем ресурс ключевых узлов ДРО значительно снижается, что ведет к частым ремонтам и простоям [8].

Масляный бак циркуляционной системы жидкой смазки – не просто резервуар, а многофункциональное устройство, от работы которого зависит эффективность охлаждения масла, качество дегазации, отстаивания и сепарации механических примесей и воды, защита от попадания пыли, влаги и абразива [9].

На практике применяются различные модификации масляных баков циркуляционной системы жидкой смазки, они имеют свои специфику и ограничения.

Бак с внутренним сепаратором и разделительной стенкой работает по следующему принципу: разделительная стенка внутри бака формирует канал, снижающий скорость потока смазочного материала и способствующий выделению из него воздушных включений [10]. Недостатком такой конструкции масляного бака является одноступенчатая сепарация, которая не обеспечивает полного удаления мелких пузырьков воздуха и воды. При недостаточно сниженной скорости потока происходит диспергирование примесей, что замедляет процесс отстаивания смазочного материала.

Интегрированный бак-сепаратор-теплообменник объединяет резервуар для масла, воздухомасляный сепаратор и теплообменник, сокращая габариты системы [11]. Однако в такой конструкции масляного бака затруднен доступ для осмотра, промывки и замены конструктивных элементов, что приводит к сложности регулировки параметров сепарации и охлаждения.

Сепаратор с двумя камерами разделения позволяет распределять поток масла, поскольку камеры питаются от общего коллектора [12]. Ограничением применения указанной конструкции масляного бака служит неравномерное распределение потока между камерами, что ведет к разбросу вязкости и аэрации и перегрузке одной из камер, повышая перепад давления.

Анализ показывает, что ключевые недостатки современных масляных баков носят системный характер и заключаются в недостаточной глубине очистки, сложности обслуживания, увеличении энергозатрат. Одноступенчатые сепараторы не справляются с мелкодисперсными примесями (частицы < 20 мкм), что ускоряет износ подшипников. Монолитные конструкции требуют полной разборки для ремонта, увеличивая время простоя оборудования. Высокие перепады давления в сепарационных камерах повышают нагрузку на насосы, увеличивая расход электроэнергии.

Обсуждение результатов. Решением описанных проблем масляных баков циркуляционной системы жидкой смазки является усовершенствование их конструкции, в частности использование цилиндрической формы бака с установкой пакета пластин-сепараторов, размещенных в лабиринтном канале резервуара-отстойника. Особенностью такой конструкции является сочетание многоступенчатой сепарации с ламинарным режимом течения, что позволяет последовательно удалять различные типы загрязнений из циркулирующего масла. Использование цилиндрического масляного бака с пакетом пластин-сепараторов приводит к увеличению времени контакта масла с сепарационными элементами за счет лабиринтной конфигурации, что повышает эффективность удаления мелкодисперсных примесей, а также к снижению турбулентности, поскольку ламинарный режим предотвращает диспергирование пузырьков воздуха и капель воды, ускоряя их отделение от масла.

Заключение. В ходе исследования проанализированы существующие конструкции масляных баков циркуляционных систем жидкой смазки и выявлены их ключевые недостатки, ограничивающие надежность и эффективность работы машин и оборудования. На основе проведенного анализа предложена новая конструкция масляного бака,

которая представляет собой цилиндрический резервуар с пакетом пластин-сепараторов, размещенных в лабиринтном канале. Применение новой конструкции масляного бака оказывает существенное положительное влияние на надежность ДРО, поскольку приводит к снижению интенсивности износа подшипников скольжения благодаря эффективному удалению абразивных частиц и стабильному теплоотводу, тем самым уменьшая риск аварийных остановок оборудования, увеличивая межремонтный период и сокращая эксплуатационные затраты за счет снижения расхода масла и уменьшения числа внеплановых ремонтов.

Таким образом, предложенная конструкция устраняет основные недостатки существующих конструкций масляных баков, повышает надежность работы ДРО и обеспечивает экономическую эффективность эксплуатации оборудования.

Автор выражает благодарность Корогодину Артуру Сергеевичу за помощь в подборе и переводе литературных источников, использованных в работе.

Список литературы

1. Лагунова Ю.А., Суслина Е.С. Анализ работы системы смазки в дробильно-размольном оборудовании // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 9. С. 34-39. EDN MUVWGN.
2. Vilanova E., Mangas I., Estevez J., Estevan C., Sogorb M.A. Lubricating oils // Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition). 2025. №5. P. 977-986. DOI: 10.1016/B978-0-12-824315-2.01084-8.
3. Лагунова Ю.А., Майоров С.А., Боярских Г.А. Статистический анализ напряженно-деформированного состояния подшипника щековой дробилки // Известия УГГУ. 2020. № 2(58). С. 159-171. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-159-171.
4. Громыка Д.С., Утенкова Т.Г., Короткова О.Ю. Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2. С. 75-86. DOI: 10.25018/0236-14932021-2-0-75-86.
5. Ярмович Я.В. Обоснование ресурса смазочного материала дробильно-размольного оборудования // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 4(50). С. 43-47. EDN WZQQAP.
6. Леванов И.Г., Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Никитин Д.Н. Моделирование гидродинамических подшипников скольжения с учетом индивидуальных противоизносных свойств смазочных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2021. №21(1). С. 14-28. DOI: 10.14529/engin210102.
7. Peng H., Chen Y., Shangguan L., Cheng R., Li Y., Yang C. Multi-objective-based intelligent lubrication system performance evaluation technology for construction machinery // Applied Sciences. 2023. №13(21). P. 1-19. DOI: 10.3390/app132111768.
8. Crump W.J.J. Centralized lubrication for high temperature applications // Tribology. 1972. №5(2). P. 78-80. DOI: 10.1016/0041-2678(72)90122-4.
9. Zheng K., Zhang X., Du K., Li S., Zhang J., Wu W., Xu B., Yang H., Zhang C. Oil film mixed lubrication of heavy-load friction pairs: Theoretical modeling, solution methods, and applications // Tribology International. 2025. №216. P. 1025. DOI: 10.1016/j.triboint.2025.111589.
10. Separator for liquid and gas: пат. US 12031463 B1 США N 18/326,622; заявл. 31.05.2023 ; опубл. 09.07.2024. 12 с.
11. Multi-Function Oil Tank: пат. US 12031463 B1 США N 16/281,852; заявл. 21.02.2019; опубл. 27.08.2020. 6 с.
12. Air/Oil Separator Apparatus and Method: пат. US 20220184641 A1 США N 17/643,544; заявл. 09.12.2021; опубл. 16.06.2022. 12 с.

УДК 621.879.3, 622.271.4, 629.7.063.7

ВЛИЯНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АЦСС НА РЕМОНТНЫЕ ПРОСТОИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Колпаков В.О.
аспирант кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет имени императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, kolpakoffon@yandex.ru

Научный руководитель: Шибанов Д.А.
канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет имени императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния технического состояния автоматических централизованных систем смазки (АЦСС) на надежность и эксплуатационную производительность электрических карьерных экскаваторов большой единичной мощности. Установлена прямая корреляционная зависимость между состоянием АЦСС, частотой и продолжительностью аварийных отказов ресурсоопределяющих узлов, что доказывает неэффективность обслуживания смазочных систем. Обоснована необходимость перехода к планово-предупредительной модели ремонта систем автоматической централизованной смазки на основе разработки и внедрения дифференцированного регламента технического обслуживания и ремонта, интегрированного в общую систему обслуживания парка горных машин.

Ключевые слова: электрический карьерный экскаватор, автоматическая система смазки, аварийные отказы, надежность, седловой подшипник, техническое обслуживание, условия эксплуатации.

Введение. Эксплуатационная надежность электрических карьерных экскаваторов в тяжелых условиях железорудных карьеров в значительной степени определяется эффективностью смазывания узлов горной машины, реализованных парами трения, в том числе узлов рабочего оборудования [1 – 3]. Вместе с тем, действующие регламенты обслуживания автоматических централизованных систем смазки (АЦСС), основанные на эмпирическом опыте, не учитывают переменный характер реальных нагрузок и горно-геологических условий, что ведет к нерациональному расходованию смазочного материала и росту числа внеплановых простоев. Целью работы является количественная оценка влияния технического состояния АЦСС на интенсивность аварийных отказов экскаваторов и обоснование необходимости разработки адаптивного регламента их технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Методы. Методологическую основу исследования составил анализ статистических данных эксплуатационных отказов парка карьерных экскаваторов за двухгодичный период (Рисунок 1). Была сформирована и обработана репрезентативная выборка данных по 12 машинам типа ЭКГ-20. Основное внимание уделялось анализу отказов узлов, реализованных парами трения, в частности, узлов седлового подшипника, позиционируемых как ресурсоопределяющих [4–6]. Параллельно проведен технический аудит в рамках исследования фактического состояния компонентов АЦСС. Корреляционный анализ выполнялся путем сопоставления доли неработоспособных элементов смазочных систем с показателями времени аварийных простоев по механической части горной машины.

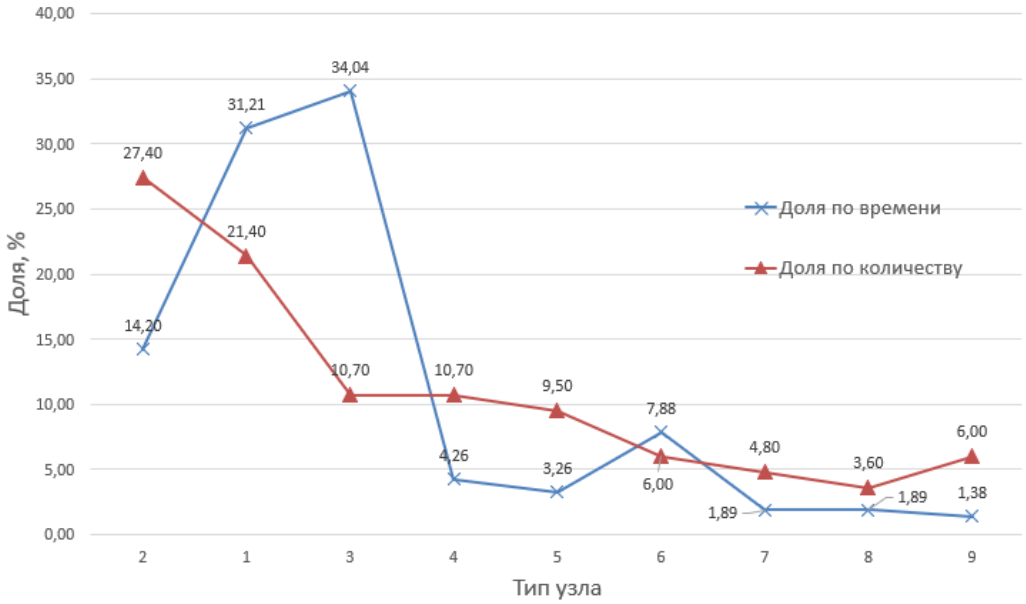


Рис. 1. Доли времени в ремонте и доли времени по отказам машин
с объемом ковша 20м^3 за период 2024-2025 г.г.
(1 – узлы седлового подшипника, 2 – подвеска ковша, 3 – опорно-поворотное устройство,
4 – замена тросика ОДК, 5 – прочие пары трения, 6 – механизм подъема,
7 – механизм напора, 8 – пневмосистема, 9 – прочее) (*составлено автором*)

Результаты. Результаты обработки статистических данных подтверждают, что абсолютное большинство простоев (более 87%) связано с аварийными механическими отказами. Анализ структуры отказов показал, что узлы седлового подшипника демонстрируют высокую значимость, занимая одно из лидирующих мест как по количеству аварийных отказов, так и по суммарной продолжительности внеплановых простоев [5]. Установлена устойчивая положительная корреляция между долей неработоспособных элементов АЦСС и временем аварийных простоев (Рисунок 2). Было выявлено, что система наиболее чувствительна к дефектам на начальной стадии: даже незначительное увеличение доли неисправных компонентов в начальном диапазоне приводит к резкому, практически двукратному росту продолжительности простоев.

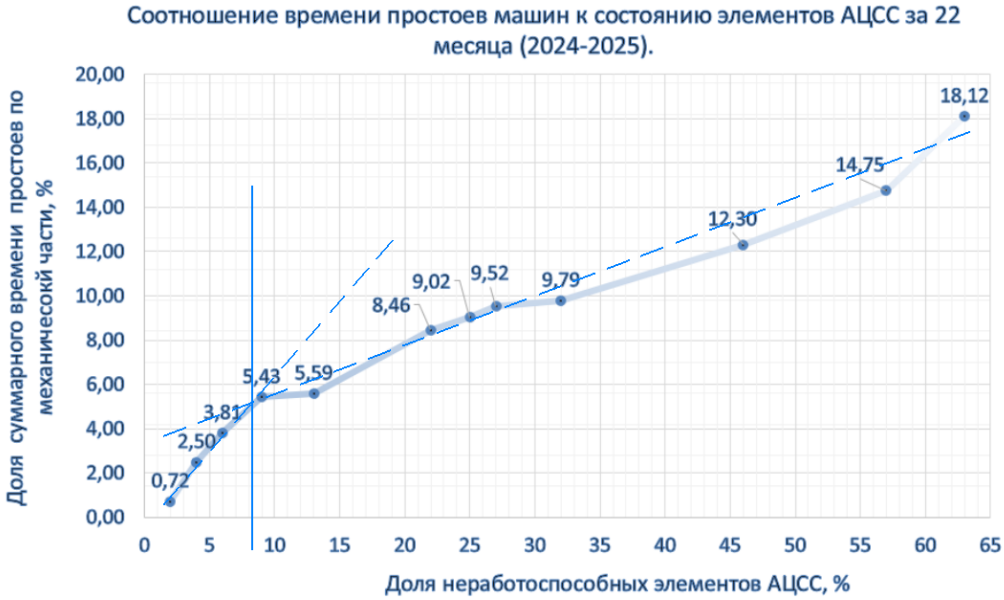


Рис. 2. Изменение доли суммарного времени простоев карьерных экскаваторов
от доли работоспособных элементов АЦСС за период 2024-2025 г.г. (*составлено автором*)

Практическим подтверждением установленной зависимости послужил эксперимент по восстановлению АЦСС седлового подшипника на одном из экскаваторов, в результате которого продолжительность связанных с данным узлом простоев сократилась более чем в 10 раз за сопоставимый период наблюдений.



Рис. 3. Изменение доли времени простоев в ремонте рабочего оборудования по месяцам от суммарного времени в ремонте за период 01.25-10.25 г. (*составлено автором*)

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что некорректная работа систем АЦСС является не сопутствующим фактором, а одной из ключевых причин, влияющих на частоту аварийных отказов и повышение уровня эксплуатационных издержек. Существующая практика обслуживания АЦСС «по факту отказа» продемонстрировала свою неэффективность, поскольку выход из строя даже небольшой части системы катастрофически влияет на ресурс ответственных узлов [6–8]. Выявленная закономерность согласуется с современными мировыми тенденциями в области эксплуатации тяжелой горной техники, указывающими на необходимость перехода к стратегиям обслуживания, основанным на постоянном мониторинге фактического состояния оборудования [9, 10].

Заключение. На основании проведенного анализа статистически подтверждена прямая причинно-следственная связь между уровнем технической готовности автоматических систем смазки и эксплуатационной надежностью карьерных экскаваторов. Для минимизации внеплановых простоев, сокращения расходования смазочных материалов и снижения совокупной стоимости владения необходимо внедрение новой модели обслуживания АЦСС. В качестве системного решения предложена разработка и внедрение дифференцированного регламента ТОиР АЦСС. Данный регламент должен быть адаптирован к реальным условиям эксплуатации, стратифицирован по видам обслуживания и интегрирован в общую систему планово-предупредительного ТОиР экскаватора. Его реализация позволит увеличить межремонтные интервалы, повысить коэффициент технической готовности парка и обеспечить существенный экономический эффект.

Список литературы

1. Валиев Н.Г., Разоренов Ю.И., Голик В.И., Лебзин М.С. Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд / Н.Г. Валиев, Ю.И. Разоренов, В.И. Голик, М.С. Лебзин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 4. – С. 33-43. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33. – EDN UAWBYI.
2. Кузнецов Д.В., Косолапов А.И. Методология обоснования горнотранспортного оборудования для рудных карьеров/ Д.В. Кузнецов, А.И. Косолапов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20, № 3. – С. 54-63. – DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63. – EDN WZFDBM.
3. Knyazkina, V.I., Ivanov, S. (2022). Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state/ V.I. Knyazkina, S. Ivanov //. Mining Informational and Analytical Bulletin, 6-2, 223-236. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_223.
4. Kazakov, Y.A., Kozachkov, G.S. (2025). Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. / Y.A. Kazakov, G.S Kozachkov, // Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025(12), 85-99. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_85.
5. Агагена Абдельвахаб, Репкина К.С., Михайлов А.В. Корректировка регламента технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора на руднике Буха-дра / Абдельвахаб Агагена, К.С. Репкина, А.В. Михайлов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 146–151. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24−146−151.
6. Колпаков В.О., Шибанов Д.А., Селезнев М.С., Хамидов О.У., Анализ функционирования систем централизованного смазывания узлов карьерных экскаваторов / В.О. Колпаков, Д.А. Шибанов, М.С. Селезнев, О.У. Хамидов // ТГиСМ НиП. – 2025. – №34 С. 122. – DOI: 10.26160/2658-3305-2025-34-122-128.
7. Иванов С.Л., Дудко П.П., Дмитриев Г.Ю., Подхалюзин С.П. / Автоматические централизованные системы смазки. Опыт применения, проблемы и перспективы использования / С.Л. Иванов, П.П. Дудко, Г.Ю. Дмитриев, Подхалюзин С.П. // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 22-26. – EDN: LHPWVD.
8. Грабский А.А., Сергеев В.Ю., Грабская Е.П. Обоснование выбора стратегиитехнического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов / А.А. Грабский, В.Ю. Сергеев, Е.П. Грабская // Уголь. – 2021. – № 2. – С. 14–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14−17.
9. Ковалев М.А., Москвичев В. В. Надежность карьерных экскаваторов на угольных разрезах Кузбасса / М.А. Ковалев, В.В Москвичев // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. – 2024. – № 1. – С. 300–303. DOI: 10.24412/cl-37269−2024−1-300−303.
10. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере / В.М. Курганов, М.В. Грязнов, С.В. Колобанов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 10–21. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.10.

УДК 681.512.2

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ИЗНОСА ФУТЕРОВОК ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ И ГОРНО-ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН НА БАЗЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Мельников М.М.
студент механико-машиностроительного факультета,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, melnikovmiron@gmail.com

Научный руководитель: Голиков Н.С.
доцент кафедры машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен морфологический анализ датчика износа футеровок горнотранспортных и горно-перерабатывающих машин и оборудования. Анализ выполнен по методу Ф. Цвикки и заключается в представлении предмета исследования в виде множества элементов и связей между ними. Использование данной методики позволяет обоснованно выбирать рациональную комбинацию составных частей машины или устройства и точно определить его эксплуатационные условия.

Ключевые слова: износ футеровки, контроль износа, мониторинг износа, датчик износа, общий морфологический анализ, Фриц Цвикки, структурная схема, определение структуры.

Морфологический анализ механизма, машины или устройства позволяет выполнить одну из главных задач конструирования многоэлементных устройств – определение общей структуры итогового изделия и подбор подходящих вариантов исполнения его элементов. В работе рассматривается пример проведения первых этапов общего морфологического анализа.

Целью данной работы является определение возможных вариантов исполнения датчика износа футеровок (далее ДИФ), для дальнейшего выбора рациональной комбинации. Идея заключается в использовании устоявшихся научных методов, а именно метода общего морфологического анализа, разработанного Ф. Цвикки [3] и развитого в трудах отечественных ученых[1] [5]. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: выбор подходящих методик морфологического анализа, структурный анализ устройства, определение общего компонентного состава ДИФ, составление перечня возможных вариантов исполнения каждого компонента, определение условий применения для каждого варианта.

Методику в общем виде можно определить следующим образом [2]: 1) формулировка проблемы и изучение существующих объектов подобного назначения; 2) выделение в объекте отдельных элементов, несущих определенный функционал и определение эксплуатационных характеристик каждого элемента. 3) конструирование морфологического ящика или многомерной матрицы, содержащей всевозможные комбинации решений для каждого структурного компонента системы; 4) анализ и оценка решений с точки зрения поставленных целей и задач; 5) выбор рационального варианта исполнения итоговой конструкции.

Следуя установленной методике, сперва была выделена основная проблема и изучены существующие разработки. Проблема заключается в необходимости обоснования

[1] Андрейчиков, А.В. Морфологические методы исследования новых технических решений : учеб. пособие / А.В. Андрейчиков, В.А. Камаев, О.Н. Андрейчикова. – Волгоград : ВолгГТУ, 1994. – 164 с.

рациональности того или иного структурного состава ДИФ. В качестве существующих решений были выбраны современные датчики и системы мониторинга, представляющие законченные коммерческие продукты [1].

Следующим этапом была разработана общая структурная схема датчика, определены функции каждого элемента и представлены возможные варианты исполнения каждого из них. Общая структурная схема ДИФ выглядит следующим образом. Составные части, выбранные в качестве верхних уровней структуры влияют своими характеристиками и требованиями на нижние.

1. Индикаторный элемент;
2. Система контроля длины футеровочного элемента;
3. Система обработки данных измерительного элемента:
   3.1. Обрабатывающий микроконтроллер;
   3.2. Элемент питания датчика;
4. Система передачи данных на систему сбора.

Следующим шагом были определены функции каждого из структурных элементов и определены существующие варианты исполнения каждого из них. Для элемента (1) структуры, были определены две функции: крепежная и измерительная [1]. Измерительная функция выполняется в результате стирания индикаторного элемента вместе с футеровкой. В качестве возможных вариантов были определены следующие конструктивные исполнения: болт, шпилька, штифт;

Для элемента (2) были выделены два способа. Метод разрыва цепи заключается в постепенном дискретном изменении сопротивления, посредством стачивания ступенчато расположенных внутри индикаторного элемента, элементов сопротивления, в результате чего примерную длину элемента можно узнать, изучив параметры протекающего тока. Ультразвуковой метод заключается в измерении толщины с помощью ультразвукового эхо-сигнала, подаваемого и снимаемого с поверхности индикаторного элемента. Рассмотрены два варианта: 1) ультразвуковой контроль на основе пьезоэлектрического датчика – заключается в использовании пьезоэлектрического элемента в качестве источника ультразвукового импульса, а затем повторное использование того же элемента для принятия эхо сигнала. Эксплуатационные особенности такого способа заключаются в необходимости наличия контактной жидкости и притирка на поверхности индикаторного элемента, с которой производится контакт датчика; 2) ультразвуковой контроль ЭМА (электромагнитно-акустический) – заключается в возбуждении и приеме индуктором поперченных ультразвуковых волн внутри материала, вызываемых вихревым током на поверхности материала. Особенностями данного способа являются отсутствие контактной жидкости, возможность наличия возможного зазора, окалины или неровности материала, высокая чувствительность к внешним шумам и вибрациям.

Элемент (3) разделен на два структурных подэлемента. Функция обрабатывающего микроконтроллера заключается в создании связующего звена между измерительным устройством и устройством передачи значений, а также преобразование значений системы контроля в физические величины. Было выбрано два возможных варианта исполнения: 1) Low-Power MCU (Microcontroller unit, пер. микроконтроллер низкого энергопотребления), включает в себя такие серии контроллеров, как ESP32 и STM. Особенностями данного варианта является низкое энергопотребление, дешевизна, невозможность произведения сложных обрабатывающих операций; 2) DSP-контроллер (Digital Signal Processor, пер. цифровой сигнальный процессор), вариант исполнения, основанный на контроллерах с раздельными шинами для получения данных и передачи команд, а также с возможностью проведения нескольких простых арифметических операций в один момент времени. Особенности метода – уменьшение энергоэффективности, возможность производить первичную очистку сигнала от погрешностей и шумов. Функция элемента питания заключается в подаче электроэнергии для всего датчика.

Элемент выделен внутри системы обработки данных, так как подключение происходит сперва в микроконтроллер, а уже оттуда питание подается на измерительную систему и систему связи. В качестве возможных вариантов исполнения выбраны следующие: 1) проводное питание, имеет преимущество в виде отсутствия необходимости перезарядки или замены элемента питания и следующие особенности – упрощение конструкции датчика, невозможность установки на движущие части машины, ограничение габаритов измеряемых машин; 2) литий-тионхлоридные батареи (Li-SOCl2), отличаются очень большой емкостью (до 35 А*ч) и удельной плотностью аккумулятора, однако не имеют возможность зарядки; 3) литий-железо-фосфатные (LiFePO4) имеют высокую удельную плотность и относительно высокую емкость, являются высоко-термически и химически стабильными.

Элемент (4) обеспечивает функцию передачи данных с ДИФ на станции приема. Проводная связь исполнена в виде коммутационного провода. Имеет схожие эксплуатационные особенности с проводным вариантом питания, а также обладает жестким ограничением на количество используемых датчиков в общей системе, так как для каждого нового датчика необходим дополнительный контакт для станции приема. Беспроводная связь может быть исполнена в следующих вариантах: 1) LoRaWAN – протокол связи, работающий на нелицензируемых частотах стандарта ISM RU864-870 (864-865, 868,7-869,2 МГц). Дальность распространения такого сигнала в условиях производства или горной выработки достигает 5 км; 2) NB-IoT (Narrowband Internet of Things) – стандарт сотовой связи для интернета вещей, обеспечивается на частотах B20 (800 МГц), B8 (900 МГц), B3 (1800 МГц), обладает дальностью в условиях плотной застройки около 1-2 км, но такое подключение требует покрытие сотовыми вышками3) ZigBee/WirelessHart – связь использующая протокол IEE802.15.4, работающий на частоте 2.4 ГГц, причем такой сигнал обладает низкой проходимостью через препятствия ограничивая дальность применения данного варианта до 10-30 метров. Особенность этого варианта заключается в создании mesh-сетей, и использовании других устройств, как ретрансляторов сигнала, что позволяет создавать покрытие по всей поверхности футеровочного материала машины.

В данной работе были разобраны и проведены два первых пункта общего морфологического анализа для датчика износа футеровок. Это позволит в дальнейшем создать матрицу комбинаций существующих решений и вариантов исполнения или морфологический ящик, для анализа всевозможных вариантов. Данная работа делает возможным рациональный выбор наиболее эффективной итоговой конструкции для конкретных условий эксплуатации датчика.

Список литературы

1. Голиков Н.С., Шашурин Н.С., Михалченков Е.В., Крепов К.С., Деревянко А.А., Соколов М.В. Обзор современных систем автоматизированного дистанционного мониторинга износа футеровок горно-транспортных и горно-перерабатывающих машин и оборудования // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – № 34. – С. 112-121.
2. Пилипенко С. В. Применение методов морфологического анализа для принятия оптимальных технических решений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2020. №3.
3. Fritz Zwicky. Discovery Invention, Research Through the Morphological Approach. McMillan, 1969.
4. Титов, В.В. Морфологический подход / В.В. Титов. – М. : Знание, 1990. – 64 с. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Математика, кибернетика» ; № 8).

УДК 622.276.438

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ

Мусихин Д.В.[1], Чиркова А.А.[2]
[1] студент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, musikhin5.04@bk.ru
[2] студент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, nastyachirkova2005@gmail.com

Научный руководитель: Шишлянников Д.И.
доктор технических наук, профессор кафедры «Горная электромеханика», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности функционирования оборудования, применяемого для очистки оборотной воды в системах поддержания пластового давления (ППД) нефтяных промыслов. Особое внимание уделено традиционным и перспективным технологиям очистки оборотной воды. Наиболее простым и распространенным методом очистки воды для закачки в систему ППД является использование резервуаров-отстойников с различными типами распределительных устройств. Однако, данный метод характеризуется низкой эффективностью и малой производительностью. Представлены результаты экспериментальных исследований по удалению эмульгированной нефти с использованием олеофобного материала OreFilter. Описаны технические решения для автоматизации тонкой очистки воды от механических примесей на примере комплексов распределения и фильтрации «БРИФ».

Ключевые слова: система поддержания пластового давления, оборудование для очистки оборотной воды, щелевые фильтры, олеофобные материалы, механические примеси, эмульгированная нефть.

Разработка нефтяных месторождений на поздних стадиях характеризуется ухудшением горнотехнических условий эксплуатации добывающих скважин и снижением продуктивности пластов, что требует применения методов интенсификации нефтедобычи. В настоящее время на нефтяных промыслах широко используются системы поддержания пластового давления (ППД). Заводнение пластов, поддержание приемной способности нагнетательных скважин, а также соблюдение требований экологического надзора обусловливает необходимость использования оборотной воды, подвергаемой качественной очистке от механических примесей и нефтепродуктов. Актуальной является задача совершенствования оборудования водоподготовки систем ППД нефтяных промыслов [1–3].

Наиболее простым методом очистки оборотной воды для закачки в систему ППД является использование резервуаров-отстойников с различными типами распределительных устройств. Однако процесс гравитационной сепарации требует существенных временных затрат и не позволяет отделить частицы механических примесей крупностью менее 100 мкм, а также эффективно очистить оборотную воду от мелкодисперсных глобул нефти [4]. Гравитационные сепараторы характеризуются существенной металлоемкостью и значительными габаритными размерами, что зачастую вызывает трудности при размещении систем водоочистки в пределах площадей землеотвода нефтяных промыслов [5, 6].

Автором проанализированы типовые схемы очистки оборотной воды с использованием фильтров, центробежных и инерционных сепараторов механических примесей и нефтепродуктов. Указывается, что главным недостатком традиционных щелевых фильтров является их низкая грязеёмкость и малая эффективность при очистке воды от

нефтепродуктов. Эффективность работы сепараторов существенно зависит от свойств очищаемой жидкости и отделяемых сред.

Показано, что эффективная очистка оборотной воды возможна с использованием каскадных систем фильтрации, в состав которых включены ступени грубой и тонкой очистки [7, 8].

Очистка оборотной воды от частиц механических примесей крупностью более 100 мкм возможна посредством применения щелевых фильтров, серийно выпускаемых отечественными предприятиями нефтяного машиностроения [1, 9]. Например, использование блоков фильтрации и очистки «БРИФ», производства компании АО «НОВОМЕТ-Пермь», позволяет очищать до 300 $м^3$/ч оборотной воды. При этом фильтроэлементы блоков «БРИФ» имеют функцию самоочистки посредством обратной промывки. Доочистка оборотной воды от глобул нефти и мелкодисперсных частиц механических примесей может быть реализована посредством использования насыпных фильтров с олеофобными гранулами. Например, высокую эффективность очистки воды от нефтепродуктов показывают олеофобные материалы OreFilter [8, 10].

Применение каскадных систем фильтрации, основанной на использовании щелевых и насыпных фильтров, позволяет повысить производительность и снизить стоимость процесса очистки оборотной воды для нефтедобывающих предприятий, что положительно скажется на рентабельности эксплуатации месторождений, находящихся на поздних стадиях разработки. Эффективность описанных автором технико-технологических решений подтверждается результатами лабораторных и промысловых исследований.

Список литературы

1. Шишлянников, Д.И. Повышение эффективности очистки оборотной воды на нефтяных промыслах / Д.И. Шишлянников, В.К. Картавцев, Ю.Г. Коротков, А.А. Иванченко, Д.И. Дремина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. №5 (389). С. 54–60.
2. Тананыхин, Д.С. Разработка химического способа обработки призабойной зоны для ограничения выноса песка в нефтяных скважинах / Д.С. Тананыхин, А.В. Петухов // Инженер-нефтяник. 2012. № 4. С. 31–34.
3. Гидроструйная эксплуатация скважин с применением блока распределения, измерения и фильтрации «БРИФ» производства ЗАО «Новомет-Пермь» / А.П. Балабанов, М.С. Попов, Ю.В. Данченко // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 6. С. 4–14.
4. Ланина Т.Д. Возможные пути решения проблемы подготовки воды для системы ППД нефтяных месторождений // Оборудование и технологии нефтегазового комплекса. 2009. № 2. С. 56–60.
5. Подготовка нефтепромысловых вод для использования в системе поддержания пластового давления / В.Д. Назаров, Л.Я. Абдулла, М.В. Назаров // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2008. № 1. С. 9–15.
6. Ивановский, В.Н. Цифровые двойники и предиктивный анализ работы установок ЭЛН в осложненных условиях / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, А.В. Деговцов, И.Н. Герасимов // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. 2021. № 4 (21). С. 164–171.
7. Якимов, С.Б. Состояние и перспективы использования технологий эксплуатации малодебитных скважин в ОАО «НК «Роснефть» / С.Б. Якимов // Инженерная практика. 2014. № 11. С. 4–12.
8. Шишлянников, Д.И. Повышение эффективности водоподготовки на нефтяных промыслах посредством использования фильтров производства АО «Новомет-Пермь» / Д.И. Шишлянников, А.В. Шавалеева, С.В. Кулаков, Ю.Г. Коротков // Нефтепромысловое дело. 2018. №12. С. 68–73.
9. Яковлев, А.Л. Анализ эффективности применяемого оборудования и возможных причин отказа при интенсификации добычи нефти на месторождениях Краснодарского края / А.Л. Яковлев, О.В. Савенок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 149-163.
10. Вдовин, Э.Ю. Новые технологии эксплуатации малодебитного и периодического фонда / Э.Ю. Вдовин, Л.И Локшин, М.А. Лурье, А.Д. Коротаев, Э.О. Тимашев // Инженерная практика. 2017. №11. С. 40–43.

УДК 621.923.9

ВАРЬИРОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМЦ

Овсянников Д.А.
студент гр. ТОА-22,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, del401152@yandex.ru

Научный руководитель: Кексин А.И.
к.т.н., доцент кафедры Машиностроения,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы варьирования значений магнитной индукции в рамках непрерывной магнитно-абразивной обработки. Показан положительный результат разделения процесса на этапы, характеризующиеся различными значениями магнитной индукции, заключающийся в повышении качества обработанной поверхности. Обосновывается практическая значимость полученных результатов для обеспечения выполнения электротехнически обоснованных требований к внутренней поверхности корпуса элегазового трансформатора.

Ключевые слова: Магнитно-абразивная обработка, алюминиевый сплав АМц, шероховатость, режимные параметры, магнитная индукция, элегазовый трансформатор.

Трансформаторные подстанции играют ключевую роль в обеспечении электроэнергией конечных потребителей, в качестве которых выступают различные хозяйствующие субъекты, к которым относятся как граждане (физические лица), так и промышленные предприятия машиностроительной, горнодобывающей и нефтяной отраслей, реализующие необходимые для экономики страны технологические процессы с целью выпуска имеющей спрос на рынке продукции, добычи сырья. Являясь промежуточным звеном в цепи передачи электроэнергии от станций, ее вырабатывающих, к вышеуказанным конечным потребителям, трансформатор должен быть надежным и долговечным в различных эксплуатационных условиях, что обеспечивается расчетами при его проектировании, их учитывающими.

В современных трансформаторах применяют два способа электроизоляции: масляная и газовая, и вызванные их особенностями и изолирующими характеристиками недостатки накладывают ограничения на срок службы, условия и стоимость эксплуатации, точность и качество изготовления ответственных деталей. Так, на сегодняшний день применение первого способа изоляции устарело ввиду пожаро- и взрывоопасности оборудования. В противоположность ему элегаз в этом отношении безопасен, и как изолирующий обладает лучшими характеристиками, в особенности – напряженностью пробоя, наивысшей среди газов [1], в результате чего трансформаторы на его основе применяются повсеместно.

Такие характеристики напряженности обеспечиваются в том числе и технологией окончательной обработки непосредственно контактирующей с элегазом внутренней цилиндрической поверхности большого диаметра корпуса, выполняемого из алюминиевого сплава АМц. При этом окончательно формируется микрорельеф поверхности, который должен иметь однородную высоту, не превышающую Ra = 0,4 мкм. При невыполнении указанных требований снижается разрядное напряжение, что приводит к пробою газовой изоляции и выходу из строя трансформатора [2]. Более половины таких повреждений являются следствием дефектов изготовления [3]. Это определяет актуальность проблемы выбора способа финишной обработки и его режимных параметров, которое бы обеспечивало получение требуемого качества.

Рассматривая в этой связи инновационные методы финишной обработки различных материалов, можно выделить метод магнитно-абразивной обработки (МАО). Проведенные ранее эксперименты, сформировавшие массив информации о результатах осуществления метода МАО с учетом производительности применительно к немагнитным заготовкам, в частности изготовленным из сплава АМц, говорят о потенциальной возможности с его помощью обеспечить требуемое качество рассматриваемого изделия. [4].

Вследствие этого, целью настоящей работы ставиться обоснование выбора способа МАО и определение рационального сочетания его режимных параметров, которые позволяют получить значения шероховатости Ra < 0,4 мкм внутренней поверхности корпуса элегазового трансформатора из алюминиевого сплава АМц. Обоснование выбора способа МАО осуществляется на основе анализа возможностей существующих способов МАО, а определение режимных параметров – при помощи экспериментальных исследований.

В работе [5] отмечается, что толщина снимаемого слоя наиболее зависит от воздействующей на частицы ферроабразивного порошка магнитной индукции, которая в то же время в наибольшей степени определяет силу резания. Кроме того, отмечается, что конечный результат обработки во многом зависит от продолжительности ее осуществления. При этом потенциальная возможность повышения эффективности МАО заключается в осуществлении ее непрерывно и при этом разделяя на черновой и чистовой этапы, соответствующие снятию основного припуска и доводку до заданный параметров качества. При этом необходимо выбрать такую схему реализации метода МАО, которая позволила бы осуществлять варьирование магнитной индукции как наиболее влияющего на результат обработки параметра с наименьшими затратами времени.

Известные способы обработки с применением постоянных магнитов [6] полностью исключаются из рассмотрения в контексте настоящего исследования ввиду невозможности изменения магнитной индукции, не прерывая процесс полирования. Причем предложенный в работе [7] способ изменения магнитной индукции путем соответствующего расширения либо сужения рабочего зазора ограничивается габаритами установки и, ввиду этого, трудноосуществим. Ввиду этого рассмотрим способы, при которых наведение магнитного поля в зону обработки осуществляется от электромагнитов, образующихся в результате подачи электрического тока на катушки.

В работе [8] предлагается зачищать оксидные пленки поверхностей путем проведения заготовки между вращающимися барабанами с магнитно-абразивной щеткой. При этом значения режимных параметров единожды устанавливаются вначале и поддерживаются неизменными в процессе обработки, ввиду чего постоянна и воздействующая на заготовку сила резания, определяющая величину снятия припуска и, что не позволяет изменять характер обработки. Способ [9] предлагает разделение заготовки на участки и осуществление поэтапной их магнитно-абразивной обработки при ее вращении, что делает процесс итерационным, ввиду чего результат обработки таких участков, характеризующийся значением параметра шероховатости и однородностью высоты микровыступов, может быть различным.

С учетом всего вышеизложенного предлагается использовать схему, аналогичную изложенной в работе [10], оптимальную для реализации варьирования параметров непрерывной обработки при сочетании равномерных прямолинейного возвратно-поступательного и вращательного движений заготовки в пространстве между полюсами. При этом данный способ позволяет осуществлять изменение значений магнитной индукции без существенных затрат времени и усилий за счет повышения и понижения величины подаваемого на электромагнитные катушки тока.

По описанному выше способу проведена экспериментальная МАО заготовки-фрагмента рассматриваемой поверхности корпуса элегазового трансформатора в течение 6 минут порошком Пр-10Р6М5 зернистостью 100 мкм. При этом варьирование режимов

осуществлялось путем определения результата от воздействия на заготовку в течение времени обработки установленных значений магнитной индукции в диапазоне от 0,3 Тл до 1,0 Тл, а после – от поочередного их воздействия в рамках общего времени обработки.

Обработка полученных при проведении эксперимента результатов показала, что повышение показателей качества обработанных с применением МАО поверхностей из сплава АМц можно достичь следующим сочетанием режимных параметров: при осуществлении непрерывной МАО продолжительностью 6 минут необходимо устанавливать магнитную индукцию, соответствующую черновой обработке, в среднем 0,7 Тл на первые 3 мин, и чистовой обработке в среднем 0,5 Тл на вторые 3 мин, в результате чего возможно получение шероховатости $Ra < 0{,}2$ мкм.

Таким образом, в настоящем исследовании предложено решение проблемы обеспечения качества внутренней цилиндрической поверхности большого диаметра корпуса элегазового трансформатора в виде применения усовершенствованного способа МАО с учетом разделения воздействий на черновое и чистовое. Реализация данного способа позволяет получить значения шероховатости, полностью обеспечивающие выполнение заданных эксплуатационных требований к высоте микровыступов профиля поверхности и их однородности, что говорит о достижении цели настоящего исследования. Результаты обладают практической значимостью, предлагая решение актуальной научно-производственной проблемы, согласуются с имеющимся научным опытом в области МАО, и определяют вектор дальнейших исследований способа в части применения для полирования внутренней поверхности корпуса элегазового трансформатора.

Список литературы

1. Кох, Д. Свойства SF6 и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения [Текст] / Д. Кох // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2003. – № 2. – С. 22.
2. Полтев А.И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 240 с.
3. Повреждаемость основного электрооборудования ПС напряжением 110-750 кВ В РФ / В.С. Богомолов, М.Х. Зихерман, Ю.Н. Львов [и др.] // Энергия единой сети. – 2013. – № 2(7). – С. 14-21.
4. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. – Мн.; БИТУ, 2006. – 218 с.
5. Овсянников, Д.А. Влияние магнитной индукции на величину удельного съема материала при магнитно-абразивной обработке поверхностей из алюминиевого сплава АМц / Д.А. Овсянников // Моя специальность : Тезисы докладов конкурса научных работ обучающихся, Санкт-Петербург, 15–17 октября 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2026. – С. 215-216. – EDN MLXIWW.
6. Патент № 2843023 C1 Российская Федерация, МПК B24B 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки бронзовых вкладышей подшипников скольжения: № 2024129881: заявл. 04.10.2024: опубл. 07.07.2025 / В.В. Максаров, В.Г. Куфаев ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».
7. Акулович Л.М., Миронович А.В., Ворошухо О.Н. «Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки» // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2016. – № 4. – С. 37-48.
8. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
9. Патент № 2626124 C1 Российская Федерация, МПК B24B 31/112. Способ магнитно-абразивного полирования рабочих участков метчика: № 2016114202: заявл. 12.04.2016: опубл. 21.07.2017 / В.В. Максаров, А.И. Кексин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».
10. Максаров В.В., Кексин А.И., Филипенко И.А. Влияние процесса магнитно-абразивной обработки на шероховатость плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц. Цветные металлы, 2022, №7, С. 82–87.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА РАБОЧИМ ИНСТРУМЕНТОМ ГОРНЫХ МАШИН

Речкин С.Е.
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, srechkinski@gmail.com

Научный руководитель: Задков Д.А.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы исследования процесса разрушения горного массива резцовым инструментом с использованием современных методов математического моделирования. Приведены обоснования применяемых методов моделирования и показаны результаты моделирования с использованием программного комплекса Ansys.

Ключевые слова: резец, очистной комбайн, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Введение. В настоящее время при подземной добыче угля в длинных очистных забоях основным оборудованием механизированных комплексов являются очистные узкозахватные комбайны, которые оснащаются преимущественно шнековыми исполнительными органами с тангенциальными поворотными резцами.

В настоящий момент определение основных параметров шнековых исполнительных органов осуществляется согласно ОСТ 12.44.258-84. В проведенных исследованиях [1, 2] показывается ряд недостатков данной методики: углы установки резцов, а также их количество не регламентируются однозначно, в связи с чем при эксплуатации в промышленных условиях наблюдается повышенный износ рабочего инструмента и самих исполнительных органов (рисунок 1).

С момента утверждения отраслевого стандарта произошло стремительное развитие как вычислительной техники, так и программных комплексов, позволяющих исследовать различные динамические процессы. Появилась возможность создавать модели, описывающие процесс разрушения угольного массива резцовым инструментом, и исследовать различные его параметры. Главным преимуществом модели перед производственными испытаниями является гибкость, что подразумевает под собой возможность изменять параметры исследуемого процесса.

В практике моделирования процесса разрушения угольных пластов резцовым инструментом наибольшее распространение получили методы дискретных (МДЭ) и конечных элементов (МКЭ). Однако, для более углубленного и точного решения задачи о нахождении нагрузок на резцах используется метод конечных элементов [3].

Методы. Моделирование процесса разрушения угольного массива проводилось с использованием метода конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса Ansys LS-DYNA. В качестве модели, описывающей поведение угольного массива при его разрушении резцовым инструментом, была выбрана карта *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (JHC), для материала резца – *MAT_RIGID.

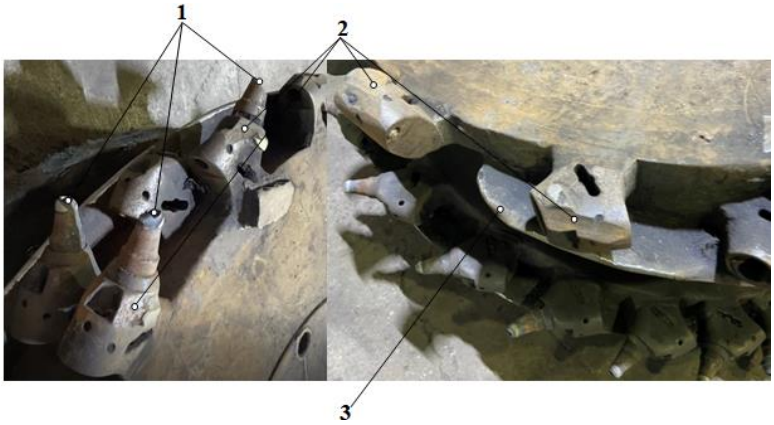
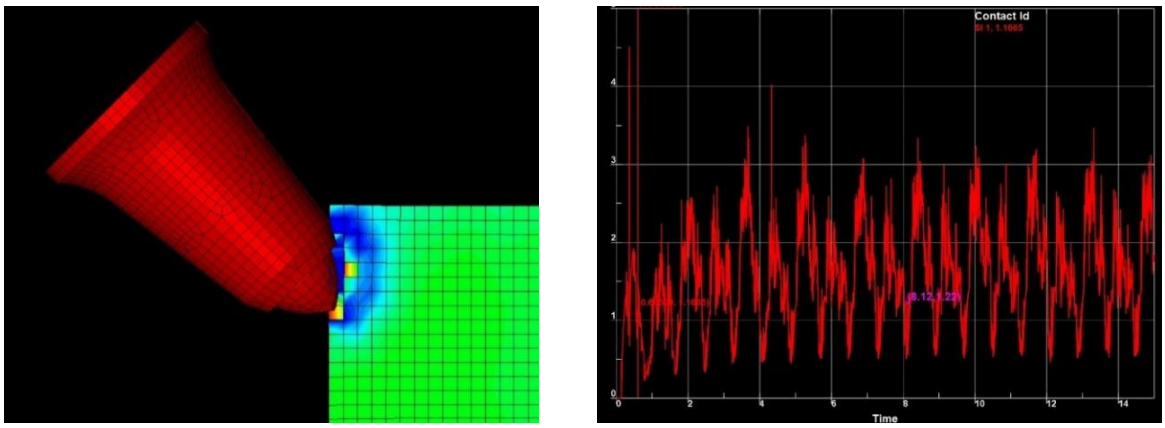


Рис. 1. Характер изнашивания шнекового исполнительного органа:
1 − износ резцов; 2 − износ резцедержателей; 3 − износ реборды

Результаты. Было проведено моделирование процесса разрушения угольного массива в следующих условиях: резец РШ 30-75L85 разрушает угольный массив в виде параллелепипеда с размерами 200×150×150 мм, резец движется с постоянной линейной скоростью ν = 5 м/с, глубина резания h =30 мм, угол атаки θ менялся в диапазонах от 45° до 53°. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.



а) б)

Рис. 2. Моделирование процесса резания угля:
а − схема резания угля; б −силовая характеристика разрушения угля

Обсуждение. Разрушение материала происходит по закономерному процессу свойственному реальному разрушения угольного массива резцом.

Заключение. Таким образом, имеются широкие возможности для анализа нагрузок, возникающих на резцах в зависимости от углов их установки. Анализ результатов моделирования позволяет определить на этапе проектирования рациональные геометрические параметры, как исполнительного органа, так и резцового инструмента в условиях конкретного массива.

Список литературы

1. Анализ структуры отказов шнеков очистных комбайнов / Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник, Э.Ю. Воронова и др. // Уголь. 2021. № 4. С. 20-24. DOI: 10.18796/0041-5790- 2021-4-20-24.

2. Габов В.В., Задков Д.А., Прялухин А.Ф., Садовский М.В., Молчанов В.В. Совершенствование конструкции шнекового исполнительного органа очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 51-71.

3. Jaime M.C., Gamwo I.K., “Finite element modeling of rock cutting and its validation with bench-scale tests”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, V. 75, pp. 123-134, 2015.

УДК 621.926.9

АНАЛИЗ РАБОТЫ ОДНОРОТОРНОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ ТИПА EV 200X200-1-125

Силаков Д.П., Парфенов В.А.
студент, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, silakov.03@list.ru

Научный руководитель: Дмитриенко В.Г.
канд. техн. наук, доц., Белгородский государственный технологический университет им. В. Г Шухова, Белгород, Россия

Аннотация. В работе рассмотрено устройство и принцип действия одноротоpной молотковой дробилки EV 200x200-1-125 для измельчения нерудных полезных ископаемых, в частности мергелей с учетом условий повышенной влажности. Основной проблемой является залипание породы на рабочих частях дробилки, что вызывает остановки и снижает производительность. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности дробильного оборудования на предприятиях в условиях повышенной влажности. В результате проведенных исследований с помощью 3D-моделирования и симуляций на базе программы Rocky Dem выявлены причины налипания материалов, что существенно поможет в поиске новых технических решений по устранению этой проблемы.

Ключевые слова: молотковая дробилка, дробление, горная порода, мергель, физико-механические свойства, футеровка дробилки.

На многих предприятиях промышленности строительных материалов России для среднего и мелкого дробления глины, известняка, мергеля, мела, доломита, мрамора применяются различные типы молотковых дробилок отечественного и импортного производства, такие как С-218А, СМ-431, СМД-97А, МД-96А [1,2] и FL.SMIDTH (Дания), Hazemag, (Германия), Metso Outotec (Финляндия), Leimeng (Китай) выбор которых зависит от физико-механических свойств горной породы [3-5].

На современных цементных заводах России для переработки горной породы (известняк, мергель) наибольшее распространение получили молотковые дробилки EV 200x200-1-125 компании FL.SMIDTH (рис.1), достоинством которых являются повышенная производительность (до 1000 т/ч), надежность и долговечность работы, ремонтопригодность и возможность измельчения горных пород с повышенным вязким компонентом [6].

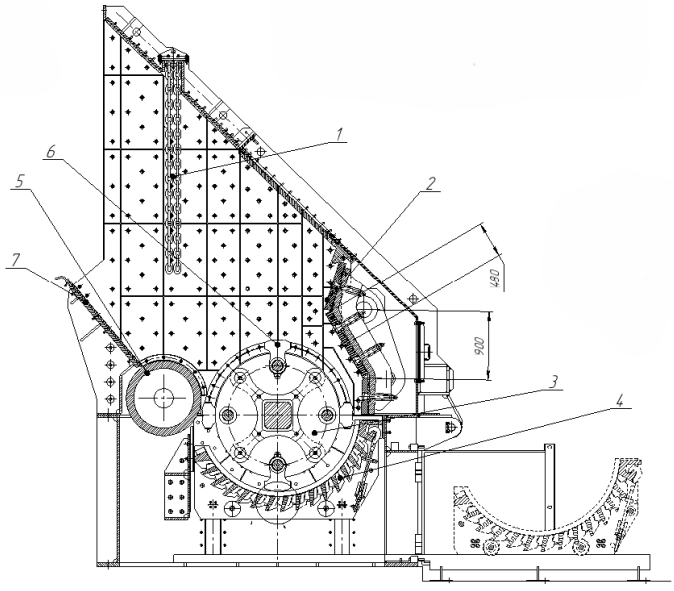


Рис.1 Схема молотковой дробилки FL.SMIDTH EV 200x200-1: 1 – цепи, 2 – бронеплита, 3 – ротор, 4 – колосниковая решетка, 5 – подающий валок, 6 – молотки, 7 – загрузочная течка

Работа дробилки (рис.1) осуществляется следующим образом: исходный материал с размером куска до 900 мм из приемного бункера поступает в загрузочную течку 7 дробилки и направляется на подающий валок 5 с помощью которого порода поступает в зону действия молотков ротора 3, который приводится в движение от привода, состоящего из электродвигателя, клиноременной передачи и червячного редуктора [7]. Измельчение происходит за счет удара молотка о кусок материала, кусков материала об отбойные плиты (подвижную часть дробящей плиты) или стенки дробилки, а также удара кусков материала между собой [8].

Особенностью исходного материала перед процессом дробления является наличие мелкой фракции «низких» и «высоких» мергелей, образующихся при проведении буровзрывных работ. Мелкая фракция (0-60мм), максимально состоящая из суглинков SiO_2+Al_2O_3, повышает влажность исходного материала за счет получения дополнительной влаги из окружающей среды.

Анализ работы дробилки в условиях производства, выявил, что при увеличении влажности породы в сезон дождей (осенне-весенний период) происходит налипание материала на подвижную часть дробящей плиты, что приводит к остановке машины и непредвидимым простоям для очистки камеры дробления.

С целью изучения поведения горной породы повышенной влажности на процесс измельчения построена 3D модель молотковой дробилки FL.SMIDTH EV 200x200-1-125 в системе автоматизированного проектирования (САПР) для трёхмерного моделирования «Компас 3D» [9] и импортирована в программу Rocky Dem с последующей симуляцией процесса [10].

Компьютерные исследования поведения горной породы повышенной влажности в камере дробления помогли установить характер подачи исходного материала на подающий валок, распределение частиц материала на ротор дробилки, залипания дробящей плиты. Так установлено, что мелкая фракция мергелей является источником интенсивного налипания породы на подвижную дробящую плиту.

Поэтому вывод из процесса дробления мелкой фракции «низких» и «высоких» мергелей является актуальным.

Дальнейшая работа состоит в поиске новых технических решений для предотвращения залипания горной породы в сезон дождей.

Список литературы

1. Кабанов В.С., Фролов И.А. Оборудование в технологических процессах строительной индустрии / Воронежский ГАСУ. – Воронеж: ВГАУ, 2012. – 100 с.
2. Чемеричко Г.И., Яготинцев И.К., Пахотин Е.Г. Решение проблемы защиты молотковых дробилок при попадании недробимых металлических включений // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Выпуск XII, 2014. – С. 352–355.
3. Hazemag & Co. Maschinenfabrik und Anlagenbau GmbH. Каталог дробильных машин и решений // Hazemag, Германия. – 2019. – 112 с.
4. Metso Outotec. Официальный каталог дробильных комплексов и решений для горной промышленности. – Финляндия, 2021. – 150 с.
5. Leimeng Machinery Ltd. Технический каталог и руководство по эксплуатации щековых и конусных дробилок // Китай, 2022. – 98 с.
6. Молотковая дробилка. Технический паспорт / Подготовил: RNM. – Тип оборудования: EV 200x200-1-125. – Док. №: 70010815 – 1. – Дата утверждения: 10.01.2011. – 9 с.
7. Инструкция по эксплуатации молотковой дробилки EV150/EV200 с входным валком / № документа: 40159-03. – 65 с.
8. Дмитриенко В.Г., Несмеянов Н.П., Герасименко В.Б. Горные машины и оборудование: лабораторный практикум: учебное пособие. / Белгородский государственный университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – 127 с.
9. Программное обеспечение «Компас 3D»: руководство пользователя / АО «АСКОН». – 2020.
10. Ведущие разработки по моделированию поведения горных пород в системах EDEM / Научный доклад / Компания DEM Solutions. – 2022. – 30 с.

УДК 621.7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ОРЕБРЕНИЯ НА ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКООВАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

Синюков М.С.
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, sms-0305@yandex.ru

Научный руководитель: Максаров В.В.
доктор технических наук, профессор,
декан механико-машиностроительного факультета,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрена технология магнитно-абразивной обработки, актуальная для повышения тепловой эффективности и надежности оребренных труб теплообменного оборудования. Описаны особенности применения численного моделирования для оценки влияния магнитно-абразивной обработки на теплоотдачу. Подробно изложена суть подхода, включая построение CFD-модели и варьирование коэффициентов теплоотдачи для имитации эффекта от улучшения поверхности. Приведены результаты применения в моделировании аппаратов воздушного охлаждения, где обработка обеспечивает снижение рабочей температуры на 5–7°C и повышение энергоэффективности. Показаны перспективы внедрения данной технологии в машиностроении для модернизации теплообменных систем.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, CFD-моделирование, теплопередача, эффективность теплообменника, оребренная труба, качество поверхности.

Совершенствование теплообменной аппаратуры является актуальной задачей в контексте энергосбережения. Одним из перспективных направлений является модификация поверхности теплоотдающих элементов, позволяющая интенсифицировать теплообмен без изменения геометрии [1]. Магнитно-абразивная обработка представляет собой эффективный способ финишной обработки, обеспечивающий высокое качество плоских поверхностей ребер плоскоовальных труб [2, 3]. Метод основан на использовании магнитного поля для управления абразивными частицами, что позволяет осуществлять контролируемое низкотемпературное полирование поверхности. В отличие от традиционных механических способов, магнитно-абразивная обработка обеспечивает однородную обработку труднодоступных зон и минимизирует риск возникновения внутренних напряжений в материале [4, 5].

Применительно к теплообменным элементам, качество поверхности стенок, подвергающихся пайке, непосредственно влияет на качество паяного соединения и интенсивность теплопередачи. Уменьшение шероховатости способствует улучшению условий конвективного теплообмена. Кроме того, удаление оксидных пленок и дефектных слоев в процессе магнитно-абразивной обработки повышает адгезионные свойства поверхности, что критически важно для обеспечения прочности паяных или сварочных соединений в биметаллических конструкциях [6].



Рис. 1. Плоскоовальная труба с оребрением

Комбинация магнитно-абразивной обработки с современными методами компьютерного моделирования представляет собой научно-практический интерес [7]. Численное исследование позволяет количественно оценить термодинамический эффект от улучшения поверхности, прогнозировать рабочие параметры оборудования и обосновать экономическую целесообразность внедрения данной технологии в производственные процессы [8, 9].

Для количественной оценки эффекта от МАО использовано компьютерное моделирование стационарного процесса теплопередачи. Объектом исследования служила осесимметричная модель биметаллической (сталь-алюминий) трубы оребрения. Варьируемым параметром выступил коэффициент конвективной теплоотдачи на границах «металл – воздух», значение которого увеличивалось для имитации эффекта от уменьшения шероховатости после обработки. Построение расчетной сетки, задание теплофизических свойств материалов и граничных условий выполнялось в соответствии с рекомендациями для подобных задач [10].

Моделирование проводилось в программном комплексе *ANSYS Fluent*, предназначенном для решения задач вычислительной гидродинамики (*CFD*) и теплообмена. Выбор данного программного обеспечения обусловлен его широкими возможностями по работе с турбулентными течениями, сложной геометрией и сопряженными физическими процессами.

Для учета турбулентности потока воздуха, омывающего ребра, была применена стандартная *k-ε* модель с усилением обработки пристеночной области (*Enhanced Wall Treatment*). Данная модель обеспечивает удовлетворительную точность при разумных вычислительных затратах для инженерных задач внешнего обтекания.

Расчетная область представляла собой сегмент, включающий основание трубы из стали и алюминиевое оребрение. Для обеспечения точности решения в областях с высокими градиентами температуры и скорости (вблизи стенок и кромок ребер) была построена структурированная расчетная сетка. Проведена проверка независимости решения от сетки, чтобы исключить влияние ее параметров на конечный результат.

В качестве граничных условий на внешних границах расчетной области задавалась температура набегающего воздушного потока и его скорость, соответствующие типовым рабочим режимам аппаратов воздушного охлаждения. На внутренней поверхности стальной трубы задавалась постоянная температура теплоносителя.

Для имитации двух сценариев – «до обработки» и «после МАО» – в расчетах варьировался коэффициент теплоотдачи α. В базовом варианте использовались стандартные эмпирические значения для технических поверхностей. В модифицированном варианте, соответствующем улучшенной поверхности после полировки, значение α увеличивалось пропорционально ожидаемому снижению шероховатости и улучшению условий контакта на границе раздела фаз.

Проведенное *CFD*-моделирование продемонстрировало существенное влияние качества поверхности на термический режим. Улучшение условий теплоотдачи на границе, моделирующее результат МАО, привело к значимому перераспределению температурного поля. Максимальный температурный градиент снизился, а сама конструкция достигла более низкого и равномерного уровня нагрева. Количественным показателем эффекта стало падение характерной температуры конструкции на величину до 7 °C, что эквивалентно росту эффективности теплоотдачи.

Таким образом, численное исследование подтвердило, что магнитно-абразивная обработка является действенным способом не только подготовки поверхности к пайке, но и средством прямой интенсификации теплообмена в ребристых теплообменниках. Внедрение данной операции в производственный цикл изготовления труб аппаратов воздушного охлаждения позволит повысить их энергетическую эффективность и общую надежность за счет улучшения качества паяных соединений.

Список литературы

1. Ahmad S., Singari R.M., Mishra R.S. Development of Al2O3-SiO2 based magnetic abrasive by sintering method and its performance on Ti-6Al-4V during magnetic abrasive finishing // Transactions of the IMF. 2021. Vol. 99(2). C. 94–101. DOI: 10.1080/00202967.2021.1865644.
2. Акулович, Л.М., Ворошуха, О.Н. Упрочняющая магнитно-абразивная обработка поверхностей с управлением процессом резания // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16, № 1(181). – С. 3-8. – EDN CCSOPT.
3. Maksarov V.V. Olt Yu, Keksin A.I., Shcheglova R.A. The use of composite powders in the process of magnetic abrasive treatment of taps to improve the quality of threads in corrosion-resistant steel products // Ferrous Metals. 2022. No. 2. C.49-55. DOI: 10.17580/chm.2022.02.09.
4. Maksarov V.V., Popov M.A., Zakharova V.P. Influence of magnetic-abrasive machining parameters on ceramic cutting tools for technological quality assurance of precision products from cold-resistant steels // Chernye Metally. 2023. Vol. 1. C. 67-73. DOI: 10.17580/chm.2023.01.10.
5. Барон Ю.М. Улучшение характеристик режущих инструментов из быстрорежущих сталей магнитно-абразивной и магнитной обработкой // Металлообработка. – 2012. – № 5-6(71-72). – С. 9-14. – EDN RKWLYZ.
6. Zhu P., Zhang G., Du J., Jiang L., Zhang P., Cui Y. Removal mechanism of magnetic abrasive finishing on aluminum and magnesium alloys // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114(5-6). C. 1717–1729. DOI: 10.1007/s00170-021-06952-4.
7. Keksin A.I., Sorokopud N.I., Zakirov N.N. Peculiarities of abrasive finishing of surfaces of parts made of aluminium alloy of AMts grade in magnetic field // International Journal of Engineering. 2024. Vol. 37(6). C. 1098-1105. DOI: 10,5829/ije.2024.37.06c.06.
8. Bazhin V.Y., Fernandez P.A., Slobodin V.A. Application of motor scrap in the production of aluminum-alloy ingots with thixotropic structure (under the conditions of the Republic of Cuba) // Metallurgist. 2025. Vol. 69. C. 905-913. DOI: 10.1007/s11015-025-02011-5.
9. Mustafin M.G., Slobodkin S.M. Methodology of Geodetic Observations for Forecasting of Potentially Hazardous Zones of Operating Main Pipelines // International Journal of Engineering, 2026. Vol. 39(7). C. 1753-1761. DOI: 10.5829/ije.2026.39.07a.18.
10. Vasiliev A.S., Goncharov A.A. Special strategy of treatment of difficultyprofile conical screw surfaces of single-screw compressors working bodies // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 235. P. 60–64. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.60.

УДК 622.23.05

К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ НАКЛОННОГО СКИПОВОГО ПОДЪЕМА С УЧЕТОМ ПОДЪЕМНОЙ СИСТЕМЫ И СПОСОБА ЗАГРУЗКИ СКИПОВ

Сушков В.С.[1], Каразаева А.С.[2]
[1] аспирант 1 курса кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, НИТУ МИСИС, Москва, Россия, vladislav.sushkov@mail.ru
[2] студент 4 курса кафедры геологии и маркшейдерского дела, НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Научный руководитель: Зотов В.В.
к.т.н., заведующий кафедрой горного оборудования, транспорта и машиностроения, НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены актуальные вопросы проектирования скиповых подъемных установок для транспортировки горной массы. Выполнен анализ влияния грузоподъемности (50, 60 и 110 т) на выбор схемы канатной подвески. Приведена методика расчета массы груженого скипа и погонной массы каната. Особое внимание уделено процессу загрузки: обоснована необходимость минимизации высоты падения материала для снижения динамических нагрузок на футеровку. Предложена классификация факторов, влияющих на длительность цикла загрузки.

Ключевые слова: скип, грузоподъемность, подъемные канаты, шахтный подъем, футеровка, загрузка скипа, горные машины.

Введение. Современные тенденции развития горнодобывающей промышленности характеризуются увеличением глубины разработки и интенсификацией грузопотоков. Одним из ключевых звеньев технологической цепи является шахтный подъем. Увеличение единичной мощности скипов до 50-110 тонн предъявляет повышенные требования к надежности элементов подъемной установки: канатам, армировке ствола, а также к узлам загрузки и разгрузки. Целью данной работы является анализ конструктивных параметров скипов высокой грузоподъемности и факторов, определяющих эффективность их загрузки [1–4].

Методы. Исходными данными для проектирования является заданная грузоподъемность скипа $Q_{гр}$. На первом этапе определяется масса груженого скипа $Q_{п}$, которая складывается из массы полезного груза и собственной массы порожнего скипа $Q_{ск}$. Согласно практике проектирования, масса порожнего скипа может быть выражена через грузоподъемность с помощью эмпирического коэффициента $k_{т}$, учитывающего тип кузова и материала:

$$Q_{о} = Q_{гр} + Q_{ск} = Q_{гр} + (0{,}5 - 0{,}8) \times Q_{гр} = Q_{гр} \times (1 + k_{т}) \quad (1)$$

Как следует из расчетных данных, соотношение полной и полезной массы может варьироваться в пределах: $Q_{о} \approx (1{,}5 \div 1{,}8) * Q_{гр}$. Меньшие значения коэффициента (1,5) характерны для скипов с высокопрочной низколегированной сталью и оптимизированной конструкцией рамы. Большие значения (1,8) – для тяжелых абразивных руд, где требуется усиленная футеровка и массивные элементы жесткости.

Результаты

Вопросы канатной подвески. Для скипов большой грузоподъемности (особенно 60 и 110 т) применение многоканатной подвески является не просто возможным, а необходимым условием безопасной эксплуатации. Согласно требованиям безопасности, каждый скип должен подвешиваться минимум на двух канатах. Многоканатная система

позволяет использовать канаты меньшего диаметра и, соответственно, меньшие блоки (шкивы), что уменьшает размеры копра, а также снижает опасность раскручивания канатов [3–5].

Таблица 1

Сравнение параметров канатов для различной грузоподъемности скипов

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Грузоподъемность скипа ($Q_{гр}$), т	50	60	110
Масса груженого скипа ($Q_о$), т (при $k_т$=0,65)	~82,5	~99	~181,5
Рекомендуемый тип подвески	Два каната	Два/Четыре каната	Четыре каната
Ориентир. диаметр каната (ГОСТ 2688)	32-37 мм	37-42 мм	42-56 мм
Справочная масса 1000 м каната (ГОСТ)	3845 – 5015 кг	5015 – 6535 кг	6535 – 11650 кг
Ориентир. погонная масса, кг/м	~3,8 – 5,0	~5,0 – 6,5	~6,5 – 11,6

Примечание: Данные по канатам приведены для типа ЛК-Р конструкции 6х19(1+6+6/6)+1 о.с. по ГОСТ 26880.

Погонная масса каната (т/м) является критическим параметром. Для наглядности в Таблице 1 сопоставлены расчетные данные с нормативными значениями по ГОСТ 2688-80 [11].

Вопрос способа разгрузки. Способ разгрузки тесно связан с конструкцией днища и типом привода. Для скипов грузоподъемностью 50-110 т наиболее применимы два типа: с донной разгрузкой (секторный затвор), обеспечивающие компактность разгрузочной кривой и меньшие габариты в сечении ствола, и опрокидные (отклоняющиеся), которые проще по конструкции, но требуют больше места в зоне разгрузки. Учет типа разгрузки важен при моделировании напряжений, так как расположение опор и векторы приложения нагрузок в этих конструкциях различны [5–6].

Обсуждение. Критическим фактором, влияющим на долговечность оборудования, является процесс загрузки. Максимальное напряжение футеровки скипа достигается при загрузке крупногабаритной фракции. Варьирование высоты падения материала (величины окна «а») и времени загрузки напрямую зависит от типа полезного ископаемого и требуемой вместимости скипа. Для минимизации ударных нагрузок необходимо стремиться к уменьшению зазора между загрузочным бункером и скипом. Способ разгрузки (донный или опрокидной) выбирается на этапе моделирования в зависимости от условий ствола и физико-механических свойств породы. Таким образом, оптимальное проектирование скиповой установки требует комплексного учета взаимосвязи между грузоподъемностью, параметрами канатной подвески и режимом загрузки [9].

Заключение. В результате проведенного анализа установлено, что проектирование скипов высокой грузоподъемности (до 110 т) требует комплексного подхода. Многоканатная подвеска является обязательным условием безопасности. Определена зависимость погонной массы каната от грузоподъемности [10]. Выявлена необходимость оптимизации высоты загрузки: ее минимизация позволяет снизить динамические нагрузки на футеровку. Время загрузки является производной от фракционного состава, требуемой производительности и прочностных ограничений.

Список литературы

1. Воробель, С.В. Динамическое обследование жесткой армировки шахтных стволов / С.В. Воробель, А.А. Князев // Проблемы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых в Пермском крае: материалы краевой науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та , 2007. – С. 195-201.
2. Воробель, С.В. Влияние диаграммы скорости на динамические нагрузки в системе «подъемный сосуд – жесткая армировка» и деформацию рамы подъемного сосуда / С.В. Воробель, Г.Д. Трифанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 12. – С. 16-19.
3. Зотов, В.В. Сравнительная оценка канатного и резинотросового тяговых органов подъёмных установок / В.В. Зотов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 10. – С. 287-293.
4. Трифанов, Г.Д. Испытания системы контроля плавности движения подъемного сосуда в шахтном стволе / Г.Д. Трифанов, А.Ю. Микрюков // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 12. – С. 16-23.
5. Трифанов, Г.Д. Непрерывный динамический контроль жесткой армировки вертикальных шахтных стволов / Г.Д. Трифанов, А.Ю. Микрюков // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 6-10.
6. Ильин, С.Р. Анализ развития, результаты и перспективы работ по технической диагностике и мониторингу эксплуатационного состояния армировки шахтных стволов / С.Р. Ильин // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр.; ИГТМ НАН Украины. – Вып. 101. – Днепропетровск, 2012. – С. 240-260.
7. Манец, И.Г. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов: в 2 т / И.Г. Манец, Б.А. Грядущий, В.В. Левит. – 4-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – Т. 1. – 409 е.; Т. 2. – 330 с.
8. Мацов, С.Я. Компьютерные системы защиты и мониторинга шахтных подъемных установок / С.Я. Мацов, Р.Н. Газизулин // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 1. – С. 32-36.
9. Сушков В.С., Зотов В.В. К вопросу о моделировании падения груза в скип наклонной подъемной установки // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. Материалы XI Международной научно-практической конференции. Пермь, 2025. С. 187-194.
10. Зотов, В.В. Математическая модель подъёмной установки с резинотросовой лентой / В.В. Зотов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S16. – С. 300-309.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОМАРОЧНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО МАРШРУТНОЙ СЕТИ ГОРОДА

Терентьева В.И.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, vika.ovelina@mail.ru

Научный руководитель: Менухова Т.А.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Разработан алгоритм распределения разномарочного автобусного парка по городским маршрутам на основе иерархии критериев (инфраструктурные ограничения, пассажиропоток, технические характеристики транспортных средств). Предложенный подход позволит повысить эффективность использования подвижного состава и качество транспортного обслуживания.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, автотранспортные средства, подвижной состав, маршрутная сеть, алгоритм распределения, пассажиропоток.

Введение. Эффективность работы общественного транспорта зависит от соответствия характеристик используемого подвижного состава физическим параметрам маршрутной сети с учетом фактического спроса на перевозки [1, 2]. В городах, в которых используется система госзаказа на транспортное обслуживание, таких как Санкт-Петербург и Москва, функции планирования и контроля разделены [3]. ГКУ «Организатор перевозок» формирует задание и распределяет транспортные средства по маршрутам, руководствуясь социальными нормативами [4…6]. Перевозчики, в свою очередь, стремящиеся к оптимизации собственных издержек [7], имеют право оспорить предложенное распределение при наличии аргументированного обоснования.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности использования подвижного состава в условиях дифференцированного пассажиропотока, различной протяженности маршрутов и экологических ограничений на отдельных территориях города. Цель исследования – разработка алгоритма, позволяющего с учетом технико-эксплуатационных характеристик автобусов и параметров маршрутов закрепить транспортные средства наиболее рациональным образом.

Методы. Формализация задачи выполнена в виде модели целочисленного линейного программирования, где в качестве критериев выступают минимизация эксплуатационных затрат, минимизация негативного экологического воздействия и максимизация качества обслуживания пассажиров [8, 9]. Оценка альтернативных вариантов распределения проводилась с применением методов многокритериального выбора с последующим ранжированием полученных решений [10].

Результаты. Алгоритм распределения подвижного состава базируется на трех основных блоках данных.

1. Цифровая модель улично-дорожной сети с паспортными данными искусственных сооружений (мосты, путепроводы, эстакады, тоннели с учетом ограничений по высоте и ширине; расположение железнодорожных переездов и минимальные радиусы поворотов).

2. Величина и характер распределения пассажиропотока на маршруте.

3. Технические характеристики транспорта [11]. Учет пассажировместимости позволит полностью удовлетворить спрос на перевозки. Запас хода важен на маршрутах с большим пробегом за день, когда дозаправка затруднена или нет возможности ее произвести без срывов рейсов. Учет расхода топлива обеспечит минимизацию издержек.

Алгоритм построен на принципе строгой иерархии критериев – нарушение критерия более высокого уровня делает решение неприемлемым независимо от значений нижестоящих критериев. На верхнем уровне заданы ограничения, обусловленные требованиями транспортной инфраструктуры. На втором уровне учитывается наполняемость подвижного состава (единовременное нахождение пассажиров в транспортном средстве).

На третьем уровне оцениваются технические характеристики, среди которых ключевое значение имеет запас хода.

Маршруты сортируются по убыванию приоритета, что обеспечивает приоритет наиболее загруженных направлений. В первую очередь рассматриваются маршруты, на которых могут быть сложности проезда транспортных средств по габаритным характеристикам. При этом подобные маршруты сортируются по пассажиропотоку, а затем по среднему суточному пробегу одной транспортной единицы. В процессе отбора транспортное средство исключается из рассмотрения для данного маршрута в случае невыполнения хотя бы одного из установленных критериев. После завершения отбора выбранные транспортные единицы и соответствующие маршруты исключаются из дальнейшего рассмотрения, после чего алгоритм повторяется, но уже с ориентацией на критерий пассажиропотока. На заключительном этапе осуществляется распределение оставшегося подвижного состава по оставшимся маршрутам с учетом величины запаса хода транспортных единиц.

Обсуждение. Предлагаемый подход направлен на минимизацию эксплуатационных затрат, снижение негативного воздействия на окружающую среду и повышение качества обслуживания пассажиров.

Заключение. Разработанный алгоритм в дальнейшем может быть интегрирован в информационное поле для автоматизированной системы планирования пассажирских перевозок. Результаты могут быть использованы органами управления городским пассажирским транспортом и транспортными компаниями при организации работы подвижного состава.

Автор выражает благодарность АО «Третий парк» за предоставленную информацию.

Список литературы

1. Менухова Т.А., Сивов А.А., Богданов М.В. Исследование транспортного поведения в Санкт-Петербурге // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2025. – № 2(72). – С. 62-70. EDN PRDNVC.
2. Менухова Т.А., Сивов А.А., Богданов М.В. Методика определения потенциального пассажиропотока в новых микрорайонах города Санкт-Петербурга после заселения жилых комплексов // Транспортное дело России. – 2025. – № 3. – С. 67-71. EDN JGNCFH.
3. Разумовский С.А. Опыт применения тендеров при распределении перевозчиков по городским регулярным автобусным маршрутам // XXXVII международные Плехановские чтения. Сборник статей аспирантов и молодых ученых. Москва, 2024. С. 455-457. EDN: TUCQLG
4. Селезнева Н.А., Добровольский А.О. Выбор рационального типа подвижного состава для работы на городских автобусных маршрутах общего пользования // Вести Автомобильно-дорожного института. 2025. № 1 (52). С. 7-14. EDN: DIXSFT
5. Степанова Е.О. Оптимальное распределение общественного транспорта по маршрутам // Человек и общество перед вызовами глобальных трансформаций. Двадцать третьи Вавиловские чтения. Материалы международной междисциплинарной научной конференции. В 2-х частях. Под общей редакцией В.П. Шалаева. Йошкар-Ола, 2020. С. 45-48. EDN: YXFVZZ
6. Фадеев А.И., Ильянков А.М., Укадеров В.В. Распределение корреспонденций по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом общего пользования // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 3(91). – С. 362-386. – DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386. EDN YNNWNU.
7. Гудков В.А., Живоглядов В.Г., Путуридзе Ш.Н. Методика определения задержек, вместимости и протяженности маршрутов на городском пассажирском транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2013. – № 4. – С. 8-12. EDN PYSVDD.
8. Лебедева О.А., Гозбенко В.Е., Каргапольцев С.К. Оптимизация транспортной сети с учетом оценки качества услуг общественного транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 1 (61). С. 112-118. EDN: ZFBFIT. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).112-118
9. Менухова Т.А., Киптева В.А., Никитцына Т.С Анализ современных решений, используемых при оборудовании остановочных пунктов городского пассажирского транспорта, с учетом общественного мнения // Транспортное дело России. – 2023. – № 2. – С. 108-112. – DOI 10.52375/20728689_2023_2_108. EDN OTGPYK.
10. Матвеев А.Г., Менухова Т. А. Подход по учету параметров при применении методов выбора альтернатив в условиях неопределенности // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 1-1(80). – С. 119-124. DOI 10.33979/2073-7432-2023-1(80)-1-119-124. EDN FJBOSV.
11. Литвинов А.А. Анализ структуры эксплуатации автобусов на маршрутах городского транспорта в Санкт-Петербурге // Магистратура – автотранспортной отрасли. Материалы VIII Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». Санкт-Петербург, 2024. С. 60-65. EDN: WCBJFH.

УДК 621:658.512.4:004.9

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ БИЕНИЙ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Тимофеев М.К.[1], Рябцева А.С.[2]
[1] аспирант, университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
timofeev.mixail.0@mail.ru
[2] бакалавр, университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Помпеев К.П.
канд. техн. наук, доцент, университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе представлен программный комплекс, предназначенный для автоматизированного построения схем биений деталей типа тел вращения и выполнения связанных расчётов точности. Комплекс включает модуль формирования эскиза по чертежу на основе методов машинного обучения, модуль интерактивного построения схемы биений, а также модуль автоматического расчёта промежуточных диаметральных размеров и проверки выполнения требований к взаимному расположению поверхностей. Актуальность разработки обусловлена высокой трудоёмкостью ручной технологической подготовки изготовления деталей вращения, применяемых в горнодобывающем и горно-обогатительном оборудовании, в том числе валов насосов, роторных узлов и деталей дробильных машин. Применение комплекса позволит сократить объём ручных операций, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить подтверждение корректности выбранной технологии обработки. Данный подход представляет интерес для цифровизации технологической подготовки производства на машиностроительных и транспортных предприятиях, связанных с недропользованием.

Ключевые слова: схема биений, детали типа тело вращения, технологическая подготовка производства, машинное обучение, промежуточные диаметральные размеры.

Введение. В условиях современного недропользования высокая надёжность оборудования во многом определяется точностью изготовления деталей вращения, работающих в тяжёлых условиях [9, 10]. К таким деталям относятся, в частности, валы и подшипниковые узлы дробилок, а также валы и роторные элементы центробежных и шламовых насосов, применяемых изделиях, предназначенных для транспортирования пульпы и переработки рудного сырья. Для подобных изделий принципиальное значение имеют требования к соосности, радиальному биению и взаимному расположению поверхностей, поскольку отклонения по этим параметрам влияют на ресурс, вибрационное состояние и работоспособность узла в целом [1, 2, 4].

Традиционно построение схем биений и последующая проверка технологических решений выполняются вручную или с использованием разрозненных инструментов. Это увеличивает длительность технологической подготовки производства, усложняет анализ маршрута обработки и не позволяет оперативно проверять, обеспечивает ли выбранная последовательность операций достижение требуемой точности. Кроме того, избыточные припуски и неполнота анализа технологической схемы приводят к перерасходу материала, росту трудоёмкости обработки, дополнительному расходу инструмента и времени [4, 5].

Методы. Разработанный программный комплекс реализует единый цифровой контур подготовки и анализа деталей типа тел вращения. Первый модуль предназначен для формирования эскиза детали по чертежу в формате PDF на основе методов машинного обучения [6-8]. На этом этапе выполняются распознавание главного вида, выделение контура детали, классификация графических элементов, удаление размерной и текстовой

информации, восстановление целостности контура и подготовка упрощённого эскиза, пригодного для дальнейшего технологического анализа [3, 6, 7].

Второй модуль обеспечивает интерактивное построение схемы биений. Пользователь через интерфейс задаёт поверхности детали, операции, установы, технологические базы, а также связи между обрабатываемыми и обработанными поверхностями. Существенным преимуществом является то, что результат ввода сразу отображается на экране, благодаря чему формирование схемы и её проверка происходят в едином рабочем пространстве.

Третий модуль выполняет автоматический расчёт промежуточных диаметральных размеров, а также проверку выполнения требований к взаимному расположению поверхностей. Тем самым программный комплекс используется не только как средство визуализации, но и как инструмент подтверждения корректности выбранной технологии обработки для получения конечного результата требуемого качества [1, 2, 4].

Результаты. В результате создан программный комплекс, объединяющий формирование эскиза, интерактивное построение схемы биений и автоматизированные расчёты. Его применение позволяет перейти от фрагментарного и в значительной степени ручного анализа к целостной цифровой модели технологического процесса. Пользователь получает возможность последовательно задать структуру обработки заготовки и сразу увидеть, как изменяется схема, а затем автоматически получить расчётные результаты по промежуточным размерам и требованиям взаимного расположения [1–3].

Программный комплекс имеет практическую значимость для производства деталей, применяемых в машиностроении и транспорте, оборудовании горнодобывающих и горно-обогатительных предприятий. Для валов насосов, деталей дробилок, роторов и других деталей типа тел вращения ошибка в выборе технологических баз, назначении припусков или последовательности операций способна привести не только к браку, но и к снижению ресурса узлов и изделий при их эксплуатации. Поэтому перенос проверки таких решений на этап цифровой технологической подготовки является важным условием повышения качества проектирования и производства [9, 10].

Обсуждение. Полученные результаты развивают направление цифровизации технологической подготовки производства, формализации анализа точности и создания интеллектуальных средств поддержки технологических решений. Разработанный программный комплекс представляет научный и практический интерес, поскольку объединяет в единой цифровой среде формирование эскиза детали, построение схемы биений, расчёт промежуточных диаметральных размеров и проверку выполнения требований к взаимному расположению поверхностей. Такой подход позволяет сократить объём ручных построений, снизить влияние человеческого фактора и повысить обоснованность принимаемых технологических решений. Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития методов автоматизированного анализа точности деталей типа тел вращения, в том числе применяемых при изготовлении ответственных узлов оборудования для недропользования [1–8].

Заключение. Таким образом, разработанный программный комплекс решает задачу автоматизированного построения схем биений деталей типа тел вращения и дополняет её функциями формирования эскиза, расчёта промежуточных диаметральных размеров и проверки выполнения требований к взаимному расположению поверхностей. Предлагаемый подход позволяет повысить обоснованность технологических решений ещё на стадии подготовки производства, сократить долю ручного труда и уменьшить риск назначения избыточных припусков и неэффективных маршрутов обработки. Для предприятий, работающих в сфере машиностроения, транспорта и недропользования, внедрение такого комплекса может стать одним из инструментов повышения точности изготовления деталей и изделий, снижения их материалоёмкости и сокращения производственных затрат [1, 2, 4, 5].

Список литературы

1. Помпеев К.П., Тимофеев М.К. Автоматизация размерно-точностного анализа ТП по элементам вращения при изготовлении осесимметричной детали из проката // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы конференции MMESE. 2025. № 14. С. 1021–1032. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id-169.
2. Ермаков С.П., Помпеев К.П. Методика исследования возможности автоматического обеспечения точности технологических процессов изготовления деталей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2025. Т. 68. № 2. С. 176–183. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183.
3. Ермаков С.П., Помпеев К.П. Построение эскиза детали с использованием макросов и учетом технологии ее изготовления для проведения размерного анализа // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы конференции MMESE. 2025. № 14. С. 1011–1020. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id-168.
4. Зелинский А.Н., Зинченко А.М., Стародубов С.Ю. Размерный анализ технологических процессов механической обработки: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 272 с.
5. Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р. Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9. С. 39–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-39-48.
6. Басов О.О., Демин О.Д., Носков Д.А. Подход к векторизации чертежей конструкторской документации на бумажном носителе // Научный результат. Информационные технологии. 2024. Т. 9. № 3. С. 55–62. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-6.
7. Басов О.О., Носков Д.А. Построение геометрической модели изделия на основе мультимодальной обработки бумажной конструкторской документации // Экономика. Информатика. 2025. Т. 52. № 1. С. 137–144. DOI: 10.52575/2687-0932-2025-52-1-137-144.
8. Кузнецов С.В., Роговик А.А., Кузнецова Е.С. Детекция деталей, получаемых методами токарной обработки, с использованием модели для распознавания объектов YOLOv5 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 3. С. 122–128. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-122-128.
9. Werbińska-Wojciechowska S., Rogowski R. Proactive Maintenance of Pump Systems Operating in the Mining Industry—A Systematic Review // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 8. Art. 2365. DOI: 10.3390/s25082365.
10. Bogdanovská G., Benková M., Bednárová D. Analysis of Causes and Consequences of Failures in Process of Andesite Crushing by Jaw Crusher // Processes. 2025. Vol. 13. No. 1. Art. 225. DOI: 10.3390/pr13010225.

ЭКОЛОГИЧНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ ГЭС

Туманова А.О.
инженер-конструктор 3 категории, АО «Силовые машины»,
Санкт-Петербург, Россия, alekseenkoalexolegovna@gmail.com

Научный руководитель: Диваков И.С.
начальник сектора детального проектирования гидротурбинного оборудования
СКБ «Гидротурбомаш», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Данная статья посвящена актуальным вопросам развития гидроэнергетики и экологической безопасности гидротехнических сооружений. Особое внимание уделено влиянию гидроэлектростанций на окружающую среду, в частности на рыбное хозяйство. В статье описываются возможные методы защиты живых организмов от травм и повреждений, а также от негативных воздействий смазывающих жидкостей турбины. Приведены примеры ГЭС, в которых используются современные технологии, направленные на улучшение экологической обстановки.

Ключевые слова: Гидроэнергетика, экологическая безопасность, рыбное хозяйство, масло, протекания.

С каждым днём потребление электроэнергии по миру растёт, что в свою очередь приводит к необходимости развития гидроэнергетики и освоения неиспользованного гидравлического потенциала. Одной из крупных компаний, ведущих свои разработки в данном направлении является АО «Силовые машины».

Гидроэлектростанция представляет собой сооружение, предназначенное для преобразования потенциальной энергии движущегося потока воды в электричество. Основными конструктивными элементами ГЭС являются:

– плотина, формирующая искусственное водохранилище;
– турбина, передающая механическую энергию;
– генератор [1].

При наличии большого количества преимуществ использования ГЭС, таких как возобновляемость источника энергии, долгий срок службы, гибкость в эксплуатации, имеются и некоторые недостатки. Основной проблемой гидроэнергетики является негативное влияние на экологию, на рыбное хозяйство [2]. Снижение разнообразия и численности популяций рыб как выше, так и ниже водохранилищ, усугубляющееся дополнительными эффектами деградации среды обитания и изменений гидрологического режима. Главные причины повреждений и смерти рыб при прохождении традиционных конструкций турбин включают механические удары, резкие изменения давления, гидравлические сдвиги, турбулентность, а также попадание смазывающих продуктов агрегата в воду [3, 4, 5].

За последнее десятилетие инженеры разработали ряд инновационных решений для гидростанций, направленных на повышение выживаемости проходящих через них рыб. Классифицировать сооружения для безопасного отвода рыб можно так:

– пассивные;
– активные.

К пассивным мерам относятся искусственные рыбоходы, которые включают в себя перегородки (рыбоходы Денила) или ступени. Таким образом, рыбоходы уменьшают движение потока. Также существуют рыбоходы с естественными элементами: гальками и валунами. Активные системы, такие как рыбозатворы и рыбоподъемники, которые используют механические запирающие ворота для направления рыбы и подъемные устройства, такие как корзины, для ее физического перемещения мимо барьеров [6].

Кроме того, несмотря на имеющиеся рекомендации по факторам риска для водных организмов, разработанные методики оценки ущерба и смертности, а также сбор большого объема статистики по мерам предотвращения негативных воздействий и смертности рыб, до сих пор отсутствует единый стандартизированный индикатор или методика, способная точно определить эффективность защиты рыб.

Последние десятилетия АО «Силовые машины» ведут разработки экологически чистых ГЭС, сокращая возможность попадания масла в воду. Для повышения надежности турбины в конструкции рабочего колеса используют безмасляные втулки, самосмазывающиеся композитные материалы для подшипниковых узлов механизма, а также производят гидровлическую изоляцию сервомотора. На данный момент на Жигулевской, Воткинской, Кегумс, Чебоксарской, Черекской малой ГЭС эксплуатируются турбины повышенной надежности и экологичности [7, 8, 9, 10].

На данный момент экологическая сторона производства ГЭС в стране развита на недостаточно высоком уровне. В связи с индивидуальностью и неповторяемостью каждой турбины тяжело разработать единую систему защиты рыб при прохождении через агрегат. Зато вопрос протекания масла в акваторию водохранилища удачно решен, разработанные технологии активно применяются.

Список литературы

1. Ю.С. Васильев, Ю.К. Петреня, Е.В. Георгиевская. О ресурсах гидротурбин: обзор зарубежной литературы // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 184-204. DOI: 10.18721/JEST.230217
2. Кисиленко А.А. СОЗДАНИЯ УСТЬ-ИЛИМСКОЙ ГЭС ГЛАВНЫЕ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ГЭС // Форум молодых учёных 12(2) 2018. – С. 963 – 965
3. Али М.С., Бегляров Д.С., Шакиров Р.Р. Особенности и анализ исследований рыбозащитного комплекса для водоприемников крупных высоконапорных гидроэлектростанций // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 86-93. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-86-93
4. Yang C. et al. A review of research on the design of fish-friendly hydraulic turbines // Strategic Study of Chinese Academy of Engineering. – 2018. – Т. 20. – №. 3. – С. 96-101. – URL: https://www.engineering.org.cn/sscae/EN/10.15302/J-SSCAE-2018.03.014 (Дата обращения 12.03.2026).
5. Brown E. et al. Safe passage for fish: The case for in-stream turbines // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Т. 173. – С. 113034. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122009157#bb39 (Дата обращения 12.03.2026).
6. Brown, E.; Sulaeman, S.; Quispe-Abad, R.; Müller, N.; Moran, E. (2023). Safe passage for fish: The case for in-stream turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 173, 113034. – URL: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113034 (Дата обращения 12.03.2026).
7. Энергетика и промышленность России (2021). Компания «Силовые машины» участвует в модернизации Воткинской ГЭС. – URL: https://www.eprussia.ru/news/base/2021/7679270.htm?sphrase_id=10613102&q=воткинская+гэс (Дата обращения 12.03.2026).
8. ИА Волга Ньюс (2015). Олег Леонов: «Жигулевская ГЭС станет значительно мощнее, безопаснее и надежнее». – URL: https://volga.news/article/341645.html (Дата обращения 12.03.2026).
9. Силовые машины (2024). «Силовые машины» выполнили модернизацию рабочего колеса для гидроагрегата № 12 Чебоксарской ГЭС. – URL: https://power-m.ru/press-center/news/silovye-mashiny-modernizirovali-rabochee-koleso-dlya-gidroagregata-12-cheboksarskoy-ges/?sphrase_id=156515 (Дата обращения 12.03.2026).
10. Силовые машины (2024). «Силовые машины» изготовили гидротурбины для строящейся Черекской ГЭС. – URL: https://power-m.ru/press-center/news/silovye-mashiny-izgotovili-gidroturbiny-dlya-stroyashcheysya-cherekskoy-ges/?sphrase_id=156517 (Дата обращения 12.03.2026).

УДК 62.001.1

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ПОДХОДОВ К РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГУ

Фаляхов Р.Ф.
аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, Кемерово, Россия, faljahovrf@kuzstu.ru

Научный руководитель: Ермаков А.Н.
кандидат технических наук, директор горного института, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, Кемерово, Россия

Аннотация. В работе рассматривается проблема отсутствия единого определения реверс-инжиниринга (РИ), затрудняющая междисциплинарное взаимодействие. Цель работы – систематизировать и провести сравнительный анализ подходов к РИ в различных сферах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью применения данных подходов для решения задач импортозамещения и модернизации горных машин в условиях износа оборудования. На основе анализа авиастроения, машиностроения, строительства и кибербезопасности выделены отраслевые методологии РИ. Результаты показывают трансформацию РИ в стратегическую дисциплину, обеспечивающую цифровую непрерывность производства.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, сравнительный анализ, междисциплинарный подход, авиастроение, машиностроение, информационная безопасность, горные машины, CAD-технологии.

Реверс-инжиниринг (РИ) стал важным инструментом для современных исследований в технологиях, праве и науке. Спектр применения РИ чрезвычайно широк - от оптимизации продуктов до предотвращения критических сбоев [1]. В зависимости от дисциплинарного контекста - инженерия, компьютерная безопасность или право интеллектуальной собственности, содержание понятия РИ различается [1], [2].

Отсутствие единообразного понимания терминов препятствует взаимодействию между различными научными дисциплинами, приводит к противоречиям в правовой сфере и осложняет выработку общих методологических принципов.

Цель исследования: систематизировать и провести сравнительный анализ существующих подходов к определению РИ в различных сферах его применения.

Проведенный анализ подходов к РИ в различных отраслях необходим для формирования целостного понимания этого инструмента, что является ключевым условием для его успешной реализации в горной отрасли применительно к горным машинам. В условиях интенсивной эксплуатации горношахтного оборудования, характеризующейся высокими нагрузками, износом парка машин, РИ становится востребованным и экономически оправданным решением для восстановления утраченной документации, импортозамещения критически важных узлов и модернизации оборудования. Выявление общих закономерностей и отраслевых особенностей РИ позволяет адаптировать лучшие практики для решения специфических задач горного дела, обеспечивая тем самым технологическую независимость и безопасность горнодобывающих предприятий.

В рамках исследования выделен ряд отраслей, для которых развитие РИ происходит наиболее динамично. К таким отраслям относятся: авиастроительная, машиностроительная, строительная, информационная безопасность.

Авиастроительная отрасль является высокотехнологичной и системообразующей, в ее состав входит самолетостроение, вертолетостроение и двигателестроение. Авиастроительная отрасль, характеризуется исключительными требованиями к безопасности, долговечности и нормативному соответствию, представляет собой уникальное поле для применения РИ [3]. В этой сфере РИ трансформируется из простого копирования в совокупность

специализированных методологий, объединённых общим технологическим ядром, но различающихся по целям и задачам. Отсутствие единого терминологического определения РИ связано с разнообразием его задач в авиастроительной отрасли, включающих как восстановление документации, так и верификацию изготовления.

Анализ литературы позволил систематизировать три основных подхода к РИ в авиастроении. Первым подходом является технико-технологический подход – РИ как процесс создания точной цифровой 3D-модели и конструкторской документации на основе данных высокоточного сканирования и метрологического анализа. Является основой для контроля качества, аддитивных технологий и ремонта сложных деталей. Второй подход – эксплуатационно-ремонтный подход, здесь РИ как методология восстановления утраченной документации для поддержания лётной годности воздушных судов с длительными сроками эксплуатации. РИ выступает инструментом сохранения и продления ресурса парка. Третий подход – аналитико-верификационный подход – РИ как инструмент сравнения цифрового проекта с физическим объектом для выявления отклонений, деформаций и верификации производственных процессов. Обеспечивает обратную связь между виртуальным проектированием и реальностью.

Особенность авиастроительного РИ заключается в точности и прослеживаемости измерений, это является строго обязательной частью, что отличает его от практик в других отраслях и обусловливает тесную связь с метрологией.

Строительная отрасль демонстрирует уникальную адаптацию РИ, где методологии формируются вокруг задач управления информацией об объекте на всех этапах его существования. В отличие от дискретного производства, как в авиастроении, строительный РИ сталкивается с проблемами масштаба, уникальности объектов и длительного жизненного цикла [4]. Анализ литературы позволил сформировать три основных подхода в этой отрасли. Информационно-модельный подход – РИ как процесс создания семантически насыщенной BIM-модели существующего здания, содержащей данные о материалах, инженерных системах и состоянии конструкций. Это основа для управления объектом на всём жизненном цикле. Геометрически-реконструктивный подход – РИ как комплекс технологий для высокоточного документирования сложной геометрии, особенно актуальный для объектов культурного наследия и уникальных архитектурных форм. Основная суть данного подхода заключается в фиксации состояния без его модификации. Прагматично-проектный подход – РИ выступает инструментом решения конкретных прикладных задач, таких как подготовка к реконструкции, контроль качества строительно-монтажных работ, оценка повреждений. В этом подходе ключевая особенность в оперативности и целесообразности, предоставление только необходимых для инженерного решения данных.

Уровень детализации в строительном РИ варьируется от простой 3D-оболочки до детализированной BIM-модели в зависимости от целей проекта. Если в авиастроении РИ инструмент безопасности и строгого нормативного соответствия, то в строительстве он выступает гибким, адаптивным средством управления жизненным циклом сложного актива.

Сфера информационной безопасности представляет наиболее динамичную и конфликтную область применения РИ, где объектом анализа выступает не физическая форма, а логика, функции и уязвимости программного обеспечения при отсутствии доступа к исходным кодам. Принципиальный дуализм РИ порождает терминологическую вариативность и позволяет выделить четыре ключевых подхода [5]. Аналитико-защитный подход – РИ как метод исследования вредоносного программного обеспечения для изучения его функциональности, механизмов заражения и разработки средств нейтрализации. Современная трактовка рассматривает РИ в объединении с искусственным интеллектом для создания проактивных систем киберзащиты. Верификационно-аудиторский подход – РИ как методология анализа стороннего программного обеспечения для

выявления недокументированного функционала, скрытых уязвимостей и программных закладок. Криминалистически-расследующий подход – РИ как неотъемлемый компонент цифровой криминалистики для восстановления логики подозрительных артефактов, идентификации тактик злоумышленников и формирования доказательной базы, включая анализ атак на промышленные системы управления. Подход правового регулирования – фокусируется на правовых аспектах применения РИ, балансируя между необходимостью анализа и защитой интеллектуальной собственности, регулируемой лицензионными соглашениями и доктриной добросовестного использования.

Уникальность РИ в информационной безопасности определяется его существованием в условиях правового дуализма и постоянного противостояния с интеллектуальным противником, который сам использует те же методы. Если в других отраслях РИ служит инструментом созидания или сохранения, то здесь он становится ещё и оружием, что накладывает особую правовую и профессиональную ответственность.

Машиностроение как фундамент промышленного производства исторически стало одной из первых и наиболее значимых областей применения РИ. В условиях глобальной конкуренции и необходимости модернизации РИ трансформировался из инструмента простого копирования в методологию воссоздания не только геометрии, но и функциональности, технологичности и эксплуатационных характеристик изделий [6]. Анализ позволил выделить четыре ключевых подхода. Восстановительно-документационный подход – РИ как процесс оперативного воссоздания конструкторской документации для замены или восстановления деталей, чертежи на которые утрачены или никогда не существовали. Акцент на скорости и точности получения геометрии для изготовления функционального аналога. Аналитико-конкурентный подход – РИ как метод сравнительного анализа продукции конкурентов для выявления применяемых технологий, материалов и конструктивных решений. Основная цель такого подход – извлечение инженерных знаний для совершенствования собственных продуктов. Подход цифрового перепроектирования – РИ как инструмент перевода физического объекта в цифровую среду для его модернизации, оптимизации или адаптации к современным методам производства. Служит связующим звеном между устаревшим объектом и цифровыми CAD-технологиями. Верификационно-контрольный подход – РИ как метод входного или выходного контроля, позволяющий сравнить цифровую модель реальной детали с исходным проектом для выявления отклонений и коррекции технологического процесса.

В машиностроении РИ носит системный и материально-ориентированный характер. РИ в машиностроении это не просто копирование формы, а восстановление и улучшение функциональности физического объекта с полным пакетом конструкторско-технологической документации. Процесс тесно интегрирован с производственными цепочками, что превращает РИ в инструмент инновационного переосмысления и модернизации, а не простого воспроизводства.

РИ сегодня это не просто совокупность технологий трёхмерной оцифровки, а полноценная стратегическая дисциплина, обеспечивающая цифровую непрерывность и адаптацию объектов в условиях, когда традиционные подходы к проектированию и ведению документации исчерпали себя или недоступны. Дальнейшая эволюция РИ будет неразрывно связана с углублением его интеграции с системами искусственного интеллекта, ростом уровня автоматизации и формированием взвешенного правового поля. Именно это позволит РИ в полной мере раскрыть свой потенциал, став одним из краеугольных камней инновационного развития, устойчивого роста и технологической безопасности в цифровую эпоху.

Список литературы

1. Kumar A., Jain P. K., and Pathak P. M., Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview. DAAAM International Vienna, 2013. doi: 10.2507/daaam.scibook.2013.39.

2. J. Xu and Z. Li, “Research on Legal Issues of Computer Software Reverse Engineering,” J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1992, no. 2, p. 022015, Aug. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1992/2/022015.

3. R. Arista, F. Mas, D. Morales-Palma, and C. Vallellano, “Industrial Resources in the design of Reconfigurable Manufacturing Systems for aerospace: A systematic literature review,” Computers in Industry, vol. 142, p. 103719, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.compind.2022.103719.

4. G. Confalone, J. Smits, and T. Kinnare, “Reverse Engineering for Architecture, Engineering, and Construction,” 2022, pp. 133–160. doi: 10.1002/9781119758532.ch7.

5. “Reverse Engineering for Generation of 3D-Building-Information-Models Applying Random Variables in Computer Aided Design,” ResearchGate. Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/238726032_Reverse_Engineering_for_Generation_of_3D-Building-Information-Models_Applying_Random_Variables_in_Computer_Aided_Design

6. J. Viana, “Mechanical engineering applied to mining: innovations in equipment and processes,” LUMEN ET VIRTUS, vol. 15, Dec. 2024, doi: 10.56238/levv15n43-154.

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Хохлов А.В.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s235073@stud.spmi.ru

Научный руководитель: Сафиуллин Р.Н.
доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. Целью исследования является совершенствование методов обеспечения функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств на этапе эксплуатации. Основные проблемы в обеспечении функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств заключаются в сложности формализации требований к поведению в условиях неопределённости, рисками систематических отказов из-за ошибок в алгоритмах восприятия и прогнозирования, а также необходимостью обеспечения безопасности на протяжении всего жизненного цикла. Исследование проблем функциональной безопасности обусловлено стремительным внедрением автономных технологий, а также высокой социально-экономической значимостью темы, поскольку успешное решение данных проблем способно снизить аварийность на дорогах, тогда как ошибки в системах безопасности могут привести к человеческим жертвам. В результате определены существующие методы обеспечения функциональной безопасности и предложены рекомендации по их совершенствованию.

Ключевые слова: высокоавтоматизированное транспортное средство, функциональная безопасность, электронные и электрические системы, системы управления, уровень автоматизации.

Введение. Транспортный сектор является одним из ключевых факторов экономического развития государства [1, 2, 3]. Ежедневно благодаря транспортным средствам осуществляется доставка грузов и пассажиров к местам назначения [4, 5, 6]. В последние несколько лет наблюдается активное внедрение высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) различных уровней автоматизации на дороги общего пользования, что открывает новые возможности для повышения эффективности перевозок, но одновременно порождает серьёзные вызовы в области безопасности [7, 8, 9]. В отличие от традиционных автомобилей, управление функциями движения в ВАТС возлагается на электронные и электрические системы, что принципиально меняет подходы к обеспечению безопасности. Функциональная безопасность таких систем регламентируется европейскими стандартами ISO 26262, а также российским ГОСТ Р ИСО 26262. Однако их применение ориентировано в первую очередь на этапы разработки и производства. Эксплуатация ВАТС сопряжена с высокой неопределённостью внешней среды, что создаёт риски систематических отказов, связанных с ошибками алгоритмов восприятия и прогнозирования. В мировой научно-технической литературе активно обсуждаются подходы к верификации и валидации автономных систем, однако вопросы обеспечения функциональной безопасности именно на этапе эксплуатации, с учетом накопления данных и адаптации поведения, остаются недостаточно проработанными [10]. Целью исследования является совершенстование методов обеспечения функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств на этапе эксплуатации. Задачами исследования являются: анализ существующих методов обеспечения функциональной безопасности ВАТС, определение их преимуществ и недостатков, определение возможностей их совершенствования. Идея исследования состоит в комплексном применении

методов анализа рисков в реальном времени и обратной связи по данным эксплуатации для поддержания функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств в течение всего жизненного цикла.

Методы. В работе использован комплекс методов анализа рисков и отказов, применяемых на этапах разработки и эксплуатации электронных и электрических систем ВАТС. Анализ видов и последствий отказов (FMEA) направлен на идентификацию потенциальных дефектов компонентов, оценку тяжести их последствий и вероятности возникновения, что позволяет ранжировать риски и определить приоритетные меры защиты. В качестве преимуществ можно отметить системный охват элементов, приоритетность рисков. В качестве недостатков можно отметить ограниченность в учёте комбинаций отказов элементов электрооборудования и человеческого фактора. Анализ дерева неисправностей (FTA) представляет собой дедуктивный метод, с помощью которого выявляются сочетания событий, приводящих к критическому отказу системы; данный метод позволяет количественно оценить вероятность возникновения опасных ситуаций. В качестве преимуществ можно отметить возможность количественной оценки рисков возникновения сбоев и отказов. В качестве недостатков можно отметить трудоёмкость при построении сложных деревьев, а также зависимость от полноты исходных данных. Анализ опасностей и работоспособности (HAZOP) применяется для систематического исследования отклонений параметров от заданных режимов функционирования. В качестве преимуществ можно отметить достаточную полноту выявления опасных отклонений. В качестве недостатков можно отметить субъективность экспертных оценок, значительные временные затраты.

Результаты. В ходе проведённого анализа установлено, что существующие методы FMEA, FTA и HAZOP, широко применяемые на этапах разработки, обладают рядом ограничений при их использовании в процессе эксплуатации ВАТС. Выявлено, что метод FMEA недостаточно учитывает комбинированные отказы, возникающие при взаимодействии нескольких электронных систем, а также влияние человеческого фактора, что критично для сценариев с частичным вмешательством в управление водителя или дистанционным управлением. Метод FTA, несмотря на возможность количественной оценки рисков, характеризуется высокой трудоёмкостью при построении деревьев для сложных систем с динамически изменяемой архитектурой, а его точность существенно зависит от полноты и актуальности данных об отказах. Метод HAZOP показал высокую полноту выявления опасных отклонений, однако его применение в реальном времени ограничено субъективностью экспертных оценок и значительными временными затратами.

Обсуждение. Анализ данных проводился на основе нормативных документов (ISO 26262, ГОСТ Р ИСО 26262), научных публикаций, а также технической документации на системы управления высокоавтоматизированных транспортных средств. Сравнительная оценка методов выполнена по критериям полноты выявления опасностей, возможности количественной оценки рисков и применимости на этапе эксплуатации.

Заключение. Таким образом, на основе выявленных недостатков сформулированы требования к совершенствованию методов обеспечения функциональной безопасности ВАТС на этапе эксплуатации. Определено, что ключевым направлением является интеграция статических методов анализа с динамическими подходами, использующими данные бортовых систем и инфраструктуры для мониторинга, прогнозирования и адаптации критических функций. Предложена концепция комбинированного применения FMEA, FTA и HAZOP с элементами обратной связи, что позволяет повысить полноту выявления опасных ситуаций и снизить влияние субъективных факторов.

Список литературы

1. Шаталова Н.В., Орешкина А.Д. Технологические принципы интеллектуальных транспортных систем // Перспективные транспортные технологии : материалы IV Международной научно-практической конференции по направлению НТИ Автонет, Екатеринбург, 08 июля 2025 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшегообразования «Московский политехнический университет», 2025. – С. 159-164. – EDN LBQFJM.
2. Назарычев А.Н., Дяченок Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института, 2023. – Т. 261. С. 363-373. – EDN HCLPJB.
3. Баркова С.А., Соловьева В.Н. Транспортный фактор в повышении конкурентоспособности российской экономики // Перспективы развития агропромышленного комплекса: региональные и межгосударственные аспекты : материалы международной научно-практической конференции, Новосибирск, 14–15 ноября 2018 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2018. – С. 212-215. – EDN YMOIPJ.
4. Парра С.А. Методика оптимизации перевозочного процесса пассажирского транспорта на основе методов искусственного интеллекта // Перспективные транспортные технологии : материалы IV Международной научно-практической конференции по направлению НТИ Автонет, Екатеринбург, 08 июля 2025 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшегообразования «Московский политехнический университет», 2025. – С. 30-40. – EDN XITBIE.
5. Присяжнюк М.С., Сафиуллин Р.Н., Сорванов А.В. Теория и практика применения цифровых технологий в перевозочном процессе пассажирского транспорта // Перспективные транспортные технологии : материалы IV Международной научно-практической конференции по направлению НТИ Автонет, Екатеринбург, 08 июля 2025 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2025. – С. 170-177. – EDN SEELNK.
6. Менухова Т.А., Сивов А.А., Богданов М.В. Методика определения потенциального пассажиропотока в новых микрорайонах города Санкт-Петербурга после заселения жилых комплексов // Транспортное дело России. – 2025. – № 3. – С. 67-71. – EDN JGNCFH.
7. Смоляков С.А., Богданов М.В., Сафиуллин Р.Р. Методика повышения контролепригодности высокоавтоматизированных транспортных средств // Магистратура - автотранспортной отрасли : Материалы IX Всероссийской межвузовской конференции, Санкт-Петербург, 24–25 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 344-360. – EDN AAYAEX.
8. Клебанов А.Ф., Габусу П.А., Еремкин И.В. Система контроля и управления движением высокоавтоматизированного погрузочно-доставочного комплекса // Транспорт. Взгляд в будущее - TFV-24 : Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07–08 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. – С. 127-128. – EDN ECGUQV.
9. Чудаков А.В., Куржев М.А. Человек-оператор - основа системы безопасности людей на автомобильном транспорте // Научно-исследовательские публикации. – 2023. – № 1. – С. 30-36. – EDN UDBIHS.
10. Харлап С.Н., Конопацкая А.Ю. Обзор существующих методов повышения функциональной безопасности беспилотных транспортных средств // Перспективы развития транспортного комплекса : Материалы IX Международной научно-практической конференции, Минск, 12–14 октября 2024 года. – Минск: БелНИИТ «Транстехника», 2024. – С. 258-265. – EDN BBYTYI.

РАЗРАБОТКА МЕЖКАМЕРНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ ТРУБНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ 3,2Х15 М

Хохлов Д.О.*, Никулин В.В.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия,
**dim.khokhlov2016@yandex.ru*

Научный руководитель: Фадин Ю.М.
канд. техн. наук, доц.,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия.

Аннотация. Рассмотрены направления совершенствования конструкций межкамерных перегородок трубных шаровых мельниц. На основе патентного анализа предложена новая конструкция перегородки, состоящая из наклонного, горизонтального и вертикального сегментов, выполненных из стержней с фиксаторами. Исследовано влияние конструктивных и режимных параметров на производительность и потребляемую мощность. Получены уравнения регрессии, определены рациональные значения параметров. Выполнен прочностной расчёт перегородки в среде КОМПАС-3D (APM FEM), подтверждены условия прочности и жёсткости.

Ключевые слова: трубная шаровая мельница, межкамерная перегородка, измельчение, производительность, мощность, прочностной расчёт.

Цементная промышленность остаётся одной из ключевых отраслей строительной индустрии, а процесс тонкого измельчения клинкера – наиболее энергоёмким и ответственным переделом. Основным агрегатом для помола служат трубные шаровые мельницы (ТШМ), которые обладают рядом преимуществ: простота конструкции, надёжность, возможность получения высокой тонкости помола [1]. Их существенными недостатками являются низкий КПД (2–5 %), повышенный расход электроэнергии и мелющих тел. Одним из путей повышения эффективности работы ТШМ является совершенствование внутримельничных устройств, в частности межкамерных перегородок, которые разделяют барабан на камеры грубого и тонкого помола и влияют на характер движения мелющих тел и транспортировку материала [2, 3].

Проведённый патентный поиск показал, что известны различные решения межкамерных перегородок: моноблочные, с регулируемыми элементами, а также сегментные решения [3–6]. Наиболее перспективным признано техническое решение по патенту SU1814919A1 [7], в котором перегородка выполнена из трёх сегментов – наклонного, горизонтального и вертикального. Развивая эту идею, предложена конструкция полностью сварной перегородки (рис. 1), состоящей из наклонного сегмента 4, горизонтального сегмента 6 и вертикального сегмента 5, соединённых друг с другом. Каждый сегмент образован стержнями, что обеспечивает необходимую жёсткость и живое сечение для прохода материала и воздуха.

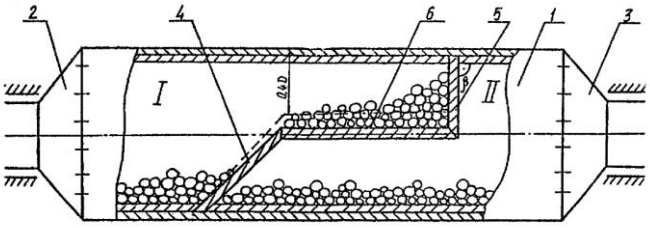


Рис. 1. Предлагаемая межкамерная перегородка:
1 – корпус; 2 – загрузочная крышка; 3 – разгрузочная крышка; 4 – наклонный сегмент;
5 – вертикальный сегмент; 6 – горизонтальный сегмент

Для оценки влияния конструктивных и режимных параметров на эффективность работы мельницы реализован центральный композиционный ортогональный план полного факторного эксперимента ПФЭ ЦКОП 2^4. В качестве функций отклика выбраны: производительность Q, т/ч, и мощность, потребляемая главным приводом P, кВт.

Эксперименты проводились на лабораторной установке (рис. 2), а также с использованием ранее полученных данных моделирования. Обработка результатов выполнена методами математической статистики (проверка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента, адекватности – по критерию Фишера).

Для оценки напряжённо-деформированного состояния перегородки выполнен конечно-элементный анализ в среде КОМПАС-3D с приложением APM FEM. Модель нагружалась равномерно распределённой статической силой, эквивалентной давлению слоя мелющих тел и материала (70 т).



Рис. 2. Общий вид лабораторной установки

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии в кодированной форме.

Анализ поверхностей отклика показал, что с ростом коэффициента загрузки k производительность возрастает, однако увеличение относительной частоты вращения ψ приводит к её снижению из-за перехода к центробежному режиму. Мощность увеличивается с ростом k и длины горизонтального сегмента L. Наименьшие значения мощности соответствуют углу наклона $\alpha \approx 65°$.

Совместная оптимизация по критериям максимума производительности и минимума потребляемой мощности позволила определить рациональные значения параметров:

- коэффициент загрузки мелющих тел $k = 0{,}30$;
- относительная частота вращения барабана $\psi = 0{,}75$;
- длина горизонтального сегмента $L = 3{,}2$ м;
- нижний угол наклонного сегмента $\alpha = 65°$.

При этих значениях расчётная производительность мельницы составляет 52,1 т/ч, потребляемая мощность – 1968 кВт, что соответствует паспортным данным и подтверждает адекватность моделей.

Прочностной расчёт показал, что максимальные эквивалентные напряжения в элементах перегородки не превышают 29,4 МПа, что значительно ниже допускаемых для стали 20 (377 МПа). Коэффициент запаса прочности равен 12,8. Максимальные перемещения – 1,24 мм, что меньше допускаемого значения 27 мм. Условия прочности и жёсткости выполняются с большим запасом.

Полученные оптимальные параметры хорошо согласуются с известными рекомендациями для ТШМ. Коэффициент загрузки 0,30 является типичным для двухкамерных мельниц, а относительная частота вращения 0,75 обеспечивает смешанный (каскадно-водопадный) режим движения шаров, при котором достигается наилучшее измельчение. Выбранная длина горизонтального сегмента 3,2 м близка к среднему значению исследованного диапазона и обеспечивает дополнительное измельчение без излишнего роста энергозатрат. Угол наклона 65° позволяет снизить мощность и стабилизировать поток материала.

Разработанная перегородка по сравнению с известными аналогами отличается простотой изготовления (сварная конструкция), возможностью регулировки живого сечения за счёт изменения шага стержней, а также повышенной надёжностью, подтверждённой расчётами.

В результате работы предложена новая конструкция межкамерной перегородки для трубной шаровой мельницы 3,2×15 м. Методом многофакторного эксперимента определены рациональные значения основных параметров: коэффициент загрузки мелющих тел 0,30, относительная частота вращения 0,75, длина горизонтального сегмента 3,2 м, угол наклона сегмента 65°. Прочностной расчёт подтвердил работоспособность и надёжность конструкции. Разработанная перегородка может быть рекомендована для модернизации действующих цементных мельниц с целью повышения производительности и снижения удельных энергозатрат.

Дальнейшие исследования будут направлены на опытно-промышленную апробацию предложенной конструкции и уточнение её влияния на гранулометрический состав готового продукта.

Список литературы

1. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Фадин Ю.М. и др. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. – 680 с.
2. Несмеянов Н.П., Калашник И.А., Сухоруков И.Н., Али А.М., Юссиф А.М., Хохлов Д.О. Изучение влияния внутримельничных устройств при измельчении материалов в барабанных мельницах – XVII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» - Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025. – Ч. 2. – 847 с.
3. Юдин К.А., Романенко В.С., Хохлов Д.О. Модернизация разгрузочного устройства шаровой мельницы – Межвузовский сборник статей «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов» - Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025.
4. Christian Pfeiffer. Monobloc diaphragm [Электронный ресурс]. – URL: https://www.christianpfeiffer.com/en/products/diaphragms/intermediate-diaphragm-monobloc/ (дата обращения: 13.03.2026).
5. FLSmidth. STANEX diaphragm for ball mills [Электронный ресурс]. – URL: https://www.flsmidth.com/en-gb/products/stanex-diaphragm-for-ball-mills (дата обращения: 13.03.2026).
6. Estanda self regulation diaphragms [Электронный ресурс]. – URL: https://www.estanda.com/en/self-regulating-diaphragms (дата обращения: 13.03.2026).
7. Патент SU 1814919 A1, МПК B02C 17/18. Межкамерная перегородка трубной мельницы / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, К.А. Юдин и др. – № 4890722; заявл. 18.12.1990; опубл. 15.05.1993.
8. Патент RU 2436634 C1, МПК B02C 17/18. Трубная мельница с классифицирующей перегородкой / О.С. Ханина, Д.С. Ханин, С.И. Ханин. – № 2010121478/13; заявл. 26.05.2010; опубл. 20.12.2011.
9. Патент RU 199892 U1, МПК B02C 17/00. Трубная шаровая мельница / Ю.М. Фадин, Е.А. Ромашкова, К.А. Юдин и др. – № 2020116511; заявл. 20.05.2020; опубл. 24.09.2020.
10. В.С. Богданов, Д.В. Богданов, И.А. Семикопенко. Процессы в производстве строительных материалов – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 436 с.

УПРАВЛЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИЦИОННЫХ КОМПАНИЙ: ПЕРЕХОД НА НОВЫЙ ФОРМАТ РАБОТЫ С КОНТРАГЕНТАМИ

Чудашкин М.Е.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, maximchudashkin@gmail.com

Научный руководитель: Менухова Т.А.
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В условиях налоговой реформы 2026 г. транспортно-экспедиционные компании сталкиваются с необходимостью перестройки операционной деятельности. На примере ООО «Пионер Авто» выявлены основные группы риска: утрата права на освобождение от налога на добавленную стоимость, повышение налоговой ставки, ужесточение администрирования. Разработан комплекс мероприятий, направленный на повышение операционной эффективности компаний с целью сохранения позиций на рынке транспортных услуг.

Ключевые слова: транспорт, транспортно-экспедиционная компания, налоговая реформа, упрощённая система налогообложения, налог на добавленную стоимость, агентская схема работы.

Введение. Эффективность деятельности транспортно-экспедиционных компаний (ТЭК) в значительной степени определяется способностью оперативной адаптации к изменениям рыночной конъюнктуры. 2026 год ознаменован налоговой реформой, которая включает поэтапное снижение порога доходов для применения упрощённой системы налогообложения (УСН) без уплаты налога на добавленную стоимость (НДС), повышение ставки НДС до 22%, а также ужесточение требований к налоговому администрированию [1, 2].

Малые и микропредприятия часто балансируют на грани порога доходов для применения УСН без НДС, чтобы сохранять средства и удерживать рыночные позиции наравне с крупными ТЭК. Малые и микропредприятия наиболее уязвимы к рыночным колебаниям [3], что обуславливает актуальность разработки адаптационных механизмов перехода на новый формат работы, отсутствие которых приводит к неоправданным расходам и затрудняет стратегическое планирование [4].

Цель исследования – разработка комплекса мероприятий по переходу ТЭК на новый формат работы с контрагентами в условиях налоговых изменений, апробированного на примере действующего предприятия.

Методы. В работе использованы методы системного анализа, сравнительного анализа налоговых режимов и договорных моделей, а также методы финансового моделирования. Формализация задачи выполнена на основе структурирования мероприятий с выделением ключевых управленческих решений [5].

Результаты. Комплекс мероприятий, предложенный для внедрения в ТЭК, с целью удержания рыночных позиций в новых рыночных условиях, включает ряд направлений.

Первое направление работы направлено на переход к агентской схеме транспортного экспедирования в соответствии с одним из возможных сценариев. В соответствии с первым сценарием, экспедитор (далее – агент) действует от имени и за счёт клиента (далее -принципал). По второму сценарию агент действует от своего имени, но за счёт принципала посредством уступки прав или перевыставления договора. Важно отметить, что применение второго сценария целесообразно для сохранения коммерческой тайны

при ограниченном круге контрагентов. Третий сценарий предполагает работу по двухуровневой агентской схеме посредством включения в схему работы субагента. Применение третьего сценария можно считать целесообразным при наличии доверенной компании, которая готова выступать в качестве субагента. В ином случае фирма, привлекаемая в качестве субагента, может исключить первичного агента из схемы работы, начав сотрудничать с контрагентами напрямую.

В качестве альтернативы первому направлению, которое предусматривает переход к новой схеме работы с целью сохранения права на неуплату налога на добавленную стоимость, можно рассмотреть второе направление, которое можно охарактеризовать как адаптацию к новым налоговым условиям. В соответствии с этим направлением планирования компания может сохранить текущую схему работы с контрагентами, сосредоточившись на минимизации потерь от необходимости выплачивать налог на добавленную стоимость. С этой целью можно выделить три основных возможных сценария работы с потерей права на освобождение от НДС при УСН.

Первый и второй сценарии предполагают выплату НДС, но компания вольна выбирать процентную ставку по этому налогу. В первом сценарии ставка принимается как 5% НДС. Существенным минусом такого сценария является невозможность для клиента принятия НДС к налоговому вычету, что соответственно приводит к неизбежному росту стоимости услуг и может привести к потере клиентов. Второй сценарий предполагает выплату 22% НДС, но при нём клиенты компании будут иметь возможность принятия этого налога к вычету, что позволит формально не повышать стоимость услуг, хотя фактически она значительно увеличится.

Так как исследуемая компания относится к числу микропредприятий, целесообразно также рассматривать вариант применения автоматизированной упрощённой системы налогообложения (АУСН). Применение её возможно только при соответствии фирмы ряду критериев, а именно: годовая выручка менее 60 миллионов рублей, менее 5 сотрудников, а также компания не должна работать по агентской схеме. Последнее условие исключает применение первого рассмотренного направления. АУСН даст возможность компании при сохранении всех текущих показателей выплачивать 8% налога, что только на 2% выше текущей ставки по УСН.

В качестве дополнительных направлений по повышению эффективности работы компании также рассматривается совершенствование технической части рабочего процесса и работа с финансовыми процессами.

Совершенствование технической части рабочего процесса предполагается через, во-первых, внедрение автоматизированной системы управления перевозками (далее – TMS), во-вторых, через внедрение автоматического расчёте себестоимости и контроля неоплаты, и в-третьих цифровизация взаимодействия с контрагентами [6..8] посредством перевода контрагентов на электронный документооборот и автоматизации процесса слежения за прибыльностью сделок и сравнения цен и перевозчиков.

Работа с финансовыми процессами должна быть направлена в первую очередь на снижение дебиторской задолженности предприятия и на оптимизацию расходов для восстановления рентабельности посредством анализа выгодности имеющихся статей дохода предприятия через отслеживание рентабельности по каждому договору перевозки.

Обсуждение. Научная новизна и практическая значимость исследования заключаются в следующем:

1. Систематизированы ключевые направления по приспособлению работы транспортно-экспедиционных компаний к изменениям налоговых режимов, что позволило выйти за рамки отраслевых рекомендаций.

2. Предложен алгоритм перехода на новый формат работы с заказчиками, структурированный по этапам и учитывающий взаимосвязь между выбором налогового режима, изменением схемы работы с контрагентами, перестройкой ценообразования и бизнес-процессов.

3. Выявлены критерии выбора управленческих решений в зависимости от типа контрагентов и операционных условий, что позволяет применять разработанные мероприятия в практике транспортно-экспедиционных компаний независимо друг от друга.

Предложенные решения позволяют выбрать оптимальную модель взаимодействия с контрагентами и повысить операционную эффективность и финансовую устойчивость предприятия в период налоговых реформ. Результаты апробированы на примере действующей транспортно-экспедиционной компании, что подтверждает их применимость на практике.

Заключение. Разработанный комплекс мероприятий может быть использован транспортно-экспедиционными компаниями с целью сохранения рыночных позиций в условиях изменившегося налогового законодательства. Дальнейшие исследования могут быть направлены на автоматизацию процесса выбора оптимальной схемы взаимодействия с контрагентами в зависимости от динамики изменений внешних условий рынка.

Список литературы

1. О внесении изменений в Федеральный закон «О транспортно-экспедиционной деятельности» и отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 07.06.2025 № 140-ФЗ. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202506070016.
2. О внесении изменений в части первую и вторую Налогового кодекса Российской Федерации, отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу законодательных актов (отдельных положений законодательных актов) Российской Федерации: Федеральный закон от 28.11.2025 № 425-ФЗ. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202511280017.
3. Шарова И.В., Галкина С.П. Управление транспортными рисками // Экономика, предпринимательство и право. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 1241-1256. – DOI 10.18334/epp.15.2.122641. – EDN FJNRRR.
4. Вьюшкова А.А., Терентьев А.В., Менухова Т.А. Методологический аспект при выборе оптимальной схемы доставки груза // Инновации на транспорте и в машиностроении. сборник трудов IV международной научно-практической конференции. 2016. С. 36-37. EDN: XFGWIP
5. Матвеев А.Г., Менухова Т.А. Подход по учету параметров при применении методов выбора альтернатив в условиях неопределенности // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1-1 (80). С. 119-124. EDN: FJBOSV. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-1(80)-1-119-124.
6. Об утверждении формата представления счета на оплату в электронной форме: приказ ФНС России от 20.01.2025 № ЕД-7-26/29@. – URL: https://www.nalog.gov.ru/rn77/about_fts/docs/15800693/.
7. Абрамов В.И. Цифровизация логистических процессов предприятий в экономике данных: вызовы, инструменты, финансовые и организационные эффекты / В.И. Абрамов, А.К. Жакин // Экономика, управление, право: проблемы и перспективы. – 2025. – Т. 2, № 5. – С. 17. – DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.02.05.017. – URL: https://s-lib.com/issues/eiu_2025_02_v5_a17/.
8. Рогов А.С. Влияние цифровой трансформации на операционную эффективность ТРЦ / А.С. Рогов // Актуальные исследования. – 2023. – № 52 (182). – URL: https://apni.ru/article/8000-vliyanie-czifrovoj-transformaczii-na-operaczionnuyu-effektivnost-tr-cz.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПЕРЕВОЗЧИКОВ В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И МОДУЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СТРУКТУРЕ TMS

Шаврина В.С.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, shavrinavalentina@yandex.ru

Научный руководитель: Менухова Т.А.
к.т.н., доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Современный рынок грузоперевозок в России характеризуется высокой степенью неопределенности и значительными рисками при взаимодействии с контрагентами. В ходе исследования проанализированы теоретические подходы к оценке поставщиков транспортных услуг, систематизированы факторы, оказывающие влияние на надежность перевозчиков, в результате исследования сформирована многокритериальная система оценки контрагентов, а также предложена ее интеграция с CRM-системой для обеспечения автоматизации ключевых этапов.

Ключевые слова: грузовые перевозки, управление цепями поставок, критерии выбора перевозчика, CRM-система, контрагент.

Введение. В современной логистике проблема выбора надежного перевозчика является одной из значимых, это обусловлено тем, что транспортная составляющая оказывает непосредственное влияние на себестоимость продукции, сроки исполнения условий договоров и репутацию заказчика транспортных услуг [1, 2]. Критичность проблемы усугубляется масштабами теневого сектора в отрасли грузоперевозок. В настоящее время отсутствует единый формализованный и научно обоснованный подход к выбору компаний-контрагентов для выполнения перевозок [3…5]. Используемые методы носят фрагментарный характер и не позволяют системно оценивать риски [6, 7], связанные с недобросовестностью или финансовой нестабильностью перевозчиков.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью создания и внедрения комплексного, научно обоснованного подхода по выбору транспортных компаний-контрагентов [8]. Цель исследования заключается в повышении эффективности перевозок грузов за счет автоматизации процесса [9, 10] выбора перевозчика.

Методы. В ходе исследования были применены теоретические методы, такие как анализ, синтез, обобщение, систематизация, классификация, а также эмпирические – метод экспертных оценок, метод рейтинговой оценки. В качестве материалов были использованы научные труды, посвященные проблеме выбора перевозчиков, а также внутренние регламенты, реестры контрагентов и статистика выполненных перевозок грузов ООО «Сумитек Интернейшнл».

Результаты. В ходе исследования были проанализированы и систематизированы теоретические подходы к оценке и выбору поставщиков транспортных услуг, а также обоснован выбор методологической базы для исследования; разработана и научно обоснована комплексная система критериев для оценки контрагентов-перевозчиков; сформулированы функциональные требования к CRM-системе, обеспечивающей автоматизацию процесса выбора контрагентов-перевозчиков, на основании которых определено подходящее цифровое решение – предложена архитектура интеграции разработанной системы критериев в IT-пространство компании; разработан алгоритм внедрения комплексного решения по выбору перевозчиков в бизнес-процессы.

В рамках формирования системы критериев выбора перевозчика были отмечены следующие основные параметры: стоимость перевозки, скорость доставки, соблюдение сроков доставки, развитость маршрутной сети, процент страховых случаев, репутация перевозчика, опыт работы на рынке, наличие специального оборудования и т.д.

Кроме того, в результате проведения сравнительного анализа рынка CRM-систем по таким параметрам как функциональная полнота, интеграционные возможности, экономическая целесообразность и т.д. была выбрана CRM-система Мегаплан, наиболее подходящая для интеграции с разработанной системой критериев.

Обсуждение. Конкретные элементы научной новизны раскрываются в следующих положениях:

1. Разработанная система критериев оценки контрагентов-перевозчиков в отличие от существующих подходов, интегрирует в себя количественные показатели, качественные характеристики, а также специфические ограничительные условия.

2. Предложен алгоритм интеграции разработанной многокритериальной системы оценки контрагентов-перевозчиков в контур CRM-системы предприятия. Таким образом, процесс выбора перевозчика переводится из субъективной оценки отдельного сотрудника в автоматизированный режим, основанный на математическом расчете интегрального показателя надежности. Это позволяет не только оценивать контрагентов по совокупности параметров, но и автоматически «отсеивать» подозрительных участников еще на этапе запроса предложения, что существенно снижает операционные риски.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Внедрение системы критериев, позволяющей отсеивать ненадежных перевозчиков, позволит не только минимизировать риски финансовых потерь и судебных разбирательств, но и повысить общую эффективность логистической деятельности за счет обеспечения сохранности грузов и соблюдения сроков доставки.

2. Автоматизация выбора контрагента сократит временные и трудовые затраты логистов на ручной сбор информации и проверку потенциальных перевозчиков.

3. Формализованный подход обеспечит четкую аргументацию выбора того или иного перевозчика для руководства и партнеров компании.

Разработанные положения могут быть непосредственно использованы в деятельности ООО «Сумитек Интернейшнл» и других аналогичных компаний для повышения эффективности управления цепями поставок.

Заключение. Полученные результаты справедливы в рамках транспортно-логистической деятельности отдельной компании. Предложенная система критериев и алгоритм могут быть адаптированы путем изменения весовых коэффициентов и набора параметров для компаний из других отраслей, сталкивающихся с проблемой выбора надежных контрагентов-перевозчиков.

Автор выражает благодарность ООО «Сумитек Интернейшнл» за предоставленные данные и содействие в проведении исследования.

Список литературы

1. Кузьмин А.А. Построение модели выбора перевозчика при проектировании системы доставки грузов // Россия – Евразия – мир: интеграция – развитие – перспектива : Материалы XIV Евразийского экономического форума молодежи. В 4-х томах, Екатеринбург, 22–26 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2024. – С. 154-157. – EDN FAGGGG.

2. Вьюшкова А.А., Терентьев А.В., Менухова Т.А. Методологический аспект при выборе оптимальной схемы доставки груза // Инновации на транспорте и в машиностроении. сборник трудов IV международной научно-практической конференции. 2016. С. 36-37. EDN: XFGWIP.

3. Градович Ю.А. Разработка организационно-управленческого механизма выбора перевозчика потребителями транспортных услуг // Россия и мир в новых реалиях: изменение мирохозяйственных связей: материалы XII Евразийского экономического форума молодежи, Екатеринбург, 26–29 апреля 2022 года / Уральский государственный экономический университет. Том 3. – Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2022. – С. 131-133. – EDN DAJIGW.

4. Супрун Ю.О. Анализ критериев выбора перевозчика // Системный анализ и логистика. – 2019. – № 1(19). – С. 31-38. – EDN YWYPPV.

5. Низяева Ю.Д., Слободчиков Н.А. Факторы, оказывающие влияние на выбор перевозчика // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Сборник докладов Пятой Международной научной конференции. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 04–20 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 219-224. – DOI 10.31799/978-5-8088-1914-6-2024-5-1-219-224. – EDN NXHETA.

6. Шарова И.В., Галкина С.П. Управление транспортными рисками // Экономика, предпринимательство и право. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 1241-1256. – DOI 10.18334/epp.15.2.122641. – EDN FJNRRR.

7. Матвеев А.Г., Менухова Т.А. Подход по учету параметров при применении методов выбора альтернатив в условиях неопределенности // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1-1 (80). С. 119-124. EDN: FJBOSV. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-1(80)-1-119-124.

8. Безель К.А. Применение математической модели расчёта экспедитором рейтинга перевозчика для выбора наиболее качественного из них // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2024. – № 4(41). – С. 5-10. – EDN HRXGJF.

9. Менухова Т.А. Автоматизация оперативного управления междугородными грузовыми автомобильными перевозками // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 80-85. EDN: RRLAUM.

10. Menukhova T.A., Borodina Y.V. Intelligent system for centralized freight traffic planning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Issue 7 Transportation of Mineral Resources. 2018. С. 072008. EDN: AWJRLX. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072008.

УДК 621.7.01, 621.7.014, 621.7.015

ПОДБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Эйжвертина В.Д.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, kesotka@gmail.com

Научный руководитель: Ефимов А.Е.
доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Данная статья посвящена созданию и обучению нейросети на предмет определения качества поверхности обрабатываемого изделия, а также нахождения компромисса между шероховатостью и производительностью обработки. На основе результатов обучения нейросети построены и проанализированы графические зависимости, которые показали рациональное сочетание качества поверхности изделия и производительности обработки.

Ключевые слова: механическая обработка, режимы резания, шероховатость, производительность, нейронная сеть.

Современные машиностроительные предприятия, связанные с механической обработкой металлов, стремятся к балансу между шероховатостью – качеством получаемого изделия, и производительностью. В данной работе для нахождения связи между качеством и режимами резания применяется нейросеть – инновационная технология, с помощью которой можно прогнозировать шероховатость поверхности. Модель искусственного интеллекта, оценивающая влияние режимов резания на качество обрабатываемой поверхности из углеродистой стали марки 45, разработана на основе экспериментальных данных.

Один из ключевых показателей качества получаемого изделия – шероховатость поверхности (по параметру *Ra* – среднеарифметическое отклонение профиля), которая зависит от режимов резания. За наиболее весомые характеристики режимов резания взяты скорость и подача, а также геометрия режущего инструмента – передний угол и радиус скругления. Режущая часть инструмента выполнена из сплава MC6015, радиус скругления – 0.5 мм, передний угол – 3 мм. Диапазоны изменения параметров выбраны на основе источников [1, 2]: скорость резания – 185–282 м/мин; подача – 0.10–0.40 мм/об; глубина резания – 1.5–3 мм. Параметр глубины резания слабо влияет на формирование шероховатости, однако является одним из составляющих параметров оценки показателя производительности обработки. Помимо глубины резания, при расчете объема снятого металла в единицу времени (производительности) учитывается скорость и подача.

В данной работе реализована многослойная нейронная сеть. По аналогии с человеческим мозгом – это модель, которая обучается на данных и находит в них закономерности без заранее прописанных правил. Многослойная нейросеть позволяет аппроксимировать нелинейные связи между входными и выходными параметрами. Обучение модели проводилось методом обратного распространения ошибки: после одного цикла обучения, нейросеть сравнивает полученные результаты с эталонными показателями из базы данных и корректирует веса, тем самым в последующих циклах уменьшая погрешность вычислений. За входные параметры были взяты режимы резания, за выходные – значения шероховатости поверхности *Ra*.

Для повышения точности обучения также была выполнена нормализация. Главная задача нормализации – приведение входных и выходных данных к единому масштабу. Средняя относительная ошибка равна 1.52%, что подтверждает достоверность модели (рис. 1).

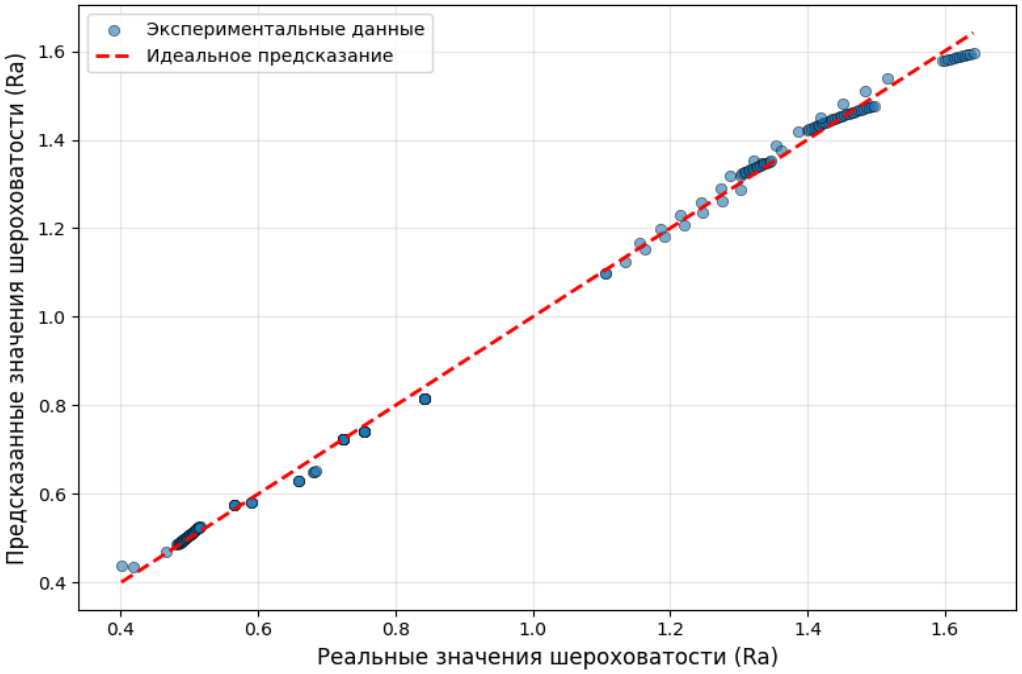


Рис. 1. Сравнение реальных и предсказанных значений шероховатости

После завершения обучения нейросети, пользователь задаёт необходимую шероховатость поверхности. Далее выполняется варьирование параметров обработки. В результате нейросеть предлагает режимы резания, которые обеспечивают максимальный объем снимаемого материала в единицу времени при условии, что шероховатость по параметру *Ra* не превышает установленного значения.

На рис. 2 представлен график, иллюстрирующий совместное влияние скорости резания *V* (м/мин), подачи *f* (мм/об) и глубины *t* (мм) на производительность.

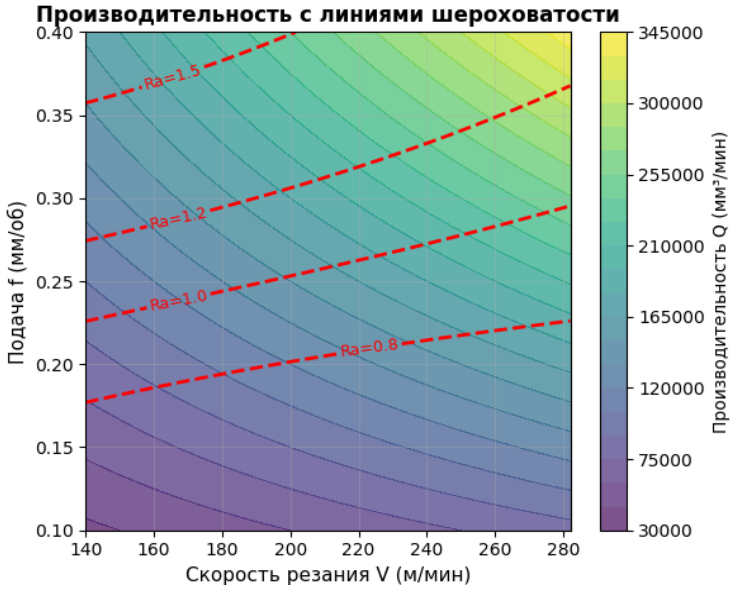


Рис. 2. Графики производительности и шероховатости в координатах скорость-подача

График показывает распределение производительности Q в поле параметров скорость – подача. Цветовая шкала от тёмно-фиолетового (низкая производительность) до жёлтого (высокая производительность) позволяет наглядно оценить, какие сочетания параметров обеспечивают максимальный съём материала. На цветовую карту производительности наложены линии шероховатости. Линии показаны красным пунктиром для значений Ra = 0.8, 1.0, 1.2 и 1.5 мкм.

Полученные графические зависимости позволяют эффективно решать задачу производств по подбору рациональных режимов резания исходя из требуемой шероховатости поверхности и производительности обработки.

Список литературы

1. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Москва: «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1979 г. С.69.

2. Mitsubishi.cdr: Токарные пластины. Рекомендуемые режимы резания. URL: https://cncmagazine.ru/images/companies/1/%21catalogs/Mitsubishi%20режимы%20обработки.pdf?1758264136903 (дата обращения 22.02.2026).

Секция 12. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ГУМАНИТАРНЫЕ АСПЕКТЫ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ

УДК 070.19

ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ И КАДРОВАЯ ПРОБЛЕМА САХАЛИНА КАК РЕЗУЛЬТАТ ОБРАЗА-МИФА ОСТРОВА (ПО МАТЕРИАЛАМ ОЧЕРКА А.П. ЧЕХОВА «ОСТРОВ САХАЛИН»)

Артеева Т.Д., Зимина М.Е.
студенты,
Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения,
Санкт-Петербург, Россия, arteevat52@gmail.com, 4mezim@gmail.com

Научный руководитель: Степанцева О.А.
к.культурологии, доцент кафедры медиакоммуникационных технологий,
Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследование оценивает влияние образа-мифа острова Сахалин, сформированного очерком А. П. Чехова, на кадровый дефицит минерально-сырьевого комплекса региона. Устойчивые нарративы каторги и изоляции рассматриваются как важный фактор оттока населения и сокращения человеческого ресурса острова.

Ключевые слова: минерально-сырьевой комплекс, человеческий ресурс, дефицит кадров, остров Сахалин, образ-миф, нарратив.

Введение. Ключевым фактором функционирования минерально-сырьевого комплекса (МСК) является наличие человеческого ресурса, а основная угроза устойчивого развития МСК – дефицит квалифицированных кадров [1]. Для Сахалинской области, как одной из опорных среди всех сырьевых регионов страны, дефицит человеческого ресурса в МСК имеет критическое значение. Традиционно проблема кадрового дефицита в конкретных регионах в научной литературе рассмотрена с позиций демографических, технологических, социальных и экономических причин. В современной науке особую роль проблеме кадрового дефицита отдают образу региона, транслируемого традиционными и новыми средствами массовой информации [2]. В стороне остается фактор устойчивого образа региона, сформированного и закрепленного в сознании людей литературными и журналистскими нарративами прошлого. В исследовании рассматривается влияние созданного с конца XIX века журналистом и писателем А.П. Чеховым образа острова Сахалин на демографическую и кадровую проблемы острова, которые напрямую влияют на развитие МСК. Целью исследования считается обоснование и аргументирование заявленных проблем. Задачами исследования является интерпретация образа-мифа Сахалина по тексту очерка «Остров Сахалин», анализ демографических и экономических показателей МСК острова, установление корреляции между проблемой дефицита человеческого ресурса на острове и устойчивостью созданного образа-мифа острова.

Методы. Методы исследования проблемы включают контент-анализ, дискурс-анализ, сравнительно-исторический и статистический анализы. В качестве материалов

исследования использован текст очерка А.П. Чехова «Остров Сахалин», официальные документы Правительства РФ, сведения территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Сахалинской области и данные с сайта Росстата. Концептуальная рамка исследования строится на теории медиаобраза и его миграционных эффектов [3].

Результаты. Анализ очерка «Остров Сахалин» позволяет выявить 4 ключевые категории, конструирующие образ Сахалина и создающего миф об острове как безысходном, неблагополучном, деструктивном и изолированном месте [4]. Сравнительно-исторический анализ численности жителей Сахалина показал значительное сокращение населения острова после отмены принудительного и стимулированного переселения на остров [5]. Ежегодный отток населения с острова продолжается в наше время [6]. Ведущей экономической деятельностью, обеспечивающей самую высокую среднемесячную заработную плату по региону [7], является добыча полезных ископаемых [8], однако серьезная нехватка человеческого ресурса становится острой проблемой для развития активно растущего МСК на Сахалине.

Обсуждение. Одной из функций литературы и журналистики является формирование у читателей картины мира и действительности. В этом контексте очерк Чехова оказал принципиальное влияние. Будучи востребованным [9] и предпочтительным в изучении [10] в России, фундаментальный труд писателя-журналиста о Сахалине фиксирует и закрепляет созданный образ острова в коллективной культурной памяти, тем самым напрямую воздействуя на нежелание миграции на остров. В конкуренции за человеческий ресурс с более привлекательными по имиджу и образу регионами Сахалин проигрывает. Резонансный, получивший широкое распространение очерк А. П. Чехова закрепил за Сахалином долгосрочный ассоциативный ряд «Сахалин – каторга – изоляция – несвобода», сделав остров в представлении людей неблагоприятным и нежелательным местом.

Заключение. Очерк А. П. Чехова «Остров Сахалин» сформировал в коллективном сознании русского населения устойчивое восприятие острова как территории каторги, природной враждебности, социальной деградации и изоляции. Это явление следует учитывать при рассмотрении причин демографической ситуации на Сахалине. Кадровый дефицит МСК на острове – прямое следствие оттока людей с острова и нежелание миграции на остров, антропологическим наследием которого является отталкивающая картина действительности. Практическая значимость исследования состоит в обосновании необходимой реабилитации образа территории острова стратегии кадрового обеспечения МСК. Привлечение специалистов в отрасль требует не только экономической мотивации, но и работы по изменению образа региона в национальном сознании. Демографическая проблема Сахалина, сказывающаяся на кадровом дефиците специалистов МСК, не является единичной. Подобное явление прослеживается в других регионах России, образ которых также сформирован за счет взглядов журналистов и писателей (С. Максимов, В. Дорошевич, М. Горького, В. Шаламов, А. Солженицын и др.). В связи с тем, что основой экономики страны является деятельность ее сырьевых регионов, кадровый дефицит является актуальной проблемой, остро требующей структурированного плана разрешения.

Направления будущих исследований включают количественные методы измерения корреляции между образом региона и миграционными потоками, а также сравнительный анализ Сахалина и регионов с различной обеспеченностью кадров.

Список литературы

1. Правительство России: Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года. URL: http://static.government.ru/media/files/TNB3oQkPRJTmDE3AMaxuTn2KRSHG9X0S.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
2. Щекотуров А.В., Винокуров В.В., Зимовина Е.П., Кришталь М.И. Медиаобразы калининградской области и миграционные установки реформеного поколения и поколения миллениалов. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (Калининград), 2022, 84 с.
3. Всеволодова А.Н. Медиаобраз городов России в федеральных печатных СМИ // Вопросы теории и практики журналистики, 2013, №2, с. 152-168.
4. Чехов А.П. Собрание сочинений в двенадцати томах. Том 10 – М.: Государственное издательство художественной литературы, 1963, 636 с.
5. Агаширинова В.Ю. Сравнительная динамика демографических процессов Сахалинской области // Система ценностей современного общества, 2010, № 12, с. 211-216.
6. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Сахалинской области: Численность населения Сахалинской области на 1 января (2020-2025 гг.). URL: https://65.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%A7%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_2020-2025.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
7. Федеральная служба государственной статистики: Доклад Социально-экономическое положение Сахалинской области 2025 год. URL: https://65.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/kr_12_2025.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
8. РБК: «Сахалин-1» и «Сахалин-2»: кому принадлежат энергетические проекты России. URL: https://www.rbc.ru/base/21/10/2025/68f614909a794728b9acf028 (дата обращения: 19.03.2026).
9. Информационно-аналитический журнал Университетская книга: Антон Чехов входит в топ-10 самых популярных писателей русской классики. URL: https://www.unkniga.ru/company-news/anton-chekhov-vkhodit-v-top-10-samykh-populiarnykh-pisatelei-russkoi-klassiki.html (дата обращения: 19.03.2026).
10. Российская газета: Чехов занял первое место по популярности в рейтинге авторов, которых изучают в школе. URL: https://rg.ru/2022/09/01/chehov-zanial-pervoe-mesto-po-populiarnosti-v-rejtinge-avtorov-kotoryh-izuchaiut-v-shkole.html (дата обращения: 19.03.2026).

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РОССИЙСКОЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ПРИОРИТЕТЫ И КОРПОРАТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ

Беркетова Е.В.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, lberketova05@gmail.com

Научный руководитель: Соловьева В.М.
к.э.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Российская металлургическая промышленность находится на этапе трансформационных изменений. Отрасль сталкивается с целым рядом вызовов, требующих эффективного ответа. В рамках исследования проведен анализ состояния российской отрасли черной металлургии, выполнен обзор государственных Стратегий, определяющих цели и задачи промышленности, определен уровень достижения целевых индикаторов развития отрасли. Исследованы направления и приоритеты развития отечественных металлургических компаний. Сформированы рекомендации, направленные на повышение эффективности взаимодействия государства и компаний в рамках достижения долгосрочных целей.

Ключевые слова: российский металлургический комплекс, сталь, государство, компании, стратегическое развитие, цели, приоритеты, координация.

Введение. Металлургическая отрасль представляет стратегическую значимость для экономики страны, так как способствует развитию целого ряда секторов промышленности. В настоящее время перед российской черной металлургией возникают все новые вызовы и задачи, связанные как с внутренними проблемами (высокая зависимость от импорта технологий, значительная энергоемкость производств и др.), так и с внешними вызовами, влияющими на неопределенность макроокружения [1]. В связи с этим актуальным представляются вопросы стратегического управления развитием отечественной металлургической промышленности. Цель работы заключается в исследовании государственных приоритетов развития отрасли и выявлении их взаимосвязи со стратегическими ориентирами и направлениями деятельности компаний данного промышленного сектора.

Методы. Основу исследования составили российские научные публикации, отчеты международных организаций, официальные статические данные, государственные нормативно-правовые документы. В работе задействованы методы отраслевого и сравнительного анализа. Для оценки степени достижения установленных государством индикаторов развития отрасли использован метод стратегического анализа, позволяющий выявить «разрывы» между целевыми и фактическими индикаторами – GAP-анализ. Проведен анализ отчетности крупнейших металлургических компаний с использованием предложенной автором системы маркеров, позволяющих оценить их вклад в реализацию государственных долгосрочных приоритетов. Анализ данных проводился с применением методов сравнения, синтеза и экспертной оценки.

Результаты. На основе выполненного обзора мирового и отечественного рынка черной металлургии выявлены ключевые вызовы, определяющие современное развитие российской отрасли. К ним относятся геополитические риски, высокий уровень конкуренции, технологическое отставание, тенденции «зеленой» экономики и ряд других. Определено, что в настоящее время развитие отечественной металлургической промышленности находится на этапе трансформации, что подтверждается и пересмотром государственной Стратегии [2].

В рамках исследования сопоставлены цели, положения и подходы двух государственных Стратегий развития отечественной металлургии (определявших приоритеты до

2020 и до 2030 г.). С использованием GAP-анализа проведено рассмотрение достижения целевых индикаторов, заявленных в государственной Стратегии до 2020 г. Выявлены стратегические «разрывы» по таким показателям как: объемы производства готового проката, стальных труб и лома черных металлов. Фактические значения этих показателей не достигли целевых ориентиров предыдущей стратегии в связи с санкционным давлением, переориентацией экспортных потоков и макроэкономической нестабильностью.

Исследованы приоритеты и направления деятельности крупнейших российских металлургических компаний, а также сделаны выводы об их соответствии целям и задачам, установленным на государственном уровне [3]. Определено, что наибольшие затруднения отечественные предприятия испытывают в развитии производственных мощностей и импортозамещении [4].

Выделены особенности современного этапа развития российской черной металлургии. Сформированы рекомендации, направленные на повышение эффективности взаимодействия государства и бизнеса для планомерного достижения стратегических целей развития отечественной металлургической промышленности [5].

Обсуждение. Авторская позиция основывается на результатах проведенного GAP-анализа как инструмента, позволяющего объективно зафиксировать расхождение между декларируемыми государственными целями и фактическими результатами. Исследование показывает, что даже при наличии утвержденной государственной Стратегии сохраняются системные разрывы, что указывает на недостаточную адаптивность механизмов ее реализации. Полученные данные подтверждают необходимость усиления кооперации государства и отраслевых компаний для достижения совместных стратегических целей и задач национальной промышленности в текущих условиях.

Заключение. Таким образом, в настоящее время российская отрасль черной металлургии сталкивается с целым рядом вызовов, требующих эффективного и своевременного ответа. Проведенный GAP-анализ позволил количественно определить отставание отрасли по ключевым индикаторам, а обзор корпоративной отчетности позволил выявить направления развития компаний сектора и их соответствие целям и задачам, утвержденным на государственном уровне.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных выводов и предложенных рекомендаций для внесения корректив в реализуемые Стратегии развития отрасли. Направления дальнейших исследований будут связаны с изучением механизмов взаимодействия государства и корпоративного сектора по координации усилий в рамках устойчивого развития отечественного металлургического комплекса.

Список литературы

1. Молдован, А.А. Рынок черной металлургии в России / А.А. Молдован // E-Scio. – 2023. – № 2 (77). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-chernoy-metallurgii-v-rossii (дата обращения: 22.01.2026).
2. Терпугов, А.Е. Развитие механизма управления рыночными стратегиями российской металлургической отрасли в современных условиях / А.Е. Терпугов // Вестник ГУУ. – 2022. – № 10. С.177–184. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-mehanizma-upravleniya-rynochnymi-strategiyami-rossiyskoy-metallurgicheskoy-otrasli-v-sovremennyh-usloviyah (дата обращения: 03.02.2026).
3. Неволин А.Е., Череповицын А.Е. Анализ миссий и стратегических целей российских горно-металлургических компаний//E-Management. 2024. Т. 7, № 3. С. 40–51.
4. Зайцев, Ю.К. Экономические аспекты государственной поддержки российских предприятий сталелитейной промышленности в условиях внешних шоков / Ю.К. Зайцев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2023. – № 3. С. 352–377. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskie-aspekty-gosudarstvennoy-podderzhki-rossiyskih-predpriyatiy-staleliteynoy-promyshlennosti-v-usloviyah-vneshnih-shokov (дата обращения: 16.02.2026).
5. Головина, А.Н. Устойчивое развитие и корпоративные стратегии: кейс российских металлургических предприятий / А.Н. Головина, Д.А. Штыхно, В.В. Потанин // Journal of new economy. – 2023. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-razvitie-i-korporativnye-strategii-keys-rossiyskih-metallurgicheskih-predpriyatiy (дата обращения: 25.02.2026).

УДК 808.53

ПРЕССИНГ-ВОПРОСЫ И ОТВЕТНЫЕ ТАКТИКИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В АНГЛОЯЗЫЧНОМ ЖУРНАЛИСТСКОМ ИНТЕРВЬЮ: ТИПОЛОГИЯ КОММУНИКАТИВНЫХ СЦЕНАРИЕВ

Валицкая А.М.[1], Фетисова А.О.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, alinavalitskaya@gmail.com
[2] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, anfisa.fetisova@mail.ru

Научный руководитель: Сытник О.О.
канд. филол. наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена анализу прессинг-вопросов как инструмента коммуникативного давления в англоязычном журналистском интервью и ответных тактик респондента. На материале корпуса из пяти интервью (Paxman-Brand, Carlson-Putin, Harris-Whitaker, Trump-O'Donnell, Moran-Trump) выявлены три коммуникативных сценария взаимодействия: условно деструктивный, смешанный и конструктивный. В корпусе зафиксировано 53 прессинг-вопроса и 43 ответные тактики. Установлено, что прессинг-вопросы повышают деструктивный потенциал взаимодействия, однако ответные тактики рационализации, самопрезентации и контроля темы способны нейтрализовать давление и трансформировать сценарий в конструктивное русло.

Ключевые слова: журналистское интервью, прессинг-вопросы, коммуникативные тактики, конструктивное и деструктивное взаимодействие, коммуникативный эффект, речевые стратегии.

Введение. Журналистское интервью представляет собой нелинейный диалоговый процесс и характеризуется ролевой асимметрией [5]. Интервью как жанр медиакоммуникации традиционно включает элементы конфронтации и коммуникативного давления (прессинга) [см. 2], в связи с чем исследовательский фокус сосредоточен на конструктивности и деструктивности взаимодействия. Под прессинг-вопросами понимаются вопросы с пропозицией, целенаправленно сокращающие пространство ответа и навязывающие определенную интерпретацию [1]. Конструктивность и деструктивность трактуются как признаки типа взаимодействия. Конструктивное коммуникативное взаимодействие в журналистском интервью в рамках данного исследования – это взаимодействие, при котором участники соблюдают нормы вежливости, жанровые нормы и направляют вопросы и ответы на уточнение информации и последовательное развитие темы [3]. Цель настоящей статьи – выявить и типологизировать коммуникативные сценарии взаимодействия в условиях прессинга. Исследовательский фокус потребовал привлечения для анализа материалов с разноплановыми интервьюируемыми и вариативностью по степени конфликтности. Материалом исследования выступают транскрипты пяти англоязычных интервью: Дж. Паксмана с Р. Брэндом (P-B), Т. Карлсона с В. Путиным (C-P), Б. Уитакера с К. Харрис (H-W), Н. О'Доннелл с Д. Трампом (T-O), Т. Морана с Д. Трампом (M-T). Время проанализированной звучащей речи – 4 часа 37 минут.

Методы. Методология исследования опирается на дискурсивно-прагматический анализ коммуникативных стратегий и тактик в динамике реплик журналистского интервью [4]. Под коммуникативной стратегией понимается целенаправленное коммуникативное поведение, под тактикой – речевой ход, реализующий стратегию. Единицей анализа выступает вопросно-ответное единство. Оно позволяет фиксировать маркеры прессинга или нейтрализации и коммуникативный эффект. Коммуникативный эффект понимается

как наблюдаемое воздействие высказывания на адресата, фиксируемое по реакциям в последующих ходах.

Результаты. В корпусе из пяти интервью выявлено 53 прессинг-вопроса и 43 тактики нейтрализации. Ниже представлена типология тактик с указанием их количественного распределения.

Таблица 2

Тактики прессинг-вопросов интервьюера (N=53) (*составлено авторами*)

Тактика	P-B	C-P	H-W	T-O	M-T	Σ
Тактика ограничения пространства ответа для гостя (разделительные вопросы (tag-questions)	3	0	1	0	0	4
Наводящие вопросы с оценочной пресуппозицией	2	0	1	0	6	9
Повтор вопроса без учёта ответа	1	0	3	0	3	7
Импликация вины/несостоятельности позиции	0	0	2	3	12	17
Перебивание для контроля темы	0	0	1	0	1	2
Уточняющие вопросы (мягкий прессинг)	0	3	0	3	4	10
Проверочные вопросы	0	2	0	0	2	4
ИТОГО	**6**	**5**	**8**	**6**	**28**	**53**

Таблица 3

Ответные тактики респондента (N=43) (*составлено авторами*)

Тактика	P-B	C-P	H-W	T-O	M-T	Σ
Рационализация / апелляция к фактам	0	0	2	0	2	4
Самопрезентация	2	0	0	0	1	3
Перефрейминг / смена темы	2	2	0	2	4	10
Перехват инициативы (монологизация)	0	1	0	2	2	5
Философское рассуждение / обобщение	2	0	0	0	0	2
Контроль общения и уточнение хода разговора	0	2	0	0	4	6
Частичное уклонение от темы	0	0	3	0	0	3
Апелляция к успеху / достижениям	0	0	1	2	3	6
Обвинение оппонента / перенос ответственности	0	0	0	0	4	4
ИТОГО	**6**	**5**	**6**	**6**	**20**	**43**

Таблица 4

Типология коммуникативных сценариев в англоязычном интервью (*составлено авторами*)

Сценарий	Тактики интервьюера	Тактики респондента	Коммуникативный эффект
Условно деструктивный (P-B, M-T)	Прессинг, навязывание интерпретации	Самопрезентация, перефрейминг, философское рассуждение, обвинение	Полемика, повтор вопроса, снижение уместности
Смешанный (H-W, T-O)	Критическая проблематизация, повтор вопроса	Частичное уклонение, рационализация, апелляция к успеху	Частичная нейтрализация, сохранение вежливости
Условно конструктивный (C-P)	Уточнение, удержание фокуса без навязывания	Контроль общения, перефрейминг	Развернутый ответ, продвижение темы

Обсуждение. В проанализированных интервью выделенный диапазон деструктивных тактик оказался шире, чем диапазон определенных конструктивных тактик (53 и 43 соответственно), следовательно, деструктивные коммуникативные тактики оказались более частотными в анализируемом материале. Проведенный анализ позволяет сформулировать ряд выводов о механизмах взаимодействия в условиях прессинга. Деструктивность не равна прямоте и жесткости вопроса. Жесткий вопрос, сопровождаемый метакоммуникативной рамкой, может оставаться в рамках конструктивного взаимодействия. Ответные тактики респондента распределяются по трем репертуарам: 1) самопрезентация и философское рассуждение; 2) речевой жанр доклада (монолог) и рационализация; 3) контроль общения и смена темы. Наиболее деструктивным оказывается сценарий с максимальным прессингом.

Заключение. Таким образом, прессинг-вопросы могут повышать деструктивный потенциал взаимодействия в журналистском интервью, однако их коммуникативный эффект зависит от ответных тактик респондента. Предложенная типология трех сценариев (условно деструктивный, смешанный, условно конструктивный) на основе анализа 96 тактик в корпусе из пяти интервью позволяет систематизировать наблюдаемые коммуникативные эффекты и может быть использована в дальнейших исследованиях медиадискурса.

Список литературы

1. Иссерс О.С. Коммуникативные стратегии и тактики русской речи. Изд. 9, доп. М.: УРСС, 2024. 320 с.
2. Иссерс О.С. Диалогические стратегии в интервью: контроль над интерпретацией // Коммуникативные исследования. 2023. Т. 10. № 4. С. 770–785.
3. Сытник О.С. Вежливость как нормативный фильтр в конструктивной коммуникации // Актуальные проблемы гуманитарного знания в техническом вузе. СПб.: СПГУ, 2025. С. 132-135.
4. Дементьев В.В. Интегральное описание речевых жанров. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2024. 304 с.
5. Овруцкий А.В., Шевченко Д.А. Становление и психологические аспекты жанра журналистского интервью // Litera. 2024. № 10. С. 120-135.

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ СДЕЛОК M&A В СЕКТОРЕ ЗОЛОТОДОБЫЧИ

Габитов М.И.
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, m9870497670@gmail.com

Научный руководитель: Пономаренко Т.В.
доктор экономических наук, профессор кафедры организации и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе исследуются факторы сделок M&A в золотодобывающей отрасли на глобальном и российском рынках. На основе корреляционно-регрессионного анализа выявлено, что цены на золото не являются определяющим фактором активности сделок, тогда как ключевую роль играют оптимизация портфелей активов, геополитические условия и стратегические цели компаний. Рассмотрена сделка между УГМК и Petropavlovsk PLC как пример перераспределения активов и укрепления ресурсной базы. Выявлены тенденции смещения рынка в сторону меньших по стоимости сделок и внутренней консолидации активов.

Ключевые слова: золотодобывающая отрасль, сделки M&A, себестоимость, экономические санкции, консолидация отрасли.

Введение. Глобальная золотодобывающая отрасль характеризуется высокой капиталоёмкостью и активным использованием сделок слияний и поглощений (M&A) как инструмента стратегического развития компаний. Актуальность работы обусловлена увеличением количества процессов консолидации в мировой золотодобыче, а также структурными изменениями под влиянием санкционного давления и выхода иностранных компаний из российской золотодобычи. Это определяет значимость изучения сделок M&A как инструмента перераспределения активов между золотодобывающими компаниями, а также факторов, определяющих их динамику.

Целью данного исследования является оценка и выявление факторов, определяющих активность сделок M&A в мировой и российской золотодобыче. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

– оценка влияния среднегодовых мировых цен на золото на общую сумму сделок M&A на глобальном и российском рынках;

– выявление и статистический анализ факторов, определяющих активность сделок M&A в золотодобывающем секторе на глобальном рынке;

– анализ влияния сделки M&A по приобретению активов компании Petropavlovsk PLC группой УГМК на результаты компаний;

– выявление перспективных направлений развития сделок M&A в золотодобывающей отрасли.

В рамках исследования были выявлены и проанализированы следующие факторы: среднегодовые мировые цены на золото, количество и сумма сделок M&A в мировой золотодобыче, удельная стоимость одной сделки, показатель общих денежных затрат на унцию проданного золота (Total Cash Costs, TCC), совокупные поддерживающие затраты (All-in Sustaining Costs, AISC).

Методы. Исследование основывалось на анализе собранных статистических данных S&P за период 2015-2024гг. по мировой золотодобыче, включая динамику среднегодовых цен на золото, показатели себестоимости (TCC и AISC), количество M&A-сделок в золотодобыче, общую сумму и удельную стоимость [1]. Регрессионный анализ применялся для проверки гипотезы о влиянии цен на золото на количество сделок в отрасли

и совокупную стоимость сделок M&A, а корреляционный анализ – для выявления значимых взаимосвязей между рассматриваемыми факторами.

Результаты. По результатам проведенного регрессионного анализа было выявлено, что в мировой золотодобыче между фактором цены на золото и количеством сделок в отрасли и общей суммой сделок отсутствует значимая взаимосвязь. То есть, цена на золото не является определяющим фактором активности компаний в сделках M&A.

Результаты корреляционного анализа показали наличие значимых на уровне 0,01 взаимосвязей между факторами. Выявлены взаимосвязи между среднегодовыми мировыми ценами на золото и показателями себестоимости добычи: TCC и AISC, где коэффициент корреляции равен 0,856 и 0,879 соответственно. Выявлена взаимосвязь между удельной стоимостью сделок и их совокупным объемом с коэффициентом корреляции 0,931, что свидетельствует о влиянии крупных сделок на общую сумму сделок M&A.

Выявлена обратная корреляция (-0,740) между количеством сделок и их средней стоимостью, что свидетельствует о том, что активность компаний в отрасли перешла от крупных сделок к большему количеству меньших сделок, что отражает рост активности на рынке средних компаний [2].

По результатам анализа российской отрасли золотодобычи было выявлено, что цена на золото также не является основным и определяющим фактором активности сделок M&A. Ключевым фактором выступают геополитические факторы, включая санкционное давление и выход иностранных компаний с территории России, что приводит к перераспределению активов внутри страны. Например, сделки между УГМК и Petropavlovsk PLC, российской «Хайленд Голд» с ТНК Kinross Gold и с британской Amur Minerals.

Анализ сделки УГМК и Petropavlovsk PLC показал ее стратегический характер и направленность на развитие ресурсной базы УГМК по золоту – в начале 2022 года компания Petropavlovsk PLC заявляла о наличии запасов объемом 7,16 млн унций в соответствии с классификацией JORC [3]. В денежном эквиваленте при средней цене золота на момент сделки (1795 долл./унц.) валовая оценка составляет около 12,9 млрд. долл., а с учетом затрат и извлечения – порядка 1,7 – 2 млрд. долл. Данная сделка позволила диверсифицировать портфель активов, а также расширить географию присутствия компании [4,5]. Активы компании продавца расположены в относительной близости к портам Дальнего Востока, что создает удобство в логистических цепях реализации золота. В свою очередь, компания Petropavlovsk PLC смогла выйти из кризисного положения, рассчитаться по обязательствам и продолжить свою деятельность.

Обозримое будущее сделок M&A в глобальной и российской золотодобыче свидетельствует о том, что их дальнейшая активность будет во многом обусловлена необходимостью оптимизации портфеля активов и высокозатратных предприятий с целью повышения общей эффективности компаний [2]. После всплеска сделок, связанного с выходом иностранного бизнеса с российского рынка в 2022 году, наблюдается тенденция к снижению их количества, что формирует ориентацию российских компаний преимущественно на внутренний рынок и перераспределению активов внутри отрасли [6].

Обсуждение. Выводы о второстепенности фактора цены в сделках M&A согласуются с экспертными обзорами, которые указывают, что активность определяется не только ценой, но и внутренней эффективностью компаний – стабильностью денежных потоков, позволяющих инвестировать в новые активы [7]. Выявленную взаимосвязь между мировыми ценами на золото и показателями себестоимости также подтверждают

отраслевые эксперты, которые указывают, что динамика затрат в золотодобыче исторически следует за трендами спотовых цен на золото [8]. Данные подтверждают, что активность сделок M&A в золотодобыче определяется не столько ценовой конъюнктурой, сколько внутренними характеристиками отрасли – уровнем издержек [9], доступом к ресурсной базе и стратегическими целями компаний.

Заключение. Проведённое исследование показало, что мировые цены на золото не являются основным побудителем активности сделок M&A. Для российского рынка определяющее значение имеют геополитические условия, включая санкции и перераспределение активов. Пример сделки между Petropavlovsk PLC и УГМК подтверждает стратегический характер M&A как инструмента укрепления ресурсной базы и позиций компаний. Выявлены тенденции к смещению активности сделок M&A в сторону оптимизации активов и увеличения доли сделок меньшего масштаба на фоне снижения участия иностранных компаний.

Список литературы

1. S&P Market Intelligence // spglobal.com URL: https://www.spglobal.com (дата обращения: 17.03.2026).
2. Лесков М.И., Баушев С.С. Слияния и поглощения в золотодобыче России в 2022 году. // Золото и технологии. № 3 (57). – 2022. – С. 28-40.
3. Press Releases // Petropavlovsk plc URL: https://petropavlovskplc.com/ (дата обращения: 18.03.2026).
4. Краденых И.А. Тенденции российского рынка слияний и поглощений в золотодобывающей отрасли // Вестник Национального Института Бизнеса. – 2023. – №51. – С. – 134-145.
5. «УГМК закрыла сделку по покупке активов Petropavlovsk» // INTERFAX.RU. – 2022. – URL: https://www.interfax.ru/business/861436 (дата обращения: 17.03.2026).
6. Рынок слияний и поглощений в России в 2025 г. // Kept.ru URL: https://kept.ru/news/rossiyskiy-rynok-sliyaniy-i-pogloshcheniy-v-2025-godu/ (дата обращения: 19.03.2026).
7. Janberg W. Gold Mining’s New Era: Mergers and Acquisitions Heat Up // Reportlinker. – 2025. – URL: https://www.reportlinker.com/article/10751 (дата обращения: 20.03.2026).
8. Gay F., Li S. Facing Facts: Mining Costs And M&A: The Key Factors To Watch In 2020 // Alchemist (LBMA). – 2020. – №97. – С. 31-33.
9. Li Q., Liu D., Zhu S., Zeng R. Test of 14 evaluation indexes of gold project mergers and acquisitions in development stage: Factor analysis method // Mineral Exploration. – 2023. – № 5. – С. 818–826. DOI: 10.20008/j.kckc.202305014.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ AI-ПЛАТФОРМЫ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ «ПУЛЬС»

Гайфуллина И.И., Гимранова А.М.
студент, АГТУ «ВШН», Альметьевск, Россия, iluza-2004@mail.ru

Научный руководитель: Глазкова И.Н.
кандидат экономических наук, доцент, АГТУ «ВШН», Альметьевск, Россия

Аннотация. В условиях нестабильности рынка и усложнения производственных процессов нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) нуждаются в новых инструментах управления эффективностью. Традиционные методы планирования не позволяют оперативно учитывать тысячи изменяющихся технологических и рыночных параметров. В работе рассматривается подход к цифровой трансформации НПЗ на основе внедрения системы прогнозирования ключевых показателей с использованием искусственного интеллекта. Представлена концепция платформы ПУЛЬС для интеграции данных, построения прогнозных моделей маржинальности и сценарного анализа (what-if). Применение машинного обучения позволяет выявлять скрытые зависимости и выбирать оптимальные стратегии управления в режиме реального времени.

Ключевые слова: нефтеперерабатывающий завод, цифровая трансформация, искусственный интеллект, машинное обучение, прогнозирование, сценарный анализ, маржинальность переработки, цифровой двойник.

Введение. Высокая волатильность рынка и сложность технологических цепочек НПЗ делают точный прогноз недоступным для традиционных методов [1]. Лидеры отрасли, включая «Роснефть» и «Лукойл», инвестируют в концепцию «Цифровых НПЗ», чтобы избежать потери конкурентоспособности [2]. Цель исследования – повышение эффективности НПЗ через внедрение системы прогнозирования на базе ИИ. Задачи: интеграция разрозненных данных (ERP, SCADA, MES, рынок), выявление скрытых факторов с помощью машинного обучения и создание инструмента сценарного анализа.

Методы. Методология основана на создании AI-платформы «ПУЛЬС», включающей четыре этапа:

1) формирование Единого Хранилища Данных: консолидация финансовых, технологических и рыночных показателей;
2) обучение моделей: применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования производственных (выход продуктов) и экономических показателей (маржинальность) [3];
3) генерация сценариев: реализация «what-if» анализа для оценки влияния изменений рыночных условий на прибыль [4];
4) визуализация: разработка дашборда с прогнозами в реальном времени. Эффективность оценивалась методом Монте-Карло (NPV, срок окупаемости).

Результаты. Разработана архитектура платформы ПУЛЬС. Расчеты по наиболее вероятному сценарию подтвердили высокую инвестиционную привлекательность:

- Годовой денежный поток: 318,1 млн руб.
- NPV: 882,05 млн руб.
- Срок окупаемости: 0,65 года.

Платформа также выявляет скрытые кросс-функциональные зависимости.

Обсуждение. Предложенный подход на базе платформы ПУЛЬС, в отличие от традиционных методов, рассматривающих параметры изолированно, обеспечивает комплексный анализ технологических и рыночных данных. Это позволяет перейти от реактивного управления к проактивному прогнозированию, выявляя с помощью ИИ

нелинейные связи, недоступные стандартным статистическим пакетам. Платформа становится системой поддержки стратегических решений, что подтверждается высокими расчетными показателями эффективности.

Заключение. Разработанная платформа ПУЛЬС повышает экономическую эффективность НПЗ за счет выявления скрытых зависимостей и многовариантного сценарного анализа. Высокая инвестиционная привлекательность подтверждена экономическими расчетами. Практическая значимость – создание инструмента для выбора оптимальных стратегий в реальном времени. Направлением будущих исследований станет интеграция новых модулей и совершенствование моделей «цифровых двойников».

Список литературы

1. Роганова А.А., Хачатуров-Тавризян А.Е. Инновационная деятельность в нефтегазовом комплексе для реализации принципов устойчивого развития: проблемы и перспективы // Успехи в химии и химической технологии. 2020. №2 (225).
2. С.А. Глобенко, Р.Ф. Добрянский. Цифровой двойник в нефтегазовой отрасли: шаг к оптимизации или иллюзия прогресса? // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. №10-2 (109). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-v-neftegazovoy-otrasli-shag-k-optimizatsii-ili-illyuziya-progressa.
3. Азамджон Акрамджонович Усмонов Машинное обучение в сфере национальной экономики // Открытое образование. 2025. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie-v-sfere-natsionalnoy-ekonomiki.
4. Байбакова И.Р., Майский Р.А. Организационно-методические аспекты управления предприятиями нефтегазового комплекса // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых. УГНТУ. Уфа, 2015. С. 173-175.
5. Козлова Вероника Вадимовна Оптимизация бизнес-процессов с применением технологий искусственного интеллекта // Вестник евразийской науки. 2025. №2S. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-biznes-protsessov-s-primeneniem-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta.
6. Соколова Ю.Д. Процесс цифровой трансформации нефтегазовой отрасли Российской Федерации: состояние, барьеры, перспективы // Administrative Consulting. 2021. №7(3). С.66–77.
7. Большов М.А., Железняк Г.И. Эффективность цифровой трансформации нефтегазовой отрасли // Journal of Monetary Economics and Management. 2023. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-tsifrovoy-transformatsii-neftegazovoy-otrasli.
8. Полянская Ирина Геннадьевна, Юрак Вера Васильевна Идентификация текущего состояния цифровой трансформации лидеров нефтегазовой отрасли России // Известия УГГУ. 2022. №4 (68). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-tekuschego-sostoyaniya-tsifrovoy-transformatsii-liderov-neftegazovoy-otrasli-rossii).
9. Александр Дмитриевич Столяров, Владимир Владимирович Гордеев, Виктор Иванович Абрамов Цифровые двойники как инструменты повышения эффективности управления компанией // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. №4 (52). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-kak-instrumenty-povysheniya-effektivnosti-upravleniya-kompaniey.
10. Абрамов Виктор Иванович, Туйцына Александра Александровна Взаимозависимость этапов цифровой трансформации и изменения корпоративной культуры компании // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2022. №1 (59). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimozavisimost-etapov-tsifrovoy-transformatsii-i-izmeneniya-korporativnoy-kultury-kompanii).

ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВОСПРОИЗВОДСТВА ОСНОВНЫХ ФОНДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ДНР

Дейнега А.А.
аспирант, Донецкий национальный технический университет, Донецк, ДНР, Россия, antondeynega98@mail.ru

Научный руководитель: Кочура И.В.
д.э.н., доцент, профессор кафедры «Управление бизнесом и персоналом», Донецкий национальный технический университет, Донецк, ДНР, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена проблема управления процессом воспроизводства основных фондах в условиях политической нестабильности и мирового кризиса. Целью исследования является формирование концепции управления процессом воспроизводства основных фондов, адаптированной под современные условия хозяйствования промышленных предприятий Донецкой Народной Республики. В результате исследования была сформулирована концепция управления процессом воспроизводства основных фондов промышленных предприятий ДНР, разработана математическая модель для определения потребности в воспроизводстве основных фондов и предложены стратегии их финансирования, из которых выбрана оптимальная для промышленных предприятий региона.

Ключевые слова: концепция, основные фонды, воспроизводство, управление, анализ, стратегии, промышленные предприятия.

Введение. Основные фонды составляют существенную долю активов промышленных предприятий, поэтому процесс управления воспроизводством основных фондов играет значимую роль в эффективности функционирования хозяйствующих субъектов. Исследованию данной проблемы посвятили свои работы такие отечественные ученые, как Р.И. Иванова [1], В.В. Кобзев и М.К. Измайлов [2], Ю.В. Новикова [3], А.В. Стрельцов и Г.И. Яковлев [4], Д.Л. Крутихин [5], В.В. Борисова [6], Д.Б. Флакс [7, 8], а также зарубежные исследователи М. Кадзима, Р. Матемане, М. Мачокото, Т. Лемма [9], Х. Лю, Дж. Ван, С. Цзян, С. Сун [10].

Несмотря на то, что проблема управления воспроизводством основных фондов является достаточно изученной, вышеуказанные исследования проводились в условиях устоявшейся нормативно-правовой среды и в отсутствие таких геополитических факторов, как военный конфликт, масштабные экономические санкции и политика импортозамещения, что характеризует современную экономику РФ, в частности, Донецкой Народной Республики. Это обуславливает актуальность темы исследования.

Целью исследования является формирование концепции управления процессом воспроизводства основных фондов, адаптированной под современные условия хозяйствования промышленных предприятий Донецкой Народной Республики.

Задачи исследования:

- провести диагностику текущего состояния промышленности Донецкой Народной Республики;
- сформулировать концептуальную модель управления процессом воспроизводства основных фондов промышленных предприятий;
- разработать математическую модель определения оптимального объема воспроизводства основных фондов;
- предложить стратегии финансирования основных фондов и выбрать оптимальную для промышленных предприятий ДНР.

Методы. В процессе исследования применялись общенаучные методы – анализ и синтез, группировка, обобщение, систематизация. Для диагностики текущего состояния промышленности Донецкой Народной Республики использован метод SWOT-анализа.

Для определения оптимального объема воспроизводства основных фондов использован метод математического моделирования. Теоретической основой исследования послужили научные труды отечественных и зарубежных авторов.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования был проведен SWOT-анализ экономики Донецкой Народной Республики. По итогам анализа установлено, что сильными сторонами экономики ДНР являются существенный объем запасов минерально-сырьевых ресурсов; наличие готовых промышленных площадок; высокую концентрацию НИИ и вузов; действие режима СЭЗ на территории Республики. Слабыми сторонами – отсутствие современной инвестиционной и финансовой инфраструктуры; временная правовая турбулентность; недостаточная инновационная активность отраслей промышленности; дефицит рабочей силы.

Возможностями экономического развития следует считать создание научно-технических центров, индустриальных кластеров и технопарков; развитие системы ГЧП; возможность получения налоговых льгот, государственных кредитов и грантов; восстановление и диверсификацию существующих производств. Угрозами, которые могут оказать негативное воздействие на предприятия региона, являются ужесточение конкуренции за привлечение крупных инвесторов; критическое отставание от других субъектов РФ в привлечении инвестиций; трудности с реализацией экспортного потенциала.

В результате адаптации этапов процесса управления воспроизводством основных фондов к современным условиям деятельности промышленных предприятий ДНР предложена авторская концепция управления процессом воспроизводства основных фондов промышленных предприятий. Новизна сформированной концепции заключается в определении потребности предприятия в основных фондах с учетом их целевых групп, а также в выборе наиболее оптимального для промышленных предприятий ДНР инструмента финансирования воспроизводства основных фондов.

Одним из ключевых этапов сформированной концепции является определение потребности предприятия в основных фондах. Для расчета вышеуказанной потребности предложена математическая модель. Ее совершенствование заключается в дополнении таким параметром, как размер резерва основных фондов на случай реализации риска их незапланированной утраты либо выхода из строя; уточнении величины затрат на воспроизводство основных фондов («…включая затраты на доставку, установку, наладку»); расчете составляющих модели с учетом структуры основных фондов – целевых групп и разновидностей объектов.

После определения потребности в основных фондах предприятие выбирает стратегию финансирования воспроизводства. В исследовании освещены такие стратегии, как финансирование за счет собственных источников, операционная аренда и финансовая аренда (лизинг), банковское и коммерческое кредитование, финансирование в рамках государственных мер поддержки. С учетом состояния экономики ДНР на современном этапе особый акцент сделан на инструментах федеральной и региональной поддержки промышленных предприятий в контексте обеспечения воспроизводства основных фондов.

Стратегия воспроизводства основных фондов, основанная на использовании мер государственной поддержки, была апробирована на трех промышленных предприятиях ДНР – ООО «Донметэкспо», ООО «НПО «ЯМЗ», ООО «ПКЦ Сталкер». В результате ее применения определена величина экономии в плановом периоде, которая составила:

- для ООО «Донметэкспо» – 28009 тыс. руб., или 29,7% потребности предприятия в основных фондах;
- для ООО «НПО «ЯМЗ» – 8504 тыс. руб., или 26,4% потребности предприятия в основных фондах;
- для ООО «ПКЦ Сталкер» – 1286 тыс. руб., или 30,8% потребности предприятия в основных фондах.

Заключение. На основе анализа теоретических исследований, особенностей промышленных предприятий и специфики их деятельности в условиях экономики региона сформулирована концепция управления процессом воспроизводства основных фондов промышленных предприятий. На базе указанной концепции разработана модель расчета потребности предприятия в воспроизводстве основных фондов и проанализированы возможные направления финансирования воспроизводственного процесса в условиях экономики ДНР.

Применение поэтапного концептуального подхода позволит руководству промышленных предприятий повысить прозрачность мер, принимаемых в рамках управления воспроизводственным процессом, а также исключить принятие управленческих решений на основе недостоверных сведений и в отсутствие изложенных выше аналитических процедур.

Список литературы

1. Иванова Р.И. Теоретические подходы к воспроизводству основных фондов // Вестник Ленинградского государственного университета им. А. С. Пушкина. 2012. №4. С. 74-80.
2. Кобзев В.В. Система принципов управления основными средствами предприятия / В.В. Кобзев, М.К. Измайлов // Организатор производства. 2021. Т. 29, № 2. С. 67-76. DOI 10.36622/VSTU.2021.90.47.008.
3. Новикова Ю.В. Особенности воспроизводства основных фондов в современных условиях // Экономика строительства и городского хозяйства. 2021. Т. 17, № 3. С. 97-103.
4. Стрельцов А.В. Формирование амортизационной политики предприятий и предпринимательских структур в цифровой экономике / А.В. Стрельцов, Г.И. Яковлев // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2021. Т. 7, № 2(26). С. 189-200. DOI 10.30914/2411-9687-2021-7-2-189-197.
5. Крутихин Д.Л. Управление воспроизводством основных фондов предприятий машиностроения: автореф. дис. … канд. экон. наук: 08.00.05. Ижевск. 2013. 20 с.
6. Борисова В.В. Совершенствование управления уровнем воспроизводства основных фондов на автомобилестроительных предприятиях: дис. … канд. экон. наук: 08.00.05. Москва. 2014. 165 с.
7. Флакс Д.Б. Потенциал технологического развития нефтехимического комплекса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 1(111). С. 17-22. DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-1-17-22.
8. Флакс Д.Б. Роль современных цифровых инструментов в управлении основными фондами промышленного предприятия // Управление устойчивым развитием. 2024. № 6(55). С. 44-48. DOI 10.55421/2499992X_2024_6_44.
9. M. Kadzima, R. Matemane, M. Machokoto, T. Lemma. Beyond the balance sheet: SME financing strategies for fixed assets amid constraints // Finance Research Letters. 2025. Vol. 2. Part A. Article 107839.
10. H. Liu, J. Wang, S. Jiang, X. Song. Research on Fixed Asset Management from the Perspective of Industry-Finance Integration – Based on CNN Method / 3rd International Conference on Education, Knowledge and Information Management (ICEKIM), Harbin, China, 2022, pp. 748-754.

УДК 81'322.4

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОДА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ЛЕКСИКИ В СФЕРЕ АВТОМАТИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ

Кильдюшева А.С.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, arina.shyudlik@mail.ru

Научный руководитель: Скорнякова Э.Р.
кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается целесообразность применения нейросетей для обработки узкоспециализированной литературы на иностранном языке. Авторами проанализировано, как нейросети переводят англоязычные технические тексты. В ходе исследования для оценки субъективного восприятия качества перевода проведен опрос среди 60 студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». На основе полученных данных систематизированы наиболее характерные особенности, свойственные нейросетевому переводу, что, по мнению исследователей, позволит снизить вероятность появления неточностей в академической деятельности студентов.

Ключевые слова: нейросетевой перевод, техническая терминология, автоматизация процессов, сравнительный анализ, человеческий фактор, студенческая среда, образовательный процесс.

Как отмечает Ректор Санкт-Петербургского горного университета, в последние годы государство столкнулось с острым кадровым кризисом. В этой связи модернизация инженерного образования и внедрение новых методик обучения является первостепенной задачей [1].

Поиск эффективных инструментов обучения неизбежно сталкивает педагогов с вопросом о роли новых технологий, и прежде всего, систем искусственного интеллекта.

Показательно, что всего за 11 лет развития нейросетей качество автоматического перевода не только догнало, но и превысило на более чем 16% результаты систем машинного перевода, ведущих свою историю с 1950-х годов [2].

Высокая скорость, доступность и постоянно растущее качество обработки запросов закономерно ставят перед педагогическим сообществом ряд вопросов [3]. Не приведет ли повсеместная оптимизация рабочих процессов к снижению языковых навыков у обучающихся? Не станет ли использование ИИ предпосылкой для частичного замещения педагогического участия в ближайшем будущем?

Указанные обстоятельства обусловливают актуальность настоящего исследования. Целью данной работы является определение степени применимости нейросетей в процессе подготовки студентов к экзамену по техническому английскому языку.

В рамках анализа качества автоматизированного перевода технических текстов авторами были рассмотрены статьи специалистов кафедры автоматизации технологических процессов и производств [4–6]. Материал был обработан с помощью трех нейросетевых сервисов (DeepSeek, QwenChat, YandexGPT), наиболее востребованных в студенческой среде. Сопоставительный анализ выявил устойчивые закономерности, характерные для работы генеративных сервисов. К числу наиболее распространенных проблем относятся конструирование сложных терминов за счет соединения общеупотребительных слов, что влечет за собой подмену понятий, нарушение смысловых и контекстуальных связей между частями предложений, а также получение громоздкой и стилистически тяжелой конструкции путем попытки сохранения исходной структуры иноязычного материала.

Для верификации полученных данных и подтверждения гипотезы о том, что недостатки нейросетевого перевода распознаются не только профессорско-преподавательским составом, но и самими обучающимися, было проведено комплексное анкетирование. Опрос был реализован с помощью яндекс-формы. Выборку составили 60 студентов, обучающихся по укрупненному направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

Респондентам предлагалось обозначить предпочтения при выборе конкретных систем, а также охарактеризовать уровень доверия к получаемым результатам. Отдельное внимание в опросе было уделено субъективной оценке качества перевода и типичным сложностям, с которыми сталкиваются студенты.

В результате анализа методологических разделов статей сотрудников кафедры автоматизации технологических процессов и производств общим объемом около 30,000 печатных знаков с пробелами методом сплошной выборки было выявлено порядка 360 лексико-грамматических и семантико-синтаксических особенностей, характерных для текстов, подвергшихся нейросетевому переводу.

Признавая преимущества автоматизации, исследователи предостерегают от полного отказа от традиционных методов перевода. По их мнению, подтверждённому выводами других исследователей, именно баланс между использованием искусственного интеллекта и классическими подходами к переводу технических текстов способствует подготовке высококвалифицированных специалистов [7, 8].

Полученные данные будут способствовать формированию у молодых специалистов критического подхода и способности к самообучению, поскольку работа с результатами, выданными нейросетью, требует осознанного анализа и последующего самостоятельного совершенствования языковых навыков.

Список литературы

1. Litvinenko V. A model of mining engineering education for the 21st century // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2025. – Vol. 17, No 2. – P. 603–615. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-603-615.
2. Смольницкий В.В., Петровский Д.А. Использование нейросетей для перевода технической литературы // Современные проблемы науки, общества и культуры : сб. ст. VIII Международной научно-практической конференции, Омск, 27–28 апреля 2023 г. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. – С. 196–201. – EDN ADRJJG.
3. Дятлова В.З. Перевод как искусство интерпретации: роль переводчика в эпоху нейросетей // Межкультурная коммуникация и профессионально ориентированное обучение иностранным языкам: материалы XIX Международной научной конференции, посвященной 104-й годовщине образования Белорусского государственного университета и 30-летию факультета международных отношений. – Минск: Белорусский государственный университет, 2025. – С. 123-127. – EDN FMAHOG.
4. Kulchitskiy A., Nikolaev M. Method for Monitoring the Condition of Steel Wire Ropes Based on the Analysis of Changes in the Linear Dimensions of Their Cross-Sections // Mining. – 2025. – Vol. 5, No 4. – P. 79. – DOI 10.3390/mining5040079.
5. Vasilyeva N., Golyshevskaia U., Sniatkova A. Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, No 7. – P. 1343. – DOI 10.3390/sym15071343.
6. Kuskova Y., Erokhina O., Simakov A. Problematics and perspectives of the development of automatic control systems for concentration tables using computer simulation // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1384, No 1. – P. 012023. – DOI 10.1088/1742-6596/1384/1/012023.
7. Kiseleva A., Borisova Y., Maevskaya A. Analysing the feasibility of using a neural network for generating English language assignments // Perspectives of Science and Education. – 2025. – No 1. – P. 319–335. DOI: 10.32744/pse.2025.1.21.
8. Кузьмина Е.В. Использование нейросетей при переводе технических текстов при обучении английскому языку в вузах // Современные технологии обучения иностранным языкам : сб. науч. тр. Международная научно-практическая конференция, Ульяновск, 17–18 января 2025 г. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2025. – С. 251–255. – EDN ASZHGE.

УДК 332.144

ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АРКТИЧЕСКИХ МОНОГОРОДОВ: ПРАВОВЫЕ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ ВОРКУТЫ

Коломоец А.А.
студент 4 курса, направление подготовки «Менеджмент»,
Воркутинский филиал Ухтинского государственного технического университета,
Воркута, Россия

Научный руководитель: Игнатская Л.Я.
кандидат экономических наук, доцент кафедры НСиМ,
Воркутинский филиал Ухтинского государственного технического университета,
Воркута, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема комплексного решения задач арктических моногородов на примере Воркуты. Цель исследования состоит в выявлении правовых, институциональных и социально-экономических механизмов стабилизации и развития арктического моногорода в условиях демографического сжатия, инфраструктурной изношенности и высокой зависимости от градообразующего предприятия. На основе анализа нормативных актов, официальной статистики, материалов институтов развития, корпоративных данных и научной литературы обоснована необходимость перехода от логики точечного антикризисного реагирования к логике долгосрочных территориальных преобразований. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выводов статьи при подготовке муниципальных, региональных и корпоративных программ развития арктических территорий.

Ключевые слова: Арктика; моногород; Воркута; градообразующее предприятие; пространственное развитие; диверсификация; человеческий капитал; мастер-план; опорный населенный пункт.

Развитие арктических моногородов в последние годы вышло за рамки узкоотраслевой повестки и превратилось в комплексную государственную задачу, затрагивающую пространственное развитие, рынок труда, демографию, инфраструктуру и национальную безопасность. В арктической зоне зависимость города от одного предприятия или одной отрасли усиливается природно-климатическими ограничениями, транспортной удаленностью, высокой стоимостью содержания инфраструктуры и повышенной чувствительностью к миграционному оттоку населения [3; 4]. Воркута является показательным примером такого типа территории. С одной стороны, город входит в перечень монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации, а с другой – включен в перечень опорных населенных пунктов Арктической зоны Российской Федерации. Это означает, что для анализа Воркуты недостаточно только традиционной логики изучения моногородов; необходим учет специфики арктической политики, мастер-планирования и взаимодействия государства с градообразующим бизнесом [1; 2; 5].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.11.2023 № 3377-р Воркута включена в перечень опорных населенных пунктов Арктической зоны. Тем самым правовой статус города расширяется: он одновременно остается моногородом, участником арктического режима поддержки и узловой территорией, для которой должны разрабатываться и синхронизироваться долгосрочные инфраструктурные и социально-экономические решения [5].

Официальные статистические материалы фиксируют продолжающееся демографическое сжатие Воркуты. По данным Комистата, оценочная численность населения города на начало 2024 года составила 67,5 тыс. человек [6]. Депопуляция означает не только снижение общего числа жителей, но и уменьшение емкости локального рынка труда, рост

удельной стоимости содержания инженерной и социальной инфраструктуры, а также усиление кадрового дефицита в базовых отраслях и бюджетном секторе.

Градообразующее предприятие «ВоркутаУголь» остается ключевым работодателем и системообразующим элементом городской экономики; производственный комплекс включает шахты, разрез, обогатительную фабрику и вспомогательные мощности [10]. Такая структура означает, что резкий отказ от угольной специализации невозможен без масштабных социальных последствий. Следовательно, развитие города должно строиться не на противопоставлении старой и новой экономики, а на постепенном расширении хозяйственной базы вокруг существующего индустриального ядра [10].

Научные исследования по арктическим моногородам показывают, что устойчивость подобных территорий зависит от способности сочетать промышленную основу с развитием новых видов занятости, инфраструктурным обновлением и политикой удержания населения. В случае Воркуты это означает, что динамика происходящих процессов должна оцениваться одновременно по нескольким контурам: демографическому, производственному, инфраструктурному, институциональному и социальному.

Стратегический потенциал Воркуты определяется не одной характеристикой, а сочетанием нескольких преимуществ. Во-первых, город обладает сложившейся промышленной компетенцией, квалифицированными кадрами и производственной культурой, накопленной в топливно-энергетическом секторе. Во-вторых, наличие градообразующего предприятия и связанной с ним сервисной инфраструктуры создает основу для развития смежных видов деятельности: ремонта, обслуживания оборудования, логистики, подготовки кадров, переработки и малого производственного бизнеса [10].

Включение Воркуты в систему опорных арктических населенных пунктов повышает ее шансы на получение федеральных инфраструктурных ресурсов и институциональную координацию проектов развития. Сам по себе статус опорного пункта не решает всех проблем, однако он расширяет горизонты планирования и позволяет синхронизировать интересы муниципалитета, региона, институтов развития и бизнеса [5; 8; 9].

Практика развития моногородов показывает, что наиболее устойчивые результаты достигаются там, где новые виды деятельности развиваются не вместо градообразующего предприятия, а рядом с ним – сервисные, ремонтные, логистические, образовательные и малые производственные функции. Для Воркуты это означает необходимость поддержки малого и среднего бизнеса, локальной переработки, строительного комплекса и сервисов для промышленности.

Значимым фактором развития Воркуты является человеческий капитал и социальная среда. Для арктических территорий критично не только создание рабочих мест, но и формирование условий, при которых жители связывают с городом среднесрочные жизненные стратегии. В этой связи необходимы развитие среднего и высшего профессионального образования, корпоративно-образовательных программ, меры жилищной поддержки молодых специалистов, модернизация учреждений здравоохранения, спорта и дополнительного образования [7; 11].

Обязательным направлением комплекса мер является инфраструктурная и пространственная перестройка. Для Воркуты целесообразен переход к модели компактного города, при которой ресурсы концентрируются на реально функционирующем урбанизированном ядре, а расходы на рассредоточенную инфраструктуру поэтапно оптимизируются без разрушения базовых социальных гарантий. Такая модель должна сочетаться с модернизацией аэропорта, цифровой связи, коммунальных сетей и общественных пространств [8; 9].

Преобразованиям должна соответствовать институциональная синхронизация. Муниципальные программы, региональные решения, механизмы Арктической зоны Российской Федерации, проекты корпоративной социальной ответственности и федеральные

инфраструктурные инициативы должны быть увязаны в единой программной конструкции. Только при такой координации отдельные меры смогут давать системный, а не разрозненный эффект [7].

Таким образом, Воркута должна рассматриваться не как «обычный» проблемный моногород, а как узловая арктическая территория, в которой совпадают риски демографического сжатия, инфраструктурной изношенности и отраслевой зависимости, но одновременно концентрируются новые федеральные и корпоративные ресурсы развития. Комплексное решение задач Воркуты требует сочетания поэтапной экономической диверсификации, политики удержания и воспроизводства человеческого капитала, пространственно-инфраструктурной оптимизации и институциональной координации.

Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.07.2014 № 709 «О критериях отнесения муниципальных образований Российской Федерации к монопрофильным (моногородам) и категориях моногородов».
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.07.2014 № 1398-р «Об утверждении перечня монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации (моногородов)».
3. Федеральный закон от 13.07.2020 № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации».
4. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года».
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.11.2023 № 3377-р «Об утверждении перечня опорных населенных пунктов (муниципальных образований) Арктической зоны Российской Федерации».
6. Республика Коми в диаграммах и графиках. 2024 [Электронный ресурс] / Комистат. URL: https://11.rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 12.03.2026).
7. Поддержка моногородов [Электронный ресурс] / ВЭБ.РФ. URL: https://veb.ru/podderzhka-monogorodov/ (дата обращения: 12.03.2026).
8. Глава Минвостокразвития Алексей Чекунков доложил Президенту о комплексном развитии опорных населенных пунктов Арктической зоны России [Электронный ресурс]. URL: https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11793 (дата обращения: 12.03.2026).
9. Мастер-план Воркуты предполагает более 22 млрд рублей инвестиций в инфраструктуру [Электронный ресурс] // ТАСС. 11.12.2024. URL: https://tass.ru/ekonomika/22639415 (дата обращения: 12.03.2026).
10. О компании [Электронный ресурс] / «ВоркутаУголь». URL: https://vorkutaugol.ru/about (дата обращения: 12.03.2026).
11. В 2024 году компания «ВоркутаУголь» направит на развитие Воркуты более 400 миллионов рублей [Электронный ресурс] / «ВоркутаУголь». 05.06.2024. URL: https://vorkutaugol.ru/vu-men (дата обращения: 12.03.2026).

ПОТЕНЦИАЛ ПРОИЗВОДСТВА РОДИЯ: БАЛАНС ГЛОБАЛЬНОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОГО СПРОСА

Леонтьева Е.Г.
аспирант кафедры «Организации и управления»,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, s255091@stud.spmi.ru

Научный руководитель: Череповицын А.Е.
доктор экономических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Организации и управления»,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье анализируется мировой рынок родия как стратегически дефицитного металла платиновой группы в условиях ограниченного предложения и роста промышленного спроса. Рассматриваются структура производства и потребления, факторы ценовой волатильности и влияние геополитических рисков. Обоснована роль рециклинга и диверсификации поставок в обеспечении устойчивости рынка в контексте энергетического перехода.

Ключевые слова: родий, потенциал производства, рынок, международная торговля, структура потребления, энергетический переход.

Введение. Рынок родия характеризуется устойчивым структурным дефицитом, обусловленным ограниченной сырьевой базой и высокой концентрацией добычи в отдельных странах [1]. Основная часть производства сосредоточена в Южно-Африканской Республике, на которую приходится более 80% мирового объема, что формирует зависимость глобального рынка от локальных экономических и энергетических факторов [2]. Существенную роль играет ограниченность разведанных запасов и сложность их освоения, что сдерживает рост предложения. Спрос на родий определяется его технологической незаменимостью в автокатализаторах и химических процессах, где доля потребления достигает 80–85% [3]. Ужесточение экологических стандартов, включая требования к снижению выбросов, усиливает потребность в металле. Развитие водородной энергетики и низкоуглеродных технологий формирует дополнительные направления использования родия [4]. Цель работы заключается в анализе потенциала производства родия, выявлении факторов дисбаланса спроса и предложения и оценке влияния энергетического перехода на структуру мирового потребления.

Методы. В работе применен системный подход к анализу рынка родия как элемента глобальных производственно-сбытовых цепочек [5]. Использованы методы сравнительного и структурного анализа, позволяющие сопоставить региональные особенности добычи и потребления [6]. Проведена экономико-статистическая обработка данных по объемам производства, динамике цен и структуре спроса [7]. В рамках исследования выполнен анализ отраслевых отчетов и научных публикаций, отражающих текущее состояние рынка [8]. Для оценки перспектив применены сценарные методы прогнозирования, учитывающие развитие энергетики, автомобильной и химической промышленности [9]. Дополнительно проведена оценка роли вторичного сырья и его вклада в формирование предложения родия на мировом рынке [10].

Результаты. Установлено, что мировой объем добычи родия составляет 23–35 тонн в год, тогда как спрос достигает 30–35 тонн, что формирует устойчивый дефицит предложения. Основным производителем остается ЮАР, обеспечивающая до 80–85% мирового предложения, при этом Россия занимает второе место с долей около 8–10%. Другие страны играют незначительную роль и не способны существенно увеличить объемы

добычи. Рециклинг из отработанных автокатализаторов обеспечивает 25–30% мирового предложения и становится ключевым источником компенсации дефицита. Выявлено, что рост спроса связан с ужесточением экологических норм и развитием водородной энергетики, где родий используется в каталитических процессах. Прогноз показывает увеличение глобального потребления на 20–35% к 2030 году при среднегодовом темпе роста 5–6%. Потенциал увеличения добычи ограничен геологическими условиями, технологическими барьерами и экологическими ограничениями.

Обсуждение. Дефицит родия носит устойчивый характер и обусловлен совокупностью факторов, включая ограниченность ресурсной базы и технологическую сложность извлечения металла. Отсутствие эффективных заменителей в ключевых отраслях усиливает зависимость промышленности от данного ресурса. Геополитические факторы, такие как санкционные ограничения и энергетические кризисы в странах-производителях, оказывают значительное влияние на стабильность поставок. Высокая концентрация добычи повышает чувствительность рынка к локальным сбоям и усиливает ценовую волатильность. Дополнительный рост спроса формируется за счет развития водородной энергетики, химической промышленности и высокотехнологичных отраслей. Рециклинг рассматривается как стратегическое направление, позволяющее снизить нагрузку на первичную добычу и частично компенсировать дефицит [1]. Однако его потенциал ограничен объемами доступного вторичного сырья и технологическими возможностями переработки.

Заключение. Спрос на родий сохранит устойчивый характер в среднесрочной перспективе за счет доминирования автокатализаторов и развития химической промышленности. Ограниченность сырьевой базы и высокая концентрация добычи будут поддерживать дефицит и способствовать сохранению высокой ценовой волатильности. Расширение рециклинга и диверсификация поставок выступают ключевыми механизмами стабилизации рынка и снижения зависимости от отдельных регионов. В долгосрочной перспективе структура спроса будет изменяться под влиянием энергетического перехода и развития новых технологий. Дальнейшие исследования должны быть направлены на моделирование сценариев развития рынка, оценку влияния технологических изменений и разработку механизмов устойчивого обеспечения промышленности родием.

Список литературы

1. Александрова Т.Н., О'Коннор С. Переработка платинометалльных руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462-473.
2. Хасанов А.С., Турдиев Ш.Ш., Боймуродов Н.А. Обзор минерально-сырьевой базы платиноидов // Universum: технические науки. 2024. № 2-2(119). С. 41-48.
3. Капустина С.И., Соколан Д.С. Мировой рынок родия: современные тенденции и перспективы // Вестник РУДН. Серия: Экономика. 2024. Т. 32. № 4. С. 673-686.
4. International Energy Agency. Global Hydrogen Review. Paris: OECD Publishing, 2023. 176 p.
5. Пономаренко Т.В., Ларичкин Ф.Д., Щетинина К.В. Методический подход к оценке ценности проекта // Экономические и социальные перемены. 2017. № 4(52). С. 135-151. DOI: 10.15838/esc.2017.4.52.8.
6. Корнеев С.И. Международный обзор рынка цветных металлов // Цветные металлы. 2025. № 9. С. 4-5.
7. Степанов И.А. Анализ рынка металлов платиновой группы // Известия Саратовского университета. Серия: Экономика. Управление. Право. 2024. Т. 24. № 1. С. 37-51.
8. Future Market Report. Rhodium Market Trends. 2025. 187 p.
9. MacDonald L., Zhang D., Alptekinoglu A., Karamalidis A. Enhancing the Resilience of Platinum Group Metal Supply Chains: Mine to (Re)use // Sustainable Development. 2025. Vol. 33. P. 7069-7085.
10. Tang H., Peng Z., Tian R., Ye L. Platinum-Group Metals: Demand, Supply, Applications and Their Recycling // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. P. 110237.

УДК 338.45:669

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПАРАДОКС ПРОИЗВОДСТВА ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Манушин А.И.
студет, Бокситогорский институт (филиал) ГАОУ ВО ЛО «ЛГУ им. А.С. Пушкина», Бокситогорск, Россия, Avrikus@yandex.ru

Научный руководитель: Рассказова А.А.
заместитель директора, куратор студенческого научного общества организация, Бокситогорский институт (филиал) ГАОУ ВО ЛО «ЛГУ им. А.С. Пушкина» Бокситогорск, Россия.

Аннотация. В работе исследуется экономический парадокс цветной металлургии РФ, выражающийся в экспорте сырья при импорте продукции высокой переделки. Цель – количественная оценка дисбаланса на примере галлия, алюминия, меди и никеля за 2010–2024 гг. Использованы данные USGS, Росстата и отчетов компаний. Выявлено, что коэффициент реализации потенциального спроса варьируется от 6% до 68%. Определены пять экономических причин диспропорции. Предложены меры налогового и инвестиционного регулирования для обеспечения технологического суверенитета.

Ключевые слова: цветная металлургия, экспорт сырья, технологический суверенитет, внутренний спрос, галлий, алюминий, медь, никель.

Цветная металлургия традиционно является драйвером экспорта Российской Федерации, однако отраслевые данные выявляют устойчивую тенденцию, характеризуемую как «экономический парадокс». Россия обладает значительной сырьевой базой, но экспортирует большую часть металлов в виде сырья, одновременно импортируя продукцию с высокой добавленной стоимостью [1]. Цель данной работы – количественная оценка этого парадокса на примере четырех ключевых металлов и выявление экономических причин, препятствующих переориентации потоков на внутренний рынок.

Для анализа использованы данные USGS, Федеральной таможенной службы (ФТС), Росстат [2-4]; а так же отчеты производителей («Русал», «Норникель») за период 2010–2024 гг. [4,5]. Ключевым индикатором выбран коэффициент реализации потенциального внутреннего спроса (КРП), рассчитываемый как отношение фактического потребления к оценочной потребности при полном цикле переработки. Потенциальный спрос определен методом экстраполяции объемов импорта конечной продукции и анализа государственных отраслевых стратегий.

За период 2010–2024 гг. наблюдается стагнация производства при высокой экспортной квоте [3]. Наиболее критическая ситуация сложилась в сегменте галлия: производство составляет всего около 7 тонн [5], экспортная доля составляет 70–85%, а КРП достигает лишь 6%. По никелю экспортная доля достигла 98% в 2024 году, КРП составил 23% [6]. В секторах алюминия и меди дисбаланс менее выражен: КРП равен 40% и 68% соответственно, однако треть потенциального внутреннего рынка не реализована.

Анализ выявляет пять ключевых экономических факторов, поддерживающих диспропорцию. Во-первых, высокая маржинальность экспортных операций обеспечивает быструю валютную выручку. Во-вторых, эффект побочного продукта (на примере галлия) делает внутреннюю очистку экономически нецелесообразной [7]. В-третьих, исторический разрыв цепочек добавленной стоимости приводит к тому, что маржинальность остается у иностранных переработчиков. Также влияют логистическая целесообразность экспорта и отсутствие долгосрочного внутреннего заказа до 2022 года. Низкая реализация потенциала создает уязвимость цепочек поставок для оборонно-промышленного комплекса.

Проведенный анализ подтверждает наличие устойчивого экономического парадокса в производстве цветных и редких металлов в России. Ситуация характеризуется высокой зависимостью от экспортной выручки при системном недоиспользовании внутреннего потенциала переработки. Для преодоления парадокса необходимы введение дифференцированных экспортных пошлин, механизмы долгосрочных оффтейк-контрактов и приоритетное финансирование проектов, замыкающих технологическую цепочку внутри страны. Без изменения экономической модели отрасль рискует сохранить статус поставщика сырья с низкой добавленной стоимостью.

Список литературы

1. Акт правительства Российской Федерации «Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г.» от 28.12.2022 № 4260-р.
2. USGS. Mineral Commodity Summaries 2024. – Reston: U.S. Geological Survey, 2024. URL: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-rare-earths.pdf (дата обращения: 23.03.2026).
3. Федеральная таможенная служба. Статистика внешней торговли РФ 2011–2022. URL: https://customs.gov.ru/statistic/vneshn-torg/vneshn-torg-countries (дата обращения: 22.03.2026).
4. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Промышленное производство в России. URL: https://www.rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 22.03.2026)».
5. Отчеты об устойчивом развитии РУСАЛа 2010-2024. URL: https://rusal.ru/sustainability/reports/ (дата обращения 22.03.2026).
6. Годовые отчеты ГМК «Норильский никель» 2014-2024. URL: https://nornickel.ru/investors/reports-and-results/annual-reports/ (дата обращения: 22.03.2026).
7. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). 2021. 572 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/74a/GD_msb-2020.pdf (дата обращения: 23.03.2026)

УДК.81’42:504

КОММУНИКАТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ИМИДЖА В КОРПОРАТИВНОМ ДИСКУРСЕ (НА МАТЕРИАЛЕ ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» И КОМПАНИИ «ЯНДЕКС»)

Миронова В.В.[1], Алпатова П.Н.[2]
[1] студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, varyamironova486@gmail.com
[2] доцент кафедры русского языка и литературы, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Alpatova_PN@pers.spmi.ru

Научный руководитель: Алпатова П.Н.
кандидат филологических наук, доцент кафедры русского языка и литературы, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию лингвистических инструментов формирования экологического имиджа крупных российских компаний. В статье проводится сопоставительный анализ методов, применяемых ПАО «Северсталь» и компанией «Яндекс», представляющих разные модели коммуникации: экспертно-индустриальную и технологическую. Рассматриваются способы трансформации технических данных в имиджевый текст. Результаты исследования позволяют выявить закономерности выбора языковых средств в зависимости от степени взаимодействия компании с конечным потребителем и специфики её деятельности.

Ключевые слова: экологический дискурс, корпоративные коммуникации, имидж компании, лингвистический анализ, стратегии вовлечения, ПАО «Северсталь», Яндекс.

Сегодняшние реалии в медиапространстве показывают, что экологическая повестка перестаёт быть исключительно набором технических данных и статистических показателей, становясь мощным инструментом стратегической коммуникации. В 2026 году корпоративный экологический дискурс превращается в поле реализации сложных коммуникативных стратегий, направленных на формирование благоприятного имиджа компании и управление лояльностью потребителей [1, 2]. Установки, управляющие современным бизнесом, всё чаще пересекаются с ценностными ориентирами общества, что делает экологическую ответственность важным репутационным качеством. [Буряк: 73] Сегодня крупным корпорациям становится выгодно поддерживать свой статус с помощью специфических языковых средств, создающих образ «этичного» и «зеленого» производителя.

В данной работе исследуется лингвистическое противоречие между фактическим техногенным воздействием предприятий и его вербальной репрезентацией в цифровой среде. Главными показателями являются способы трансформации сухих статистических отчетов в убедительный имиджевый текст [4, 9]. В работе представлен сопоставительный анализ коммуникативной методики, используемой для конструирования экологического имиджа в различных секторах экономики.

Методология исследования базируется на принципах сопоставительного дискурс-анализа и языкового описания. В качестве основного инструментария использован контент-анализ корпоративных отчетов и материалов официальных сайтов компаний, что позволило выявить ключевые лексические маркеры и коммуникативные стратегии, формирующие экологический имидж бренда [4].

Объектами исследования стали ПАО «Северсталь» и компания «Яндекс». Выбор обусловлен стремлением сопоставить полярные модели: тяжелую промышленность и сферу цифровых услуг. Компании со схожим промышленным профилем (например,

«Русская медная компания») были исключены из анализа ввиду недостаточного объема открытых коммуникативных материалов, а финансовый сектор (ПАО «Сбербанк») демонстрирует менее выраженное повседневное взаимодействие с пользователем в экологическом аспекте, чем экосистема компании «Яндекс».

Анализ экологического раздела веб-сайта, стратегий об устойчивом развитии ПАО «Северсталь» позволяет классифицировать данный тип коммуникации как экспертно-индустриальный дискурс, ориентированный на демонстрацию технологического контроля промышленного воздействия на окружающую среду. Языковая специфика материалов компании характеризуется высоким содержанием профессионализмов. В текстах преобладают сложные технические понятия: *бескомпрессорная утилизационная газовая турбина, котел-утилизатор, интенсивность выбросов в CO_2-эквиваленте*[1]. Подобное использование инженерных терминов помогает компании говорить на языке международных стандартов, создавая образ эксперта, чья деятельность подтверждена юридически и технически [6].

Изучение подразделов, посвященных модернизации производства, выявляет сопровождение описаний конкретных проектов (замена нагревательных печей, ремонт доменных печей) графической пометкой *мероприятие реализовано*[1], что переводит коммуникацию из планов в плоскость отчетов. Использование точных данных о сокращении выбросов формирует образ компании, которая не просто ставит амбициозные цели, но и гарантированно их достигает, например на сайте «Северстали» размещена информация об уменьшении выбросов: *-2700 тыс. тонн CO_2-экв/год*[1]. Таким образом, «Северсталь» выстраивает имидж через экспертность, где сухие цифры и инженерная сложность становятся главными аргументами в диалоге с обществом [5,7].

В противовес экспертно-индустриальной модели, экологический дискурс компании «Яндекс» реализует более технологическую модель, направленную на интеграцию экологических практик в повседневную жизнь пользователя. Визуальная стратегия «Яндекса» строится на принципах дружелюбного интерфейса, который сокращает дистанцию между корпорацией и потребителем. Языковой анализ выявляет преобладание вовлеченности, выраженной через включающие пользователя в процесс конструкции и глаголы действия первого лица: *мы строим*; *нам важно*[2]. Вместо сложных инженерных схем компания использует понятные обывателю категории и интерактивные элементы, такие как кнопка «Узнать свой вклад», которая превращает чтение отчёта в персональный пользовательский опыт [8,9]. Акцент делается не на тоннах выбросов, а на доступности сервисов. Использование конкретных бытовых примеров – *пакеты Лавки из перерабатываемых материалов* или *фильтры для сдачи батареек* – позволяет компании обозначить словами экологическую повестку как часть комфортной городской среды. Сложные процессы, такие как энергоэффективность дата-центров, объясняются через доступные, что делает деятельность компании понятной и прозрачной для непрофессиональной аудитории. Например, метафора, поясняющая процесс энергопотребления: *каждый запрос в интернете – это работа серверов*[2].

Если «Северсталь» позиционирует себя как удаленный эксперт, то «Яндекс» создаёт образ экологического партнёра, разделяющего общие ценности с обществом. Таким образом, сопоставление двух моделей выявляет ключевое языковое отличие: «Северсталь» транслирует идеологию контроля и силы, в то время как «Яндекс» продвигает идеологию соучастия и пользы. Следовательно, успех создания экологического имиджа с помощью лингвистических средств зависит от способности компании найти баланс между технологическим превосходством и эмоциональной доступностью [2, 3].

[1] Экология | Северсталь: https://severstal.com/rus/sustainabledevelopment/environment/

[2] Устойчивое развитие в Яндексе: https://sustainability.yandex.ru/ecology

Список литературы

1. Айтжанова Г.С. Дискурс и дискурсивные стратегии в современном языкознании // Вестник науки. 2025. № 10 (91). – С. 532–536.
2. Буряк Н.Ю. Корпоративные коммуникации и их влияние на формирование имиджа организации // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. № 1 (51). – С. 72–75.
3. Голомидова М.В., Гладий А.Е. Экологический дискурс и аспекты его изучения в российской лингвистике // Russian Linguistic Bulletin. 2024. № 5 (53). – С. 1–4.
4. Зверев С.Э. Риторический инструментарий в формировании профессиональных компетенций PR-специалиста // Актуальные проблемы гуманитарного знания в техническом вузе IX международная научно-методическая конференция. Сборник научных трудов. 19-20 октября 2023 года, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. СПб. 2023. – С. 238–240.
5. Кицура Д.Д. Теоретический разбор совершенствования имиджа компании и стратегии формирования имиджа // Форум молодых ученых. 2023. № 11 (68). – С. 72–82.
6. Мэй Чан Мьей Зо Связь между терминами энергетической отрасли в научных текстах (на примере семантического поля термина «энергоснабжение») // Актуальные проблемы гуманитарного знания в техническом вузе IX международная научно-методическая конференция. Сборник научных трудов. 19-20 октября 2023 года, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. СПб. 2023. – С. 172–175.
7. Палий Т.П., Потеряхина И.Н. конфликт в виртуальном корпоративном дискурсе // СИСП. 2023. № 4-2. – С. 56–61.
8. Романова Е.В., Карташова Е.П. Эколингвистика и экологический дискурс: терминология, подходы и перспективы // Вестник Марийского государственного университета. 2025. № 3. – С. 424–430.
9. Шапочкин Д.В. Экологический дискурс: интенциональный аспект // Russian Linguistic Bulletin. 2023. № 3 (39). – С. 1–4.

ВЛИЯНИЕ СТИЛЯ РУКОВОДСТВА НА РЕАЛИЗАЦИЮ КОММУНИКАЦИОННОЙ СТРАТЕГИИ ВУЗА ЧЕРЕЗ ПРОЕКТНЫЙ ПОДХОД (СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИУ «МЭИ» И КГТУ ИМ. И. РАЗЗАКОВА)

Рогов Р.Г.[1], Никитина Е.А.[2]
[1] аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, RogovRG@mpei.ru
[2] ведущий специалист дирекции международного сотрудничества, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, NikitinaYAl@mpei.ru

Научный руководитель: Гуличева Е.Г.
кандидат экономических наук, директор по международному сотрудничеству, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.

Аннотация. В статье рассматривается взаимосвязь стиля руководства и эффективности реализации коммуникационной стратегии вуза через призму проектного управления. На основе эмпирического исследования, проведенного в НИУ «МЭИ» (Россия) и КГТУ им. И. Раззакова (Кыргызстан), доказывается, что демократический и трансформационный стили руководства создают благоприятную среду для внедрения проектных методов, что, в свою очередь, повышает адаптивность, открытость и результативность коммуникаций. Предложены рекомендации по интеграции проектного подхода в управленческую практику университетов.

Ключевые слова: стиль руководства, коммуникационная стратегия, проектное управление, высшее образование, НИУ «МЭИ», КГТУ им. И. Раззакова, организационная культура, эффективность управления.

Введение. Современные государственные вузы функционируют в условиях высокой неопределенности и конкуренции, что требует от руководства не просто административной гибкости, но и способности реализовывать стратегические задачи через временные, междисциплинарные проектные команды [1; 5]. Коммуникационная стратегия, будучи инструментом формирования репутации и внутренней консолидации, все чаще реализуется не в рамках рутинных бюрократических процедур, а как серия целенаправленных проектов (PR-кампании, брендинг, работа с абитуриентами, запуск новых медиа). Однако успех таких проектов напрямую зависит от доминирующего стиля руководства, который либо поощряет инициативу и проектную культуру, либо подавляет ее, сводя коммуникацию к формальной отчетности. Под коммуникационной стратегией университета авторы понимают комплексный план взаимодействия с целевой аудиторией (студенты, сотрудники, абитуриенты, партнеры, органы власти), направленный на формирование и поддержание репутации вуза, а также продвижение образовательных услуг. Цель данного исследования – выявить, как различные стили руководства влияют на способность вузов применять проектный подход в коммуникационной деятельности.

Методы. Исследование проводилось в 2025 году на базе двух технических университетов: НИУ «МЭИ» (Москва) и КГТУ им. И. Раззакова (Бишкек). Выборка составила 233 сотрудника и руководителя различных уровней. Основным инструментом выступила методика диагностики стилей руководства А.Л. Журавлева, позволяющая оценить выраженность директивного, коллегиального и либерального компонентов. Для оценки вовлеченности в проектную деятельность был проведен дополнительный опрос,

выявляющий частоту создания кросс-функциональных команд, делегирования полномочий в проектах и использования проектных методов в коммуникации [2].

Результаты. В обоих вузах диагностировано доминирование коллегиально-демократического стиля (78% в МЭИ и 72% в КГТУ). При этом в МЭИ зафиксирована более высокая интенсивность использования проектных форм работы в коммуникационной сфере (регулярное создание проектных групп под конкретные мероприятия, активное привлечение студентов и внешних партнеров). В КГТУ, при сохранении коллегиальности, проектная активность чаще носит формальный характер, ограниченный рамками утвержденных планов.

Обсуждение. Полученные данные согласуются с современными представлениями о том, что проектный подход требует делегирования и доверия, которые являются атрибутами демократической управленческой культуры [3; 4]. Университеты, где руководители среднего звена (директора институтов, заведующие кафедрами) обладают реальной автономией и могут инициировать проекты, демонстрируют более живую, многоканальную и эффективную коммуникационную стратегию. Напротив, даже при формально коллегиальных процедурах, но жестком контроле сверху, коммуникационные проекты превращаются в шаблонные отчеты, теряя свою главную функцию – диалог с аудиторией [6; 7]. Также важно заметить, что на стиль руководства могут влиять и внешние факторы (особенности управления в странах СНГ, различия в законодательстве разных стран).

Заключение. Проектный подход является эффективным инструментом реализации коммуникационной стратегии вуза, однако его внедрение невозможно без соответствующего стиля руководства. Переход к демократическому и трансформационному лидерству, предполагающему делегирование, поощрение инициативы и создание кросс-функциональных команд, выступает необходимым условием для повышения конкурентоспособности университета. Перспективой дальнейших исследований является разработка методик оценки экономической эффективности коммуникационных проектов, реализуемых в рамках различных управленческих моделей.

Список литературы

1. Друкер, П.Ф. Эффективный руководитель / П.Ф. Друкер; пер. с англ. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2022. – 240 с.
2. Корговой, М.А. Актуальные вопросы менеджмента и управления персоналом в современных организациях: монография / М.А. Корговой – М.: РУСАЙНС, 2024. – С. 40-45.
3. Королев, Л.М. Психология управления: учебное пособие для вузов / Л.М. Королев – 112-е изд. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2025. – 30-47 с.
4. Набоков, В.И. Организационная культура: учебник для вузов / В.И. Набоков – 3-е изд. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2025. – 29-40 с.
5. Тарасов, В.К. Искусство управленческой борьбы / В.К. Тарасов. – М.: Добрая книга, 2021. – 464 с.
6. Шейн, Э.Х. Организационная культура и лидерство: учебное пособие / Э.Х. Шейн; пер. с англ. – СПб.: Питер, 2023. – 352 с.
7. Сергеева, О.А. Особенности формирования конкурентоспособности будущего специалиста в сфере энергетики/ О.А. Сергеева, А.Н. Вохмянина, А.Е. Тарасов // Глобальный научный потенциал. 2025. № 4(169). С. 66-69.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОРТФЕЛЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ АКТИВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ

Семенова Д.Е.
студент 4 курса,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, daryasmnw@mail.ru

Научный руководитель: Пономаренко Т.В.
д.э.н., профессор кафедры организации и управления,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе предлагается применение усовершенствованного подхода к формированию инвестиционного портфеля нефтегазовых активов на примере ООО «Газпромнефть-Восток». Актуальность исследования обусловлена существенными различиями между месторождениями внутри портфеля по уровню добычи, капиталоемкости и способности генерировать денежный поток, что снижает эффективность традиционной матричной классификации активов. Цель работы заключается в разработке подхода к приоритизации месторождений с точки зрения осуществления инвестиционных вложений на основе агрегированного показателя. В результате работы был предложен двухфакторный индекс инвестиционной приоритетности и проведен сценарный анализ размещения дополнительной буровой установки, позволивший определить наиболее эффективные направления инвестирования.

Ключевые слова: портфель нефтегазовых активов, месторождение, агрегированный показатель, двухфакторный индекс, инвестиции, денежный поток.

Введение. Формирование портфеля добывающих активов и инвестиционных проектов является одной из ключевых задач стратегического планирования в контуре нефтегазовых компаний (НГК). Развитие нефтегазодобывающих активов, занимающих различные позиции в инвестиционном портфеле, определяется не только объемом капитальных вложений, но и методом их распределения между отдельными объектами. Для компаний нефтегазового сектора данная проблема приобретает особое значение, поскольку портфель включает одновременно зрелые месторождения и объекты, находящиеся на стадии введения в разработку и характеризующиеся повышенной инвестиционной нагрузкой [1, 2]. В таких условиях отсутствие обоснованного подхода к ранжированию инвестиционных проектов снижает эффективность деятельности НГК, ограничивает возможности роста прибыли и рентабельности.

Цель исследования заключается в разработке подхода к приоритизации нефтегазовых активов в инвестиционном портфеле с применением агрегированного показателя на примере ООО «Газпромнефть-Восток».

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Исследовать теоретические подходы к формированию портфеля нефтегазовых активов;

2. Проанализировать стратегические материалы и отчетность компании ООО «Газпромнефть-Восток»;

3. Разработать модель интегральной оценки объектов (месторождений) с точки зрения наилучшего варианта инвестирования.

Методы. В исследовании использованы методы анализа корпоративных материалов компании, сравнительного анализа, сценарного моделирования, экономико-математического моделирования [3].

Результаты. Проведенное исследование на примере компании ООО «Газпромнефть-Восток» показывает, что наличие различных месторождений по степени отработанности запасов, уровню инвестиционной нагрузки, ценности, уровню накопленной

добычи является не просто качественной характеристикой актива, а основой для формирования портфельной инвестиционной стратегии. Содержательно результаты исследования подтверждают, что универсального сценария развития и инвестиционного планирования, одинаково оптимального для всех целей управления и активов портфеля, не существует. Предложенный в работе агрегированный индекс используется как интегральный критерий ранжирования портфеля в зависимости от приоритетности осуществления инвестиционных вложений в размещение дополнительной буровой установки в краткосрочном и среднесрочном периодах.

Обсуждение. В современной теории стратегического управления[1] формирование портфеля активов рассматривается как инструмент распределения ограниченных ресурсов между направлениями бизнеса и инвестиционными объектами с учетом их вклада в стоимость, уровень риска и перспективы роста[2] [4, 5]. Отраслевая специфика портфеля нефтегазовых активов состоит в том, что инвестиционные решения должны учитывать не только экономические показатели, но и производственные параметры месторождений, влияние инженерных решений на добычу углеводородного сырья [6, 7, 8].

В компании ООО «Газпромнефть-Восток» [9] применяется классификация месторождений на четыре группы исходя из удельного показателя FCF/тнэ, объема финансирования CAPEX без учета финансовых инструментов и динамики изменения добычи нефти. Данный подход предполагает построение матрицы месторождений, в соответствии с которой добывающие участки ранжируются на группы: «лидеры», «доноры», «хвостовые», «акцепторы». Ограниченность матричного подхода заключается в том, что, обеспечивая лишь качественную группировку месторождений по категориям, он не формирует единого количественного критерия для принятия инвестиционных решений, не позволяет ранжировать объекты внутри одной группы, недостаточно приспособлен для сравнения альтернативных сценариев перераспределения инвестиционного капитала внутри портфеля.

В работе предложен альтернативный метод экономической оценки активов (месторождений), предполагающий использование двухфакторного агрегированного показателя (A_i):

$$A_i = 0{,}5 \times FCF_{ni} + 0{,}5 \times CAPEX_{ni}\,, \qquad (1)$$

где FCF_{ni} – нормализованное значение денежной эффективности, рассчитанное на основе показателя FCF на единицу добычи углеводородов i-го месторождения; $CAPEX_{ni}$ – нормализованное значение эффективности капиталовложений, рассчитанное на основе показателя CAPEX на единицу добычи углеводородов i-го месторождения.

Применение данного индекса ранжирования портфеля месторождений было рассмотрено на примере сценариев размещения дополнительной буровой установки (БУ) на конкретном месторождении. Первый сценарий предполагает размещение дополнительной БУ на зрелом месторождении Западно-Лугинецкого участка, второй – на разрабатываемом Арчинском месторождении, третий – на новом месторождении Нежданный мыс [10]. Агрегированный индекс для первого, второго и третьего сценариев равен соответственно 0,66, 0,91, 0,00. Нулевое значение показателя для месторождения Нежданный мыс объясняется полученным отрицательным значением FCF, не принимаемым для расчета.

---

[1] Отварухина, Н.С. Современный стратегический анализ: учебник и практикум для вузов / Н.С. Отварухина, В.Р. Веснин. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 463 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-14975-3.

[2] Погодина, Т.В. Инвестиционный менеджмент: учебник и практикум для вузов / Т.В. Погодина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 229 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-16418-3.

На следующем этапе необходимо рассчитать взвешенный показатель для портфеля в целом в каждом из сценариев (A_{pi}):

$$Api = \sum \frac{Ai * Qi}{\sum Qi}, \quad (2)$$

где Ai – агрегированный индекс по i-му месторождению; Qi – объем добычи нефти на i-м месторождении.

Данный подход позволяет оценить не только локальный эффект по отдельному месторождению, но и изменение качества портфеля в целом. Значения взвешенного показателя по портфелю в первом, втором и третьем сценарии соответственно равны 0,5, 0,49 и 0,47.

Согласно полученным результатам, наибольшую экономическую эффективность для портфеля обеспечит размещение дополнительной БУ, в первую очередь, на зрелом месторождении Западно-Лугинецкого участка. Дополнительная БУ на данном объекте интерпретируется как инструмент удержания падения добычи и поддержания денежного потока зрелого донора. Сценарий размещения БУ на Арчинском месторождении оценивается как наиболее привлекательный для достижения роста прибыли и рентабельности в среднесрочном горизонте. Текущее размещение дополнительной буровой установки на новом месторождении Нежданный мыс усиливает инвестиционную нагрузку и ухудшает краткосрочный денежный результат.

Заключение. В статье разработан и апробирован подход к совершенствованию инвестиционной стратегии формирования портфеля нефтегазовых активов с применением интегральной оценки на примере ООО «Газпромнефть-Восток». Научная новизна исследования состоит в том, что корпоративная классификация месторождений дополнена авторским двухфакторным агрегированным индексом инвестиционной приоритетности активов портфеля. Таким образом, рост экономической эффективности в рамках комплексного проекта развития актива обеспечивается совершенствованием подхода к адресному распределению инвестиций между месторождениями в зависимости от их экономической роли внутри дифференцированного портфеля добывающих активов.

Список литературы

1. П.В. Пугачева, Н.А. Половникова Проблемы и перспективы реализации нефтегазовых проектов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. №12-2 (111).
2. А.О. Брехов Управление портфелем инвестиционных проектов компаний нефтегазовой отрасли в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов // ЕГИ. 2024.
3. Макарова Е.Б., Молчанова Л.А. Инструменты оценки и формирования устойчивого портфеля проектов предприятий нефтегазового сектора // Инновации и инвестиции. 2020. №12.
4. Матрохина К.В., Трофимец В.Я., Мазаков Е.Б., Маховиков А.Б., Хайкин М.М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2023. Т.259. С. 112-124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.
5. Гальчич, Н.М. Ключевые принципы и этапы формирования инвестиционных портфелей компаний ТЭК / Н.М. Гальчич. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2025. – № 39 (590). – С. 38-41.
6. Агусев В.А. Особенности формирования инвестиционного портфеля российскими компаниями нефтегазового сектора экономики // Экономические системы. 2021. №3.
7. Marina K, Anastasiia S. (2025). Optimization of the investment portfolio for oil and gas projects under conditions of risk and uncertainty. Journal of Infrastructure, Policy and Development. 9(2): 10928. https://doi.org/10.24294/jipd10928.
8. Ponomarenko, T.; Marin, E.; Galevskiy, S. Economic Evaluation of Oil and Gas Projects: Justification of Engineering Solutions in the Implementation of Field Development Projects. Energies 2022, 15, 3103. https://doi.org/10.3390/ en15093103.
9. Официальный сайт ООО «Газпромнефть – Восток» – URL: https://vostok.gazprom-neft.ru/ (дата обращения: 01.03.2026).
10. Годовой отчет ПАО «Газпром нефть» 2024 [Электронный ресурс] – URL: https://www.gazprom-neft.ru/ (дата обращения: 01.03.2026).

УДК 658.51

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО КАК ОБЪЕКТ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА: РЕЗЕРВЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ ВНЕДРЕНИИ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ

Сопина Ю.Д.
студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, yu_sopina@mail.ru

Научный руководитель: Новиков А.В.
к.э.н., доцент каф. Отраслевой экономики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Инструментальное хозяйство промышленных предприятий остается зоной скрытых потерь в рамках концепции бережливого производства, тогда как внедрение режущей керамики традиционно рассматривается лишь как технологическое решение. Цель исследования – выявление резервов снижения потерь при интеграции керамического инструмента в систему инструментального обеспечения на принципах бережливого производства. Предложены аналитические зависимости для количественной оценки эффекта ($К_п$), определены условия, при которых потенциал керамики может быть реализован. Практическая значимость заключается в разработке инструментария для обоснования управленческих решений при переходе на керамический инструмент.

Ключевые слова: бережливое производство, инструментальное хозяйство, режущая керамика, снижение потерь, инструментальное обеспечение, управление запасами, организация производства, высокоскоростная обработка.

Несмотря на широкое распространение и применение концепции бережливого производства на промышленных предприятиях, инструментальное хозяйство – включающее в себя центральный инструментальный склад, участки заточки, выдачи – зачастую остаётся зоной скрытых потерь, связанных с избыточными запасами, простоями оборудования и неоптимальной логистикой инструмента [6]. В то же время применение режущей керамики – высокотвёрдого стойкого инструмента, способного обеспечивать высокоскоростную обработку – традиционно рассматривается исключительно как технологическая мера, без учёта её потенциала для организационной перестройки инструментального обеспечения [3, 4].

Целью работы является выявление резервов снижения потерь в инструментальном хозяйстве при масштабировании применения режущей керамики на основе принципов бережливого производства. Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи, как:

- структурировать потери в инструментальном хозяйстве при используемом инструменте (твердосплавные инструменты);
- оценить влияние внедрения режущей керамики на номенклатуру, запасы и логистику инструмента;
- предложить аналитические зависимости для оценки интеграционного эффекта;
- разработать рекомендации по реорганизации процессов инструментообеспечения.

Теоретическую базу исследования составляют принципы бережливого производства, включая инструментыVSM (картирование потока создания ценности), SMED (быстрая переналадка), 5S и систему «тянущего» пополнения запасов, которые адаптированы к специфике инструментального хозяйства. В свою очередь технологический анализ строится на сравнении стойкостных и скоростных характеристик твердосплавного и керамического инструмента на основе данных справочной литературы. Для реализации количественной оценки потерь, связанных с инструментальным обеспечением, вводится интегральный коэффициент $K_{\text{п}}$, который позволит учесть затраты на хранение запасов, простои оборудования и логистику инструмента в совокупности и определить уровень влияния каждого из показателей на целевую функцию [8].

Так для количественного анализа используется коэффициент потерь инструментального обеспечения, который выражается формулой (1):

$$K_{\text{п}} = \frac{C_{\text{зап}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{лог}}}{C_{\text{обр}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{зап}}$ – затраты на хранение оборотных средств в инструменте, руб.; $C_{\text{пр}}$ – потери от простоев оборудования из-за отсутствия или смены инструмента, руб.; $C_{\text{лог}}$ – затраты на перемещение, выдачу и учёт инструмента, руб.; $C_{\text{обр}}$ – прямые затраты на механическую обработку (без учёта стоимости инструмента), руб.

Также в ходе исследования необходимо провести оценку эффекта от сокращения номенклатуры, который выражается формулой (2):

$$\Delta Q_{\text{стр}} = \alpha \cdot \Delta N \cdot q_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где ΔN – количество типоразмеров инструмента при использовании твердосплавного и керамического инструмента ($\Delta N = N_{\text{тв}} - N_{\text{кер}}$), шт.; α – коэффициент страхового запаса (обычно принимается в диапазоне 0,3-0,5 от среднемесячного расхода); $q_{\text{ср}}$ – средний расход по одному типоразмеру, руб.

В ходе анализа выявлены основные категории потерь в инструментальном хозяйстве – потери ожидания инструмента у станка, избыточные страховые запасы с низкой оборачиваемостью, а также затраты на внутрискладскую логистику [9]. Установлено, что потенциал снижения потерь при внедрении режущей керамики может быть реализован в полной мере при выполнении соответствующего комплекса условий: достаточной жесткости и мощности системы, готовности технологической службы к пересмотру режимов резания, а также перестройке системы планирования потребности в инструменте [10].

Полученные результаты позволяют утверждать, что внедрение режущей керамики создаёт потенциальный организационный рычаг для перестройки инструментального хозяйства – высокая стойкость инструмента даёт возможность сократить частоту замен и страховые запасы, а унификация номенклатуры позволит упростить применение инструментов бережливого производства [2, 5].

Таким образом, практическая значимость работы заключается в разработке аналитического инструмента ($K_{\text{п}}$) и выявлении факторов, которые являются определяющими в вопросе успешной интеграции керамического инструмента в систему бережливого производства [1]. Так перспективным направлением дальнейших исследований является разработка алгоритма принятия решений о целесообразности перехода к работе керамическим режущим инструментом с учётом конкретных производственных условий [7].

Список литературы

1. Армашова Г.С. Бережливое производство как фактор роста конкурентоспособности субъекта хозяйствования // Вестник ВГУИТ, 2019, №2 (80). DOI: 10.20914/2310-1202-2019-2-336-340.
2. Джеймс Вумек, Дэниел Джонс Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Паблишер, 2013. – 472 с.
3. Иванов И.И., Петрова А.А. Механические свойства твердосплавных и керамических материалов [Электронный ресурс] // Научный журнал «Материалы и технологии»: сведения, относящиеся к заглавию / ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». URL: http://www.mgtu.ru/journal/materials-and-technologies (дата обращения: 23.03.2026).
4. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В. и др. Режущий инструмент: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2022. – 528 с.
5. Кобозева Е.М., Пшеничная В.В. Концепция бережливого производства: основные принципы и современные инструменты // Вестник Адыгейского государственного университета, 2023, №4 (330). DOI: 10.53598/2410-3683-2023-4-330-128-134.
6. Кузнецов А.В. Инструментальное хозяйство: сущность, задачи и структура [Электронный ресурс] // Научный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: сборник научных трудов / МГТУ им. Н.Э. Баумана. URL: https://www.bmstu.ru/science/publications/2023/novelty/ (дата обращения: 23.03.2026).
7. Максаров В.В., Халимоненко А.Д., Горшков И.В. Влияние структурных параметров режущей керамики на качество обработки при селективном формировании обработки // Металлообработка, 2020, №1 (115), с. 54-62. DOI: 10.25960/mo.2020.1.54.
8. Новиков А.В. Об управлении промышленным предприятием на основе показателей потенциала // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2023, №1 (14). – с. 96-103. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-1-96-103.
9. Петрова Е.С. Организация инструментального хозяйства на предприятиях машиностроения [Электронный ресурс] // Вестник машиностроения: журнал / Российская академия наук. URL: https://www.ras.ru/vestnik/2023/organization/ (дата обращения: 23.03.2026).
10. Тихомиров А.А. Технологические аспекты планирования инструментального хозяйства на предприятиях машиностроения [Электронный ресурс] // Научные труды Технического университета: журнал / Технический университет. URL: https://www.tu.ru/publications/2023/technological_aspects/ (дата обращения: 23.03.2026).

ПОТЕНЦИАЛ ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЕМА ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В РОССИИ

Спиваков К.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, kaspivakov@gmail.com

Научный руководитель: Пономаренко Т.В.
д.э.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается потенциал использования золошлаковых отходов как альтернативного (вторичного) сырья для производства глинозема в российской алюминиевой отрасли. Проведен анализ передового китайского опыта и используемых технологий получения глинозема из золошлаковых отходов. Оценены ресурсные возможности обеспечения производства глинозема из золошлаковых отходов в России. Обоснована необходимость использования внутренних альтернативных источников сырья для увеличения сырьевой базы.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, алюминиевая отрасль, глинозем, переработка ЗШО, бокситы, диверсификация.

Введение. В условиях роста дефицита бокситов, исключения производственных мощностей по глинозему из цепочки ОК «Русал» и необходимости закупать глинозем у зарубежных поставщиков следует рассматривать все доступные источники сырья, включая использование золошлаковых отходов при производстве глинозема. Ежегодно на тепловых электростанциях в России образуется более 20 млн. тонн золошлаковых отходов (ЗШО) [1], которые накапливаются в отвалах, занимая земельные участки и создавая дополнительную нагрузку на окружающую среду. При этом ЗШО содержат 25-40% глинозема и могут использоваться как дополнительный источник сырья для его производства, а не как замещающая альтернатива [2, 3].

Методы. Методология исследования основана на контент-анализе научной литературы, годовых отчетов компаний, государственных докладов, новостных источниках, официальных стратегических документах. Использовались методы анализа информации, синтез, прогнозирование, систематизация и обобщение.

Результаты. В ходе исследования был проанализирован передовой китайский опыт получения ЗШО из глинозема, где в год производится 5 млн. тонн глинозема, что составляет 5,8 % от потребностей Китая [4, 5]. Выявлены новейшие технологии по переработке ЗШО, которые позволяют повысить эффективность процесса и снизить себестоимость глинозема. Проанализированы ресурсные возможности и перспективы в РФ переработки ЗШО. В различных сценариях потенциал может составлять от 700 тыс. тонн глинозема до 3450 тыс. тонн. На примере проекта производства 1,25 млн. тонн глинозема из отходов Рефтинской ГРЭС и малых тепловых электростанций, расположенных на расстоянии до 150 км от алюминиевых и глиноземных заводов [6, 7], выполнена экономическая оценка производства глинозема из золошлаковых отходов, которая может быть масштабирована.

Обсуждение. В отличие от традиционной добычи бокситов, использование ЗШО снижает экологическую нагрузку за счет снижения объема складируемых отходов. Экономическая эффективность доказана китайским опытом с учетом объемов производства и качества руды. Для реализации подобных проектов необходимы значительные инвестиции, государственная поддержка и дополнительные НИОКР [8, 9]. Основными проблемами тиражирования китайского опыта являются: меньшие объемы переработки, географическая разбросанность предприятий, отсутствие государственной поддержки, отличие в качестве отходов [10].

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует высокий ресурсный потенциал использования ЗШО для производства глинозема в России, однако их использование сдерживается технологическими и экономическими ограничениями. Направление будущей работы должно быть сфокусировано на изучении состава ЗШО и отвалов конкретных станций, которые находятся близи алюминиевых и глиноземных заводов. Необходимо провести более детальный расчет экономической эффективности, который бы учитывал затраты на транспортировку и применение наиболее эффективных технологий.

Список литературы

1. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС. / И.Ю. Золотова // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 7. – С. 123-128. – EDN: TGKIVS.
2. Русанов И.Ф. Теоретический анализ возможности переработки золы тепловых электростанций методами пирометаллургии / И.Ф. Русанов, С.В. Куберский, М. Ю. Проценко, Г.И. Кононенко // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. – 2025. – № 81. – С. 43-52. – EDN: IOFZCE.
3. Делицын Л.М. Получение глинозема из золы угольных электростанций. / Л.М. Делицын, Р.В. Кулумбетов, О.С. Попель, М.Г. Сульман // Теплоэнергетика. – 2022. – №12. – С. 31-39. – DOI: 10.56304/S0040363622120025.
4. Valeev D.A review of the alumina production from coal fly ash, with a focus in Russia / D. Valeev, P. Bobylev, N. Osokin, I. Zolotova, I. Rodionov, C. Salazar-Concha, K. Verichev // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 363. – Art. 132360. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132360.
5. Yao Z.T. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China / Z.T. Yao, M.S. Xi, P.K. Sarker, T. Chen // Fuel. – 2014. – Vol. 120. – P. 74–85. – DOI: 10.1016/j.fuel.2013.12.003.
6. Осокин Н.А. Извлечение глинозема из золошлаков ТЭС: технологические возможности и экономические перспективы / Н.А. Осокин, И.Ю. Золотова, Ю.В. Никитушкина // Металлург. – 2024. – № 1. – С. 100-107. – DOI 10.52351/00260827_2024_1_100. – EDN BEQMIF.
7. Шабаров А.Н. Комплексное использование отходов переработки теплоэлектростанций / А.Н. Шабаров, Н.В. Николаева // Записки Горного института. – 2016. – Т. 220. – С. 607–610. – DOI: 10.18454/PMI.2016.4.607.
8. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций. / Е.А. Пичугин // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 4. – С. 77-87. – DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.
9. Чукаева М.А. Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов. / М.А. Чукаева, В.А. Матвеева, И.П. Сверчков // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 97-104. – DOI: 10.31897/PMI.2022.5.
10. Размахнин К.К. Технология переработки и обогащения золошлаковых отходов. / К.К. Размахнин, А.Н. Хатькова, Л.В. Шумилова, Т.С. Номоконова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 10. – С. 122-135. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_122.

УДК 338.45:622:553.677

ПОТЕНЦИАЛ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛЮДЯНОЙ ОТРАСЛИ ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Стрельченко К.А.
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, kstrelchenko19@gmail.com

Научный руководитель: Череповицын А.Е.
доктор экономических наук, заведующий кафедрой организации и управления, профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена оценке значения природной слюды в период снижения декарбонизации экономики и быстрого роста электромобильного производства. Цель исследования заключается в выявлении факторов, которые поддерживают спрос на слюду, и в анализе перспектив возобновления ее добычи и глубокой переработки в России. На основе консенсус-анализа рыночных прогнозов и сценарной оценки выпуска электромобилей показано, что спрос постепенно уходит от прежних направлений использования к электротехническим и аккумуляторным решениям, а сегмент электромобилей формирует для слюдяной продукции новый внутренний рынок.

Ключевые слова: природная слюда, слюдяная отрасль, электромобили, прогноз спроса, энергетический переход.

Введение. Декарбонизация мировой энергетики и курс на энергоэффективность меняют структуру спроса на минеральное сырье [1, 2]. По мере расширения электротранспорта значение нефти как ключевого сырья снижается, а потребность в материалах для электротехники, аккумуляторных систем и термостойкой изоляции возрастает. Для российской экономики данный факт представляет конкретную задачу. Речь идет о диверсификации промышленности и о возвращении тех секторов производства, которые ранее утратили устойчивые позиции [3]. Цель исследования состоит в оценке перспектив восстановления добычи и глубокой переработки природной слюды в России с учетом расширения рынка электромобилей.

Методы. В исследовании использованы консенсус-анализ прогнозов по мировому рынку слюды, структурно-отраслевой анализ направлений конечного потребления и сценарный подход к оценке спроса в сегменте электромобилей. Информационную базу составили отраслевые исследования по свойствам и сферам применения слюды, научные публикации и нормативно-правовые документы по развитию российской электромобильной отрасли (Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года[1], утвержденная в 2021 году, Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года[2], утвержденная в 2022 году, и Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года[3], принятый в 2025 году). Расчетная часть выполнена посредством сопоставления прогнозов выпуска электромобилей в мире и России и диапазона удельного расхода

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р «Об утверждении Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_393496/ (дата обращения: 22.03.2026).

[2] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2022 г. № 4261-р «Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436471/ (дата обращения: 22.03.2026).

[3] «Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года» (утв. Правительством РФ). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_495719/ (дата обращения: 22.03.2026).

слюды на один электромобиль марки Tesla Model S Plaid, с выделением верхней и нижней границы расхода.

Результаты. Природная слюда сохраняет промышленную значимость за счет термостойкости, электроизоляционных характеристик и механической устойчивости. Данные свойства поддерживают применение слюды в электронике, строительных материалах, лакокрасочной продукции и композиционных материалах [4, 5]. Экспериментальные исследования подтверждают пригодность слюды для термозащиты аккумуляторных систем, а также ее эффективность в составе строительных и защитных покрытий [6–8]. Анализ показал, что при умеренном росте мирового рынка слюды структура потребления смещается в сторону электромобильного сегмента. Для России наиболее реалистичная траектория выпуска электромобилей изложена в Едином плане по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года. При реализации данного сценария, объем потребления слюды в сегменте электромобилей вырастет более чем в 27 раз к 2030 году.

Обсуждение. Полученные результаты отражают переход слюды из категории сырья для традиционных отраслей в категорию материалов, связанных с низкоуглеродной промышленностью и транспортом. Для России восстановление слюдяной отрасли требует реализации комплексной промышленной стратегии, которая будет включать добычу, обогащение, переработку, локализацию производства аккумуляторов, электротехнических компонентов и зарядной инфраструктуры [9, 10].

Заключение. Исследование показало, что в среднесрочной перспективе до 2030 года расширение электромобильной промышленности становится ключевым фактором роста спроса на природную слюду. Российская минерально-сырьевая база и накопленные за долгие годы научные разработки могут способствовать восстановлению слюдяной отрасли. Практический результат зависит от того, насколько согласованны меры промышленной, транспортной и инфраструктурной политики. Дальнейшее исследование будет направлено на уточнение норм расхода слюды по отдельным отраслям и построение интегрированных сценариев развития внутреннего и внешнего рынков.

Список литературы

1. Шевелева Н.А. Разработка и обоснование подхода к эколого-экономической оценке проектов декарбонизации нефтегазовой компании // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 1038-1055. EDN: GAOTZW.
2. Nevskaya M.A., Raikhlin S.M., Vinogradova V.V., Belyaev V.V., Khaikin M.M. A study of factors affecting national energy efficiency // Energies. 2023. Vol. 16. No. 13. P. 5170. DOI: 10.3390/en16135170.
3. Жданеев О.В. Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 1061-1078. DOI: 10.31897/PMI.2022.107.
4. Федорова С.В. Создание композита на основе слюды и стекла // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. Т. 156. № 2. С. 101-110. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-101-110.
5. Бубнова Т.П., Букчина О.В. Мусковитовое сырьё Карелии: история добычи и перспективы использования // Горный журнал. 2019. Т. 622. № 3. С. 21-25. DOI: 10.17580/gzh.2019.03.04.
6. Qi C., Wang H., Li M., Li C., Li Y., Shi C., Wei N., Wang Y., Zhang H. Research on the thermal runaway behavior and flammability limits of sodium-ion and lithium-ion batteries // Batteries. 2025. Vol. 11. No. 1. P. 24. DOI: 10.3390/batteries11010024.
7. Ibeh C.U., Tarantino A., Pedrotti M., Lunn R.J. An experimental investigation into the use of mica as a material for the stabilisation of marginal clays in construction // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 299. P. 123971. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123971.
8. Jiang Y., Zhang H., Zhang H., Shao Y., Zhu J., Jin X. Incorporating graphene-modified mica and conductive nickel particles for enhanced corrosion resistance in epoxy zinc-rich coatings // Frontiers in Chemistry. 2025. Vol. 13. Article 1544762. DOI: 10.3389/fchem.2025.1544762.
9. Колян Н.С., Плесовских А.Е., Гордеев Р.В. Прогнозная оценка потенциального рынка электромобилей и эффектов снижения выбросов парниковых газов в России // Journal of Applied Economic Research. 2023. Т. 22. № 3. С. 497-521. DOI: 10.15826/vestnik.2023.22.3.021.
10. Semikashev V.V., Kolpakov A.Y., Yakovlev A.A., Rostovski J.K. Development of the electric vehicles market in Russia as a necessary condition for benefiting from the global trend towards transport electrification // Studies on Russian Economic Development. 2022. Vol. 33. No. 3. Pp. 274-281. DOI: 10.1134/S1075700722030133.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ПРОЕКТОВ

Терекулов М.А., Василевская Ю.Н.
студенты 4 курса, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель: Сидоренко С.А.
к.т.н, доцент кафедры организации и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В данной статье были рассмотрены наиболее актуальные проблемы недропользования, которые связаны с появлением экологических рисков при реализации проектов в Российской Федерации. Особое внимание сосредоточено на вопросе минимизации воздействия на окружающую среду на этапах строительства и ввода в эксплуатацию объектов газовой инфраструктуры. Практическим примером послужил проект реконструкции магистрального газопровода на участке «Северо-Ставропольское ПХГ-Октябрьская-Сохрановка» с вводом площадки компрессорных агрегатов КС «Егорлыкская», реализуемый ПАО «Газпром». Показано, что применение определенных современных технологических решений, строгого нормативного регулирования и многоуровневого контроля позволяет значительно понизить экологические риски и обеспечить наиболее рациональное использование недр. Полученные, в ходе проведения анализа, выводы подчеркивают необходимость внедрения принципов устойчивого развития в недропользование.

Ключевые слова: недропользование, экологические риски, магистральный газопровод, компрессорная станция, охрана окружающей среды, Газпром, рациональное природопользование, устойчивое развитие.

Введение. Недропользование в Российской Федерации играет ключевую роль энергетической безопасности и социально-экономического развития страны [1]. Более того, добыча и транспортировка углеводородных ресурсов сопровождается значительным техногенным влиянием на окружающую среду, это и определяет высокую актуальность проблемы экологически ориентированного управления недрами [2]. В условиях ужесточения природоохранных требований и реализации принципов устойчивого развития появляется необходимость интеграции экологических решений в проекты топливно-энергетического комплекса. Проблема заключается в том, что экологические риски недропользования формируются не только на этапе добычи полезных ископаемых, но и при строительстве и эксплуатации газотранспортной инфраструктуры [4]. Пониженное внимание к экологическим факторам на данных этапах может послужить поводом для загрязнения недр, почв и водных ресурсов [3].

В качестве объекта исследования изучен проект реконструкции магистрального газопровода на участке «Северо-Ставропольское ПХГ-Октябрьская-Сохрановка» с вводом площадки компрессорных агрегатов КС «Егорлыкская», реализуемый в соответствии с требованиями законодательства и корпоративных стандартов ПАО «Газпром» [5, 6].

Целью исследования является анлиз возможных экологических рисков недропользования на примере данного проекта и оценка эффективности мер по их минимизации.

Для достижения цели в данном анализе были поставлены определенные цели: анализ проектных решений, выявление ключевых факторов экологического воздействия и определения роли газотранспортных объектов в системе рационального недропользования.

Методы. В исследовании использован анализ проектной документации ПАО «Газпром», нормативно-правовых актов Российской Федерации в сфере недропользования и охраны окружающей среды [1, 2, 4], а также материалов официальных экологических отчётов компании [6, 7, 8]. Применялись методы нормативного анализа, сопоставления проектных решений, а также поиск решения проблемы, путём моделирования и разработки специализированных датчиков по предотвращению внезапных поломок трубопроводов.

Результаты. Результатом проведённого исследования стало выполнение анализа проектных решений, что было предусмотрено в рамках реконструкции магистрального газопровода и строительства новой площадки компрессорных агрегатов КС «Егорлыкская», что рассматривается со стороны минимизации экологических рисков использования недр. Ключевым результатам данного исследования стало выявления системного характера экологической защиты, которая заложена в проектную документацию, охватывающую все стадии жизненного цикла объекта. Таким образом, было выявлено, что ключевые экологические риски в рамках такого проекта связаны с возможным искажением или нарушением целостности подземных и надземных трубопроводов, утечкой газа и технологических сред, а также отрицательным воздействием на почвы и подземные воды в зоне строительства и реконструкции. Для понижения данных рисков в проекте был реализован комплекс инженерных решений, который включает в себя многоуровневый контроль качества сварочных соединений, обязательные гидравлические испытания трубопроводов, регламентированную продувку инертным газом и дальнейшую осушку всех коммуникаций.

Более того, отдельным результатам исследования является анализ применяемых мер противокоррозионной защиты. В проекте рассчитано использование заводской изоляции труб, антикоррозионных покрытий типа «БИУРС», ещё защитных колец в некоторых местах выхода трубопроводов на поверхность земли. Такие меры направлены на предотвращение контакта металлоконструкций с негативной средой и, более того, на понижение возможности загрязнения недр и водоносных горизонтов продуктами коррозии или утечек природного газа. Как итогом, было выявлено, что проект регламентирован по строгим требованиям к обращению с технологическими средами (вода для гидроиспытаний, азот для продувки, масло и промывочной жидкости), это и позволяет снизить их попадание в экологию.

Обсуждение. Проект реконструкции магистрального газопровода с вводом площадки компрессорных агрегатов представляет собой наглядный пример реализации принципов экологически ориентированного недропользования в газотранспортной отрасли. В большинстве примеров аналогичного порядка экологические меры носят в основном формальный характер или номинативный, а соответственно ограничиваются выполнением минимальных нормативных требований, однако, в данном случае экологическая составляющая введена в технологические решения на всех этапах реализации.

Во-первых, система сварки технологических трубопроводов в проекте отличается расширенными требования к качеству данных соединений. Помимо обязательной аттестации сварщиков и применения сертифицированных материалов, ещё предусмотрен многофакторный контроль сварочных швов. Типовые проекты аналогичного назначения контролируют зачастую ограничено или сохраняют лишь выборочные проверки. Что касается недропользования, такой подход дает возможность к более высокому уровню герметичности трубопроводов, снижая риск утечек газа и потерь минеральных ресурсов, это напрямую связано с принципами рационального использования недр.

Во-вторых, проведение гидравлических испытаний в проекте описывается детальной регламентации параметров испытаний и обязательным документированием результатов. В отличие от других проектов, где испытания рассматриваются как формальный

этап перед вводом в эксплуатацию, в КС «Егорлыкская» они выступают как основной элемент экологической безопасности [2,4]. Именно такой подход позволяет выявлять возможные дефекты на ранней или начальной стадии и предотвращать аварийные ситуации, которые могут привести к загрязнению геологической среды и подземных вод.

В-третьих, проект данной компрессорной станции отличается улучшенным и повышенным вниманием к вопросам антикоррозионной защиты трубопроводов. В данном проекте применяются комбинированные системы изоляции, защитные кольца и специальные покрытия, которые превосходят уровень, характерный для ряда ранее реализованных объектов газотранспортной инфраструктуры. С научной точки зрения это снижает вероятность долгосрочной деградации трубопроводов и вероятность аварийных выбросов. Этот фактор подчёркивает ориентацию выбранного проекта на долгосрочное сохранение качества недр минимизации техногенного воздействия.

В-четвёртых, процессы продувки и осушки трубопроводов с применением инертного газа в проекте регламентированы более жёстко по сравнению с типовыми решениями. В ряде аналогичных проектов допускается упрощенная схема продувки, что дает возможность увеличить риски коррозии и образование взрывоопасных смесей. В данном проекте использования азота и строгое соблюдение технологических режимов наоборот снижает вероятность аварии и негативного воздействия на недра, что в своем большинстве соответствует концепции экологически ориентированного недропользования.

В-пятых, выбранный проект характеризуется системным подходом к обращению с технологическими средами и хвостами строительства. В отличие от проектов, где вопросы утилизации решаются преимущественно на этапе эксплуатации, в КС «Егорлыкская» данные меры интегрированы уже на стадии проектирования. Именно такое решение позволяет избежать вторичного загрязнения недр и водных объектов, это свидетельствует о более высоком уровне экологической ответственности при реализации инфраструктурных проектов [9, 10, 11].

Более того, предлагаю рассмотреть возможность создания и дальнейшего внедрения специализированных датчиков, которые подробно описаны в работе Василевской Ю.Н. И Шабашкиной А.А.: струнные тензодатчики – для измерения деформаций трубы и оценки напряжённо-деформированного состояния; датчики давления -для контроля рабочих режимов и выявления отклонений, связанных с утечками или дефектами; датчики температуры -для учёта тепловых воздействий, влияющих на прочностные характеристики и процессы коррозии и т.д. Все эти датчики размещаются с переменным шагом (чаще в зонах риска), непрерывно собирают данные, которые через контроллеры и SCADA-систему поступают в аналитическое ядро, где используются для построения графовой модели трубопровода, прогнозирования развития дефектов и принятия решений о ремонте.

Таким образом, проект КС «Егорлыкская» выделяется от ряда аналогичных газотранспортных объектов не только большим масштабом технической сложности, но и высокой степенью интеграции экологических требований в систему управления недропользования.

Заключение. Анализ данного проекта магистрального газопровода указывает на то, что применение современных технологических и организационных процессов существенно снижает негативное воздействие на окружающую среду и обеспечивает рациональное использование недр. Практическая значимость исследования заключается в возможности тиражирования примененных решений на подобные объекты газовой инфраструктуры. Перспективным направлением дальнейших исследований является оценка экологической эффективности подобных проектов на стадии их эксплуатации.

Список литературы

1. Российская Федерация. Закон РФ от 21.02.1992 № 2395-1 «О недрах». – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Российская Федерация. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
3. Российская Федерация. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
4. Российская Федерация. Федеральный закон от 31.03.1999 № 69-ФЗ «О газоснабжении в Российской Федерации».
5. ПАО «Газпром». Официальный сайт. – URL: https://www.gazprom.ru (https://www.gazprom.ru/) (дата обращения: 24.02.2026).
6. ПАО «Газпром». Отчёт об устойчивом развитии. – URL: https://www.gazprom.ru/sustainability/ (дата обращения: 24.02.2026).
7. ПАО «Газпром». Экологическая политика. – URL: https://www.gazprom.ru/nature/ (дата обращения: 24.02.2026).
8. Министерство энергетики Российской Федерации. Официальный сайт. – URL: https://minenergo.gov.ru (https://minenergo.gov.ru/) (дата обращения: 24.02.2026).
9. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор). – URL: https://rpn.gov.ru (https://rpn.gov.ru/) (дата обращения: 24.02.2026).
10. Президент Российской Федерации. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. -URL: http://kremlin.ru (http://kremlin.ru/) (дата обращения: 24.02.2026).
11. Правительство Российской Федерации. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. – URL: http://government.ru (http://government.ru/) (дата обращения: 24.02.2026).

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ «ОСНОВЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА»

Ушпик И.В., Краева В.А.
ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия,
ushpik.i.v@gmail.com

Научный руководитель: Ильинский А.А.
д.э.н., профессор, ВШПМ ФГАОУ ВО СПбПУ,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Декарбонизация как один из современных факторов, определяющих ландшафт деятельности отечественных и зарубежных нефтегазовых компаний, предъявляет новые требования к профилю компетенций будущих специалистов. Целью данной работы является представление результатов внедрения образовательной программы «Основы декарбонизации нефтегазового комплекса» на цифровой образовательной платформе в рамках обучения в высшем учебном заведении. Обоснована значимость проработки данного направления и приведены перспективы исследований.

Ключевые слова: декарбонизация, устойчивое развитие, образовательная платформа, цифровые технологии, нефтегазовый комплекс, подготовка кадров.

В настоящее время одним из стратегических векторов мирового топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является декарбонизация и реализация климатических проектов, нацеленных на создание и коммерциализацию технологий, направленных на снижение негативного антропогенного воздействия. Российская Федерация придерживается данного вектора [1], что закреплено в действующих отраслевых документах стратегического планирования и нормативно-правовых актах. По состоянию на 2024 год выбросы CO_2 в России достигли значения в 2575,65 млн. тонн экв./CO_2, что на 28,64 % больше чем в 1998 году[1], также отдельным вызовом сегодня для отечественного ТЭК введенные секторальные ограничения [2, 3], что подводит к необходимости самостоятельного технологического развития российских предприятий [4]. Также сохраняющиеся технологические, правовые, институциональные и организационно-экономические вопросы [5] актуализируют необходимость формирования и развития профильных компетенций у специалистов и управленцев нефтегазового сектора [6, 7], а также прививание осознания ответственности за принимаемые решения.

Цифровые технологии сегодня играют важную роль в образовательном процессе [8, 9] и обладают рядом преимуществ, которые позволяют полностью реализовать учебные задачи и включить все необходимые элементы для полноценного образовательного процесса [10]. Неотъемлемой частью современного образовательного процесса является разработка и внедрение образовательных платформ.

Целью данной работы является представление результатов внедрения образовательной программы «Основы декарбонизации нефтегазового комплекса» на цифровой образовательной платформе в рамках подготовки специалистов профиля: «Менеджмент в нефтегазовом комплексе» (магистратура).

Задачи:

1. Привести теоретическое описание цифровой образовательной платформы;
2. Описать основные содержательные блоки и элементы образовательного курса;
3. Представить результаты обучения студентов на образовательной платформе и полученную обратную связь;
4. Определить перспективы развития цифровой образовательной платформы.

[1] Emissions Database for Global Atmospheric Research. – URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/

В работе использовались следующие общенаучные методы исследования: сбор информации, методы информационного анализа и синтеза (обобщение). Также применялся специфический метод: опросник System Usability Scale (SUS).

Цифровая образовательная платформа – это многофункциональная среда онлайн-обучения, объединяющая технологическую инфраструктуру, контентные ресурсы и сервисы сопровождения образовательного процесса, функционирующая на принципах открытости, адаптивности и непрерывного мониторинга результатов. Информационно-технологической основой выступила платформа корпоративного научно-образовательного центра.

Ключевым содержанием выступили разделы, посвященные различным аспектам:

1. Нефтегазовая отрасль: состояние и тренды – представлен статистический обзор показателей мирового нефтегазового рынка, история и значение нефтегазовой отрасли для России и место в современной экономике, экологический аспект использования ископаемого топлива;

2. Концепция и целевые установки развития декарбонизации – введение в теоретические основы декарбонизации, рассмотрение движущих сил, противоречий и перспектив декарбонизации в XXI веке.

3. Основные технологии и организационные схемы декарбонизации – рассмотрены низкоуглеродные источники энергии, технологии и организационные схемы секвестрации CO_2, метод CO_2-EOR;

4. Стратегии и методы декарбонизации нефтегазовых компаний – стратегические подходы ведущих транснациональных нефтегазовых компаний в контексте декарбонизации и устойчивого развития;

5. Нормативно-правовые основы декарбонизации – история формирования концепций и ретроспективный анализ причин их появления;

6. Методы и технологии секвестрации парниковых газов – рассмотрены научно-методические основы секвестрации и организационно-технологические схемы транспортировки и закачки ПГ;

7. Организация и оценка эффективности проектов декарбонизации – введение в базовые понятия и инструментарий оценки инвестиционной привлекательности проектов, специфика оценки климатических проектов и риски.

После каждого тематического раздела студентам необходимо было пройти тестирование с целью отслеживания промежуточных результатов, в заключении необходимо пройти итоговое тестирование. Также каждой теме соответствовал перечень рекомендуемых материалов к изучению (отчеты консалтинговых компаний, учебные пособия и иные информационные ресурсы), а также интерактивные дополнительные элементы (SCORM-пакеты). В процессе обучения студенты решают сквозные кейсы, направленные на разработку индивидуальных проектов в контексте декарбонизации и устойчивого развития по различным направлениям (разработка и обоснование государственных мер и проектов на уровне отраслевых компаний).

Анализ отчетов о посещаемости платформы и промежуточных результатах тестирования свидетельствует о высокой активности обучающихся (все разделы курса просмотрены) на платформе и достойных результатах тестирований (среднее значение правильности решения итогового теста – 93,46%, промежуточных тестов – 92,86%).

Проведенный опрос согласно SUS применительно к данной платформе показал средний балл SUS 87,02 (SD = 11,93; N = 58), что свидетельствует о высоком уровне удобства разработанной платформы.

Важным будущим направлением исследований является возможность персонализации образовательного контента, который бы наиболее полно бы отвечал цели комплексного освоения академических знаний, данному направлению соответствует инте-

грация в образовательную платформу интерактивных моделей климатического, энергетического и экономического моделирования (например: MARKAL, TIMES, MAED, WASP и др.). Также применение Q-методологии, которая позволит выявить и описать типы субъективного восприятия контента и выявления кластерных мнений.

Таким образом опыт внедрения цифровой образовательной платформы в процесс обучения студентов профиля: «Менеджмент в нефтегазовом комплексе» (магистратура) в рамках дисциплины «Основы декарбонизации нефтегазового комплекса» показал себя как эффективный способ обучения и формирования базовых компетенций, а также позволяет предложить студентам наиболее актуальные знания и практики при подготовке будущих специалистов нефтегазовой отрасли.

Список литературы

1. Стратегические приоритеты декарбонизации России в условиях санкционных ограничений / А.А. Саитова, А.А. Ильинский, В.М. Красильников, Б.А. Цыпкин // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность : тезисы докладов. X Молодежная международная научно-практическая конференция, п. Развилка, 24–26 мая 2022 года. – п. Развилка: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», 2022. – С. 128.
2. Фадеев А.М. Импортозамещение в российском нефтегазовом комплексе в современных макроэкономических условиях: вызовы и перспективы развития / А.М. Фадеев, А.С. Лупцов, Б. Цыпкин // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : Сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции. В 8-ми частях, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023.
3. Саитова А.А. Сценарии развития нефтегазовых компаний России в условиях международных экономических санкций и декарбонизации энергетики / А.А. Саитова, А.А. Ильинский, А.М. Фадеев // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2022. – Т. 25, № 3(77). – С. 134-143.
4. Фадеев А.М. Стратегические подходы к обеспечению технологического суверенитета в энергетической отрасли России / А.М. Фадеев, А.Ю. Цветкова // Менеджмент, экономика, этика, технология – МЕЕТ 2023 : Тезисы докладов IX международной конференции, Санкт-Петербург, 06–07 октября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2024. – С. 55-60.
5. Фадеев А.М. Развитие подходов по интеграции принципов устойчивого развития в процесс управления портфелем проектов государственных нефтегазовых компаний / А.М. Фадеев // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 5, № 11(164). – С. 56-65. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.11.05.006.
6. Качелин А. Обеспечение технологического суверенитета и структурной модернизации в нефтегазовом комплексе России / А. Качелин // Энергетическая политика. – 2024. – № 3(194). – С. 20-29. – DOI 10.46920/2409-5516_2024_3194_20.
7. Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании : Материалы IX Международной научной конференции. В 4-х частях, Красноярск, 23–26 сентября 2025 года. – Красноярск: Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева, 2025. – 476 с. – ISBN 978-5-00102-760-7.
8. Ковальжина Л.С. Цифровые технологии и формы корпоративного обучения персонала / Л.С. Ковальжина, Л.П. Смуток // Социальные и экономические системы. – 2023. – № 4-1(45). – С. 228-238.
9. Верна, В.В. Развитие цифровых технологий в корпоративном обучении персонала: перспективы использования образовательных экосистем / В.В. Верна, А.В. Сорока // Век качества. – 2022. – № 1. – С. 238-252.
10. Лысков Н.В. Цифровые технологии в сфере обучения персонала / Н.В. Лысков // Достойный труд – основа стабильного общества : материалы XV Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 14–18 ноября 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2023. – С. 104-110.

А 437 **Актуальные проблемы недропользования:** Тезисы докладов. В 2 томах. Том 2 / Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. СПб, 2026. 392 с. (XXI Всероссийская конференция-конкурс проектов студентов и аспирантов, 06–10 апреля 2026 г.)

ISBN 978-5-00253-035-9
ISBN 978-5-00253-037-3 (Том 2)

УДК 00 (622+55+665.6/7+620.9+621+669)
ББК 2 (65.304.11+33.36+31+34.3)

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС ПРОЕКТОВ
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

06–10 апреля 2026 г.

Тезисы докладов

Том 2

Статьи публикуются в авторской редакции

Сборник включен в базу данных РИНЦ
Научной электронной библиотеки elibrary.ru

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Подписано к печати 28.08.2026. Формат 60×84/8. Уч.-изд. л. 40.
Тираж 50 экз. Заказ 439.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2