



Общественно-профессиональное сообщество
вузов России
КОНСОРЦИУМ «НЕДРА»



ГОРНЫЙ



XX ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС
СТУДЕНТОВ ВЫПУСКНОГО КУРСА И АСПИРАНТОВ

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ»

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ТОМ 1

02-06
ДЕКАБРЯ
2024
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



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

XX ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС
СТУДЕНТОВ ВЫПУСКНОГО КУРСА И АСПИРАНТОВ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

2–6 декабря 2024 г.

Том 1

Тезисы докладов

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025

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 XX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2–6 декабря 2024 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.

The Volume contains works of young researchers-participants of XX Russian Conference of students and graduate students “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, which was held at the Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University from the 2th to 6th December 2024. The Volume can be of great interest for a wide range of researchers, scientists, university lecturers, specialists and managers of industrial enterprises and organisations as well as for businesspeople involved in exploration, prospecting, development and processing of minerals.

Редакционная коллегия: профессор *О. М. Прищеп* (председатель), профессор *М. А. Пашкевич*, профессор *Т. Н. Александрова*, профессор *В. Ю. Бажин*, профессор *С. Г. Гендлер*, профессор *В. Н. Гусев*, профессор *А. С. Мустафаев*, профессор *М. В. Двойников*, профессор *О. И. Казанин*, профессор *В. В. Максаров*, профессор *А. Б. Пономарев*, профессор *А. Г. Протосеня*, профессор *Е. И. Пряхин*, профессор *Т. В. Пономаренко*, профессор *А. Г. Сырков*, профессор *О. В. Черемисина*, профессор *А. Е. Череповицын*, профессор *И. А. Шаммазов*, профессор *Я. Э. Шклярский*, доцент *Е. Н. Быкова*, доцент *Н. А. Вахнин*, доцент *П. А. Деменков*, доцент *Ю. Л. Жуковский*, доцент *К. Г. Каранетян*, доцент *М. Г. Мустафин*, доцент *П. А. Петров*, доцент *И. В. Поцешковская*, доцент *Д. Г. Подопригора*, доцент *Д. С. Тананыхин*, доцент *Д. Л. Устюгов*.

Содержание

Секция 1. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	8
Бельков Ф. И., Федуров Д. С. Экспериментальная установка для имитации подъема механических примесей в нефтедобывающей скважине.....	8
Валиуллина В. И., Галеев Р. Р., Мусин А. А., Ковалева Л. А. Экспериментальное исследование влияния электромагнитного поля на течение дисперсных систем в пористых средах	13
Воронцов А. А., Коробов Г. Ю., Буслаев Г. В. Ингибирование добывающей скважины в условиях образования АСПО и газовых гидратов.....	17
Карманский Д. А. Лабораторное определение зависимости проницаемости глинизированных песчаников от эффективного давления	21
Мохсен Али Мохаммед Абдулла Разработка вязкоупругих кислотных составов для интенсификации добычи нефти	24
Невольских Е. Н. Исследование применимости предварительно сшитых гелевых частиц для извлечения остаточной нефти из неоднородных коллекторов месторождений Западной Сибири	28
Рудых Л. А., Добролюбова Р. К. Влияние неуглеводородных компонентов в пластовом газе на потери конденсата при разработке Мастахского газоконденсатного месторождения	31
Раупов И. Р., Григорьева В. М., Зазуля В. С. Исследования физико-химических характеристик растворов полиакриламида для повышения эффективности полимерного воздействия	35
Раупов И. Р., Зазуля В. С., Григорьева В. М. Изучение инверсионного характера показателей вязкоупругости растворов полиакриламида для оптимизации технологий полимерного воздействия	39
Раупов И. Р., Коне Ахмед. Реологические исследования вязкоупругих свойств высокомолекулярного полимерного раствора для повышения нефтеотдачи пластов	43
Сабитов Э. А., Сайди Саиф Саад. Перспективы применения комбинированных гуаро-боратных бинарных термохимических композиций для гидроразрыва в «холодных» пластах	46
Соромотин А. В., Мартюшев Д. А. Разработка автоматизированного способа оценки проницаемости удаленной зоны пласта	50
Федотов А. С., Дорменев В. С. Перспективы применение машинного обучения в нефтегазовой отрасли.....	53
Хуснутдинова А. Д. Межфазные взаимодействия в ячейке Хеле-Шоу на примере различных систем «нефть-вода-ПАВ- наночастицы».....	56
Секция 2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН, АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА XXI ВЕКА.....	59
Валеев Э. Р., Гафуров Н. Р., Харитонов Е. В., Юрченко Я. А., Миннахметов Ф. Ф. Методика тестирования противотурбулентных присадок на лабораторном стенде для трубопроводной транспортировки нефти	59
Гафуров Н. Р., Валеев Э. Р., Харитонов Е. В., Юрченко Я. А., Миннахметов Ф. Ф. Анализ эффективности депрессорной присадки для транспортировки сверхвязких нефтей в динамических условиях.....	62
Даминов Б. Р., Соловьев А. Я. Эффективность применения промывочной системы нового поколения «IMD-NEXT» для бурения в многолетнемерзлых породах	66
Камаев Д. Р., Нечаева О. А. Тампонажный состав для ликвидации зон поглощения в условиях агрессивного флюида	69
Кривошеев К. В. Технология изготовления пропанта на основе рециклинга бурового шлама	72
Шаповал В. М., Шостак Н. А., Балаев Эйтибар Юсиф Оглы. Разработка модифицированной модели PDC долот с использованием интеллектуальных материалов	75

Секция 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ 79

Абурова В. А. Повышение извлечения благородных металлов из углеродистых руд с применением энергетических воздействий.....	79
Ананенко Е. С., Алгебраистова Н. К., Гуревич Ю. Л., Теремова М. И. Биообработка продуктов обогащения с целью удаления собирателя с минеральной поверхности.....	83
Баева А. П. Флотация апатита и ионный состав флотационной пульпы в зависимости от минерального состава апатит-нефелиновых руд.....	87
Васильев М. И. Исследование влияния параметров брикетирования коксовой пыли алюминиевого производства на их прочность.....	91
Вертиев С. А. Обогащение руд редких металлов: состояние и перспективы.....	95
Гатиатуллин Б. Л. Моделирование кинетических параметров флотационного обогащения с использованием нейронных сетей.....	98
Зозуля Ф. С., Петров П. А. Перспективы развития системы механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок.....	101
Кухтина А. А., Каллаев И. Т. Исследование влияния ультразвука на измельчаемость полиметаллических руд.....	105
Кухтина П. А. Исследование возможности применения высокоградиентной магнитной сепарации при обогащении руд различного состава.....	108
Люблянова В. А. Обоснование возможности извлечения меди из комплексных медных руд с учетом их фазового состава.....	111
Прохорова Е. О. Влияние применения аполярного собирателя на процессы обогащения углеродсодержащего материала.....	115
Смирнов А. Ю. Направленное регулирование поверхностных свойств для эффективной флотации углеродсодержащих материалов.....	118
Степанов Д. В. Высокоградиентная магнитная сепарация: возможности применения и перспективы развития.....	122
Струк Г. В. Исследование прочностных свойств руд для обоснования технологии циклов рудоподготовки.....	125

Секция 4. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИРОДНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ, УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ 128

Аветисов А. С., Косолапова С. М. Влияние содержания воды на конверсию сырья в реакции перезтерификации растительных масел.....	128
Артамонов А. А., Нечаев В. А., Бессонов В. В., Абиев Р. Ш. Применение вихревых контактных устройств для получения окисленных битумов.....	131
Богатыко А. П. Диспергаторы для нефтяных топлив (обзор).....	134
Боженко Е. А., Зубков И. Н., Пономарев Д. А., Яковенко Р. Е. Синтез Фишера-Тропша в 3D напечатанном стальном реакторе.....	137
Волик А. В., Салиев А. Н., Савостьянов А. П., Яковенко Р. Е. Синтез и разложение аммиака – эффективный способ хранения и транспортировки водорода.....	141
Гафаров Р. Р. Влияние термообработки отработанной отбелочной глины на процесс ионного обмена.....	144
Говкелевич К. Ю. Влияние полимерной модификации сырья нефтяного кокса на свойства получаемого дистиллята.....	148
Еремеева А. М., Маринец А. Р. Синтез биодобавок из отработанных масел для получения дизельного топлива с улучшенными экологическими свойствами.....	150
Копейкин М. Ф., Косолапова С. М., Рудко В. А. Влияние бактерицидной присадки на микробиологический фон в судовых топливах с биокomпонентом.....	153

Макаров Р. Д., Югов Е. Д. Пленкообразующие ингибированные составы на основе ПБВ	157
Макушева И. В., Абиев Р. Ш. Численное моделирование и экспериментальное исследование двухступенчатого микрореактора с закрученными потоками жидкости	161
Никитин И. Д. Вовлечение промышленных отходов 3-5 классов опасности в технологию изготовления блочных катализаторов газоочистки	165
Романова В. В., Абиев Р. Ш. Массообмен в двухфазном потоке в системе жидкость-жидкость в микрореакторе при снарядном режиме течения	169
Стельмах Е. А., Булавка Ю. А. Способ рационального использования нефтяных шламов в производстве битумных материалов	176
Чебыкина А. А., Утенкова Т. Г., Габдулхаков Р. Р. Влияние температуры сольвентной экстракции на групповой углеводородный состав каменноугольного пека	180
Чемес А. А., Зубков И. Н., Зубкова М. А., Яковенко Р. Е. Синтез изопарафиновых базовых масел из природного газа	183
Секция 5. СОВРЕМЕННЫЕ ГОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	187
Любимов А. С. Анализ способов определения газонасыщенных зон геофизическими методами.....	187
Пастихин М. Д. Моделирование работы экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования и буровзрывных работ в карьере.....	191
Решетников К. И., Глухов М. С., Ронкин М. В. Исследование подходов компьютерного зрения в задаче фрагментации горных пород	195
Садыков А. А., Матвеев А. В. Экспериментальное определение зависимости величины эксплуатационной производительности мехлопат от кусковатости взорванных пород	199
Ситников Д. А. Увеличение наработки насосных установок водопонижающих скважин посредством использования самоочищающихся фильтров	203
Смирнова А. А. Технологическая схема производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа на месторождении низинного типа.....	207
Смирнова А. Д., Михайлова Т. В., Чэнь Шаоцзе, Попов А. В. Особенности определения зон повышенной газоотдачи на основе анализа цифровых сеточных поверхностей физико-механических свойств горных пород	210
Тохтамыш М. А. Пространственное моделирование открытых горных работ с целью обоснования вариантов разработки	214
Трофимов М. В., Смирнова А. Д. Комплексный подсчет запасов угля и оценка ресурсов метана угольных пластов при помощи алгоритмического кодирования	217
Секция 6. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА	221
Ахметьянов А. Н., Округин П. Е., Кочнева Л. В. Проведение воздушно-депресссионных съемок специалистами службы депрессионных съемок ФГУП «ВГСЧ».....	221
Белехов П. А. Применение математического моделирования для оценки влияния параметров проветривания на эффективность разбавления дизельных газов.....	225
Белкин И. А., Грунско́й Т. В. Оценка эффективности применения тампонирувания в трещиноватых горных породах Ярегского месторождения	227
Белов А. А. Исследование сейсмозрывного воздействия на приконтурный массив при разработке месторождения открытым способом	232
Васяева Д. Д., Вишнева Е. В., Зуева А. А., Кочнева Л. В. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела.....	235
Вишнёва Е. В., Васяева Д. Д., Зуева А. А., Кочнева Л. В. Влияние цифровых решений на обеспечение безопасности в горной промышленности	239
Егоров И. Д. Обзор современных методов снижения повышенного уровня шума и содержания пыли на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса	243

Егоров И. Д. Анализ методов снижения запыленности воздуха на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса.....	246
Зуева А. А., Булавка Ю. А. Оценка профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов на территории НПЗ.....	249
Кузьменок И. Н., Булавка Ю. А. Предупреждение аварий при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях	253
Красноухова Д. Ю. Исследование влияний психофизиологического состояния работников на реализацию травмоопасных ситуаций	257
Мелешенко Е. Э. Наряд-допуск как конечный детерминированный автомат	260
Ниязов А. Р. Устойчивое управление безопасностью труда в электроэнергетике: стратегия предупреждения несчастных случаев	263
Попович Е. В. Эмоциональный интеллект и soft skills, их роль для работников экстремальных профессий	267
Чешагорова Ю. Б. Несовершенство действующего федерального законодательства по охране труда по отношению к областным субъектам пожарной охраны	271
Секция 7. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ПРИРОДООХРАННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ПРИНЦИПЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА	274
Казаков Е. С. Анализ последствий аварии на сети водоотведения вблизи Коркинской промагglomерации.....	274
Кузнецова Я. А., Антонинова Н. Ю. Разработка комплекса мероприятий по биоремедиации почв и техногенных грунтов, загрязненных тяжелыми металлами	279
Мельникова А. С. Экологически устойчивый сорбент для ликвидации нефтяных загрязнений в горной промышленности	283
Пашкевич М. А., Гейдарова В. Р. Необходимость восстановления территорий экологических катастроф, сформировавшихся при разработке месторождений сульфидных руд.....	286
Пашкевич М. А., Панин Н. Е. Направление утилизации и переработки отходов нефтеперерабатывающей промышленности	289
Проказов Н. Д. Применение модифицированного бентонита для усовершенствования технических средств очистки сточных вод урбанизированных центров	293
Стрелкова Ю. Ю. Выявление геохимической аномалии в донных отложениях Карабашского пруда	297
Щербакова Е. С. Оценка нарушенности экосистем Авачинского перевала с использованием натуралистических наблюдений и ГИС-технологий	300
Яковлев Н. М., Смирнов Ю. Д. Оценка применимости озерного сапропеля для улучшения экологической обстановки в горнодобывающем районе	304
Секция 8. ПРИКЛАДНАЯ ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА, ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА	307
Востриков Н. Н., Яшмолкин А. М., Логинов А. В. Уточнение геологического строения и перспектив нефтегазоносности продуктивных ниже-среднемиоценовых отложений северо-западной части листа М-55 Охотоморской нефтегазоносной провинции с использованием алгоритмов машинного обучения	307
Дашко Р. Э., Колосова Д. Л. Применение ядерно-магнитного резонанса при совершенствовании гипотезы фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов и анализе длительной устойчивости сооружений.....	310
Залевский Я. О. Оценка результатов определения пористости пород-коллекторов лабораторным методом ядерного-магнитного резонанса и ядерного-магнитного каротажа скважин	314
Медина Хименес Хуан Пабло, Игнатов П. А. Фреатомагматические брекчии месторождения Au-Ag Тунанца-Эквадор, изменения физических свойств.....	317

Назарова А. А. Диагенетическая доломитизация как ключевой фактор изменения фильтрационно-емкостных свойств карбонатных отложений Северо-Останинского месторождения (Томская область).....	320
Никитенкова А. В. Гидрогеологические особенности эксплуатации месторождений подземных вод юга Восточной Сибири (на примере Хакасии и Красноярского края)	324
Поспехов Г. Б., Изотова В. А. Инженерно-геологическая характеристика гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты в связи с их складированием.....	327
Романов П. А. Оценки потенциала нефтегазоматеринских пород по результатам геохимических исследований Южно-Каспийского бассейна.....	331
Токарева Д. А. Анализ пространственного распределения геолого-промышленных параметров северо-западного фланга Новороссийского IV месторождения цементных мергелей (Краснодарский край).....	335
Устюгов Д. Л., Ноа Сегура Э. Л., Мила Дома Ю. Анализ уровней подземных вод на основе методов машинного обучения на примере гидрогеологического бассейна Ла Яна (Республика Куба).....	340

Секция 1.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

УДК 622.276.53

Бельков Федор Игоревич*
Федуров Дмитрий Сергеевич
ПНИПУ, Пермь, Россия
* fedechka.belkov@mail.ru

Экспериментальная установка для имитации подъема механических примесей в нефтедобывающей скважине

Аннотация. В рамках исследования были изучены процессы, происходящие на забое нефтяной скважины, эксплуатация которой затруднена из-за выноса механических примесей. Для мониторинга процесса выноса механических частиц была сконструирована экспериментальная установка, которая моделирует движение многофазной среды в стволе скважины. В результате проведенного исследования было установлено, что пузырьки газа способствуют увеличению выноса механических примесей. Также было зафиксировано, что пузырьки газа объединяются в кластеры, содержащие от двух до двадцати пузырьков, в зависимости от интенсивности подачи газа.

Ключевые слова: механические примеси, вынос песка, пузырьки газа, частицы песка, экспериментальная установка.

Fedor I. Belkov*
Dmitry S. Fedurov
PNRPU, Perm, Russia
* fedechka.belkov@mail.ru

An experimental installation for simulating the rise of mechanical impurities in an oil well

Abstract. The study examined the processes occurring at the bottom of an oil well, the operation of which is hampered by sand production. An experimental setup was designed to monitor the sand transport process, which simulates a multiphase flow in the wellbore. The study found that gas bubbles contribute to an increase in sand transport. It was also recorded that gas bubbles are combined into clusters containing from two to twenty bubbles, depending on the gas flow rate.

Keywords: mechanical impurities, sand production, gas bubbles, grains of sand, experimental installation.

При эксплуатации скважин вне зависимости от обводненности потока движение жидкости по стволу скважины от интервала перфорации до глубинно-насосного оборудования описывается капельно-пузырьковой структурой, где внешней фазой обычно является вода, а нефть и газ всплывают в виде отдельных капель и пузырьков.

Пузырьки газа и капли нефти могут влиять на подъем механических частиц при их всплытии в потоке жидкости.

Для исследования процесса подъема механических примесей в скважине была создана экспериментальная установка. Моделью скважины служит труба из органического стекла, надежно зафиксированная на стенде. Через слой механических примесей (песка) в трубу подаются вода и газ. Пузырьки газа, проходя через слой песка, захватывают и поднимают механические примеси, после чего вода выливается из трубы в емкость

с фильтрационным диском, закрепленную на штативе. Схема установки представлена на рисунке 1. Фотография установки представлена на рисунке 2.

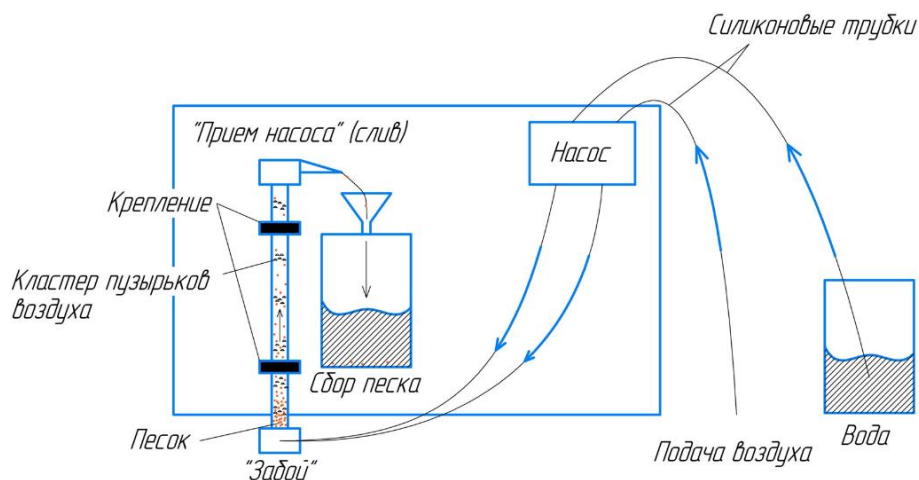


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки в сборе (в положении 45°)

В ходе проведения экспериментов с подачей газа в трубу через слой механических примесей было зафиксировано следующее:

1. В условиях, при которых эффекты поверхностного натяжения и вязкости жидкости пренебрежимо малы, а изолированные пузырьки газа достаточно большие, их скорость всплытия в вертикальной трубе можно определить по формуле Дэвиса и Тейлора (Davies and Taylor's) [1]:

$$u = 0,707\sqrt{gd}$$

Зависимость скоростей пузырька от его диаметра представлена на рисунке 3.

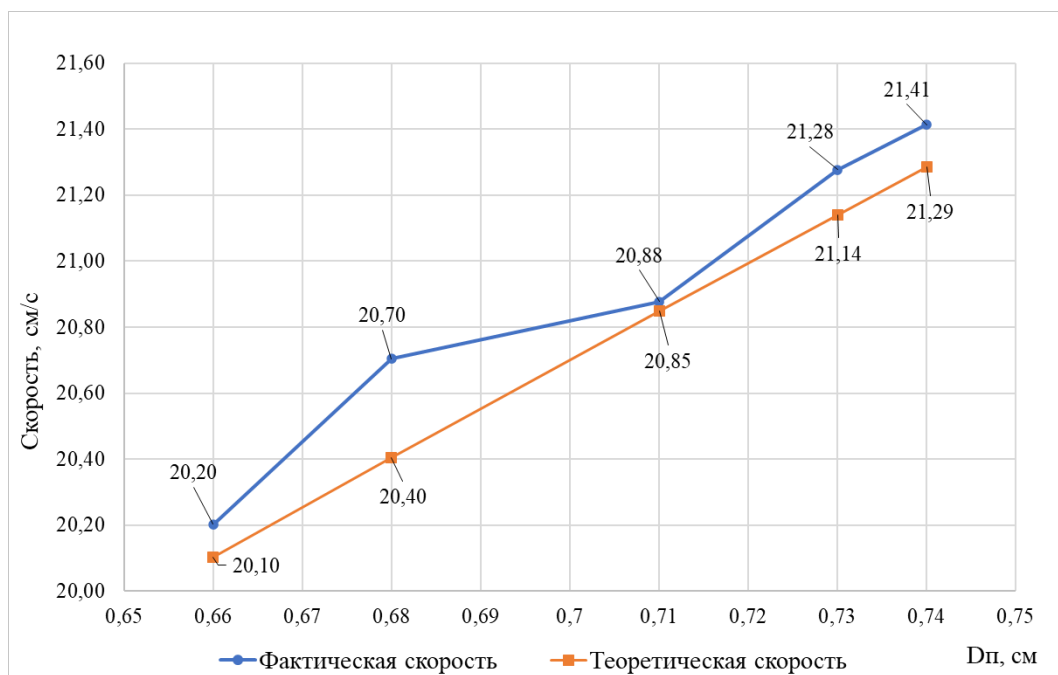


Рисунок 3. Зависимость скорости пузырька от его диаметра

2. Пузырьки газа по мере продвижения по трубе собираются в кластеры от двух до двадцати пузырьков в зависимости от интенсивности подачи газа в трубу (рисунок 4).



Рис. 4. Движение пузырьков кластерами
(от минимальной подачи газа до максимальной – слева на право)

Процесс формирования пузырьковых кластеров подробно описан в работе Озерова А. Ю. [2]. Автор полагает, что кластерный режим характерен не только для вулканических процессов; его следует рассматривать как отдельный режим в области физики газожидкостных смесей. Это относится, например, к природным объектам

(гидротермальные системы и грязевой вулканизм), а также к моделированию скважин (как гидротермальных, так и нефтяных) и к химической промышленности.

Также в ходе исследований был изучен процесс слияния пузырьков в единый кластер. Средняя скорость догоняющего кластера в момент присоединения в среднем в 1,5 раза превышает скорость отдельно идущего кластера (рисунок 5).

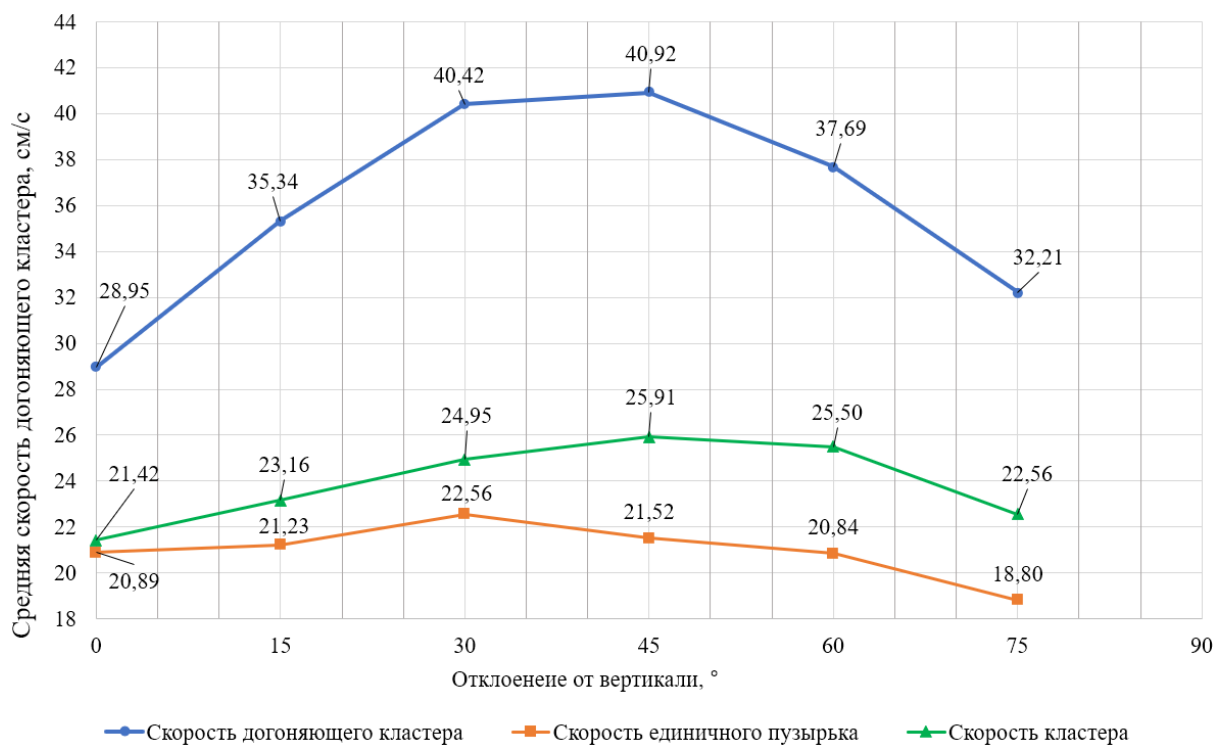


Рис. 5. Зависимость средней скорости догоняющего кластера, кластера и единичного пузырька от угла наклона трубы

3. При проходе газа через слой песка на дне трубы, независимо от объема подаваемого газа и изначальной формы пузырьков, они растягиваются в горизонтальном направлении и приобретают дисковидную форму. Их диаметр составляет от 0,5 до 1,5 см. (рисунок 6).

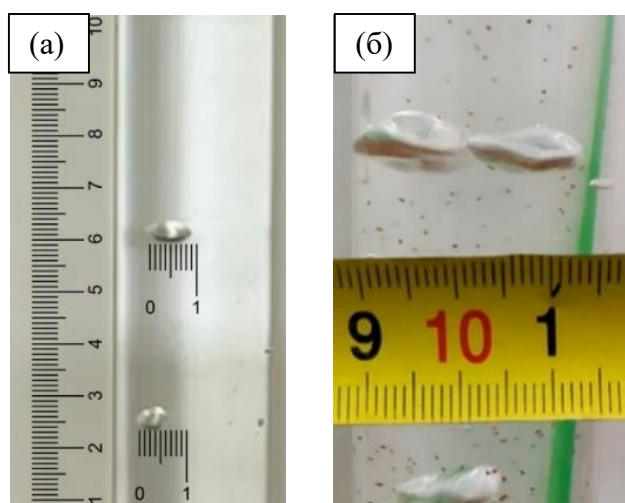


Рис. 6. Размер пузырьков до прохождения через слой песка (а) и после (б)

4. Пузырьки газа способны подхватывать частицы песка и выносить их на прием насоса (Рисунок 7). Концентрация вынесенного песка представлена на рисунке 8.

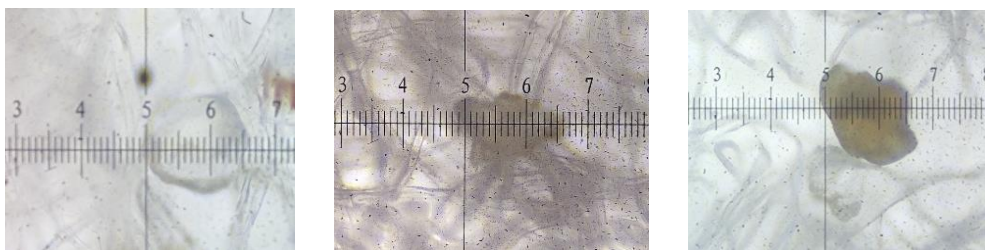


Рис. 7. Частицы, попавшие на фильтрационный диск (деление малой шкалы 10 мкм)

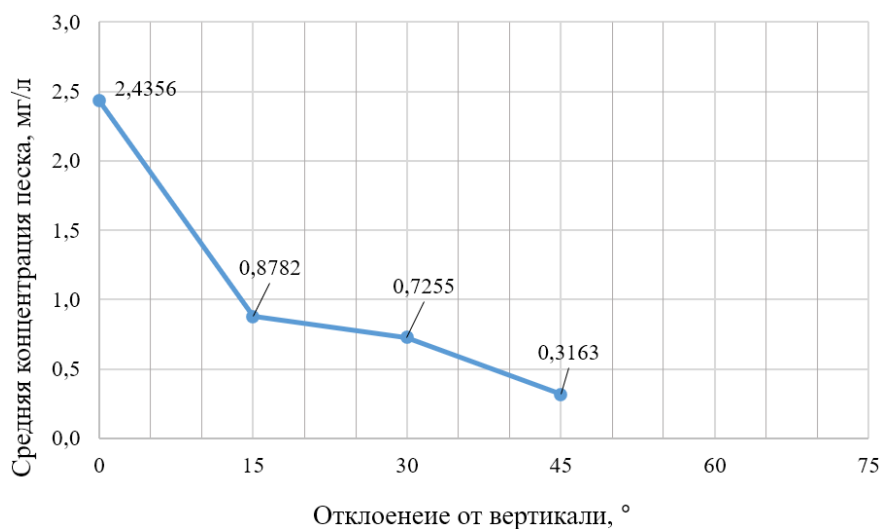


Рис. 8. Концентрация вынесенного песка

В ходе экспериментов с использованием экспериментальной установки было обнаружено, что пузырьки газа имеют дисковидную форму и их диаметр составляет от 0,5 до 1,5 см. Пузырьки газа объединяются в кластеры, количество пузырьков в одном кластере варьируется от 2 до 20 в зависимости от интенсивности подачи газа. Отмечено, что пузырьки газа способны захватывать частицы песка и поднимать их к приему насосных установок. Наибольшая концентрация вынесенного песка наблюдается в вертикальном положении. С увеличением угла наклона концентрация песка снижается.

Список литературы

1. R. M. Davies and G. I. Taylor, "The mechanics of large bubbles rising through liquids in tubes", Proc. of Roy. Soc., London, 200, Ser. A, pp. 375-390, 1950.
2. Ozerov A. Yu. (2009) Cluster Regime – The New Regime Of Flowing Of Gas-Liquid Mixture In Vertical Columns (Based On Experimental Data) // 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Xi'an, China, 11–15 July 2009. pp. FG-30.

Научный руководитель: Кожевников Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, Пермь, Россия.

Валиуллина Вилена Ильшатовна*

Галеев Рушан Ринатович

Мусин Айрат Ахматович

Ковалева Лiana Ароновна

УУНУТ, Уфа, Россия

* valiullina.vilena@mail.ru

Экспериментальное исследование влияния электромагнитного поля на течение дисперсных систем в пористых средах

Аннотация. Одним из основных источников энергии в современном мире является нефть. Ввиду того, что роль тяжелой нефти в общих запасах органического сырья возрастает, добыча такой нефти является актуальной задачей. Целью настоящего исследования является подобрать оптимальные параметры для успешной транспортировки нефти в пористой среде. Это важно для повышения эффективности разработки месторождений углеводородов.

Ключевые слова: фильтрация, вязкость, неоднородное электромагнитное поле, дисперсные системы, пористые среды.

Vilena I. Valiullina*

Rushan R. Galeev

Airat A. Musin

Liana A. Kovaleva

UUST, Ufa, Russia

* valiullina.vilena@mail.ru

An experimental study on the electromagnetic fields effect on the flow of dispersed systems through porous media

Abstract. One of the primary sources of energy in the modern world is oil. As the role of heavy crude oil in the overall reserves of organic raw materials increases, the extraction of this oil has become a critical task. The aim of this study is to determine the optimal parameters for successful oil transportation in a porous medium, which is essential for enhancing development efficiency.

Keywords: filtration, viscosity, inhomogeneous electromagnetic field, dispersed systems, porous media.

В настоящее время нефть является одним из важнейших источников энергии. Добыча высоковязкой нефти является важной практической задачей, поскольку запасы таких месторождений значительны, а их роль в общих запасах органического сырья постоянно возрастает. Такая нефть представляет собой суспензию асфальтеновых коллоидов, стабилизированных смолами [1], что приводит к необычному поведению тяжелой нефти, протекающей по трубам и пористым средам [2–3]. Как правило, тяжелая нефть представляет собой разновидность неньютоновской жидкости и относится к бингамовской жидкости. Это мнение подтверждено многими экспериментальными данными [4]. Но реологические характеристики тяжелой нефти зависят от температуры окружающей среды. Это может быть ньютоновская жидкость с более высокой температурой. Из-за высокой вязкости нефти, а также из-за частого засорения призабойной зоны скважины отложениями коллоидных поверхностно-активных компонентов добыча нефти становится возможной только после предварительной термической обработки пласта. Так, в статье [5] с помощью экспериментов были изучены характеристики протекания через капиллярную и пористую среду различных видов тяжелой нефти при различных температурах. Показано, что тяжелая нефть, содержащая асфальтеновые коллоиды, обладает реологическими свойствами предела текучести (жидкости Бингама). Но обработка горячим паром или горячей жидкостью не всегда эффективны. Более того, их широкое

применение может привести к серьезным экологическим последствиям в виде нарушений гидрогеологической обстановки. Одним из перспективных методов термической обработки является электромагнитный нагрев продуктивных пластов [6]. Благодаря глубокому проникновению и объемному тепловыделению, а также отсутствию теплоносителя, электромагнитное излучение может обеспечить по сравнению с традиционными методами высокую скорость и равномерность нагрева, возможность оптимального управления и автоматизации технологических процессов, практически исключить вредное воздействие на окружающую среду [7].

В работе [8] рассматривается влияние высокочастотных электромагнитных полей и электрического нагрева на процессы массо- и теплопередачи в многокомпонентной углеводородной системе, протекающей в пористых средах. Были выявлены критические параметры, такие как снижение вязкости, которые влияют на извлечение тяжелой нефти под воздействием этих вариантов нагрева. Было замечено, что высокочастотное электромагнитное поле воздействует на полярные компоненты нефти, десорбируя их с поверхности породы и увеличивая добычу. Эта важнейшая роль радиочастотного поля в процессе адсорбции при вытеснении высоковязких нефтей в конечном итоге привела к меньшему осаждению асфальтенов и закупориванию пор.

Для исследования влияния электромагнитного поля (ЭМП) на течение дисперсных систем была собрана экспериментальная установка (рис. 1а), которая состояла из компрессора Fubag OL231/24, создающего давление воздуха, подключенного к нему контроллера давления Parker для поддержания постоянного давления в ресивере с жидкостью, экспериментальной ячейки, дренажной емкости, аналитических весов AND GR-200 с выводом информации и графиков на ПК, генератора высокочастотного поля Tabor 9100 amplifier (Tabor Electronics Ltd.) и термостата LIOP LT-117b, в который были помещены экспериментальная ячейка и ресивер для поддержания определенной температуры во время проведения эксперимента.

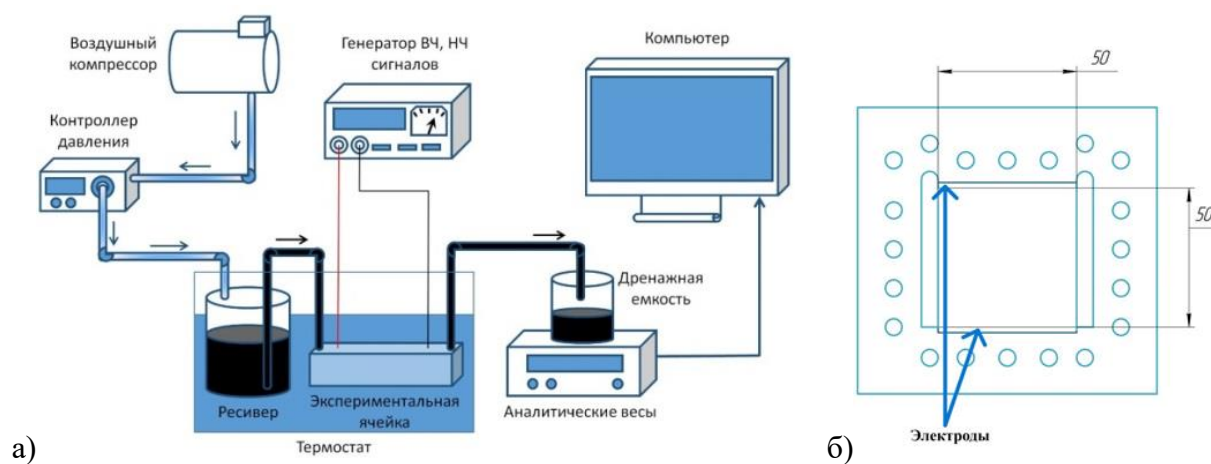


Рис. 1. Экспериментальная установка (а) и ячейка (б)

Основным элементом установки была экспериментальная ячейка, которая представляла собой насыпную модель (рис. 1б). Расположение электродов в ячейке было направлено вдоль потока фильтрации жидкости, при этом вектор напряженности электрического поля был направлен перпендикулярно вектору скорости фильтрации.

В ресивер для жидкости заливался исследуемый образец и погружался вместе с экспериментальной ячейкой в термостат. Эксперимент проводился при $t = 20 \div 60^\circ\text{C}$ с шагом 10°C . В ресивер с жидкостью от компрессора через регулятор давления подавался воздух. В данном эксперименте использовалось три перепада давления $p = 5, 10$ и 15 кПа.

Воздух вытеснял жидкость из ресивера, и она текла через ячейку в дренажную емкость, которая была установлена на весы. В момент начала эксперимента также включался генератор частот, который был подключен к электродам ячейки.

Предварительно были проведены исследования частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta'$ эмульсии для определения частоты воздействия, исходя из чего, была подобрана частота $f=5\text{МГц}$ и напряжение электрического поля $U=50\text{В}$. При заданном давлении была проведена фильтрация жидкости через каждую из ячеек. Результаты были получены с использованием программы RSWeight. Построены кривые, описывающие расход жидкости в зависимости от давления (рис. 2). Проанализировано влияние высокочастотного поля на расход жидкости через фильтрационную область.

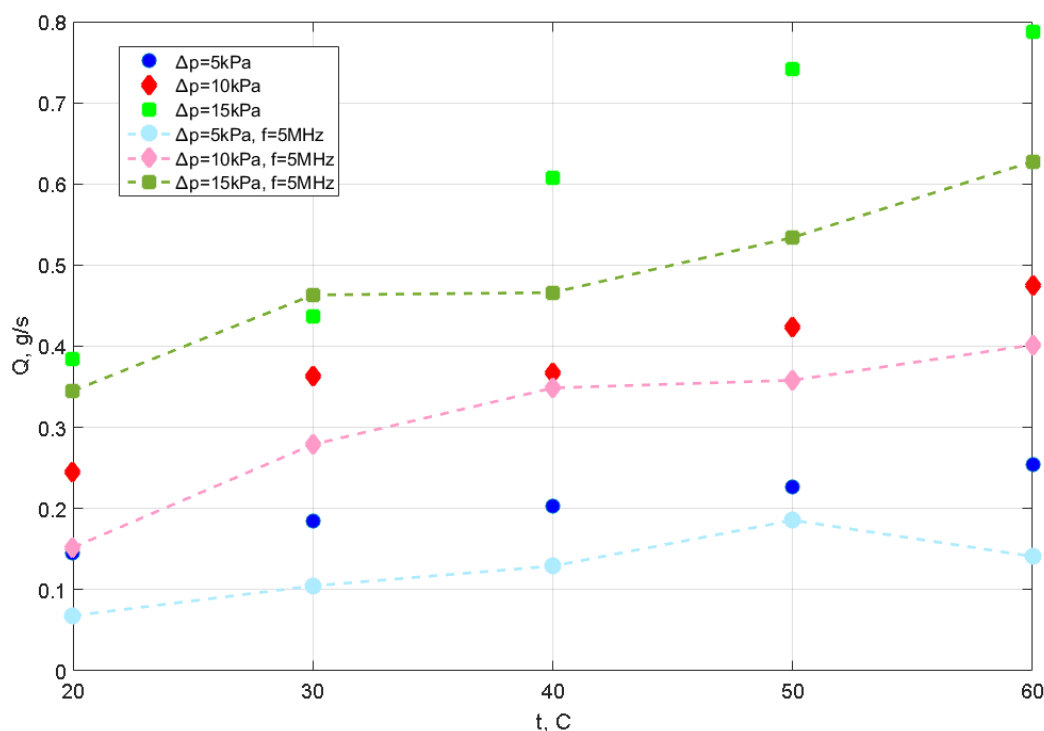


Рис. 2. Изменение расхода жидкости от температуры: маркеры – без воздействия; пунктирные линии – в присутствии ЭМП

Из рис. 2 видно, что воздействие поля привело либо к незначительному увеличению расхода, либо к его уменьшению в сравнении с фильтрацией без воздействия поля. Принимая во внимание конструктивные особенности микромоделей можно предположить, что причиной стало действие диэлектрофоретических сил на полярные компоненты нефти. Также можно увидеть, что при увеличении перепада давления значение расхода под воздействием поля уменьшается, можно предположить, что данное явление происходит из-за возникновения эффекта запираания. Показано, что влияние диэлектрофоретических сил и эффекта запираания увеличивается при повышении содержания полярных компонент в нефти.

Таким образом, в ходе эксперимента обнаружено, что при расположении электродов, при котором вектор напряженности электрического поля направлен поперек направлению фильтрации наблюдается снижение расхода, что объясняется возникновением диэлектрофоретических сил, препятствующих фильтрации. Выявлено, что при нахождении частоты поля в области поляризации полярных компонент нефти все наблюдаемые эффекты от действия поля усиливаются. Воздействие диэлектрофоретических сил и эффекта запираания усиливается при увеличении содержания полярных компонент в нефти,

что необходимо учитывать и уметь контролировать при создании новой электромагнитной технологии разработки месторождения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-20042.

Список литературы

1. Mullins O. C., Sheu E. Y. (ed.). Structures and dynamics of asphaltenes. – Springer Science & Business Media, 2013.
2. Hasan S. W., Ghannam M. T., Esmail N. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation //Fuel. – 2010. – Т. 89. – №. 5. – С. 1095–1100.
3. Luo P., Gu Y. Characterization of a heavy oil–propane system in the presence or absence of asphaltene precipitation //Fluid Phase Equilibria. – 2009. – Т. 277. – №. 1. – С. 1–8.
4. Evdokimov I. N., Eliseev N. Y., Eliseev D. Y. Rheological evidence of structural phase transitions in asphaltene-containing petroleum fluids //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2001. – Т. 30. – № 3–4. – С. 199–211.
5. Liu H. et al. Flow characteristics of heavy oil through porous media //Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2011. – Т. 34. – №. 4. – С. 347–359.
6. Mukhametshina A., Martynova E. Electromagnetic heating of heavy oil and bitumen: a review of experimental studies and field applications //Journal of Petroleum Engineering. – 2013. – Т. 2013. – № 1. – С. 476519.
7. Sysoev S., Kislitsin A. Modeling of microwave heating and oil filtration in stratum // Numerical Simulations–Applications, Examples and Theory. – 2011. – С. 237–250.
8. Kovaleva L. et al. Effects of electrical and radio-frequency electromagnetic heating on the mass-transfer process during miscible injection for heavy-oil recovery //Energy & fuels. – 2011. – Т. 25. – № 2. – С. 482–486.

Научный руководитель: Ковалева Лиана Ароновна, д.т.н., профессор, УУНУТ, Уфа, Россия.

Воронцов Андрей Алексеевич*

Коробов Григорий Юрьевич

Буслаев Георгий Викторович

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

Санкт-Петербург, Россия,

** andrey-vorontsov98@yandex.ru*

Ингибирование добывающей скважины в условиях образования АСПО и газовых гидратов

Аннотация. Данная работа посвящена проблеме ингибирования добывающих скважин при образовании асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) и газовых гидратов в внутрискважинном оборудовании. Особое внимание уделено использованию химических реагентов-ингибиторов для борьбы с АСПО и газовыми гидратами. В частности, в работе представлены лабораторные исследования поверхностно-активных веществ (ПАВ), используемых в качестве ингибитора АСПО. Производится подбор наиболее эффективного ингибитора для выбранных скважинных условий, также анализируется влияние выбранного ПАВ на процесс гидратообразования. Работа включает практические рекомендации по выбору оптимальной технологии ингибирования для конкретных условий.

Ключевые слова: асфальтосмолопарафиновые отложения, газовый гидрат, условия гидратообразования, поверхностно-активные вещества, ингибиторы АСПО, холодный стержень, время нуклеации газогидратов.

Andrey A. Vorontsov*

Grigory Yu. Korobov

Georgiy V. Buslaev

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,

St. Petersburg, Russia

** andrey-vorontsov98@yandex.ru*

Inhibition of a producing well under conditions of ARPD and gas hydrate formation

Abstract. This paper is devoted to the problem of inhibition of production wells in the formation of asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD) and gas hydrates in downhole equipment. Special attention is paid to the use of chemical reagents-inhibitors to combat ARPD and gas hydrates. In particular, the paper presents laboratory studies of surfactants used as ARPD inhibitors. The selection of the most effective inhibitor for the selected well conditions is made, also the influence of the selected surfactant on the hydrate formation process is analyzed. The work includes practical recommendations for selecting the optimal inhibition technology for specific conditions.

Keywords: asphalt-resin-paraffin deposits, gas hydrate, hydrate formation conditions, surfactants, ARPD inhibitors, cold rod, gas hydrate nucleation time.

Введение. Проблема образования асфальтосмолопарафиновых отложений и газовых гидратов является одной из наиболее актуальных задач в области добычи нефти и газа, в частности эксплуатации добывающих скважин в условиях Крайнего Севера. Образование данных отложений на стенках оборудования может существенно снижать производительность добывающих скважин, приводить к аварийным ситуациям и увеличивать затраты на эксплуатацию оборудования. В связи с этим разработка эффективных методов ингибирования таких процессов становится ключевым направлением исследований в нефтегазовой отрасли.

Асфальтосмолопарафиновые отложения образуются вследствие выпадения тяжелых углеводородных компонентов из нефти при снижении температуры и давления

в процессе ее подъема по стволу скважины [1]. Газовые гидраты, в свою очередь, формируются при определенных термобарических условиях из молекул воды и легких углеводородов, образуя твердые кристаллические структуры, способные блокировать трубопроводы и оборудование [2].

Образование агломераций газовых гидратов и АСПО в единую структуру значительно осложняет эксплуатацию нефтедобывающих скважин. В исследовании [3] предложена усовершенствованная концепция формирования гидратных зародышей в условиях присутствия АСПО и ПАВ, функцию которых могут выполнять асфальтены. Полученные результаты показывают следующее:

1. Время нуклеации молекул газового гидрата увеличивается в присутствии АСПО или ПАВ.

2. Молекулы АСПО препятствуют массопереносу между молекулами гидрата.

3. При наличии АСПО без ПАВ в системе объем отложений гидрата возрастает. Это объясняется тем, что молекулы АСПО внедряются в структуру агломератов газового гидрата, что дополнительно затрудняет последующее разрушение этих образований.

Целью исследования является определение наиболее подходящего ингибитора для заданных условий, что позволит минимизировать риски, связанные с образованием АСПО, и одновременно контролировать процесс гидратообразования. Объект исследования – ингибиторы АСПО. Предмет исследования – влияние подобранного ингибитора на процесс образования АСПО и газовых гидратов.

Методы. В данной работе анализируется работа добывающей нефтяной скважины на нефтегазоконденсатном месторождении. Газогидраты образовывались изначально в данной скважине, что потребовало применение метилового спирта в качестве ингибитора гидратообразования. Однако, в процессе разработки месторождения и эксплуатации скважины было установлено, что на стенках внутрискважинного оборудования также образуются АСПО. Соответственно, образовалась необходимость в подборе ингибитора АСПО с учетом геолого-физических характеристик. Далее представлены основные этапы подбора ингибитора с учетом выделенных особенностей эксплуатации добывающей скважины

В рамках данного исследования рассматривалось 6 марок ингибиторов, включающих в себя поверхностно-активные вещества. Для сохранения конфиденциальности, их наименования заменяются условными обозначениями.

На начальном этапе анализа проводилось лабораторное тестирование влияния концентрации растворов ПАВ на межфазное натяжение на границе раздела «дистиллированная вода – модельная нефть». В качестве модельной нефти использовался 7 %-ный раствор парафина в керосине. Оптимальная концентрация ПАВ в водной среде определялась в соответствии с ГОСТ 29232-91 «Определение критической концентрации мицеллообразования» методом падающей капли с применением автоматизированного устройства для измерения угла смачивания и поверхностного/ межфазного натяжения (система анализа формы капли) EASYDROP[4].

Для последующей оценки эффективности ингибирующих свойств исследуемых составов ПАВ и выбора оптимальной композиции проводились испытания по методике «холодного стержня» [5]. В ходе экспериментов фиксировались массы отложений на «холодном стержне» в зависимости от концентрации ингибитора в системе. Оценка эффективности ингибирования осуществлялась путем сравнения масс отложений до и после введения ингибирующего агента:

$$\mathcal{E} = \frac{M_1 - M_2}{M_1}, \%$$

где M_1 – масса отложений без ингибитора, г; M_2 – масса отложений с добавлением ингибитора.

Следующий этап исследования заключается в оценке влияния добавки данного ингибитора на условия гидратообразования. Эксперимент состоит из трех этапов:

1. В автоклаве PSL GAS HYDRATE AUTOCLAVE GHA-350 исследуются условия гидратообразования при наличии в системе чистой воды и керосина;
2. Во второй раз исследуется «модельная нефть» с чистой водой;
3. Заключительный этап состоит в исследовании системы, состоящей из модельного раствора и раствора ингибитора АСПО (0,055 % раствор ингибитора Составы №6).

Эффективность ингибирования гидратообразования будет оцениваться по степени охлаждения ($^{\circ}\text{C}$), которые показывает разницу между температурой, которую достиг раствор перед активным гидратообразованием, и равновесной температурой гидратообразования. Чем этот показатель больше, тем лучше кинетически ингибируется смесь.

Результаты. В результате эксперимента на установке EASYDROP были получены зависимости поверхностного натяжения от концентрации каждого ингибитора, см. рисунок 1.

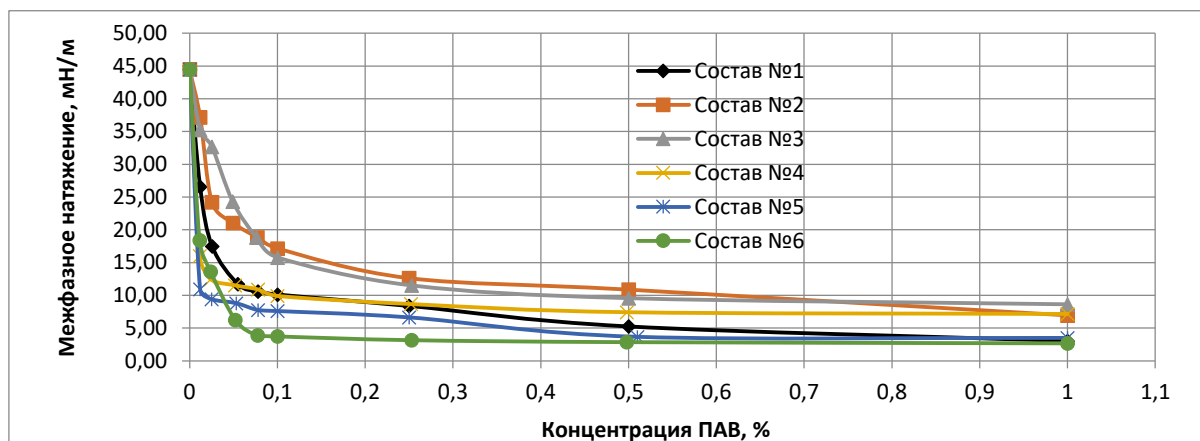


Рис. 1. Значение межфазного натяжения в зависимости от массовой концентрации ПАВ в воде

В ходе анализа полученных результатов было выделено два ингибитора, обладающие наилучшими результатами. Это Состав №5 и Состав №6. Состав №5 А достигает критической концентрации мицеллообразования при наименьших концентрациях раствора – 0,025 % масс. Состав №6, в свою очередь, сильнее всех других ингибиторов снижает межфазное натяжение – на 91 %, межфазное натяжение при критической концентрации мицеллообразования составляет 3,89 мН/м.

Результаты исследования на «холодном стержне» представлены на рисунке 2.

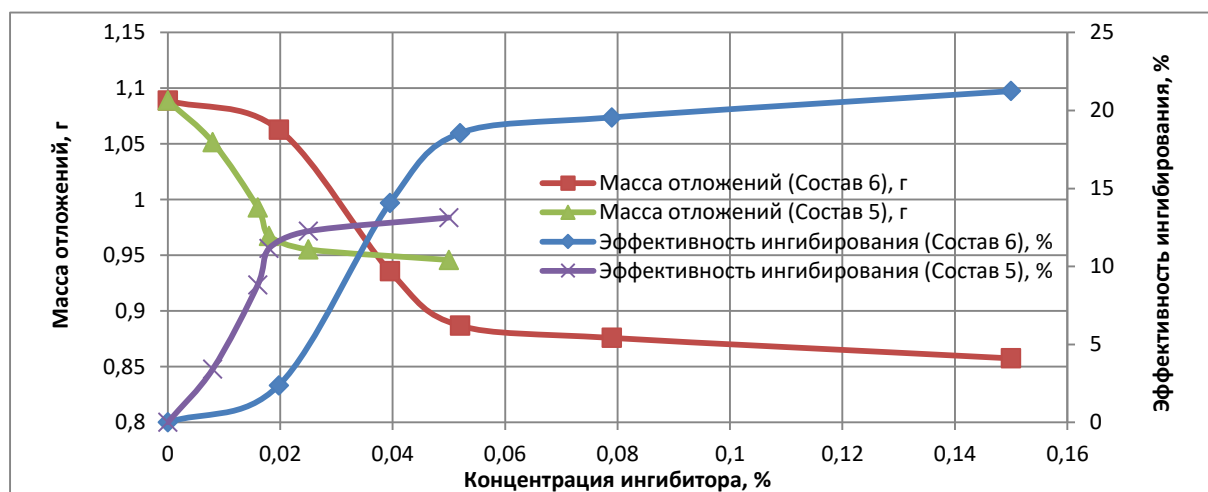


Рис. 2. Сравнение эффективности ингибирования двух представленных составов

В результате сравнительного анализа был сделан вывод, что наиболее эффективным в данных условиях будет ингибитор Состав №6. Необходимая оптимальная концентрация данного ПАВ составляет 0,055 %.

На рисунке 3 представлена диаграмма, полученная в ходе заключительного эксперимента в гидратном автоклаве.

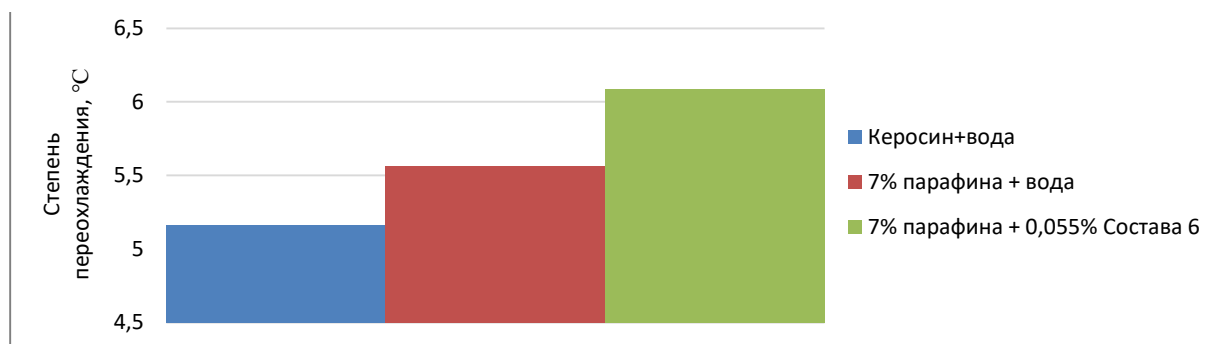


Рис. 3. Зависимость степени переохлаждения гидратообразования в зависимости от химического состава жидкостей

Добавление к системе ингибитора Составы №6 в концентрации 0,055 % приводит к увеличению времени нуклеации газовых гидратов. Степень переохлаждения увеличивается на 9,8 % относительно состава без ПАВ, на 18,3 % – состава без ПАВ и парафина.

Заключение. В ходе представленного исследования получены следующие выводы и результаты:

1. Представлена методика лабораторных исследований при подборе состава ПАВ в качестве ингибитора АСПО с учетом образования в скважине не только парафиновых отложений, но и кристаллогидратов.

2. Произведен подбор ингибитора по представленной методике. Выбран Состав №6 в концентрации 0,055 %, достаточной для выноса тяжелых компонентов нефти.

3. Добавление данного ПАВ в систему ингибирования скважины позволяет увеличить время нуклеации газового гидрата и снизить риски образования гидратных пробок в подземном скважинном оборудовании, что значительно упрощает борьбу с ними. Анализ зависимостей позволяет модернизировать схему дозировки ингибитора гидратообразования с заправки его в затрубное пространство на добавление его уже в наземное оборудование, промышленные трубопроводы, непосредственно возле устья скважины.

Таким образом, результаты работы подтверждают перспективность использования химических ингибиторов на основе ПАВ для предотвращения АСПО и управления процессом гидратообразования.

Список литературы

1. Ilyushin P. Y., Vyatkin K. A., Kozlov A. V. Development of a Method for Estimating Thermal Conductivity of Organic Deposits on the Wax Flow Loop Laboratory Installation // Int. J. Eng. 2022. Vol. 35, № 6. P. 1178–1185.
2. Gao Q. et al. Influence of the memory effect during CO₂/CH₄ mixed gas hydrate reformation process // Fuel. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 353, № July. P. 129249.
3. Tong S. et al. Promotion and inhibition effects of wax on methane hydrate formation and dissociation in water-in-oil emulsions // Fuel. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 337, № October 2022. P. 127211.
4. Sandyga M. S., Struchkov I. A., Rogachev M. K. Formation damage induced by wax deposition: laboratory investigations and modeling // J. Pet. Explor. Prod. Technol. Springer International Publishing, 2020. Vol. 10, № 6. P. 2541–2558.
5. Chi Y., Daraboina N., Sarica C. Effect of the Flow Field on the Wax Deposition and Performance of Wax Inhibitors: Cold Finger and Flow Loop Testing // Energy Fuels. 2017. Vol. 31, № 5. P. 4915–4924.

Научный руководитель: Коробов Григорий Юрьевич, к.т.н., доцент каф. РНГМ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Лабораторное определение зависимости проницаемости глинизированных песчаников от эффективного давления

Аннотация. Основные параметры пластов и скважин меняются на протяжении разработки месторождений нефти. Оценка и прогнозирование таких параметров, как проницаемость и пластовое давление, напрямую связаны с повышением эффективности процесса добычи нефти и увеличения нефтеотдачи. Целью данного исследования являлось определение зависимости проницаемости породы-коллектора от эффективного давления. Проведение лабораторных исследований позволило составить рекомендации по разработке месторождений нефти.

Ключевые слова: проницаемость, фильтрация, эффективное давление.

Daniil A. Karmanskiy
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
karmanskiy.da@yandex.ru*

Laboratory determination of the dependence of clayey sandstones permeability on effective pressure

Abstract. The main parameters of reservoirs and wells change during the development of oil fields. Evaluation and forecasting of such parameters as permeability and reservoir pressure are directly related to increasing the efficiency of the oil production process and increasing oil recovery. The purpose of this study was to determine the dependence of reservoir rock permeability on effective pressure. Conducting laboratory studies made it possible to draw up recommendations for the development of oil fields.

Keywords: permeability, filtration, effective pressure.

Постоянное истощение запасов углеводородного сырья эксплуатируемых месторождений ставит перед инженерами задачу повышения эффективности добычи нефти и вовлечения в разработку месторождений с нетрадиционными запасами нефти. В таких условиях становится важным использовать весь потенциал пласта на протяжении всего срока эксплуатации месторождения нефти.

Строительство горных выработок и вскрытие продуктивных пластов сопровождается изменением напряжений в горной породе, пребывавшей в течение продолжительного периода времени в состоянии устойчивого равновесия. Изменение напряжений вокруг нефтяных и газовых скважин проявляются в виде деформации пласта, снижении проницаемости и пористости в призабойной зоне. Снижение проницаемости в призабойной зоне напрямую сказывается на эффективности добычи нефти и достижении проектных показателей разработки месторождения, тогда как деформации коллектора в призабойной зоне вызывают постепенное разрушение породы, смятие обсадных колонн и разрушение цементного камня. Напряженное состояние пласта описывается эффективным давлением [1–3]:

$$p_{эф} = p_r - np_{пл}$$

где p_r – горное давление, создаваемое вышележащими породами, МПа; $p_{пл}$ – пластовое давление, создаваемое насыщающими породу жидкостями и газами, МПа; n – коэффициент Био, показывающий, какая часть пластового давления участвует в разгрузке горного давления [4–5].

Из уравнения видно, что снижение пластового давления, вызываемое процессом разработки месторождения нефти, приводит к росту эффективного давления. В большинстве случаев значения пластового давления, при котором эксплуатируется залежь, опускаются ниже первоначальных, что приводит к снижению фильтрационного потенциала пласта и росту механической нагрузки на коллектор. Необходимость определения зависимостей фильтрационных свойств от эффективного давления тесно связана с повышением сложности и стоимости разработки нефтяных месторождений, а также с необходимостью увеличения коэффициента нефтеотдачи пластов. Несмотря на значительное количество исследований проницаемости различных пород-коллекторов [6–8], для обеспечения высокой степени достоверности предлагаемых рекомендаций необходимо определение свойств пород для каждого конкретного случая.

Эксперименты проводились на лабораторной базе Санкт-Петербургского горного университета. Для проведения испытаний использовалась сервогидравлическая система RTR 1500. Испытательная система позволяет создавать боковое и поровое давление до 70 МПа и осевую нагрузку до 1500 кН. Система оснащена оборудованием для проведения фильтрационных испытаний. Перед испытанием образцы насыщались пресной водой. В процессе испытания в качестве фильтрующей жидкости также использовалась пресная вода. В качестве материала для эксперимента были использованы мелкозернистые песчаники с глинистым цементом. Состав породы: полевые шпаты (45–50 %), кварц (35–40 %), а также кремнистые, кварцевые, кварц-слюдистые и эффузивные разности (около 15 %). Пористость образца 1–17 %, пористость образца 2–10 %.

Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 1. Для всех испытанных образцов увеличение эффективного давления приводит к снижению проницаемости. Это объясняется тем, что в процессе роста нагрузки на образец начинается рост деформаций образца. Существующие фильтрационные каналы, поры и каверны смыкаются, уменьшается общая площадь поперечного сечения фильтрации через образец. Тем не менее, рост деформации в образце также приводит к активизации процесса трещинообразования, что положительно сказывается на фильтрационных свойствах образцов.

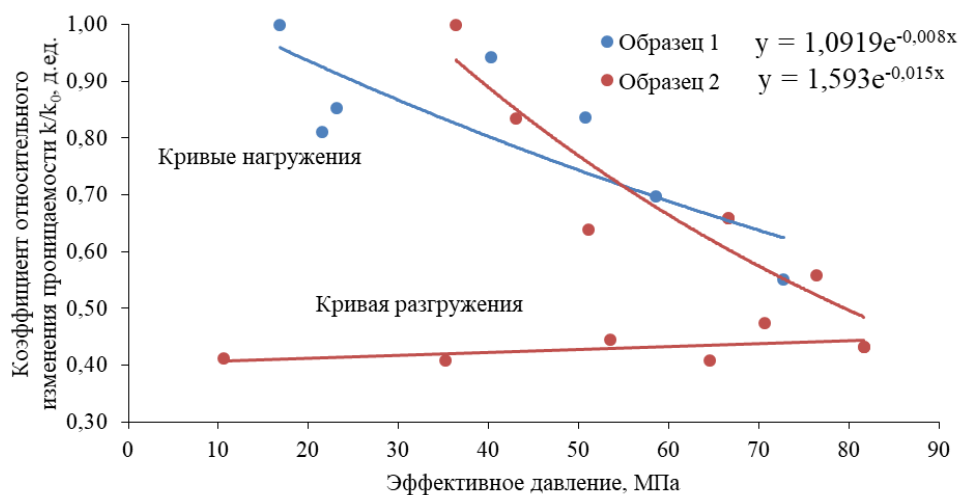


Рис. 1. Зависимость коэффициента относительного изменения проницаемости k/k_0 образцов пород от эффективного давления [составлено автором]

Анализируя процесс нагружения образцов, можно заметить общие закономерности. Для обоих образцов рост эффективного давления приводит сначала к снижению проницаемости, затем к началу трещинообразования и росту проницаемости в определенном диапазоне изменения эффективного давления. При дальнейшем росте эффективного давления проницаемость продолжает снижаться. В снижении проницаемости также участвует

процесс глинонабухания, который возможен при контакте пресных или слабоминерализованных вод с глинистыми частицами образца, высвобожденными в процессе трещинообразования. Взаимодействие породы и воды приводит к увеличению пластичности образца, что в свою очередь способствует снижению несущей способности скелета породы и снижению предела прочности.

Для образца №2 было снижено эффективное давление, однако проницаемость осталась на уровне 50 % от начального значения и продолжила снижаться. Подобное снижение объясняется необратимыми деформациями, возникшими в образце в результате роста эффективного давления, а также взаимодействием нагнетаемой в образец воды с глинистыми частицами, содержащимися в породе.

Согласно результатам теоретических и экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы и рекомендации:

- для исследуемого типа глинистых коллекторов снижение пластового давления в условиях реального месторождения способно привести к необратимой потере проницаемости призабойной зоны. С целью предотвращения подобных осложнений предлагается вводить систему поддержания пластового давления до того, как пластовое давление начнет значительное снижение. Продолжительность разработки месторождения на естественном режиме при данном типе коллектора предлагается снизить для сохранения начальной проницаемости пласта.

- в системе поддержания пластового давления должна использоваться подготовленная вода, не вызывающая набухания глин; все виды работ, осуществляемые на скважинах месторождения должны учитывать влияние закачиваемых жидкостей на свойства породы.

- при проведении гидроразрыва пласта необходимо учитывать снижение прочности и увеличение пластичности пород при высоких значениях обводненности.

Список литературы

1. Biot M. A. General theory of three-dimensional consolidation // Journal of applied physics. – 1941. – Vol. 12, № 2. – P. 155–164. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>.
2. Biot's effective stress coefficient of mudstone source rocks / Zhou X. [et al.] // 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium / American Rock Mechanics Association. – San Francisco, 2017.
3. Determination of Biot's effective-stress coefficient for permeability of Nikanassin sandstone / Qiao L.P. [et al.] // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2012. – Vol. 51, № 03. – P. 193–197. <https://doi.org/10.2118/150820-PA>.
4. Experimental evaluation of Biot's poroelastic parameter—Three different methods / Franquet J. A. [et al.] // Rock Mechanics for Industry. – 1999. – P. 349–355.
5. Jun He, Zhenhua Rui, Kegang Ling. A new method to determine Biot's coefficients of Bakken samples // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Vol. 35, part A. – P. 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.061>.
6. Pore pressure variation at constant confining stress on water–oil and silica nanofluid–oil relative permeability / Adenutsi C. D. [et al.] // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2019. – № 9. – P. 2065–2079. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0605-6>.
7. Sato M., Takemura T., Takahashi M. Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 108. – P. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.010>.
8. Triaxial test research on mechanical properties and permeability of sandstone with a single joint filled with gypsum / Yu J. [et al.] // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 20, № 6. – P. 2243–2252. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-1663-7>.

Научный руководитель: Петраков Дмитрий Геннадьевич, к.т.н., проректор по образовательной деятельности, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Разработка вязкоупругих кислотных составов для интенсификации добычи нефти

Аннотация. Для повышения эффективности кислотных обработок применяются кислотные составы сомоотклоняющего действия, направлены на увеличение охвата воздействием. цель работы заключается в разработке кислотного состава с вязкоупругими свойствами для выравнивания фронта и увеличения глубины кислотного воздействия. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований разработки вязкоупругого кислотного состава, обеспечивающий набор вязкости по мере истощения (реагирования) соляной кислоты с карбонатной породой, что обеспечивает увеличение охвата воздействием и повышает эффективность кислотной обработки.

Ключевые слова: кислотный состав, кислотная обработка, вязкоупругие ПАВ, кокаמידопропилбетаин и лауретс ульфосукцинат динатриевая соль

Mohsen Ali Mohammed Abdullah
Samara State Technical University, Samara, Russia, alhalmyali@mail.ru

Development of Viscoelastic Surfactant-Based Self-diverting Acid System to Stimulate Oil Production

Abstract. To increase the efficiency of acidizing treatments, self-diverting acid systems are used, aimed at increasing the coverage of the treatment. The objective of this work is to develop an acid composition with viscoelastic properties to even out the front and increase the depth of acid penetration. This paper presents the results of experimental studies on the development of a viscoelastic acid system that provides an increase in viscosity as the hydrochloric acid is depleted (reacted) with the carbonate rock, which ensures increased treatment coverage and enhances the efficiency of the acid treatment.

Keywords: acidic composition, acid treatment, viscoelastic surfactants, cocamidopropyl betaine and laureth sulfosuccinate disodium salt.

Повышение эффективности кислотной обработки (КО) является актуальной задачей, особенно на поздней стадии разработки месторождений. Основная причина низкой эффективности КО – неравномерный охват пласта кислотным воздействием, приводящий к преимущественной обработке высокопроницаемых водонасыщенных зон и повышению обводненности продукции. Для улучшения технологической эффективности применяются модифицированные кислотные составы (КС) с добавлением твердых частиц, волокон, полимеров, ПАВ, углеводов и др., способные перераспределять кислоту в низкопроницаемые нефтенасыщенные зоны. Примером являются «самоотклоняющиеся» КС на основе ПАВ, проявляющие вязкоупругие свойства при реакции с карбонатной породой. Исходный реагент имеет низкую вязкость, при закачке поступает в высокопроницаемые зоны, где происходит нейтрализация кислоты, повышение pH и роста вязкости, что перераспределяет свежую порцию КС в другие зоны пласта, осуществляя процесс «самоотклонения» [3, 4]. При полном реагировании или контакте с углеводородами состав разрушается, вязкость снижается, улучшая обработку нефтенасыщенных пропластков. Несмотря на успехи, остаются вопросы совершенствования: поиск новых сочетаний ПАВ, снижение стоимости, определение областей эффективного применения, детальное исследование свойств КС и улучшение технологий применения.

Объектом исследования является технологии интенсификации добычи нефти в карбонатных коллекторах, а предмет исследования – водные и солянокислотные растворы смеси анионного (+) и цвиттерионного ПАВ (кокамидопропилбетаин).

Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических и экспериментальных исследований, содержит результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний. Применяемый комплекс оборудования: реометр MCR52 (Anton Paar GmbH) – вязкоупругие и реологические свойства; видеотензиометр SVT 15N (DataPhysics) – поверхностные свойства; анализатор частиц DelsaMax PRO – гидродинамические радиусы мицелл в растворах ПАВ.

При разработке кислотного состава важно было подобрать анионное ПАВ (сульфосукцинат с различной степенью этоксилирования), определить оптимальную концентрацию ПАВ, изучить влияние индивидуальных ПАВ и их смеси на вязкость растворов и нефти, а также размеры образующихся мицелл. Реологические эксперименты показали, что степень оксиэтилирования сульфосукцината влияет на вязкость растворов ПАВ. Смесь СС-7 и КАПБ обладает низкой вязкостью. Для СС-5 и СС-3 наблюдается резкий рост вязкости при определенных соотношениях ПАВ, что связано с формированием смешанных мицелл. По реологическим характеристикам предпочтительно использование СС-3.

Важный аспект применения ПАВ в технологиях интенсификации – их влияние на вязкость нефти. Экспериментально установлено, что как индивидуальные ПАВ (КАПБ, СС-3), так и их смесь существенно влияют на вязкость нефти в зависимости от скорости сдвига и общего содержания ПАВ [1–2].

Оценка изменения реологических свойств соляно-кислотных композиций при реакции с карбонатной породой показала (Рис. 1), что исходный состав обладает низкой вязкостью 4,5–8 мПа·с, практически не зависящей от концентрации ПАВ. При снижении содержания HCl и появлении продуктов реакции (CaCl_2) происходит резкое увеличение вязкости системы, значительно превышающей вязкость водных растворов ПАВ при том же соотношении. Важно достичь необходимых реологических характеристик при минимальной концентрации ПАВ, для чего используются модификаторы реологических свойств. Результаты (Рис. 1) показали, что при добавлении CaCl_2 пик вязкости смещается в зону более высокой остаточной концентрации HCl, а динамическая вязкость раствора повышается в 1,3 раза. Вязкость полностью нейтрализованного раствора существенно не изменилась (23,4 мПа·с), что улучшает освоение скважины после обработки. Присутствие электролита значительно влияет на форму и строение мицелл ПАВ, повышая связывание противоионов и вязкость раствора. Исследования радиусов мицелл подтвердили увеличение их размера на 88 % при добавлении CaCl_2 .

Результаты исследования изменения динамической вязкости состава в зависимости от температуры при различных скоростях сдвига выявили три участка (рис. 10): 1) 10–35°C – повышение температуры увеличивает вязкость системы; 2) 35–40°C – регистрируется максимальная вязкость раствора; 3) >40°C – наблюдается снижение вязкости системы. Таким образом, оптимальная температура проявления максимальной вязкости солянокислотных растворов составляет 30–90°C, что предпочтительно при выборе объекта внедрения. Исследования показали, что повышение вязкости обусловлено ростом диаметра мицеллярных агрегатов около 40°C на 20 %, а падение вязкости – уменьшением диаметра мицелл при дальнейшем повышении температуры [1–2,5].

Подбор кислотного состава выполняли для одного из месторождений Урало-Поволжья. Необходимое содержание кислотных добавок/присадок определяли на основании стандартных подходов, связанных с оценкой коррозионной агрессивности, стабильности КС в присутствии трехвалентного железа, совместимостью КС с нефтью и пластовой водой [5].

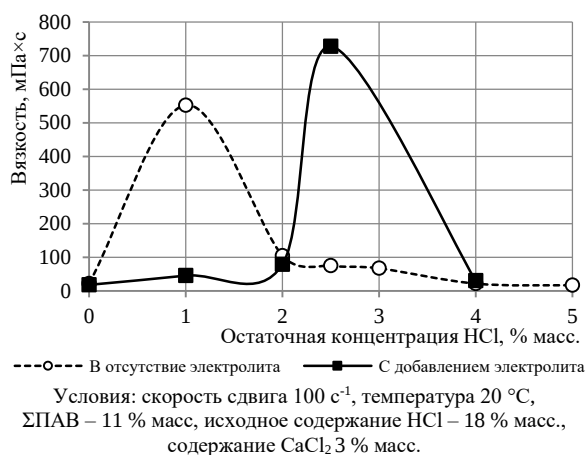


Рис. 1. Влияние добавки электролита на вязкость частично нейтрализованных солянокислотных растворов



Рис. 2. Зависимость динамической вязкости от остаточной концентрации HCl

Результаты эксперимента показали, что введение присадок приводит к смещению пика вязкости: для КС с присадками максимальная вязкость регистрируется при остаточном содержании соляной кислоты 2,5 %, а при добавлении присадок – 3,0 %. Также присутствие добавок расширяет диапазон вязкоупругих характеристик, а свип-анализ частотных характеристик подтверждает сохранение вязкоупругих свойств при введении КП.

В присутствии углеводов не наблюдается образования вязкого геля, и вязкость КС не превышает 13,8 мПа·с. В среднем вязкость кислотных составов с КП ниже примерно на 30 %, что облегчает процедуру освоения скважины и удаления продуктов реакции из пласта[5–6]. Итоговый кислотный состав, содержащий водный раствор соляной кислоты, ПАВ и присадки представлен в таблице 1.

Таблица 1

Состав КС на основе ВУ ПАВ

Компонент	Концентрация, % масс.
Базовая основа	
ПАВ (КАПБ + СС)	11,0
Соляная кислота	18,0
Электролит (CaCl_2)	3,0
Кислотные добавки/присадки	
Ингибитор коррозии	0,8
Дезэмульгатор	0,1
Противоосадочный реагент	0,1
Стабилизатор железа	0,8

Кислотные растворы на основе вязкоупругих ПАВ могут использоваться в следующих целях:

- кислотная обработка призабойной зоны пласта для улучшения проницаемости и интенсификации нефтеносных и газоносных карбонатных коллекторов (многослойных, с большими продуктивными интервалами, с неоднородной проницаемостью);
- в качестве жидкости песконосителя в кислотно-пропантном ГРП и/или при проведении кислотного ГРП;
- в технологиях глушения скважин для улучшения очистки забоя;
- закачка под давлением или через ГНКТ (колтюбинг).

Для технологии кислотной стимуляции пласта рекомендуется первоначально поддерживать низкую скорость закачки ($0,1-0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$) для обеспечения оптимального распределения раствора в ПЗП. далее с постепенным увеличением скорости закачки. Необходим контроль забойного давления, а также выдержка скважину после обработки (2–4 часа). Для ограничения потери раствора в условиях высокой приемистости возможно использования буферных оторочек различного состава.

Для кислотных обработок с использованием вязкоупругих ПАВ отмечаются следующие преимущества по сравнению с «классическими» кислотными составами: более глубокое проникновение кислоты в пласт, значительное увеличение продуктивности, более эффективное использование кислоты.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что предложенный кислотный раствор при обработке призабойной зоны пласта в карбонатных коллекторах обеспечивает улучшение распределения и отклонение потока кислоты от зон высокой проницаемости в менее проницаемые нефтенасыщенные интервалы, улучшить их фильтрационные свойства, уменьшить вязкость нефти, снизить межфазное натяжение на границе «нефть – кислота», что в совокупности приводит к повышению эффективности кислотной обработки.

Список литературы

1. Исследование реологических свойств водных и соляно-кислотных растворов смеси цвиттерионного и анионного ПАВ / А. М. Мохсен, В. В. Коновалов, М. А. Хуссейн, П. В. Склюев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2019. – № 1. – С. 33–40.
2. Мохсен А. М. А., Коновалов В. В., Склюев П. В. Исследования влияния хлористого кальция на реологические свойства смеси соляно-кислотных растворов цвиттерионных и анионных поверхностно-активных веществ // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 4. – С. 18–22.
3. Mohsen Ali, Mohammed Al-Shargabi, Shadfar Davoodi, David A. Wood, Valeriy S. Rukavishnikov, Konstantin M. Minaev / A critical review of self-diverting acid treatments applied to carbonate oil and gas reservoirs. Pet. Sci. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.005>.
4. Ali, M., Viktorovich, K. V., Vitalievich, S. P., Igorovna, B. K., Mohammed, A. S. (2023). Development of Viscoelastic Surfactant-Based Self-diverting Acid System to Stimulate Oil Production in Carbonate Reservoirs. In: Lin, J. (eds) Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2022. IFEDC 2022. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1964-2_414.
5. Мохсен А. М. А., Коновалов В. В., Склюев П. В. Оценка влияния кислотных присадок на реологические свойства и технологическую эффективность смеси цвиттерионных и анионных поверхностно-активных веществ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. –Т. 335. –№ 2. –С. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4221.
6. Мохсен А. М. А., Коновалов В. В., Любимов О. А., Павлов И. В. Состав для повышения эффективности солянокислотных обработок в карбонатных коллекторах: пат. 2 829 133 Рос. Федерация. заявитель и патентообладатель: ООО «Эксперт Технолоджи». – № 2023108635; заявл. 06.04.2023г.; опубл. 24.10.2024 Бюл. № 30.

Научный руководитель: Коновалов Виктор Викторович, кандидат химических наук, доцент кафедры разработки эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Самарский государственный технический университет, Россия, Самара, konvalov-samgtu@yandex.ru.

Исследование применимости предварительно сшитых гелевых частиц для извлечения остаточной нефти из неоднородных коллекторов месторождений Западной Сибири

Аннотация. Сейчас многие месторождения в России эксплуатируются благодаря использованию системы нагнетательных скважин, которые поддерживают необходимое давление в пласте и способствуют интенсивной добыче нефти. Однако такой подход имеет свои недостатки, включая ускоренное обводнение пластов, а также неравномерную выработку ресурсов. В связи с этим все актуальнее становится применение потокоотклоняющих технологий, которые помогают снизить обводненность и задействовать те зоны пласта, которые ранее не были охвачены в процессе разработки.

Ключевые слова: сшитые гелевые частицы, ограничение водопритока, выравнивание профиля приемистости, потокоотклоняющие технологии.

Efim N. Nevolskikh
*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia,
efimnevolskih6@gmail.com*

Investigation of the applicability of preformed particle gel for the extraction of residual oil from heterogeneous reservoirs of deposits in Western Siberia

Abstract. Currently, many fields in Russia are being exploited through the use of a system of injection wells that maintain the necessary pressure in the reservoir and contribute to intensive oil production. However, this approach has its drawbacks, including accelerated reservoir flooding, as well as uneven resource extraction. In this regard, the use of flow-deflecting technologies is becoming increasingly relevant, which help reduce waterlogging and involve those areas of the reservoir that were not previously covered during the development process.

Keywords: preformed particle gel, limiting water flow, leveling the pickup profile, flow-deflecting technologies.

Добыча нефти из пластов, разрабатываемых с помощью нагнетательных скважин, зачастую сопровождается высокой обводненностью извлекаемого сырья, что уменьшает экономическую выгоду добычи даже при больших объемах оставшейся нефти. Анализ физических характеристик этого процесса демонстрирует, что причина кроется в изменении фильтрационных свойств коллектора. При промывании каналов с высокой проницаемостью, происходит перераспределение потоков жидкости, что приводит к образованию целевиков нефти или не охваченных участков пласта.

Для извлечения нефти из таких участков важно заблокировать интервалы с низким фильтрационным сопротивлением к забою. В связи с этим были разработаны методы, направленные на увеличение нефтеотдачи, которые снижают фильтрационные способности промытых зон [1].

В данный момент одним из основных методов повышения нефтеотдачи стали потокоотклоняющие технологии. Задачами этого метода являются ограничение притока воды к добывающим скважинам и выравнивание профиля приемистости нагнетательных сква-

жин. На заключительной стадии разработки метод потокоотклоняющих технологий помогает увеличить конечный коэффициент нефтеотдачи и снизить количество воды в добываемой жидкости.

В практике селективной изоляции водонасыщенных интервалов активно используются осадкообразующие и гелеобразующие составы, но они имеют свои недостатки. Главный из них заключается в практически необратимом характере формирования структуры этих составов, что приводит к тому, что часть запасов нефти остается в изолированном участке. Восстановление фильтрационных характеристик после обработки требует больших усилий, что снижает общий коэффициент извлечения нефти [2].

Более щадящим и эффективным способом решения проблемы является закачивание предварительно сшитых гелевых частиц. Частицы при соприкосновении с водой расширяются, тем самым перекрывают пропластки с высокой проницаемостью [3]. Эти частицы на основе полиакриламида, вбирают в себя воду и становятся эластичными. Эта эластичность позволяет сжиматься и разрушаться в узких фильтрационных каналах. Благодаря тому, что при соприкосновении с водой частицы увеличиваются в размерах, в пласте создается полимерная пробка, перекрывающая высокообводненные зоны. Как правило, эта пробка изменяет направление фильтрационных потоков и способствует увеличению охвата пласта процессом вытеснения нефти [4].

Был испытан состав предварительно сшитых гелевых частиц. Оптимальный состав гелевых частиц имеет низкую плотность (0,95–1,16 г/см³). Это означает, что он может избежать проблемы осаждения в стволе скважины, вызванных большой плотностью. Основа гелевых частиц – полиакриламид, наполнитель – неорганический материал. Размер частиц геля варьируется от 0,1 до 3 мм. Предлагаемый состав подходит для метода выравнивания фронта вытеснения в пластах с различной проницаемостью.

На основании данных, полученных в ходе лабораторных испытаний этого состава, была создана гидродинамическая модель в программном продукте tНавигатор на объекте ПК19-20 месторождения Западной Сибири. При подборе скважин-кандидатов была выделена 1 нагнетательная скважина и 10 реагирующих скважин. Была смоделирована закачка оторочки сшитого гелевого состава в объеме 600 м³. Гидродинамическая модель объекта была создана таким образом, чтобы все показатели разработки были учтены и использованы при моделировании.

Оценка эффективности применения рассматриваемой технологии оценивалась по среднему удельному эффекту на скважинную операцию, а также по изменению приемистости в закачиваемом интервале. После начала закачки сшитого геля наблюдается снижение приемистости в закачиваемом интервале в 5-7 раз, а средний удельный эффект составил 1,8 тыс.т/ скв. операцию.

Снижение воды в добываемой жидкости было достигнуто ввиду вовлечения в разработку ранее не охваченных заводнением участков. Дополнительный дебит по нефти составил 4,9 тонн в сутки с 10 добывающих скважин, что подтверждает высокую эффективность использования сшитого гелевого состава.

Подводя итог, можно сделать вывод, что использование сшитого гелевого состава в совокупности с потокоотклоняющими технологиями дает хороший эффект в неоднородных коллекторах на месторождениях Западной Сибири. Данный эффект заключается в дополнительной добыче нефти из неохваченных зон и снижением обводненности продукции, благодаря перераспределению потоков. Также состав сшитых гелевых частиц можно рекомендовать для месторождения с похожими характеристиками пласта.

Список литературы

1. Газизов А. Ш., Газизов А. А. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений на основе ограничения движения вод в пластах. – М.: Недра, 1999. – 285 с.
2. Байда, А. А. Мицеллярные растворы и микроэмульсии для повышения нефтеотдачи пластов / А. А. Байда, С.Г. Агаев // Нефтепромысловое дело. – 2012. – №. 7. – С. 37–40.
3. Деревянко В. К., Мустафин А. З., Минханов И. Ф. Исследования применения предварительно сшитых гелевых частиц для блокирования высокопроницаемых зон пласта на месторождениях с высокой минерализацией Республики Татарстан / В. К. Деревянко, А. З. Мустафин, И. Ф. Минханов [и др.] // Практические аспекты нефтепромысловой химии : Сборник тезисов докладов научно-практической конференции, Уфа, 24–27 мая 2022 года. – Уфа: Фонд поддержки и развития науки Республики Башкортостан, 2022. – С. 49–50.
4. Кетова Ю. А., Бай Б., Хижняк Г. П., Гладких Е. А., Галкин С. В. Тестирование технологии предварительно сшитых частиц полимерного геля для ограничения водопритокков на фильтрационных керновых моделях // Ю. А. Кетова, Б. Бай, Г. П. Хижняк, Е. А. Гладких, С. В. Галкин // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 91–96. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.91.

Научный руководитель: Королев Максим Игоревич, к.т.н., доцент ВНИИ, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия.

Рудых Любовь Андреевна*
Добролюбова Розалия Кирилловна**
Политехнический институт (филиал) СВФУ, Мирный, Россия
* lubovrudyh79@gmail.com
** rose941101@mail.ru

Влияние неуглеводородных компонентов в пластовом газе на потери конденсата при разработке Мастахского газоконденсатного месторождения

Аннотация. В работе рассматривается возможность получения максимальной отдачи углеводородов на газоконденсатных месторождениях. В ходе исследования был изучен состав пластовой газоконденсатной залежи Мастахского месторождения, в котором помимо углеводородных компонентов преобладают азот, и другие неуглеводородные вещества. Проведенные исследования показали зависимость влияния азота и гелия на пластовые потери конденсата. Выяснили, что растворенный азот в пластовом газе увеличивает давление, а гелий уменьшает давление начала конденсации.

Ключевые слова: термодинамические характеристики, PVT-исследования, влияние неуглеводородных компонентов, растворимость и потери конденсата.

Lyubov A. Rudykh*
Rosalia K. Dobrolyubova**
Polytechnic Institute (branch) of NEFU, Mirny, Russia
* lubovrudyh79@gmail.com
** rose941101@mail.ru

The effect of non-hydrocarbon components in the formation gas on condensate losses during the development of the Mastakhskoye gas condensate field

Abstract. The paper considers the possibility of obtaining the maximum return of hydrocarbons in gas condensate fields. During the study, the composition of the formation gas condensate deposit of the Mastakhskoye field was studied, in which, in addition to hydrocarbon components, nitrogen and other non-hydrocarbon substances predominate. The conducted studies have shown the dependence of the influence of nitrogen and helium on reservoir condensate losses. It was found out that dissolved nitrogen in the formation gas increases the pressure, and helium reduces the pressure of the beginning of condensation.

Keywords: thermodynamic characteristics, PVT studies, the effect of non-hydrocarbon components, solubility and condensate losses.

Разработка газоконденсатных месторождений имеет свои особенности, которые заключаются в физических и химических свойствах флюидов. В результате литературного анализа выделили значимость неуглеводородных компонентов при добычи конденсата из залежи. Вследствие необходимости точных данных по влиянию неуглеводородных компонентов на газоконденсат было решено провести термодинамические исследования, на примере Мастахского газоконденсатного месторождения, расположенного в 340 километрах северо-западнее г. Якутска и в 50 километрах от поселка Кысыл-Сыр, на правом берегу реки Вилюй.

Исследование проводилось в несколько этапов: подготовка рекомбинированных проб, проведение PVT-экспериментов, систематизация и обработка результатов исследований. Данные этапы позволили произвести термодинамические исследования и корректировку при помощи аналитических диаграмм. Влияние неуглеводородных компонентов определялось по методике ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Прогнозирование показателей разработки требует знаний о свойствах газоконденсатных залежей, а также об их составе. Данные знания не всегда удается получить, поэтому возникают сложности с определением потерь конденсата.

Мастахское месторождение сложено терригенными коллекторами. Залежи многокомпонентных углеводородов являются недонасыщенными, исходя из этого переход в жидкое состояние осуществляется при давлении ниже начального пластового. При исследовании рекомбинированных проб содержание гелия составляло до 20 % мольн. и до 5 % мольн. азота. Для сравнительной характеристики использовались пластовая углеводородная смесь, газоконденсатная система с азотом и отдельно с гелием. Замечено, что во всех трех случаях присутствуют потери конденсата, но в системе с азотом потери начинаются при более высоком давлении и являются максимальными 88 г/м³, в то время как у простой системы и системы с гелием давление начала потерь ниже, а максимальные составляют 83,15 г/м³ и 75,15 г/м³ соответственно. То есть в ходе анализа полученных результатов приходим к выводу, что системы с азотом и гелием по-разному оказывают влияние на потери конденсата в залежи.

Проведение исследований позволило составить сравнительную характеристику среди трех систем (пластовой, с азотом и с гелием), в сравнении оказались текущее давление в залежи (МПа) и потери конденсата в залежи при данном давлении (г/м³). На основе полученных значений построена диаграмма (зависимость потерь конденсата от давления залежи). Максимальные потери у системы с азотом 88 г/м³ при давлении 10,04 МПа, у пластовой системы – 83,15 г/м³ при 9,6 МПа, а у системы с гелием 75,15 г/м³ при 9,4 МПа. После достижения максимальных потерь, начинается процесс ретроградного испарения, т.е. жидкая фаза, снова становится газообразной.

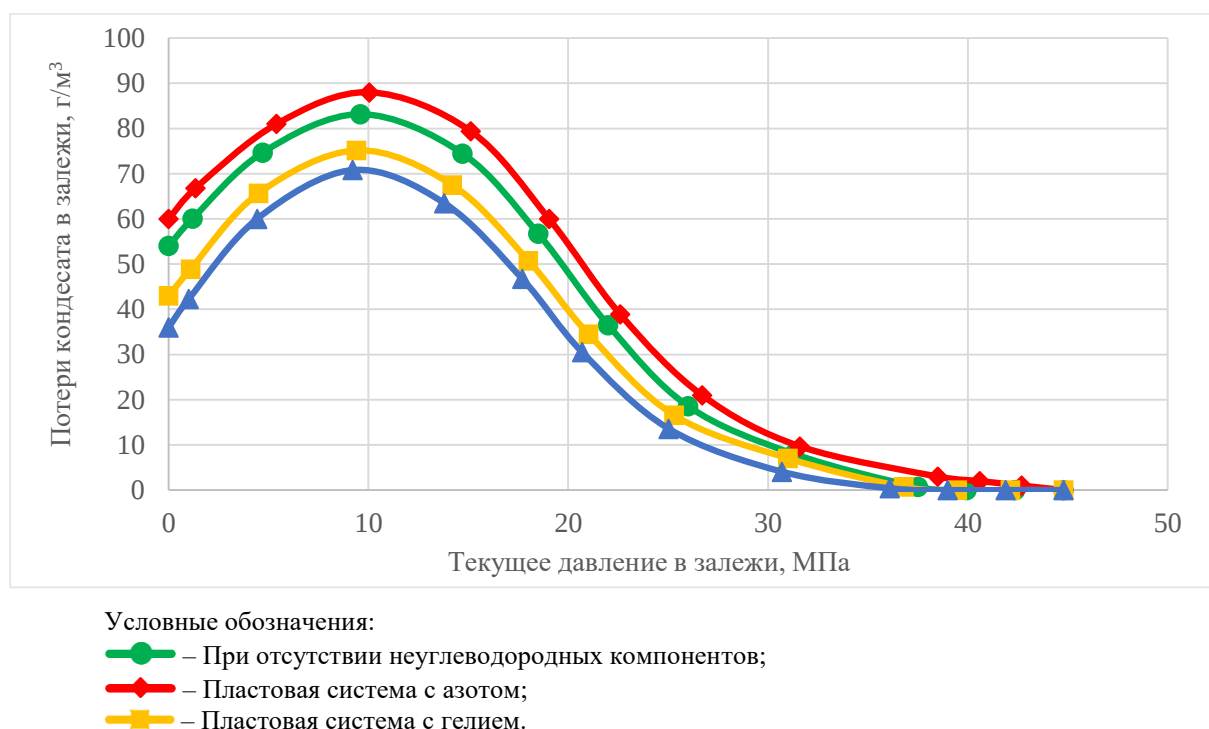
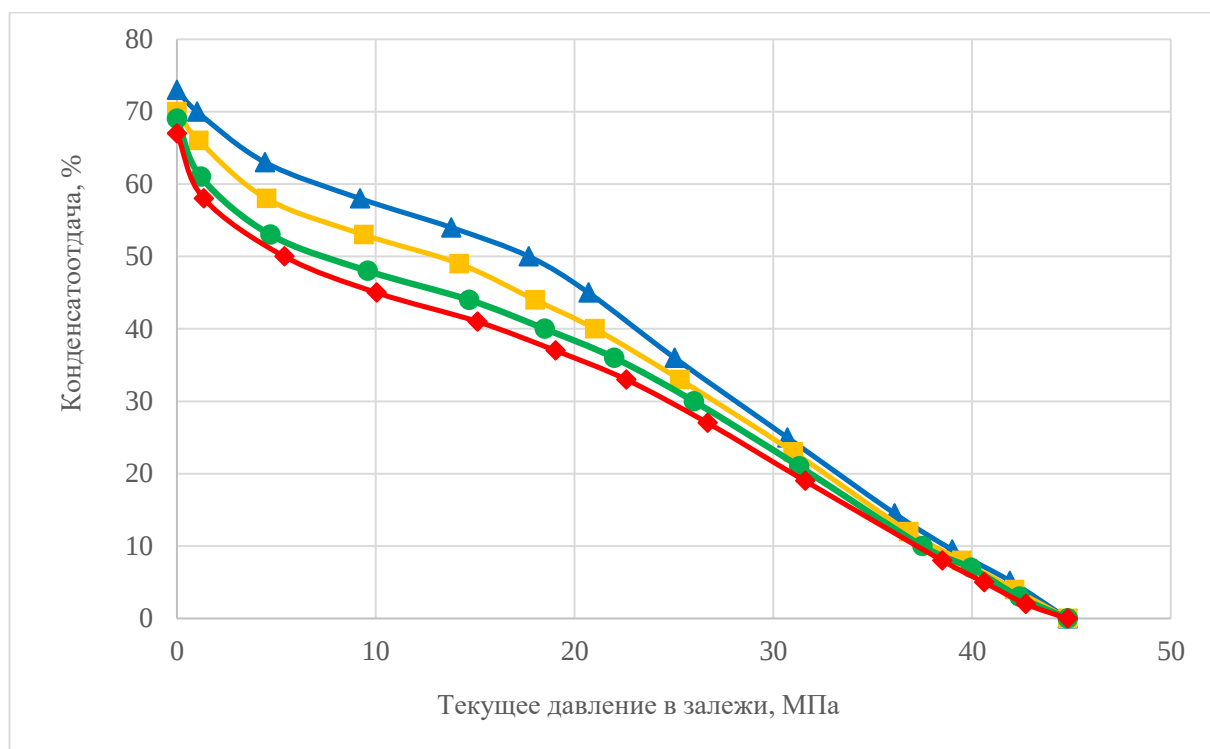


Рис. 1. Зависимость потерь конденсата от давления в залежи систем с неуглеводородными компонентами

Следующим этапом стало определение влияния неуглеводородных компонентов на коэффициент извлечения конденсата. Для всех трех систем определили количество конденсата в добываемом газе на n -ом этапе (г/м³), количество извлекаемого конденсата на n -ом этапе (г/м³) и рассчитали конденсатоотдачу (КИК) %



Условные обозначения:

- Пластовая газоконденсатная система;
- Пластовая система с азотом;
- Пластовая система с гелием.

Рис. 2. Зависимость КИК от влияния неуглеводородных компонентов в пластовой системе Мастахского месторождения

По диаграмме можно выделить, что максимальную конденсатоотдачу получаем в системе с гелием 70 %, минимальную в системе с азотом 67 %, после определения потерь конденсата полученные результаты КИК ожидаемы. Такие результаты говорят о том, что азот уменьшает растворимость углеводородов, за счет чего увеличивает давление начала конденсации, гелий наоборот увеличивает растворимость ароматических УВ, снижая давление начала конденсации.

Произвели прогноз распределения доли добычи конденсата на данном месторождении и сделали следующие заключения:

1. В пластовой газоконденсатной системе от давления начала конденсации до давления максимальной конденсации будет добыто 48 % конденсата, после ретроградного испарения – 21 %, общие потери конденсата составят 31 % (при КИК=0,69).
2. В системе с азотом до давления максимальной конденсации будет добыто 58 %, после максимальной – 15 %, общие потери 27 % (КИК=0,67).
3. В системе с гелием до давления максимальной конденсации будет добыто 53 %, после максимальной – 17 %, общие потери 30 % (КИК=0,7).

Таким образом, можно сделать вывод, что азот и гелий влияют на потери конденсата по-разному, потери конденсата также зависят от количества неуглеводородных компонентов в залежи. Свойство неуглеводородных компонентов – растворяющая способность, способствует изменению давления начала конденсации. В случае с гелием, у которого лучшая растворяющая способность по отношению к азоту, происходит снижение давления начала конденсации, в системе с азотом наоборот – увеличение давления начала конденсации.

Список литературы

1. Александрова Е. М. Результаты изучения пластовых флюидов газонефтяных залежей ботуобинского горизонта. / Е. М. Александрова, Е. И. Инякина и др. // Академический журнал Западной Сибири. 2018. Т. 14. № 4 (75). С. 42–43.
2. Брусиловский А. И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа / А. И. Брусиловский. – М.: Грааль, 2002. – 575 с.
3. Добролюбова Р. К. Исследование влияние азота на пластовые потери конденсата при разработке Чаяндинского месторождения / Р. К. Добролюбова, Е. И. Инякина, И. И. Краснов // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 3. С. 75–96.
4. Инякина Е. И., Катанова Р. К., Инякин В. В., Альшейхли М. Д. 3. Изучение влияния остаточной нефти на пластовые потери конденсата на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении. Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 1. С. 39–52.
5. Конторович В. А. Критерии классификации платформенных структур / В. А. Конторович, С. Ю. Беляев, А. Э. Конторович // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 2004. – № 1. – С. 47–58.
6. Катанова Р. К. Оценка потерь углеводородов в залежи пласта Т1-А при разработке Среднетюнгского месторождения / Р. К. Катанова, Е. Е. Левитина, Е. И. Инякина, И. И. Краснов // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 4. С. 29–40.
7. Краснова Е. И. Оценка увеличения продуктивности газоконденсатных скважин на поздней стадии разработки месторождений. / Е. И. Краснова, Т. Д. Островская // Академ. журнал Западной Сибири, 2013. Т. 9. № 6 (49). С. 31.

Научный руководитель: Краснов Иван Игнатьевич, к.т.н. доцент, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.

Раупов Инзир Рамилевич
Григорьева Виктория Максимовна*
Зазуля Василий Сергеевич
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия*
* grigorevavm@mail.ru

Исследования физико-химических характеристик растворов полиакриламида для повышения эффективности полимерного воздействия

Аннотация. В работе представлены результаты теоретических и лабораторных исследований физико-химических параметров полимерных растворов, используемых в т.ч. и в системах заводнения при добыче трудноизвлекаемой нефти. На первом этапе были проведены реологические исследования, в ходе которых были получены зависимости ньютоновской вязкости полимерных растворов от температуры и от их содержания, построены кривые течения и кривые вязкости для каждой марки исследуемых полимеров. Далее с помощью моделей Ostwald de Waele и Herschel Bulkley описаны кривые вязкости и течения и по ним определено изменение показателей неньютоновского поведения при повышении температуры и содержании полимера в водном растворе. На втором этапе работы описывается эксперимент по определению молекулярной массы 7 марок полимеров, приводятся результаты эксперимента и рассчитанные значения ММ. Приводятся результаты оптических исследований и их связь с ММ полимера и вязкоупругими свойствами. Полученные зависимости можно использовать как входные данные для построения более точной и гибкой гидродинамической модели фильтрации полимерных растворов.

Ключевые слова: повышение нефтеотдачи пластов, полиакриламиды, реология полимеров, вязкоупругие свойства, молекулярная масса полимеров.

Inzir R. Raupov
Victoria M. Grigoreva*
Vasily S. Zazulia
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
* grigorevavm@mail.ru

Studies of the physicochemical characteristics of polyacrylamide solutions to enhance the efficiency of polymer flooding

Abstract. The paper presents the results of theoretical and laboratory studies of the physicochemical parameters of polymer solutions used, including in flooding systems during the extraction of hard-to-recover oil. At the first stage, rheological studies were carried out, during which the dependences of the Newtonian viscosity of polymer solutions on temperature and on their content were obtained, flow curves and viscosity curves for each brand of polymers under study were constructed. Further, using the Ostwald de Waele and Herschel Bulkley models, viscosity and flow curves are described and the change in non-Newtonian behavior indicators with increasing temperature and polymer content in an aqueous solution is determined from them. At the second stage of the work, an experiment is described to determine the molecular weight of 7 polymer grades, the results of the experiment and the calculated MM values are presented. The results of optical studies and their relationship with the MM of the polymer and viscoelastic properties are presented. The obtained dependences can be used as input data for constructing a more accurate and flexible hydrodynamic model of filtration of polymer solutions.

Keywords: enhanced oil recovery, polyacrylamides, rheology of polymers, viscoelastic properties, molecular weight of polymers.

В работе представлены результаты теоретических и лабораторных исследований физико-химических параметров полимерных растворов, используемых в т.ч. и в системах заводнения при добыче трудноизвлекаемой нефти.

На первом этапе были проведены реологические исследования, в ходе которых были получены зависимости ньютоновской вязкости полимерных растворов от температуры и от их содержания, построены кривые течения и кривые вязкости для каждой марки исследуемых полимеров. Далее выбраны реологические модели, наиболее точно характеризующие поведение растворов полимеров. С помощью моделей Ostwald de Waele и Herschel Bulkley описаны кривые вязкости и течения и по ним определено изменение показателей неньютоновского поведения при повышении температуры и содержании полимера в водном растворе. В ходе изучения вязкоупругих свойств растворов полимеров акрилового ряда для некоторых марок был получен новый эффект их поведения – наличие точки инверсии, в которой при дальнейшем увеличении содержания полимера происходило резкое изменение упругой компоненты вязкости [1, 2]. Полученные зависимости можно использовать как входные данные для построения более точной и гибкой гидродинамической модели фильтрации полимерных растворов.

На основе изучения реологических характеристик, исследований по обоснованию характеристик полимерных составов для заводнения [4, 5] и по влиянию режимов течения жидкости на гидродинамические свойства высокомолекулярных соединений [6, 7, 8] предложено применять к обоснованию технологии закачки полимерного состава комплексный анализ, включающий в себя изменение конформационных параметров полимерной системы на молекулярном уровне и проявление гидродинамических свойств потока [9]. Основопологающим для реализации данного направления является лабораторное определение молекулярной массы (ММ) исследуемых марок полимеров.

В работе обращается внимание на такие физико-химические параметры, как вязкость полимера, его ММ, анионность, полиэлектролитный эффект, и такие фильтрационные параметры, как число Рейнольдса и Вейссенберга, которые влияют на законы фильтрации полимерного раствора в пласте.

Описывается вискозиметрический метод определения ММ полиакриламидов (ПАА), суть которого заключается в определении характеристической вязкости раствора путем экстраполирования до нулевой концентрации прямолинейной зависимости приведенной вязкости от концентрации раствора и расчета ММ по уравнению Марка-Куна-Хаувинка [9, 10]. Линейная зависимость была получена для водного раствора марки АК-631, однако из-за низкого коэффициента достоверности корреляции был проведен дополнительный эксперимент на автоматическом капиллярном вискозиметре. Результат определения характеристической вязкости на ротационном и капиллярном вискозиметре совпал с точностью до 2,9 %, что подтверждает корректность проведенного эксперимента. Рассчитанная ММ для данной марки попала в диапазон паспортной характеристики, указанный производителем, и составила 6,33 млн. у.е.

Опыт определения молекулярной массы ПАА различных марок показал, что нельзя использовать одни и те же содержания полимеров и условия проведения оценки ММ: большая часть выбранных марок являются заряженными и в водном растворе у них проявляется эффект полиэлектролитного набухания, что усложняет определение ММ, поскольку приходится подавлять обнаруженный эффект с помощью введения солей низкомолекулярных соединений [9].

В результате для установления требований по реологическим и фильтрационным характеристикам ПАА необходимо сопоставить их со свойствами, определяющими природу самого полимера. В качестве основного такого параметра может выступать молекулярная масса, по значениям которой в дальнейшем можно определить оптимальные характеристики полимерного раствора и обосновать выбор раствора для полимерного заводнения.

В работе по оптическим исследованиям полимерных растворов акрилового ряда [3] была установлена тесная взаимосвязь между реологическими характеристиками и оптическими свойствами полимерных растворов.

В качестве количественного параметра, определяющего оптические свойства, использовалась оптическая плотность полимерного раствора. Увеличение оптической плотности является следствием протекания процесса структурообразования, а именно образования полимерных цепочек. Вязкость, плотность и другие физические свойства технологических жидкостей могут быть определены при постоянном контроле спектральных характеристик исследуемых растворов путем корреляционных зависимостей, полученных экспериментально.

Зависимости линейного и степенного характера ньютоновской вязкости от оптической плотности имеют практическую значимость и могут использоваться для решения целого ряда промышленных задач. Одной из них является оценка распределения фильтрационных потоков нагнетаемой жидкости в зоне дренирования скважин. Например, путем спектрофотометрических исследований можно определить коэффициент светопоглощения и по известной зависимости установить, присутствуют ли скважинные перетоки, оценить поглощение закачиваемого агента и взаимную интерференцию эксплуатационных скважин. Также в процессе приготовления полимерных растворов оптический метод позволяет контролировать гидратацию полимера и набор целевого показателя вязкости раствора с помощью мониторинга оптических свойств. В этом смысле данный метод может стать надежным и достоверным инструментом промыслового геолога или технолога для оперативного контроля разработки месторождения углеводородов.

Другими словами, оптический метод контроля характеристик полимерных растворов позволяет оперативно и с высокой достоверностью получаемых данных контролировать процессы разработки месторождения углеводородов. Однако для реализации данной идеи необходим большой объем данных, для получения которых могут быть использованы новые мобильные оптические устройства. Как показывает опыт экспериментального определения физико-химических параметров полимерных составов различных марок, получение требуемых зависимостей является нетривиальной задачей и требует индивидуального подхода к полимерам различных производителей в связи с разными технологическими особенностями синтеза, отличающейся степенью анионности, степенью гидролиза, наличием или отсутствием полиэлектролитных эффектов и ряда других свойств.

Данные, полученные при исследовании реологических, оптических и фильтрационных характеристик, в дальнейшем можно использовать в математических моделях фильтрационных процессов, описывающих закачку полимерных растворов, а также для обоснования эффективности геолого-технических мероприятий, направленных на увеличение коэффициента извлечения нефти.

Список литературы

1. Григорьева, В. М. Изучение вязкоупругих свойств растворов полимеров акрилового ряда / В. М. Григорьева, М. В. Мовпан // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2021. – Т. 1. – С. 167–171. – EDN CPBPUS
2. Мовпан, М. В. Исследование влияния температуры и концентрации на реологические характеристики полимерных растворов на основе полиакриламида различных марок / М. В. Мовпан, В. С. Зазуля // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2021. – Т. 1. – С. 337–342. – EDN WBBZSX.
3. Зазуля, В. С. Оптические исследования растворов полимеров акрилового ряда различных марок / В. С. Зазуля, В. М. Григорьева // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2021. – Т. 1. – С. 191–196. – EDN RICODO.
4. Черепанова, Н. А. Обобщение опыта применения полимерного заводнения и критериев выбора полимера / Н. А. Черепанова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина. – 2015. – № 10. – С. 48–52.

5. Попов В. И. Возникновение и развитие эластической турбулентности в полимерных потоках // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53. – № 2. – С. 189–195.
6. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. - М.: Химия. – 1977. – 438 с.
7. Рафигов, С. Р. и др. Методы определения молекулярных весов и полидисперсности высокомолекулярных соединений / С. Р. Рафигов, С. А. Павлова, И. И. Твердохлебова; АН СССР, Ин-т элементо-орган. соединений. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 335 с.
8. Алдошин, В. Г. Некоторые физико-химические характеристики высокомолекулярного полиамида / В.Г. Алдошин // Высокомолекулярные соединения. - 1960. – Т. 2. – № 3. – С. 347–353.
9. Зазуля, В. С. К вопросу об определении молекулярной массы полимеров для добычи трудноизвлекаемой нефти / В. С. Зазуля, В. М. Григорьева, М. В. Мовпан // 76-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ-2022» : тезисы докладов 76-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 25–29 апреля 2022 года. Том 2. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2022. – С. 46–47. – EDN JLITCY.
10. Kulicke, W. M., Clasen, C. (2004). Viscosimetry of polymers and polyelectrolytes. Springer Science & Business Media.

Научный руководитель: Раупов Инзир Рамилевич, к.т.н., доцент кафедры РНГМ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

**Раупов Инзир Рамилевич
Зазуля Василий Сергеевич***

Григорьева Виктория Максимовна
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия
* vasilij.zazulia@gmail.com)*

Изучение инверсионного характера показателей вязкоупругости растворов полиакриламида для оптимизации технологий полимерного воздействия

Аннотация. В работе представлены результаты изучения физико-химических свойств водных растворов полиакриламида (ПАА) с целью повышения эффективности извлечения трудноизвлекаемых запасов нефти. Описано влияние молекулярной массы полимера на его реологические характеристики, вязкоупругие свойства и поведение в пористой среде. Проведено сопоставление данных, полученных методом спектрофотометрии, вискозиметрии и осцилляционных исследований. Выявлены «точки инверсии» – содержания полимера, при которых резко возрастает упругая составляющая вязкости. Показано, что положение этих точек зависит от молекулярной массы и скорости фильтрации, что важно учитывать при выборе режима закачки полимерных растворов. На основании полученных зависимостей предложены рекомендации по выбору содержаний ПАА для различных технологий разработки нефтяных месторождений: доинверсионный диапазон – для полимерного заводнения, заинверсионный – для потокоотклоняющих технологий.

Ключевые слова: повышение нефтеотдачи пластов, полиакриламид, реология полимеров, вязкоупругие свойства, молекулярная масса полимеров, полимерное заводнение.

**Inzir R. Raupov
Vasiliy S. Zazulia***

Victoria M. Grigoreva
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
* vasilij.zazulia@gmail.com*

Study of the inversion character of viscoelasticity parameters of polyacrylamide solutions for optimization of polymer flooding technologies

Abstract. The study presents the results of investigating the physicochemical properties of aqueous polyacrylamide (PAA) solutions aimed at enhancing the recovery of hard-to-extract oil reserves. The influence of the polymer's molecular weight on its rheological characteristics, viscoelastic properties, and behavior in porous media is described. A comparison of data obtained through spectrophotometry, viscometry, and oscillatory testing was carried out. "Inversion points" – polymer concentrations at which the elastic component of viscosity sharply increases – were identified. It was shown that the position of these points depends on the molecular weight and filtration rate, which is crucial to consider when selecting injection modes for polymer solutions. Based on the observed dependencies, recommendations are proposed for selecting PAA concentrations for various oilfield development technologies: the pre-inversion range for polymer flooding and the post-inversion range for flow-diverting technologies.

Keywords: enhanced oil recovery, polyacrylamides, rheology of polymers, viscoelastic properties, molecular weight of polymers, polymer flooding.

Научно-исследовательские работы по формированию подходов к решению проблемы извлечения трудноизвлекаемых запасов нефти требуют проведения наукоемких исследований по изучению физико-химических процессов влияния природы полимеров на их поведение в пористой среде. Ряд фундаментальных научных работ посвящен изучению

структур высокомолекулярных полимерных соединений на основе полиакриламида (ПАА), а именно исследованиям реологических показателей (параметры проявления вязкоупругих свойств, характеристики поведения неньютоновских жидкостей) и изучению влияния внешних факторов (температура, минерализация, режим течения, время релаксации раствора) и внутренних факторов (конформационное состояние и молекулярная масса (ММ)) на процесс фильтрации в пористой среде [1]. Целью данной работы является сопоставление результатов реологических, спектрофотометрических и вискозиметрических исследований и анализ влияния ММ на ранее полученные зависимости физико-химических параметров растворов полимеров акрилового ряда.

В ходе анализа вязкоупругих свойств водных растворов ПАА [2] и определения их ММ [3] для некоторых марок ПАА были выявлены «точки инверсии» – при достижении содержания полимера в водном растворе в 0,25-0,5 % масс. зависимости изменяют свой характер и наблюдается резкий рост упругой компоненты вязкости из-за полного насыщения раствора молекулами полимера (рис. 1,2). Причем чем выше ММ, тем ниже содержание полимера, при котором достигается «точка инверсии» и упругая компонента начинает резко увеличиваться.

С увеличением частоты колебаний, прямо пропорциональной скорости фильтрации, содержание полимера, при котором достигается «точка инверсии» упругой составляющей, увеличивается. Из графиков можно сделать вывод, что с ростом скорости фильтрации увеличивается содержание полимера, при котором проявляется инверсия упругой составляющей и в меньшей степени проявляется эффект влияния упругой составляющей. Поэтому при фильтрации в зоне роста упругой компоненты вязкости полимерный раствор будет плохо фильтроваться в пористой среде из-за характеристик закачиваемого реагента (высокая ММ и, соответственно, большой диаметр молекул полимера), а также из-за технологии (низкая скорость фильтрации) или фильтрационно-емкостных свойств эксплуатационного объекта (низкое значение диаметра пор, низкая проницаемость). Исходя из этого с целью оптимизации различных технологий полимерного воздействия выдвигаются рекомендуемые диапазоны скоростей фильтрации.

Помимо этого, диапазон концентраций, где наблюдается рост упругой составляющей, характеризуется снижением вязкой составляющей, что вызывает отклонение от проектного отношения подвижностей нефти и полимерного раствора и, как следствие, вызывает дополнительное снижение эффективности полимерного воздействия.

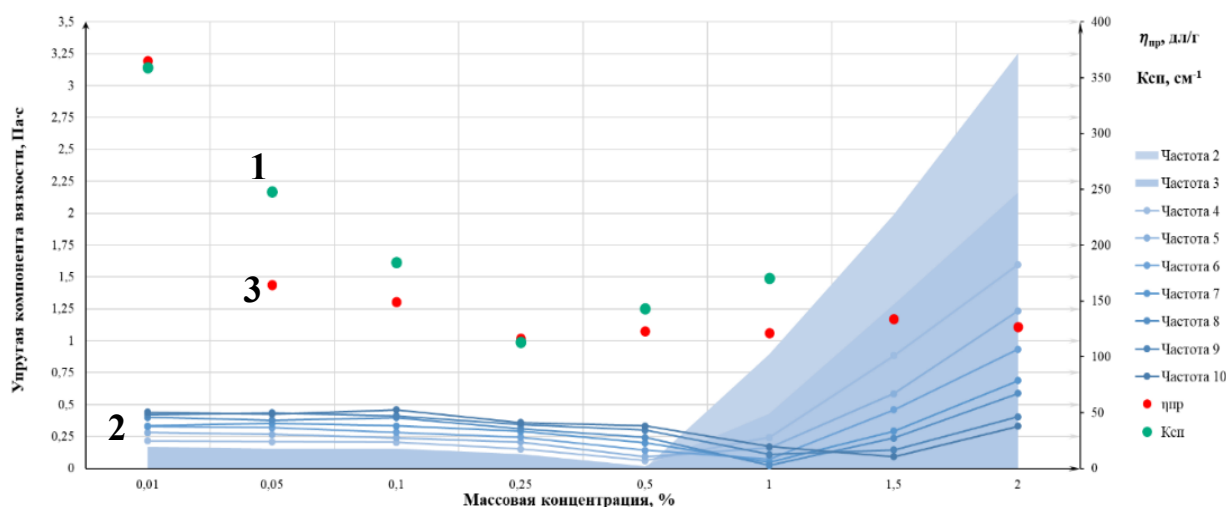


Рис. 1. Сопоставление зависимостей коэффициента светопоглощения (кривая 1), упругой составляющей (набор кривых 2) и приведенной вязкости (кривая 3) полимерных растворов от содержания ПАА марки PDA-1004

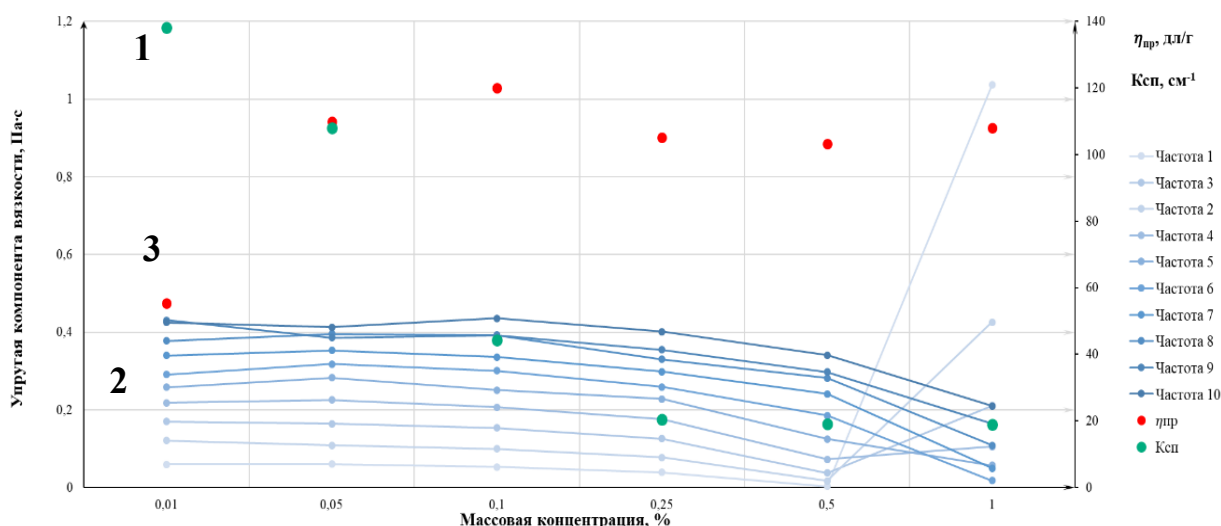


Рис. 2. Сопоставление зависимостей коэффициента светопоглощения (кривая 1), упругой составляющей (набор кривых 2) и приведенной вязкости (кривая 3) полимерных растворов от содержания ПАА марки Poly-T

На образцах некоторых марок уже на частотах 4 и 5 с⁻¹ достигается критическое значение числа Вейссенберга [4], отвечающего за вязкоупругое поведение (рис. 2), и при дальнейшем увеличении частоты эффекта инверсии не наблюдается.

Инверсионный характер подтверждается двумя независимыми от вязкоупругости экспериментами: оптическим с помощью контроля кривой коэффициента светопоглощения K_{sp} и реологическим с помощью контроля кривой приведенной вязкости.

Заметим, что точки инверсии, фиксируемые кривой K_{sp} , проявляются на меньших значениях содержания ПАА, чем аналогичные точки инверсии реологических кривых. Оптические исследования пропускания пучка поляризованного света монохроматической волны через слой исследуемого образца связаны с поглощением вещества на молекулярном уровне и расчетом изменения интенсивности света. Тогда как реологические исследования проводились с использованием ротационных вискозиметров, измеряющих сопротивление потока исследуемой жидкости при заданной скорости углового вращения. То есть расхождение может быть связано с различной степенью чувствительности, заложенной в принципе действия используемого оборудования.

На основании графиков можно судить о взаимосвязи оптической плотности как параметра, косвенно характеризующего молекулярный вес полимера, и вязкоупругих параметров полимерного раствора, которые характеризуют гидродинамические свойства потока. Также полученные корреляции подтверждают, что оптические исследования позволяют осуществлять контроль за изменением параметров полимерной системы на молекулярном уровне, реализация которого повысит эффективность принятия решений при разработке месторождений углеводородов.

Таким образом, с целью оптимизации технологий полимерного воздействия при обосновании содержания ПАА рекомендуется учитывать инверсионный характер показателей вязкоупругости, зависящих от внутреннего строения вещества, в т.ч. ММ: для полимерного заводнения рекомендуется диапазон содержаний полимера до роста упругой составляющей (доинверсионный), для потокоотклоняющих технологий рекомендуется диапазон содержаний полимера после роста упругой составляющей (заинверсионный).

Список литературы

1. Zhang H. P. et al. Synthesis and Mechanical Properties of Polyacrylamide Gel Doped with Graphene Oxide. / *Energies*. 2022. V. 15 (5714). <https://doi.org/10.3390/en15155714>.
2. Григорьева, В. М. Изучение вязкоупругих свойств растворов полимеров акрилового ряда / В. М. Григорьева, М. В. Мовпан // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2021. – Т. 1. – С. 167–171. – EDN CPBPUS.
3. Зазуля, В. С. К вопросу об определении молекулярной массы полимеров для добычи трудно-извлекаемой нефти / В. С. Зазуля, В. М. Григорьева, М. В. Мовпан // Нефть и газ – 2022 : Материалы 76-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 25–29 апреля 2022 года / Отв. редактор В. Г. Мартынов, сост. А. Ф. Максименко, А. Н. Комков, Р. Р. Фатхутдинов. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2022. – С. 161–170. – EDN NTRAIY.
4. Ахметов А. Т. и др. Эластичная турбулентность при течении полимерных растворов в микро-каналах с переменным сечением // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. – 2010. – Т. 7. – С. 48–59.

Научный руководитель: *Раупов Инзир Рамилевич, к.т.н., доцент кафедры РНГМ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.*

Реологические исследования вязкоупругих свойств высокомолекулярного полимерного раствора для повышения нефтеотдачи пластов

Аннотация. В данной работе мы представляем исследование реологических свойств частично гидролизованного полиакриламида (HPAM). Экспериментально измерено и количественно проанализировано время релаксации, которое является ключевым параметром, характеризующим поведение полимерных растворов HPAM при сдвиговом уплотнении. На основе динамических испытаний с частотной разверткой были измерены модуль упругости и модуль вязкости различных полимерных растворов, а для получения времени релаксации использовался метод перекрестного анализа.

Ключевые слова: химические методы увеличения нефтеотдачи, частично гидролизованный полиакриламид, терригенный коллектор, тяжелая нефть, вязкоупругость, неоднородность, полимерный раствор, реология.

Inzir R. Raupov*

Ahmed Kone

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

*inzirrr@yandex.ru

Rheological studies of viscoelastic properties of high molecular weight polymer solution for enhanced oil recovery

Abstract. In this paper, we present a study of the rheological properties of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM). The relaxation time, which is a key parameter characterizing the shear-thickening behavior of HPAM polymer solutions, has been experimentally measured and quantitatively analyzed. The elastic modulus and viscosity modulus of different polymer solutions were measured based on frequency sweep dynamic tests, and a cross-over method was used to obtain the relaxation time.

Keywords: chemical methods of enhanced oil recovery, partially hydrolyzed polyacrylamide, terrigenous reservoir, heavy oil, viscoelasticity, heterogeneity, polymer solution, rheology.

Полимерное заводнение для повышения эффективности коэффициента охвата широко изучалось в лабораторных условиях и испытывалось на промыслах для традиционных нефтей. Согласно литературным данным, полимерное заводнение не рекомендуется применять для нефтей с вязкостью более 200 мПа.с. Сильно вязкие пальцы при заводнении тяжелой нефти оставляют большое количество нефти в пласте нетронутой. Полимерное заводнение может стать потенциальным методом повышения нефтеотдачи из тяжелой нефти за счет увеличения эффективности коэффициента охвата (1). Однако вопрос о том, как разработать полимерное заводнение для пласта с тяжелой нефтью, чтобы сделать его экономически целесообразным, изучен недостаточно. В данной работе исследован потенциал полимерного заводнения пласта тяжелой нефти с использованием высокомолекулярного HPAM и его вязкоупругие свойства. Так, реологические исследования проводились при различных концентрациях и различных зазорах между параллельными реометрическими пластинами. Вязкоупругое поведение раствора полимера с высокомолекулярным частично гидролизованным полиакриламидом (HPAM) исследовали методом динамических сдвиговых измерений. Влияние различных параметров, а именно концентрации реагента, молекулярной массы полимера, зазора между

параллельными пластинами, на модули упругости (G') и потери (G'') было систематически исследовано с помощью тестов с частотной разверткой (2).

В данном исследовании использовались полимеры НРАМ (FLOPAAM 3630). Полимеры были предоставлены компанией SNF Floerger. Растворы полимеров готовили путем растворения сухих полимеров в дистиллированной воде при концентрации 5000 частей на миллион (ppm) с использованием магнитной мешалки.

Все растворы готовились в соответствии со стандартом Американского института нефти – API (Рекомендуемые практики оценки полимеров, используемых в операциях по повышению нефтеотдачи пластов, 1990), начиная с хранимого раствора с содержанием 5000 ppm, с учетом рекомендаций по перемешиванию, скорости, общему времени растворимости и т.д.

Для проведения реологических испытаний использовался реометр ANTON PAAR, работающий в режиме параллельного колебания пластин. Для определения линейной вязкоупругой области проводился динамический тест на развертку деформации в диапазоне 1–1000 % деформации при определенной частоте (10 рад/с). Изменение реологических свойств с частотой отмечали по результатам динамической развертки частоты, проведенной в диапазоне 1–1000 рад/с при 25°C с заданной амплитудой деформации 10 %. Для проведения динамической развертки была выбрана температура 25°C. Полученные результаты, такие как модуль потери (G''), модуль упругости (G'), используются для расчета времени релаксации (3).

На рисунке 1 показаны результаты реологического исследования теста на вращение с 8 различными диаметрами между параллельными пластинами раствора высокомолекулярного полимера в концентрации 5000 ppm. Этот тест показывает, как меняется вязкость в зависимости от скорости сдвига, и чем больше диаметр, тем более вязкий раствор мы получаем.

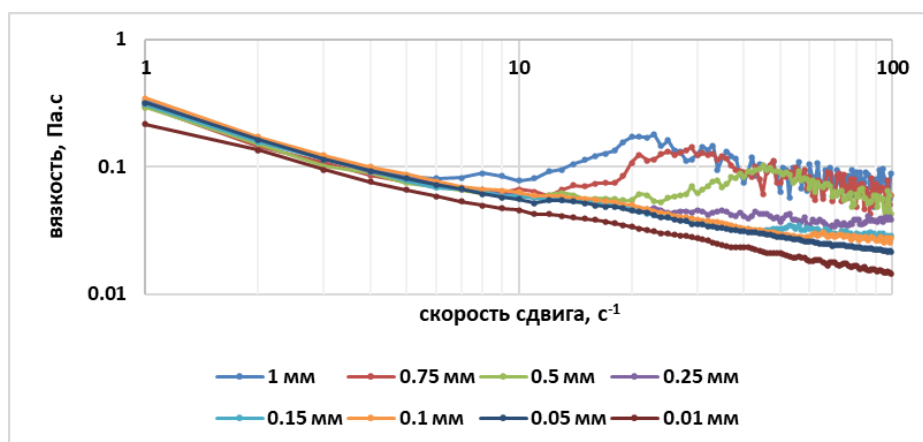


Рис. 1. Вязкость в зависимости от скорости сдвига и зазоров между параллельными реометрическими пластинами

Испытание на динамическую развертку деформации – это метод измерения G' и G'' в зависимости от деформации для определения пределов линейной вязкоупругости при постоянной частоте, как показано на рисунке 2. Испытания на динамическую развертку деформации проводились в диапазоне деформаций от 1–1000 % при частоте 10 рад/с. Измеренный предел линейной вязкоупругости использовался в качестве исходных данных для испытания динамической развертки частоты. Испытание динамической развертки частоты использовалось для измерения G' и G'' как функций частоты в диапазоне 1–1000 рад/с в пределах предела линейной вязкоупругости. Время релаксации определялось как обратная частота пересечения G' и G'' (рис. 3) и равно $\lambda_R = 0,085397$ с.

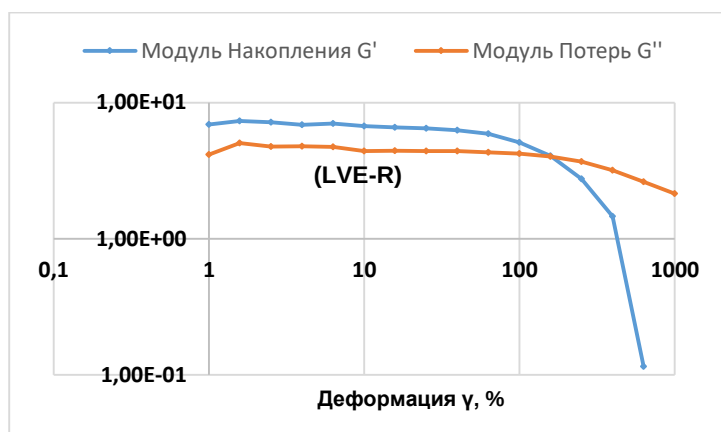


Рис. 2. Результаты испытаний с амплитудной разверткой, иллюстрирующие изменение модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') в зависимости от деформации (γ)

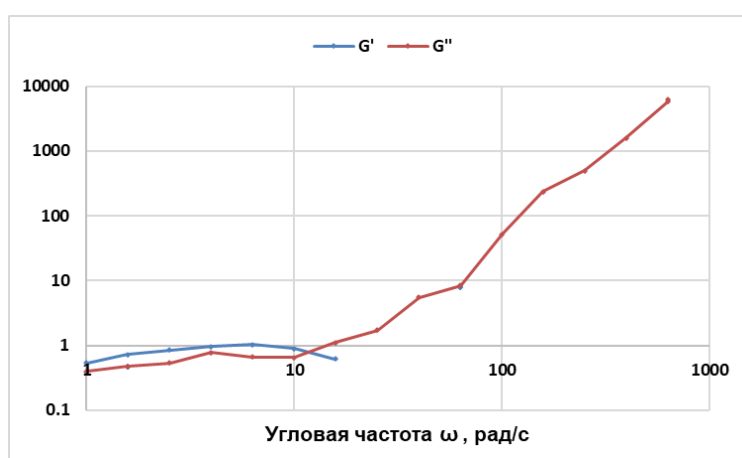


Рис. 3. Результаты испытаний с частотной разверткой, иллюстрирующие изменение модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') в зависимости от угловой частоты (ω).

Результаты показывают, что с увеличением диаметра пор время релаксации раствора полимера увеличивается, достигая «точки инверсии» (перехода из вязкого в вязкоупругое состояние) с последующей стабилизацией: при более высоком содержании полимера точка инверсии достигается при меньшем диаметре пор.

Список литературы

1. Азад, М. С., Далсания, Ю. К. и Триведи, Дж. Дж. (2018), Реометрия растяжения с капиллярным разрушением ассоциативных и гидролизованых полиакриламидных полимеров для применения в нефтедобыче. Дж. Прил. Полим. Науки, 135, 46253. doi: 10.1002/app.46253.
2. Левенте Санто, Роберт Фогт, Джулия Мейер, Дитмар Аул, Эвелин Ван Реймбеке, Кристиан Фридрих; Время релаксации перепутывания расплавов полиэтилена по данным высокочастотной реометрии в мегагерцовом диапазоне. Дж. Реол. 1 сентября 2017 г.; 61 (5): 1023–1033. <https://doi.org/10.1122/1.4998174>.
3. Хушбу Ринава, С. Н. Маити, Родольф Соннье, Хосе-Мари Лопес-Куэста. Динамический реологический исследования и применимость принципа суперпозиции время-температура для смесей PA12/SEBS-g-MA. Полимерный бюллетень, 2015, 72 (12), стр. 3305-3324. ff10.1007/s00289-015-1467-4ff.fhal-02914222ff.

Научный руководитель: *Раупов Инзир Рамилевич, к.т.н., доцент кафедры РНГМ, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.*

Перспективы применения комбинированных гуаро-боратных бинарных термохимических композиций для гидроразрыва в «холодных» пластах

Аннотация. Гидроразрыв пласта традиционно является одним из ключевых методов, позволяющих вовлечь в разработку трудноизвлекаемые запасы нефти. Особенности применения гидроразрыва в пластах с низкой температурой обусловлено в первую очередь свойствами жидкости разрыва и влиянием этих свойств на проводимость трещин и прилегающих к трещине интервалов продуктивных пластов. Придание традиционным гуаро-боратым жидкостям ГРП комбинированных свойств, позволяющих регулируемо управлять термохимической реакцией, является одним из перспективных направлений совершенствования выполнения ГРП. Ключевыми аспектами технологической эффективности предлагаемого подхода в совершенствовании ГРП является возможности решения целого ряда задач, таких как: увеличение гидростатического давления жидкости ГРП за счет насыщающих компонентов основы жидкости ГРП, создание после ГРП условий активации термохимической управляемой реакции, позволяющей очистить пропантную набивку и прилегающие пласты как от жидкостей ГРП, так и от коьматантов АСПО за счет температурного разложения и генерации газов, создать условия закрепления RCP пропантов за счет выделяемого тепла. В представленной работе на основании лабораторных экспериментов анализируются возможности применения технологий и дальнейшие перспективы масштабирования в условия конкретных эксплуатационных объектов.

Ключевые слова: гуаро-боратные жидкости, термохимические составы, термохимическая реакция, генерация тепла и давления, реология, деструкция геля, пропантная пачка, АСПО, очистка трещины, очистка пласта, проводимость, спекание RCP пропанта

Emil A. Sabitov*
Saidi Saif Saed
IGPT KFU, Kazan, Russia
* emilsabitovkzn@gmail.com

Prospects of application of combined guar-borate binary thermochemical compositions for hydraulic fracturing in “cold” formations

Abstract. Hydraulic fracturing remains a widely utilized technique for the development of hard-to-recover oil reserves. Its application in low-temperature reservoirs is contingent on the properties of the fracturing fluid and the resulting effects on the conductivity of fractures and adjacent productive formations. Transitioning from conventional guar-borate-based fracturing fluids to a combined fluid that enables controlled thermochemical reactions represents a promising advancement in fracturing technology. The proposed technology addresses several critical issues, including: Enhancing hydrostatic pressure within the fracturing fluid through additional components; Creating post-fracturing conditions of activation of the thermochemical controlled reaction, allowing to clean the proppant packing and adjacent formations from both fracturing fluids and ARPD due to thermal decomposition and gas generation; Establishing conditions that promote the fixation of resin-coated proppants (RCP) as a result of the heat generated. This study, based on laboratory experimentation, evaluates the feasibility of this technology and explores the potential for scaling its application within specific operational environments.

Keywords: guaro-borate fluids, thermochemical compositions, thermochemical reaction, heat and pressure generation, rheology, gel degradation, proppant pack, ARPD, fracture cleanup, formation cleanup, conductivity, RCP proppant sintering.

На сегодняшний день гидравлический разрыв пласта является одной из самых применяемых и востребованных технологий воздействия на пласты. Анализ проблематики выполнения ГРП на некоторых месторождениях Восточной Сибири выявили проблему недостаточной эффективности технологии и осложнений, возникающих при последующей эксплуатации скважин, связанных с низкими начальными пластовыми температурами. Например, данная проблематика активно проявляется в некоторых залежах Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции.

Основной задачей исследования ставилась оценка возможности решения проблем с низкой эффективностью ГРП в «холодных» пластах и борьбы с осложнениями за счет достижения синергетического эффекта воздействия при использовании жидкостей ГРП, сочетающих термохимические активируемые компоненты. Идея применения термохимической реакции в задачах ГРП является достаточно хорошо проработанной в лабораторных условиях и исследована различными авторами. При этом отдельные авторы рассматривают применение бинарных жидкостей как альтернативы существующим технологиям ГРП [1]. Исследователи описывают идею закачки химикатов во время процедуры гидроразрыва пласта, которые в результате реакции выделяют тепло и газ. Повышение температуры и выделение газа создает локальное давление, которое приводит к термическому и механическому разрушению. Результаты лабораторных исследований на из плотных отложений месторождений США показали, что проницаемость испытанных кернов значительно увеличилась после применения обработки. Также было обнаружено усиленное сообщение между микро- и макропорами [2]. Вопросы влияния реакции бинарных систем на изменение напряженного состояния пород также является достаточно изученным вопросом [1, 3]. Варианты комбинации обработки трещины после выполнения ГРП для обеспечения очистки трещины и обеспечения локального воздействия также является задачей, которая изучалась многими авторами [4].

Ключевой задачей, решаемой в рамках представленной работы, являлась оценка возможности придания к традиционной жидкости гидроразрыва на гуаро-боратной основе свойств термохимической жидкости.

Концепция применения подобной системы основывается на возможностях:

- создания инертной жидкости до активации, обладающей свойствами традиционной жидкости гидроразрыва с хорошими и стабильными для выполнения ГРП свойствами;
- тепловой обработки трещины и прилегающей к трещине зон, которая позволяет обеспечить высокую степень очистки и проводимость трещины ГРП и прилегающих пластов;
- решить задачу закрепления RCP пропантов, в достаточных для этого температурных режимах реакции;
- обеспечить условия удаления АСПО в интервале трещины ГРП.

В качестве основы приготовления гуаро-боратной системы жидкости ГРП была подобрана смесь активных бинарных солей, обеспечивающих минимальное изменения рН системы и стабильные реологические характеристики (Таблица 1).

Основные компоненты жидкости ГРП были идентичны промышленно применяемым в системах ГРП и включали:

- Биоцид / ТТ ВЮ, 0,02 л/м³;
- Гелеобразователь / ТТ WG, 3 кг/м³;
- Диэмульгатор / ТТ NE, 1 л/м³;
- Стабилизатор глин / ТТ CS, 2 л/м³;
- Брейкер / ТТ ВА марка, 0,7 кг/м³;
- Сшиватель / ТТ ВС марка 1, 2 л/м³.

Исследования предусматривали приготовление бинарных термохимических систем разной степени насыщенности с оценкой реологии и стабильности жидкостей с минимальным отклонением от базовых характеристик жидкостей ГРП.

Таблица 1

Изменение основных физических характеристик бинарного раствора и сшитого геля ГРП

Насыщенность раствора	Плотность, кг/м ³	Кислотный индекс раствора pH, ед	Кислотный индекс сшитого геля pH, ед
пресная вода	1000	7,01	8,34
15 % раствор	1038	7,5	8,44
25 % раствор	1110	8	8,49
35 % раствор	1190	8,5	8,68

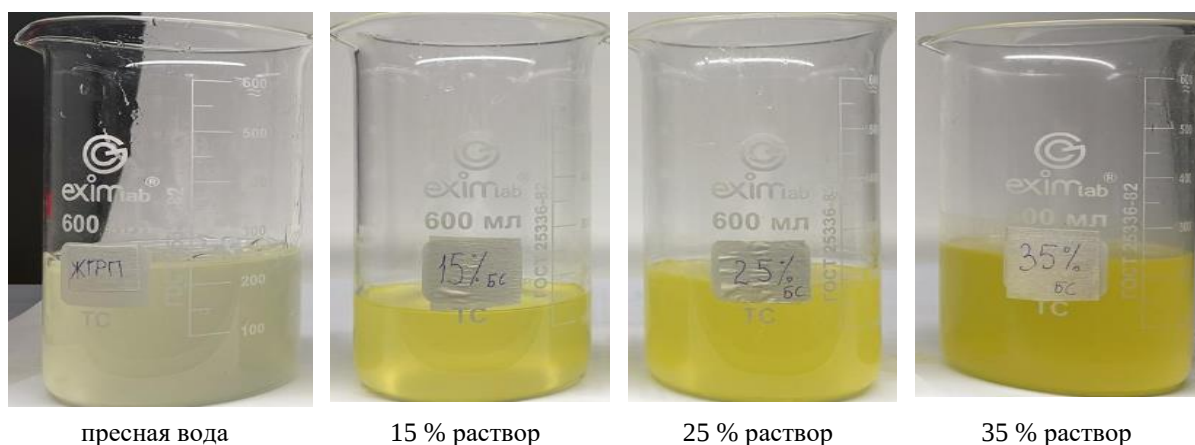


Рис. 1. Внешний вид жидкостей ГРП, приготовленных на пресной воде и бинарных термохимических составах разной концентрации

Важно отметить, что присутствие в составе жидкости ГРП бинарных термохимических компонентов не повлияли как на скорость гидратации раствора жидкости ГРП, так и на сшивающую способность сшивателя, т.е. система стабильна. Нормативное время гидратации 120 секунд и закрытие воронки происходило за 60–150 секунд. Стандартные тесты на реологию предусматривали выполнение тестов на чувствительность сдвигу на 511с^{-1} и 100с^{-1} с использованием вискозиметра OFITE 900 и теста на стабильность. Результаты сравнения реологических характеристик систем на пресной воде и систем на бинарных термохимических компонентах показывают незначительное влияние компонентов на реологию систем для концентраций 15 и 25 %. В концентрации раствора 35 % стабильность системы хуже. Кроме того, отмечается положительное влияние компонентов на сшивку системы, что не характерно для минерализованных систем приготовления жидкости ГРП.

Активация геля ГРП предусматривала закачку окислителя и оценку изменения температуры реакции в свободном объеме и степени деструкции геля ГРП. Результаты тестов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Характеристика деструкции сшитого геля ГРП

Насыщенность раствора, %	Температура реакции, °C	Деструкция
15	73	гель разрушился
25	76	гель разрушился
35	83	гель разрушился

Результаты деструкции геля ГРП показывают, что деструкция происходит до ньютоновской жидкости, т.е. происходит полное деструктирование сшитого геля ГРП.

Таким образом, результаты лабораторного изучения возможностей использования комбинированных термохимических жидкостей ГРП показывают, что для месторождений с низкими пластовыми температурами использование подобных систем является потенциально перспективным.

Применение подобных систем целесообразно в условиях, когда возникают проблемы с окончательной деструкцией геля при гидроразрыве пласта (ГРП) и наблюдается значительный вынос даже РСР-пропантов обладающих более высокой температурой закрепления, чем пластовые.

Комбинация характеристик жидкости ГРП и термохимической жидкости несмотря на дополнительные затраты, в конечном счете могут значительно повлиять на потенциал работы скважин и повысить эффективность технологических работ.

Список литературы

1. Tariq, Z., Aljawad, M. S., Mahmoud, M., Abdulraheem, A., & Al-Nakhli, A. R. (2020). Thermochemical acid fracturing of tight and unconventional rocks: Experimental and modeling investigations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103606. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103606.
2. Al-ajwad, H., H. Abass, et al. (2013). Unconventional Gas Stimulation by Creating Synthetic Sweetspot. 2013 SPE Middle East Unconventional Gas Conference & Exhibition. Muscat, Sultanate of Oman, Society of Petroleum Engineers.
3. Tariq, Z., Mahmoud, M., Abdulraheem, A., Al-Nakhli, A., & BaTaweel, M. (2020). An experimental study to reduce the breakdown pressure of the unconventional carbonate rock by cyclic injection of thermochemical fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106859. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106859.
4. Aljawad, M. S., Mahmoud, M., & Abu-Khamsin, S. A. (2020). Mass and Heat Transfer of Thermochemical Fluids in a Fractured Porous Medium. *Molecules*, 25(18), 4179. DOI: 10.3390/molecules2518417.
5. Ф. Э. Сафаров, А. А. Мамыкин, С. А. Вежнин, А. Г. Телин Технические решения для выполнения операций по термозакреплению гср-пропанта и термореагентному воздействию на призабойные зоны пласта добывающих скважин / Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. Том 4 / № 1 (2022). С 73–82.

Научный руководитель: *Маннанов Ильдар Илгизович, к.т.н., доцент, Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета (ИГиНГТ К(П)ФУ), Казань, Россия.*

Соромотин Андрей Витальевич¹

Мартюшев Дмитрий Александрович²

¹ инженер 1-й категории, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Пермь, Россия, s@soromotinav.ru

² д.т.н., профессор кафедры Нефтегазовых технологий,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, martyushevdi@inbox.ru

Разработка автоматизированного способа оценки проницаемости удаленной зоны пласта

Аннотация. Используемые на данный момент методы оценки проницаемости удаленной зоны пласта опираются на интерпретацию гидродинамических исследований. В настоящей работе разрабатывается инструмент оперативной оценки исследуемого параметра путем моделирования кривых восстановления давления в любой момент времени эксплуатации скважин без их остановки с помощью машинного обучения (МО). Решение данной задачи позволит обеспечить своевременное применение методов интенсификации и повышения нефтеотдачи пласта, а также контроль за разработкой месторождений углеводородного сырья.

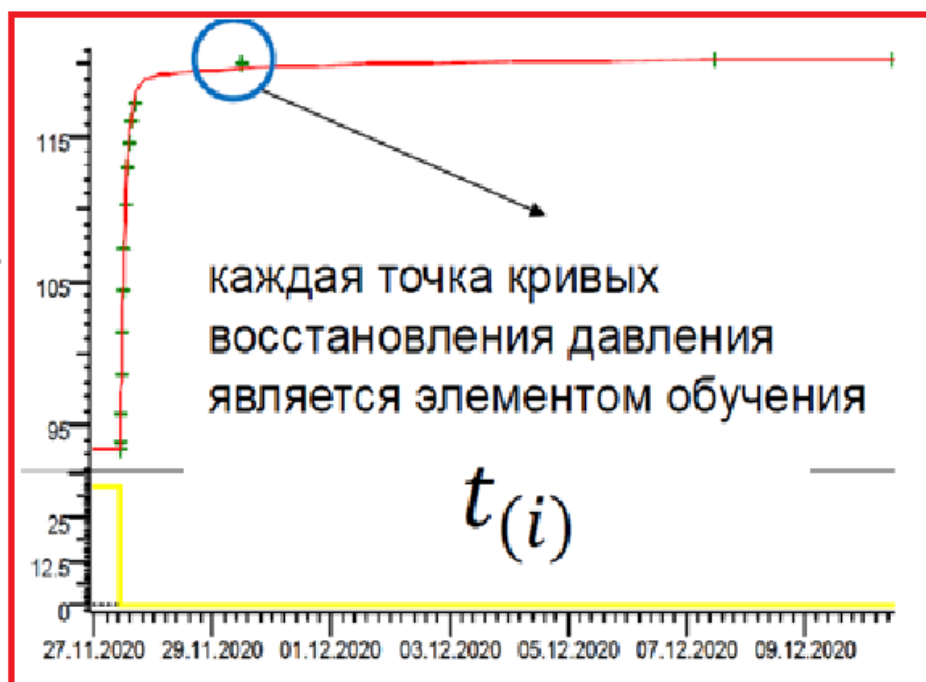
Ключевые слова: гидродинамические исследования, искусственные нейронные сети, машинное обучение, проницаемость, кривая восстановления давления.

Введение (Introduction). В настоящее время методы определения проницаемости имеют ряд недостатков. Эмпирические корреляции зависят от статистических связей между измерениями проницаемости керна и петрофизическими свойствами, что может сделать их непригодными для применения в различных геолого-физических условиях [1]. Методы прогнозирования проницаемости путем интерпретации данных каротажа широко изучаются [2]. Однако данный способ предоставляет информацию о свойствах окружающего пласта, непосредственно прилегающего к стволу скважины. Целью настоящего исследования является описание инновационных подходов к использованию накопленных данных разработки объектов и данных интерпретации гидродинамических исследований скважин для прогнозирования фильтрационных характеристик пласта. Эти методы позволят контролировать фильтрационные параметры удаленной зоны скважин без их остановки, что позволит снизить потери предприятий, занимающихся добычей нефти [3].

Методы (Methods). Достоверное прогнозирование проницаемости удаленной зоны пласта осложнено особенностями процесса интерпретации гидродинамических исследований. Поэтому в данной работе представляется инновационный подход прогнозирования кривых восстановления давления. Сформирована информация высокоинформативных 4045 гидродинамических исследований. База данных содержит исходные параметры и данные интерпретации скважин различных объектов с различными геолого-физическими свойствами пласта и нефти. Прогнозируемым параметром является забойное давление в каждый временной период восстановления КВД (кривых восстановления давления). Исходные параметры и алгоритм обучения представлены на рисунке 1.

В качестве модели прогнозирования выбран градиентный бустинг catboost – техника машинного обучения для задач классификации и регрессии, которая строит модель предсказания в форме ансамбля слабых предсказывающих моделей, обычно деревьев решений. Обучающая и тестовая выборки разделены в соотношении 90 % на 10 %.

№	Исходный параметр	Источник
1	Дебит жидкости	Эксплуатационные параметры
2	Обводненность	
3	Пластовое давление	
4	Забойное давление	
5	Удельный коэффициент продуктивности	
6	Время восстановления	Данные ГДИ
7	Проницаемость ПЗП	
8	Пористость	Свойства пласта
9	Коэффициент сжимаемости породы	
10	Коэффициент сжимаемости пласта	
11	Глубина	
12	Эффективная нефтенасыщенная толщина пласта	
13	Вязкость нефти	Свойства нефти
14	Газосодержание	
15	Плотность нефти	
16	Коэффициент сжимаемости нефти	
17	Объемный коэффициент нефти	
18	Давление насыщения	



$$P_{\text{заб}}(i)$$

Рис. 1. Алгоритм модели прогнозирования забойного давления в момент восстановления

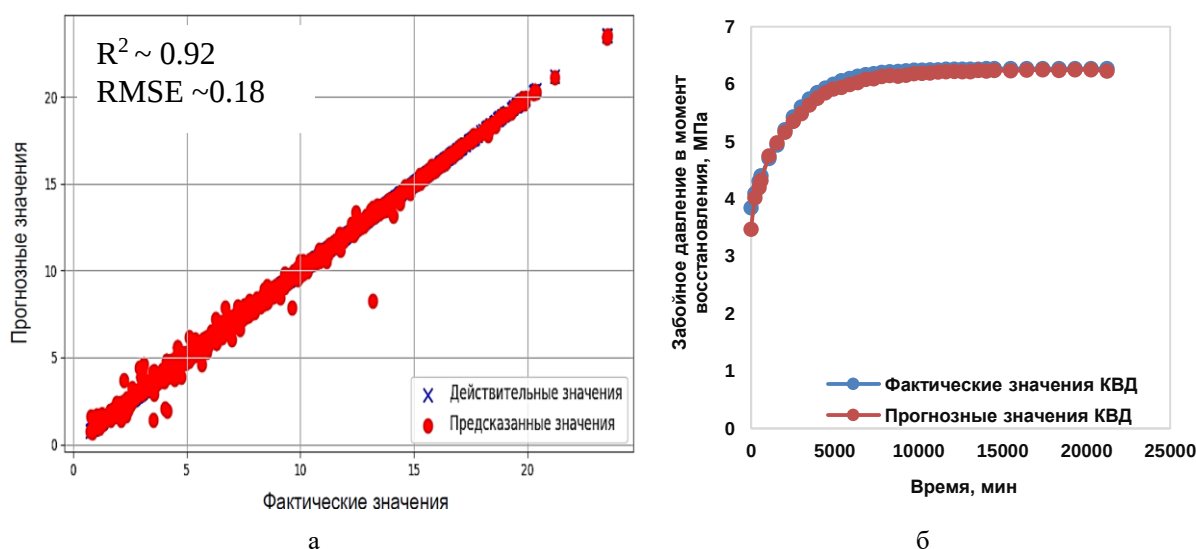


Рис. 2. Результаты прогнозирования забойного давления в момент восстановления
а – диаграмма рассеяния прогнозных и фактических значений давления в момент восстановления;
б – пример прогнозирования кривой восстановления давления

Результаты и обсуждение (Results and discussion). Интеграция методов машинного обучения и использование кривых восстановления давления в реальном времени перспективно для контроля за разработкой месторождений углеводородов. Эти технологии не только увеличат точность прогнозирования проницаемости, но и сократят время простоя, связанное с традиционными методами испытания скважин. На рисунке 2а приведено корреляционное поле прогнозных и фактических значений забойного давления в моменты восстановления. Коэффициент детерминации для тестовой выборки составил R^2 более 0,92. RMSE (Root Mean Square Error – корень среднеквадратичной ошибки) составил ~0,18. На рисунке 2б представлен пример прогнозирования кривой восстановления давления.

Закключение. Таким образом, данные алгоритмы позволяют моделировать кривую восстановления давления в любой момент эксплуатации скважины без необходимости ее остановки для дальнейшей интерпретации проницаемости удаленной зоны пласта. Предлагаемые подходы способствуют более эффективной и экономически рациональной разработке месторождений, обеспечивая оптимизацию ресурсов и улучшение процесса принятия решений в нефтедобыче.

Список литературы

1. Belhouchet H. E., Benzagouta M. S., Dobbai A., Alquraishi A., Duplay J. A new empirical model for enhancing well log permeability prediction, using nonlinear regression method: Case study from Hassi-Berkine oil field reservoir – Algeria // Journal of King Sau University – Engineering Sciences. 2021. Vol. 33, PP. 136–145. DOI: 10.1016/j.jksues.2020.04.008.
2. Bennis M., Torres-Verdín C. Estimation of Dynamic Petrophysical Properties from Multiple Well Logs Using Machine Learning and Unsupervised Rock Classification // Paper SPWLA-2019-KKKK, SPWLA 60th Annual Logging Symposium. 2019. The Woodlands, Texas, USA. DOI: 10.2118/134011-MS.
3. А. В. Соромотин, Д. А. Мартюшев, А. А. Мелехин. Прогнозирование гидродинамических параметров призабойной зоны скважин с использованием методов машинного обучения // Георесурсы. 2024. №26(1), С. 109–117. DOI: 10.18599/grs.2024.1.9.

Перспективы применение машинного обучения в нефтегазовой отрасли

Аннотация. Целью данного исследования является определение роли машинного обучения (МО) в повышении эффективности и производительности нефтегазовой отрасли. С ростом объемов данных возрастает необходимость в их обработке и анализе, и машинное обучение становится важным инструментом для решения этих задач. Однако применение МО в отрасли сопряжено с рядом проблем, включая дефицит квалифицированных специалистов, недостаток вычислительных мощностей и низкое качество получаемых данных. В рамках работы рассматриваются примеры использования МО в разведке и разработке месторождений, бурении, предотвращении аварий и оптимизации производственных процессов, что помогает снизить затраты и повысить эффективность добычи углеводородов. Основное внимание уделяется преодолению ограничений традиционных аналитических методов и выявлению перспективных направлений применения МО.

Ключевые слова: машинное обучение (МО), цифровая трансформация, нефтегазовая отрасль, большие данные, анализ данных, искусственный интеллект.

Andrey S. Fedotov*

Vladislav S. Dormenev

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

* fedotandrey99@mail.ru

Prospects of Machine Learning Application in the Oil and Gas Industry

Abstract. The aim of this study is to determine the role of machine learning (ML) in enhancing the efficiency and productivity of the oil and gas industry. As the volume of data grows, the need for its processing and analysis increases, making machine learning a crucial tool for addressing these challenges. However, the application of ML in the industry faces several issues, including a shortage of qualified specialists, insufficient computational resources, and low data quality. This study examines examples of ML applications in exploration and field development, drilling, accident prevention, and optimization of production processes, which help reduce costs and improve hydrocarbon recovery efficiency. Particular attention is given to overcoming the limitations of traditional analytical methods and identifying promising directions for ML implementation.

Keywords: machine learning (ML), digital transformation, oil and gas industry, big data, data analysis, artificial intelligence.

Машинное обучение (МО) становится важнейшим инструментом в процессе цифровой трансформации нефтегазовой отрасли, играя ключевую роль в повышении эффективности добычи, снижении операционных затрат и минимизации рисков. Сегодняшняя отрасль сталкивается с необходимостью обрабатывать огромные объемы данных, поступающих из различных источников, таких как датчики, геофизические исследования, данные, получаемые во время бурения и добычи. В этом контексте цифровизация и внедрение технологий МО становятся важными элементами для поддержания конкурентоспособности на мировом рынке.

МО подразделяется на контролируемое и неконтролируемое обучение. Контролируемое обучение предполагает обучение моделей на размеченных данных, где целевая переменная известна. Этот тип обучения активно используется в нефтегазовой отрасли для задач, таких как прогнозирование характеристик скважин, классификация типов пород, предсказание объема добычи или параметров нефти. Неконтролируемое обучение

применяется для анализа данных без предварительной разметки данных. Например, алгоритмы кластеризации используются для сегментации месторождений по геологическим признакам, что помогает выявлять области с наибольшим потенциалом добычи нефти.

В рамках проведенного анализа было рассмотрено успешное применение методов МО в различных областях нефтегазовой отрасли, включая разведку и разработку месторождений, бурение, мониторинг оборудования и оптимизацию производственных процессов. Алгоритмы позволяют анализировать геологические данные, прогнозировать добычу и предотвращать аварии, а также автоматизировать управление данными.

Одним из успешных примеров применения машинного обучения в области разведки месторождений является проект DeerpCore, разработанный Российской компанией Digital Petroleum и представляет собой систему автоматического описания ядра полного цикла. Разработанный компанией программный продукт позволяет с достаточно высокой точностью и скоростью классифицировать по фотографии ядро на различные типы и текстуры пород.

Система основана на обработке входных данных, представленных в виде снимков ядра в «ящике», с использованием искусственных сверточных нейронных сетей, которые способны извлекать текстурные, цветовые и структурные особенности изображения. Данная система позволяет эффективно обрабатывать и классифицировать данные о ядре, позволяя сократить время, необходимое для анализа с 5 часов до 40 минут на 50 метров ядра, с точностью до 95 %.

В области разработки месторождений углеводородов Российская компания Nest Lab разработала технологию, которая помогает нефтяным компаниям оптимизировать добычу с помощью алгоритмов МО и физических моделей пласта. Она анализирует большие массивы данных о месторождении и на выходе формирует рекомендации по оптимизации добычи на основе глубокого анализа данных.

Полевые испытания «умной» системы показали значительное улучшение производительности на нефтяных месторождениях в нескольких компаниях, включая ЛУКОЙЛ и Газпром нефть. Так в одной из компаний, использующих технологию Nest Lab, дневной объем добычи нефти увеличился на 70 % за три года для месторождения из 50 скважин. Рекомендации, подготовленные системой, позволили инженерам корректировать объем добычи и улучшать управление скважинами.

В проекте на крупном месторождении в Западной Сибири Nest Lab провела анализ работы примерно 800 скважин. Система выявила мероприятия, которые не были эффективными в прошлом, что позволило сэкономить средства, избегая повторения этих ошибок. В среднем на каждые 100 скважин Nest Lab помогает избежать одного неэффективного бурения и семи малоэффективных операций. Анализ исторических данных помог сократить число неэффективных операций, позволяя компаниям лучше планировать будущее и экономить на операционных затратах.

МО, уже зарекомендовавшее себя в задачах разработки месторождений, находит успешное применение и в области бурения. Одной из ключевых задач здесь является определение уровня загрязнений нефти буровым раствором на углеводородной основе (ОВМ). Этот процесс традиционно требует аналитических подходов, которые могут быть субъективными и давать разнящиеся результаты в зависимости от выбора методов и опыта специалиста.

Алмалки Ф.Ф. и др. предложили модель машинного обучения, способную распознавать специфические закономерности загрязнений в пробах нефти и прогнозировать уровень присутствия ОВМ. Такой подход исключает субъективность анализа и повышает точность и эффективность работы.

В предложенном методе были применены различные алгоритмы машинного обучения, такие как логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVM), дерево решений и случайный лес. После обучения модель была протестирована на реальных данных. Лучшую точность в 97 % и F1-оценку 94 % показал алгоритм ручной логистической регрессии, что делает его оптимальным для решения этой задачи.

Это исследование демонстрирует, как машинное обучение упрощает и ускоряет определение ОВМ-загрязнений. МО помогает снизить затраты на бурение за счет минимизации времени на очистку проб и делает анализ данных более воспроизводимым и объективным.

Примеры успешного применения МО показывают важность дальнейшего развития и интеграции цифровых технологий в нефтегазовой отрасли. Тем не менее, для этого необходимо преодолеть проблемы нехватки квалифицированных специалистов, недостаточных вычислительных мощностей и качества данных.

Список литературы

1. Дмитриевский А. Н., Еремин Н. А., Черников А. Д. Цифровая модернизация нефтегазодобычи: инструменты и индикаторы развития // Экспозиция Нефть Газ. – 2024. – Т. 102. – С. 44–47.
2. Чесноков А. С. Робот на месторождении. Цифровые технологии расширяют возможности российской нефтедобычи // Нефтегазовая вертикаль. – 2017. – № 24 – С. 38–41.
3. Almalki F. F. et al. Machine Learning to Detect Oil-Based Mud Contamination in Oil Samples // International Petroleum Technology Conference – Society of Petroleum Engineers, 2024. – P. 12.
4. Baraboshkin E. E. et al. Automated Full-Bore Core Description Application for Production Purposes. From an Idea to IT-Product // Data Science in Oil and Gas 2021. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – P. 1–6.
5. Sircar A. et al. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry // Petroleum Research. – 2021. – Т. 6. – №. 4. – P. 379–391.

Научный руководитель: Хабибуллин Ринат Альфредович, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия.

Межфазные взаимодействия в ячейке Хеле-Шоу на примере различных систем «нефть-вода-ПАВ-наночастицы»

Аннотация. Целью исследования являлось изучение процессов при динамическом взаимодействии фаз в ячейке Хеле-Шоу в различных системах «нефть-вода-ПАВ-наночастицы». Взаимодействия на границах фаз влияют на эффективность разрабатываемых составов с целью оптимизации процессов извлечения нефти, особенно трудноизвлекаемой. Возникновение наноразмерных систем на поверхностях взаимодействия фаз и их эволюция представляет сложный процесс, особенно в условиях реального коллектора. Синергизм действия различных компонентов также усложняет процесс. Поэтому изучение механизмов взаимодействия нефти с другими компонентами, как и возможность разработки вытесняющих агентов для извлечения нефти в более простых и наглядных условиях в ячейке Хеле-Шоу является актуальной задачей. Результаты исследования показали, что добавление наночастиц в ПАВ способствует более эффективному извлечению нефти и снижает возникновение «вязких пальцев».

Ключевые слова: межфазные взаимодействия, наночастицы, ячейка Хеле-Шоу, тяжелая нефть, вода, ПАВ, вязкие пальцы.

Alfinur D. Khusnutdinova
Samara State Technical University, Samara, Russia, pushchinchigym@yandex.ru

Interphase interactions in the Hele-Shaw cell on the example of various "oil-water-surfactant-nanoparticle" systems

Abstract. The aim of the study was to study the processes during the dynamic interaction of phases in the Hele-Shaw cell in various «oil-water-surfactant-nanoparticle» systems. Interactions at the phase boundaries affect the efficiency of the compositions being developed in order to optimize the processes of oil extraction, especially difficult to recover. The emergence of nanoscale systems on the surfaces of phase interaction and their evolution is a complex process, especially in the conditions of a real collector. The synergistic action of the various components also complicates the process. Therefore, the study of the mechanisms of interaction of oil with other components, as well as the possibility of developing displacing agents for oil extraction in simpler and more visual conditions in the Hele-Shaw cell, is an urgent task. The results of the study showed that the addition of nanoparticles to surfactants contributes to more efficient oil extraction and reduces the occurrence of "viscous fingers".

Keywords: interfacial interactions, nanoparticles, Hele-Shaw cell, heavy oil, viscous fingers, surfactants.

При добыче тяжелой нефти применение воды в качестве вытесняющей жидкости становится неэффективным и приводит к преждевременному обводнению скважины, одной из причин которого является возникновение «вязких пальцев». Образование «вязких пальцев» связано с возникновением неустойчивой границы между нефтью и водой, также называемой неустойчивостью Саффмана-Тейлора [1]. Для эффективного извлечения нефти перспективно применение составов на основе ПАВ с добавлением наночастиц. Моделирование процесса добычи нефти представляет собой сложную задачу. Простейшей моделью нефтяного пласта является ячейка Хеле-Шоу (рис. 1.), которая состоит из двух параллельных стеклянных пластин, между которыми создается зазор толщиной около 20 микрон. В верхнем стекле сверлится отверстие диаметром 1–2 мм, через которое с помощью насоса нагнетается жидкость. Расход жидкости в ячейке Хеле-Шоу можно описать с помощью формулы Пуазейля:

$$Q = \pi R^4 (P_2 - P_1) / 8 L \eta \quad (1)$$

где Q – расход жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$), R – радиус трубки насоса (м), P_2 – давление на выходе из трубки насоса (Па), P_1 – давление на входе в трубку насоса (Па), L – длина трубки насоса (м).

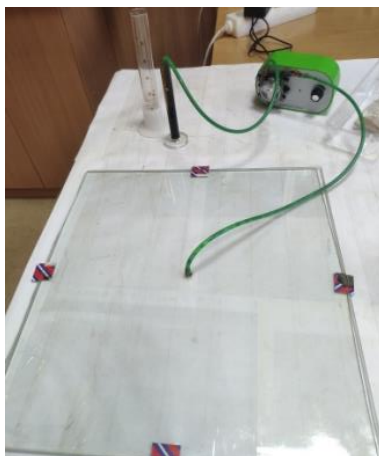


Рис. 1. Ячейка Хеле-Шоу

Был исследован процесс вытеснения тяжелой нефти дистиллированной водой (а); 3 % ПАВом (б); и 3 % ПАВом с добавлением наночастиц (в) в ячейке Хеле-Шоу. Весь этот процесс снимали на видео. Толщину зазора между стеклянными пластинами установили равной 0,5 мм. Сначала в ячейку закачивали тяжелую нефть (рис. 2). Опытным путем был подобран объем закачиваемой нефти $V_n=10$ мл. Одновременно с включением насоса включали таймер для замера времени закачки нефти t_n . Далее производили закачку вытесняющей жидкости (дистиллированной воды, ПАВ, ПАВ с наночастицами) объемом $V=15$ мл. Одновременно с включением насоса включали таймер для замера времени закачки жидкости t_k . После закачки нужного объема вытесняющей жидкости насос выключали.

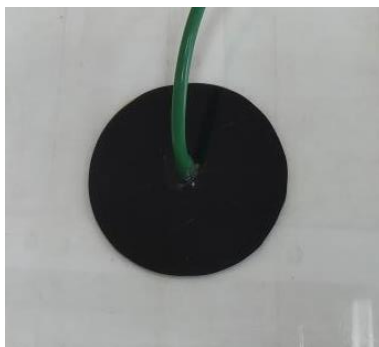


Рис. 2. Нефть, закачанная в ячейку Хеле-Шоу

В опыте (а) производили закачку дистиллированной воды объемом $V_{д.в.}=15$ мл (рис. 3). Дистиллированная вода просачивалась сквозь тяжелую нефть, образуя «вязкие пальцы», и практически ее не вытесняла.



Рис. 3. Вытеснение тяжелой нефти дистиллированной водой в ячейке Хеле-Шоу

В опыте (б) производили закачку 3 % ПАВ объемом $V_{\text{пав}}=15$ мл, концентрацию которого подобрали опытным путем. 3 % ПАВ вытеснил нефть эффективнее дистиллированной воды (рис. 4).



Рис. 4. Вытеснение тяжелой нефти 3 % ПАВом

В опыте (в) производили закачку 3 % ПАВ с добавлением 1 % наночастиц объемом $V(\text{пав}+\text{нч})=15$ мл. Добавление наночастиц положительно сказалось на вытеснении нефти, и данный 3 % ПАВ оказался эффективнее, чем тот же 3 % ПАВ без добавления наночастиц.



Рис. 5. Вытеснение тяжелой нефти 3 % ПАВом с добавлением 1 % наночастиц

Результаты эксперимента показали, что процесс вытеснения нефти на примере ячейки Хеле-Шоу сопровождается возникновением неустойчивой границы с образованием «вязких пальцев». Применение 3 % ПАВ с наночастицами позволило вытеснить нефть более равномерно, т.е. минимизировать появление и распространение вязких пальцев.

Список литературы

1. С. А. Бублик, М. А. Семин. Исследование неустойчивости Саффмана-Тейлора в нефтесодержащем пласте в двухмерной постановке задачи, - Математическое моделирование, 2020, том 32, № 7, 127–142.
2. Артур Ашотович Рахимов, Азат Ахматович Валиев. Особенности экспериментального изучения устойчивого и неустойчивого вытеснения в ячейке Хеле-Шоу, заполненной стеклянными шариками / - Текст: электронный // – 2022 /№77. – (Вестник Томского государственного университета «Математика и механика»). – URL: https://journals.tsu.ru/uploads/import/2233/files/1998-8621_i77_pl40.pdf (дата обращения 10.11.2024).

Научный руководитель: Штеренберг Александр Моисеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Геология и физические процессы нефтегазового производства», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия.

Секция 2.
**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН,
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРУБОПРОВОДНОГО
ТРАНСПОРТА XXI ВЕКА**

УДК 622.692.4

Валеев Эмиль Русланович^{1*}
Гафуров Наиль Рустемович¹
Харитонов Евгений Васильевич¹
Юрченко Яна Александровна²
Миннахметов Фирдус Фидаилевич²
¹ ГБОУ ВО АГТУ ВШН, Альметьевск, Россия
² ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия
* valeev.e.rus@gmail.com

**Методика тестирования противотурбулентных присадок на лабораторном
стенде для трубопроводной транспортировки нефти**

Аннотация. Целью данной работы является разработка наиболее эффективной методики тестирования противотурбулентных присадок. Основные проблемы включают необходимость сокращения затрат на транспортировку нефти и несовершенство существующих методов подбора реагентов для трубопроводной транспортировки нефти. В результате исследований был создан метод тестирования присадок, который позволил повысить эффективность опытно-промышленных испытаний, благодаря чему стало возможным снижение энерго- и ресурсозатрат при трубопроводной транспортировке нефти.

Ключевые слова: Противотурбулентные присадки, лабораторный стенд, методика тестирования, гидравлическое сопротивление, транспортировка нефти.

Emil R. Valeev^{1*}
Nail R. Gafurov¹
Evgeny V. Kharitonov¹
Yana A. Yurchenko²
Firdus F. Minnakhmetov²
¹ ASTU HSP, Almet'yevsk, Russia
² KNRTU, Kazan, Russia
* valeev.e.rus@gmail.com

**Methodology for testing anti-turbulence additives
on a laboratory bench for pipeline transportation of oil**

Abstract. The purpose of this work is to develop the most effective methodology for testing anti-turbulence additives. The main problems include the need to reduce oil transportation costs and the imperfection of existing methods for selecting reagents for pipeline transportation of oil. As a result of the research, a method for testing additives was created, which made it possible to increase the efficiency of pilot industrial tests, making it possible to reduce energy and resource costs during pipeline transportation of oil.

Keywords: Anti-turbulence additives, laboratory bench, testing methodology, hydraulic resistance, oil transportation.

В настоящее время в условиях постоянного увеличения объемов транспортировки нефти важным является поиск способов повышения эффективности магистральных нефтепроводов. Один из наиболее перспективных, но мало изученных методов – применение противотурбулентных присадок (ПТП) [1, 2].

Для тестирования противотурбулентных присадок рассматривается методика с использованием лабораторного стенда для подбора химических реагентов при транспортировке нефтей. Данный стенд позволяет измерять расходные характеристики перекачиваемой жидкости и фиксировать изменения их показателей при добавлении реагентов (рис. 1).

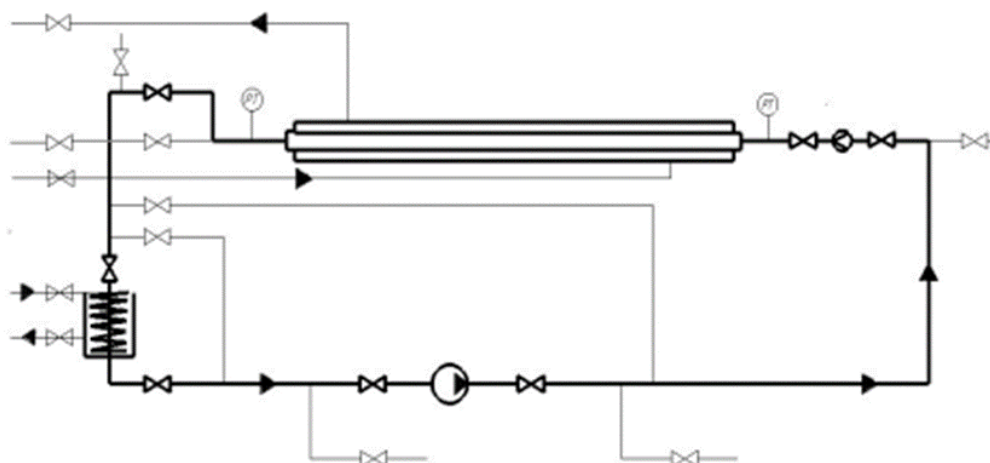


Рис. 1. Схема лабораторного стенда

Стенд для подбора реагентов включает в себя все основные узлы и элементы трубопроводной сети, такие как резервуар, насос, трубопроводная обвязка, средства КИПиА (расходомер и манометры), системы термостатирования и стабилизации (работа насоса регулируется с помощью ЧРП, система термостатирования интегрирована как на трубопровод так, и на расходный бак). Основной отличительной чертой является то, что основной узел трубопровода является блочным и может меняться на трубопроводы различного диаметра в зависимости от вязкости углеводородов.

В расходный бак наливается испытуемая жидкость, реологические свойства которой определены на том же стенде в чистом виде без добавления реагента. При установлении стационарного режима течения жидкости, постоянных давления и температуры подготовленные реагенты вводятся в бак трубопровода. Через равные временные интервалы все параметры (шифр реагента, его дозировка, расход жидкости до и после ввода присадки, температура и давление в начале и в конце измерительного участка до и после введения присадки) вносятся в режимную карту работы установки.

По сформированным данным рассчитывается количественная оценка эффекта Томса, которая выражается по снижению гидравлического сопротивления при постоянном давлении и рассчитывается по формуле 1 [3].

$$T = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\lambda}} - 1, \quad (1)$$

где λ и λ_0 – коэффициенты гидравлического сопротивления.

После чего рассчитывается коэффициент снижения гидравлического сопротивления по формуле 2 [3].

$$DR=1-\frac{Q_{\text{до}}^2 * \Delta P_{\text{после}}}{Q_{\text{после}}^2 * \Delta P_{\text{до}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{до}}$ – расход жидкости до ввода присадки, м³/ч; $Q_{\text{после}}$ – расход жидкости после ввода присадки, м³/ч; $\Delta P_{\text{до}}$ – перепад давления до ввода присадки, Па; $\Delta P_{\text{после}}$ – перепад давления после ввода присадки, Па.

На основе рассчитанных данных формируется график зависимости концентрации определенной присадки от коэффициента снижения гидравлического сопротивления, что является графиком общей эффективности присадки (рис. 2).

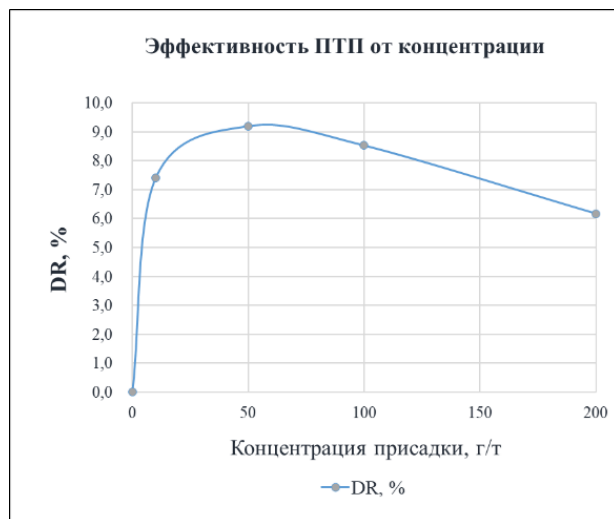


Рис. 2. График общей эффективности присадки

В результате выполненной работы была выработана методика, основанная на фиксации расхода, перепада давления и температуры нефти в трубопроводе. Также фиксируется показатель «времени жизни присадки», при котором наблюдалось положительное значение эффективности реагента, выраженное в циркуляционных циклах. Данные значения являются показателями устойчивости ПТП к деструкционному воздействию от насоса, местных сопротивлений и турбулизации потока. Итогом является расчет карты данных, на основе которых выбирается наиболее эффективный способ использования присадки, что позволяет оптимизировать процесс трубопроводной транспортировки нефти с добавлением противотурбулентных присадок.

Список литературы

1. Харитонов Е. В., Шарифуллин А. В., Байбекова Л. Р., Миннахметов Ф. Ф., Юрченко Я. А., Гафуров Н. Р., Валеев Э. Р., Дусметова Г. И. Оценка возможности применения промышленных гиперразветвленных полимеров как реагентов повышения пропускной способности трубопроводов при перекачке нетрадиционных углеводородов. // Вестник технологического университета. – 2024. – № 7 – С. 57–61.
2. Харитонов Е. В., Шарифуллин А. В., Байбекова Л. Р., Пестерникова Г. Г., Гафуров Н. Р., Юрченко Я. А., Миннахметов Ф. Ф., Дусметова Г. И. Исследования промышленных гиперразветвленных полимеров для трубопроводной перекачки вязких нефтяных сред. // Нефтяная провинция. – 2024. – №2(38) – С. 204–219.
3. Абдусаламов А. В. Формирование композиции противотурбулентной присадки и ее физико-химические и реологические свойства: автореф... дис. кан. хим. наук. – М.: 2018. – 24 с.

Научный руководитель: Байбекова Лия Рафаэльевна, кандидат технических наук, доцент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа, ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия.

Гафуров Наиль Рустемович^{1*}

Валеев Эмиль Русланович¹

Харитонов Евгений Васильевич¹

Юрченко Яна Александровна²

Миннахметов Фирдус Фидаилевич²

¹ ГБОУ ВО АГТУ ВШН, Альметьевск, Россия

² ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия

* nailgaf987@gmail.com

Анализ эффективности депрессорной присадки для транспортировки сверхвязких нефтей в динамических условиях

Аннотация. Сверхвязкая нефть обладает аномальными физико-химическими свойствами, которые затрудняет процессы транспортировки с мест добычи до потребителей. Высокая вязкость нефти не только снижает пропускную способность трубопроводов, но и значительно увеличивает затраты на ее перекачку. Одним из наиболее перспективных методов изменения реологии нефти является химизация, включающая использование специализированных химических реагентов. Наиболее эффективным в снижении вязкости нефти показали депрессорные присадки. В данной работе была проведена оценка эффективности применения депрессорной присадки в динамических условиях на лабораторном стенде.

Ключевые слова: депрессорная присадка, сверхвязкая нефть, транспортировка нефти, лабораторный стенд.

Nail R. Gafurov^{1*}

Emil R. Valeev¹

Evgeny V. Kharitonov¹

Yana A. Yurchenko²

Firdus F. Minnakhmetov²

¹ ASTU HSP, Almeteyevsk, Russia

² KNRTU, Kazan, Russia

* nailgaf987@gmail.com

Analysis of the effectiveness of depressant additives for the transportation of high-viscosity oils under dynamic conditions

Abstract. High-viscosity oil possesses anomalous physical and chemical properties that significantly complicate its transportation from production sites to consumers. The high viscosity of the oil not only reduces pipeline throughput but also substantially increases pumping costs. One of the most promising methods for altering the rheology of oil is chemical treatment, which involves the use of specialized chemical additives. Depressant additives have proven to be the most effective in reducing oil viscosity. This study evaluates the effectiveness of using a depressant additive under dynamic conditions on a laboratory setup.

Keywords: depressant additive, high-viscosity crude oil, oil transportation, laboratory stand.

В настоящее время мы наблюдаем постепенное истощение традиционных месторождений нефти, что в свою очередь ведет к значительному снижению доходов. Доля самой нефти в общем объеме снижается, в то время как содержание попутных компонентов, таких как газ и пластовая вода, значительно возрастает. Эти изменения ставят перед отраслью новые вызовы, так как технологии интенсификации добычи становятся все менее рентабельными.

Связи с этим добывающие компании переходят к разработке трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ), которые характеризуются наличием низкопроницаемых коллекторов, находящихся на значительной глубине в недрах Земли, или же сверхвязкой нефтью,

обладающей высокой вязкостью и плотностью, при этом глубина залегания этой нефти может быть относительно небольшой.

Стимулирование нефтедобывающих компаний со стороны государства через предоставление налоговых льгот позволило разрабатывать месторождения СВН. В результате этого были разработаны новые технологии, которые значительно повысили рентабельность добычи СВН.

Несмотря на достижения в эффективной добыче сверхвязких нефтей (СВН), процесс их транспортировки по-прежнему сталкивается с серьезными затруднениями, одной из которых является значительное увеличение вязкости нефти при понижении температур. Это приводит к тому, что жидкость загустевает, что делает перемещение по трубопроводам крайне трудоемким и энергозатратным, а в некоторых случаях и вовсе невозможным. Снизить вязкость является критически важным для успешной транспортировки, так как высокая вязкость может привести к различным проблемам на этапах транспортировки, подготовки и переработки [1].

В данной работе проведено исследование эффективности применения депрессорных присадок при различных концентрациях для снижения гидравлического сопротивления при транспортировке СВН (Ашальчинского месторождения). Испытания проводились в динамических условиях на лабораторном стенде.

Существует множество методов, позволяющих изменить реологические свойства нефти и, таким образом, повысить ее текучесть. Одним из наиболее эффективных способов является использование химических реагентов, таких как депрессорные присадки [2].

Депрессорные присадки – это специальные химические соединения, которые добавляются в нефть с целью снижения ее вязкости и повышения текучести. Эти добавки имеют способность изменять молекулярную структуру углеводородов, воздействуя на их межмолекулярные взаимодействия. В результате снижаются силы сцепления между молекулами, что способствует улучшению характеристик потока и увеличению подвижности жидкости.

Принцип действия депрессорных присадок заключается в том, что они препятствуют присоединению молекул парафинов и других высокомолекулярных компонентов нефти, которые при низких температурах склонны к образованию кристаллов и осадков. Эти осадки могут значительно повышать вязкость и создавать препятствия для свободного потока нефти по трубопроводам.

Лабораторный стенд (рисунок 1) разработан для изучения снижения гидравлического сопротивления и анализа свойств различных химических реагентов, таких как депрессорные, противотурбулентные присадки и поверхностно-активные вещества (ПАВ). Конечная эффективность действия реагента оценивается по снижению перепада давления и изменению расхода [3].

Стенд для испытаний представляет собой замкнутую гидравлическую систему, работающую по принципу циркуляционного цикла. Установка состоит из бака для хранения жидкости, который нагревается до необходимой температуры с помощью змеевика, подключенного к теплоносителю. Жидкость из бака попадает в насос, после чего направляется на испытательный участок. Данный участок оборудован расходомером, термоманометрами и трубопроводом, выполненным в блочном исполнении. Это позволяет заменять трубопровод на различные диаметры в зависимости от требований углеводородов. Кроме того, в трубопровод интегрирована система термостатирования, которая обеспечивает оптимальные условия для проведения экспериментов [4].



Рис. 1. Упрощенная схема лабораторного стенда с рабочим блоком

В рамках исследования была оценена эффективность депрессорной присадки СНПХ-НП-2310 Д2 на СВН при дозировках 1000 г/т, 2000 г/т, 4000 г/т. Температура исследований составляла 28 градусов, режим течения – турбулентный, $Re = 15000$.

На рисунках 2, 3, 4 представлены зависимости эффективности реагента от гидравлического сопротивления, расхода жидкости и циркуляционных циклов.

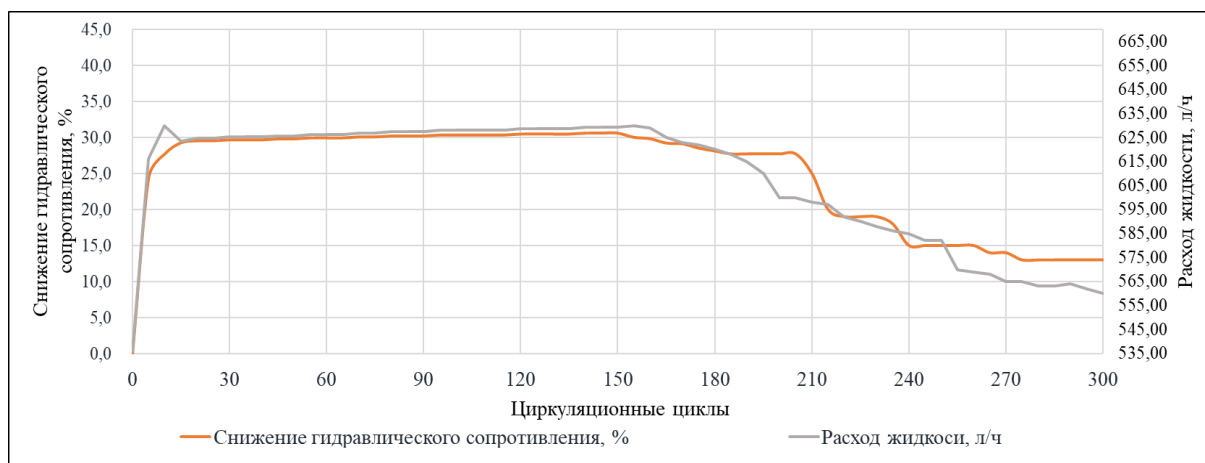


Рис. 2. Эффективность депрессорной присадки СНПХ-НП-2310 Д2 с концентрацией 1000 г/т

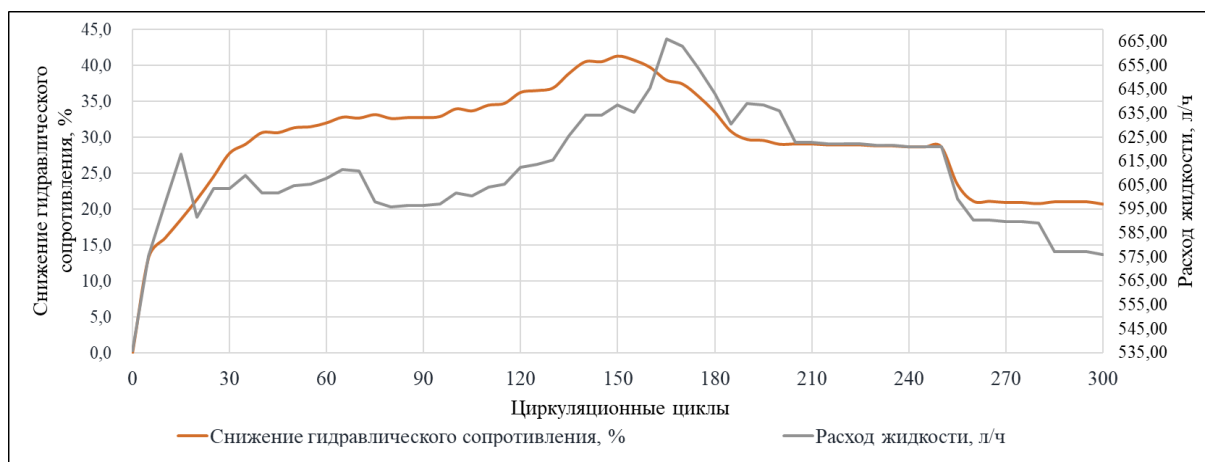


Рис. 3. Эффективность депрессорной присадки СНПХ-НП-2310 Д2 с концентрацией 2000 г/т

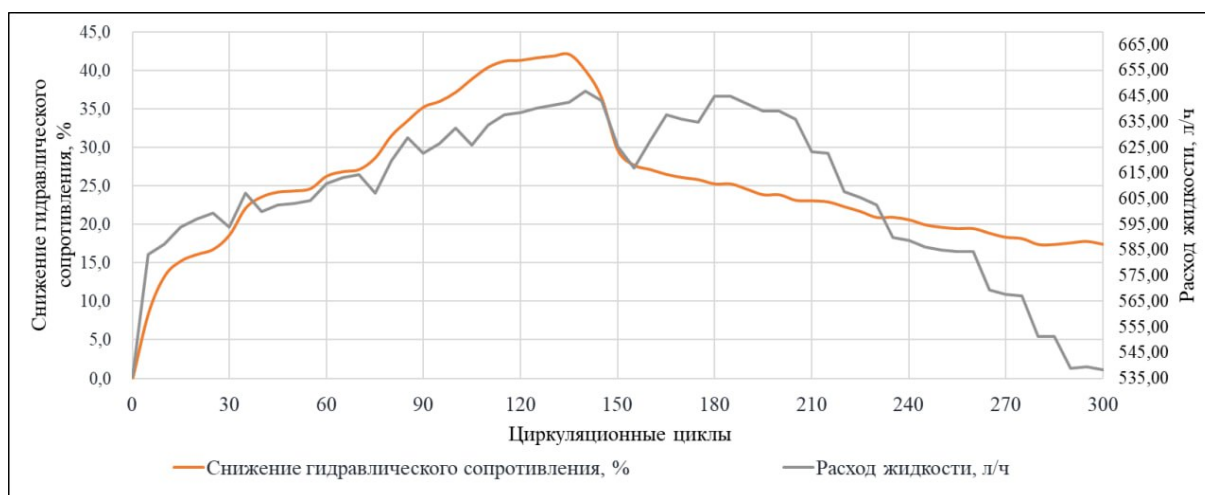


Рис. 4. Эффективность депрессорной присадки СНПХ-НП-2310 Д2 с концентрацией 4000 г/т

Максимальная эффективность была достигнута при дозировке 4000 г/т, что позволило снизить гидравлическое сопротивление на 42 % при 130 циркуляционных циклах.

Результаты экспериментов показывают, что увеличение дозировки депрессорной присадки СНПХ-НП-2310 Д2 до 4000 г/т сокращает гидравлическое сопротивление при транспортировке СВН, снижая ее вязкость. Тем не менее, после достижения определенного количества циркуляционных циклов эффективность присадки начинает снижаться из-за деструкции активного вещества.

Список литературы

1. Харитонов Е. В., Шарифуллин А. В., Байбекова Л. Р., Пестерникова Г. Г., Гафуров Н. Р., Юрченко Я. А., Миннахметов Ф. Ф., Дусметова Г. И. Исследования промышленных гиперразветвленных полимеров для трубопроводной перекачки вязких нефтяных сред. // Нефтяная провинция. – 2024. – № 2(38) – С. 204–219.
2. Харитонов Е. В., Шарифуллин А. В., Байбекова Л. Р., Миннахметов Ф. Ф., Юрченко Я. А., Гафуров Н. Р., Валеев Э. Р., Дусметова Г. И. Оценка возможности применения промышленных гиперразветвленных полимеров как реагентов повышения пропускной способности трубопроводов при перекачке нетрадиционных углеводородов. // Вестник технологического университета. – 2024. – № 7 – С. 57–61.
3. Харитонов Е. В., Байбекова Л. Р., Шарифуллин А. В., Годящева М. В. Лабораторный стенд для испытания реагентов для трубопроводного транспорта и его модернизация к системе «из насоса в насос» / Вестник технологического университета. 2022, т. 25, в. 10, с. 36–39.
4. Харитонов Е. В., Минеев А. Э., Максимов А. Ф., Годящева М. В., Багеев А. М. Модельная установка магистрального трубопровода для исследования противотурбулентных присадок // Трубопроводный транспорт углеводородов. 2022. С. 44–45.

Научный руководитель: Байбекова Лия Рафаэловна, кандидат технических наук, доцент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа, ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия.

Эффективность применения промывочной системы нового поколения «IMD-NEXT» для бурения в многолетнемерзлых породах

Аннотация. Рассмотрена эффективность применения различных промывочных систем для бурения в условиях наличия интервала мерзлых пород. В качестве основного критерия для сопоставления рассматриваемых промывочных систем использовалась расчетная кавернозность ствола скважины в интервале залегания ММП на момент окончания бурения секции, так как именно от нее зависят основные технологические показатели эффективности. Поскольку почти 60 % запасов ископаемых углеводородов России располагается в зоне распространения вечной мерзлоты, задача повышения качества сооружения скважин в криолитозоне является актуальной. Результатом исследования стали данные сравнительного анализа, основанные на экспериментальном определении теплофизических свойств жидкости, показавшие значительное превосходство предлагаемой промывочной системы «IMD-NEXT» над известными решениями.

Ключевые слова: бурение, многолетнемерзлые породы, буровая промывочная жидкость, зона протаивания, кавернозность, кавернообразование.

Bogdan R. Daminov*
Alexandr Ya. Solovyov
FSBEI HE USPTU, Ufa, Russia
* bogdan17082@bk.ru

Permafrost drilling efficiency with new mud generation – "IMD-NEXT"

Abstract. The efficiency of using various drilling fluid for drilling in permafrost is considered. The cavernosity of the permafrost interval at the moment when drilling of the section ends was chosen as the main criterion for assessing the efficiency of an drilling fluid, since it is precisely this that causes a number of problems that arise during the construction and operation of wells. Considering that about 60 % of Russia's hydrocarbon reserves are located in the permafrost zone, the task of improving the quality of well construction in the cryolithozone is especially relevant. The study resulted in comparative analysis data showing the superiority of the «IMD-NEXT»drilling fluid over other models.

Keywords: drilling, permafrost, drilling fluid, thawing zone, cavernosity, cavern formation.

Наличие в геологическом разрезе многолетнемерзлых пород обуславливает ряд проблем, возникающих на всех этапах сооружения и эксплуатации скважин и связанных с интенсивным кавернообразованием при растеплении в результате теплового воздействия и таяния льда, связывающего породу [1]. Растепление ММП происходит в основном из-за теплообмена между стенкой скважины и восходящим потоком промывочной жидкости в процессе бурения, интенсивность которого зависит от теплофизических свойств, температуры, скорости и режима течения ПЖ, а также теплофизических свойств, температуры и льдистости интервала ММП. Кроме того на кавернозности сказывается и время циркуляции [2]. Это значит, что снизить кавернозность можно путем оптимизации теплофизических, реологических параметров ПЖ и увеличения скорости бурения. Промывочными системами с подходящими параметрами являются растворы на углеводородной основе, однако они дороги, токсичны и сложны в приготовлении. «IMD-NEXT» – это лиофильная инвертно-мицеллярная дисперсия с пониженным содержанием углеводородной основы, относящейся к классу синтетических [3], которая по

своим параметрам близка к РУО, в некоторых аспектах превосходя их. При этом для приготовления «IMD-NEXT» не требуется специального оборудования, она безопасна для окружающей среды, полностью биоразлагаема и имеет стоимость сопоставимую с растворами на водной основе. В качестве базы для сравнения использовался полимерглинистый раствор, применяемый повсеместно несмотря на свою низкую эффективность. В качестве альтернативного решения рассмотрен биополимерный раствор с добавлением пропиленгликоля [4].

Сопоставление рассматриваемых систем проводилось по расчетному коэффициенту кавернозности в интервале залегания мерзлых пород на момент окончания бурения интервала кондуктора по экспериментально определенным теплофизическим свойствам жидкости [2]. Данные по скважине для расчетов были взяты из проекта на строительство скважины на Вать-Еганском месторождении. Кроме того, для расчета программы промывки замерялись фактические значения технологических свойств рассматриваемых промывочных жидкостей. Общетеchnологические свойства (плотность, реологические параметры, показатель фильтрации) определялись в соответствии со стандартными методиками [5; 6]. Теплофизические свойства определялись: теплоемкость – калориметрическим методом; температуропроводность – методом сопоставления темпа нагрева образца с темпом нагрева эталона с известным значением температуропроводности [7]; теплопроводность – вычислялась соответственно из полученных ранее температуропроводности, плотности и теплоемкости. Моделирование процесса бурения для подбора режимных параметров осуществлялось в ПО «Wellplan», оптимальные режимные параметры подбирались из условия обеспечения полной очистки ствола скважины от шлама при максимально возможной механической скорости бурения. Образец промывочной системы «IMD-NEXT» был приготовлен в соответствии с рецептурой представленной в работе [3]. Образцы биополимерного раствора с добавлением пропиленгликоля в концентрациях 50 % и 65 % приготовлены в соответствии с рецептурой представленной в патенте [4].

Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эффект и стоимость применения рассматриваемых промывочных систем

Промывочная система	Коэффициент кавернозности в интервале ММП	Механическая скорость бурения, м/ч	Стоимость руб./м ³
Полимерглинистый раствор	1,414	62	12000
БПР + 50 % Пропиленгликоль	1,151	95	110000
БПР + 65 % Пропиленгликоль	1,042	141	140000
IMD-NEXT	1,055	181	25000

Из результатов, полученных в ходе исследования, очевидна эффективность применения решений, направленных на снижение теплового воздействия, так как благодаря использованию биополимерного раствора с 50 % содержанием пропиленгликоля удалось значительно снизить кавернозность интервала ММП на момент окончания бурения секции, а при использовании биополимерного раствора с 65 % содержанием пропиленгликоля и «IMD-NEXT» и вовсе практически полностью остановить процесс растепления стенок скважины. Также, благодаря улучшенным реологическим свойствам стало возможным кратное увеличение механической скорости бурения.

Наряду с достижением целевого эффекта, промывочная система «IMD-NEXT» обладает следующими преимуществами:

- нечувствительна к разбавлению водой, изменение водосодержания на (10–20) % в результате перехода в раствор выбуренной породы не приводит к значительному изменению реологических и теплофизических свойств;
- стоимость системы «IMD-NEXT» составляет (20–25) тыс.руб./м³, тогда как стоимость биополимерного раствора с добавлением пропиленгликоля находится в диапазоне (110–140) тыс.руб./м³, т.е. «IMD-NEXT» в 5 раз дешевле и по цене соответствует уровню современных ингибирующих систем на основе прямых эмульсий;
- «IMD-NEXT» будучи дешевле РУО на синтетической основе в 5 раз, полностью лишена недостатков таких систем (не требует подготовки ствола к цементированию, использования буферных жидкостей).
- на шлеме остается (5–6) % жидкости, но за счет низкого содержания углеводородного компонента его доля в выбуренной породе будет составлять менее 0,5 %, что позволяет классифицировать ее как безопасную для окружающей среды и вместо утилизации на специальных полигонах, размещать непосредственно на месте бурения [8].

Таким образом обуславливается эффективность применения промывочных систем нового поколения «IMD-NEXT» для бурения в условиях наличия интервалов многолетнемерзлых пород. В будущем будут проводиться дополнительные исследования на более совершенных экспериментальных установках в целях подтверждения полученных результатов и дальнейшего совершенствования разработки.

Список литературы

1. Кудряшов, Б. Б. Бурение скважин в мерзлых породах / Б.Б. Кудряшов, А. М. Яковлев – Москва. : Недра, 1983. – 286 с.
2. Седов, В. Т. Теплообмен при бурении мерзлых пород / В.Т. Седов – Ленинград. : Недра, 1990. – 127 с.
3. Соловьев, А. Я. Новое поколение промывочных жидкостей на базе инвертно-мицеллярных дисперсий для бурения сложных скважин / А. Я. Соловьев // Международная научно-практическая конференция, посвященная 75-летию горно-нефтяного факультета УГНТУ и 100-летию ученого Спивака Александра Ивановича. Сборник материалов.– 2023. – С. 72–74.
4. Пат. 2723256 Российская Федерация, МПК С 09 К 8/08. Буровой раствор для бурения скважин в условиях ММП / Минаков А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» – № 2019127140; заявл. 27.08.2019; опубл. 09.06.2020 Бюл. № 16. – 8 с.
5. ГОСТ 33213-2014. Контроль параметров буровых растворов в промысловых условиях. Растворы на водной основе. – Введ. 01.04.2016 – Москва: Стандартинформ, 2015.
6. API R13-B2. Recommended practice for field testing oil-based drilling fluids.– API, 2014.
7. Кондратьев, Г. М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. – Москва : Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
8. Neff, J. M. Environmental impact of synthetic based drilling fluids / J. M. Neff, S. McKelvie, R. C. Ayers Jr // U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, 2000. – 118 pp.

Научный руководитель: *Соловьев Александр Янович, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия.*

Тампонажный состав для ликвидации зон поглощения в условиях агрессивного флюида

Аннотация. В данной работе исследуется применение полиэлектролитных реагентов в тампонажных материалах для улучшения их устойчивости в агрессивных условиях. Актуальность темы обусловлена необходимостью ликвидации зон поглощения тампонажного раствора при креплении скважин. Рассматриваются системы на основе ПолиТЩР и Биоксана, которые обладают уникальными свойствами для укрепления стволов скважин. Эти материалы демонстрируют значительный потенциал в повышении эффективности традиционных методов крепления. Проведенные исследования показывают, что использование полиэлектролитных композитов может значительно улучшить устойчивость тампонажных материалов как в обычной, так и в агрессивной среде, что способствует более надежной эксплуатации скважин.

Ключевые слова: тампонажный материал, агрессивный флюид, полиэлектролитный реагент, крепление скважин, проницаемость материала, цементный камень.

Danila R. Kamaev¹
Olga A. Nechaeva²

¹ Postgraduate student, teaching assistant, Samara State Technical University,
Samara, Russia, kamaev.dr@samgtu.ru

² Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Samara State Technical University,
Samara, Russia, nechaeva.oa@samgtu.ru

Plugging composition for eliminating absorption zones in aggressive fluid conditions

Abstract. This paper examines the use of polyelectrolyte reagents in cementing materials to improve their stability in aggressive conditions. The relevance of the topic is due to the need to eliminate the absorption zones of the cement slurry when casing wells. Systems based on PolyTESR and Bioxan, which have unique properties for strengthening wellbores, are considered. These materials demonstrate significant potential in increasing the efficiency of traditional casing methods. The studies show that the use of polyelectrolyte composites can significantly improve the stability of cementing materials in both normal and aggressive environments, which contributes to more reliable operation of wells.

Keywords: plugging material, aggressive fluid, polyelectrolyte reagent, well casing, material permeability, cement stone.

Введение. Современное развитие нефтегазовой отрасли требует постоянного совершенствования технологий бурения и крепления скважин. Одной из сложнейших задач в этой области является ликвидация зон поглощения бурового раствора и предотвращение утечек при работе в сложных геологических условиях, особенно в присутствии агрессивных флюидов. Применение традиционных тампонажных материалов зачастую оказывается недостаточно эффективным, что стимулирует разработку новых композитов с улучшенными характеристиками [1].

В данной работе рассматриваются возможности использования полиэлектролитных реагентов в составе тампонажных материалов для достижения более высокой степени устойчивости при взаимодействии с агрессивными средами. Полиэлектролитные системы, такие как ПолиТЩР и Биоксан, произведенные компанией «НПО Полицелл», демонстрируют значительный потенциал для решения этой проблемы. Эти материалы

обладают уникальными свойствами, которые могут быть полезны в борьбе с утечками и в укреплении стволов скважин.

Обоснование проблемы. Зоны поглощения представляют собой участки в разрезе скважины, где происходит активное проникновение бурового раствора в горные породы. Это приводит к снижению гидростатического давления и нарушению процесса бурения, а также может вызывать серьезные экологические проблемы. Использование стандартных цементных систем не всегда эффективно в сложных геологических условиях, особенно когда в породах встречаются агрессивные флюиды, такие как кислоты или минерализованные растворы [2].

Агрессивные химические вещества могут разрушать цементные структуры, снижая их долговечность и эффективность. Это диктует необходимость создания тампонажных материалов, которые не только обладают высокой прочностью, но и стойкостью к химическому воздействию.

Методы исследования. Разработка эффективного тампонажного состава базируется на синтезе и тестировании композитов на основе полиэлектролитов. ПолиТЦР и Биоксан, как представители современных полиэлектролитных систем, были выбраны для изучения их влияния на устойчивость и прочностные характеристики тампонажных материалов.

1. Физико-химическое тестирование: Включает изучение взаимодействия новых композитов с агрессивными флюидами. Это позволяет оценить долговечность и стойкость составов при выполнении защитных функций в агрессивной среде [3, 4, 5].

2. Механические испытания: Определение прочностных характеристик тампонажного материала, трещиностойкости и возможности восстановления целостности после их повреждения флюидами.

3. Микроструктурный анализ: Исследование структуры материалов после контакта с агрессивными веществами с помощью методов электронной микроскопии и рентгеновской дифракции.

Результаты и их обсуждение. Тестирование показало, что модификация тампонажного состава полиэлектролитами увеличивает его химическую стойкость и прочность. ПолиТЦР и Биоксан оказались способны существенно уменьшить скорость взаимодействия агрессивных флюидов с основной цементной массой. Это достигалось за счет формирования защитного слоя на поверхности цемента, что предотвращало проникновение агрессивных ионов внутрь структуры.

1. Увеличение прочности: Введение полиэлектролитов в состав повысило адгезионные свойства материала, что обеспечило более эффективное заполнение пористой структуры и увеличило общую прочность тампонажного камня на 20 % по сравнению с традиционными материалами.

2. Устойчивость к агрессивным средствам: Проведенные испытания в кислотных растворах показали, что полиэлектролитный тампонажный состав демонстрирует меньшую степень эрозии и структурного разрушения по сравнению с контролем.

3. Трещиностойкость: Материалы продемонстрировали улучшенное сопротивление образованию трещин, что является критически важным аспектом при высокой вероятности образования зон поглощения.

Заключение. Разработка и внедрение полиэлектролитных тампонажных составов открывает новые перспективы в области ликвидации зон поглощения в условиях действия агрессивных флюидов. Применение ПолиТЦР и Биоксан в качестве компонентов таких составов позволяет значительно улучшить текущие методы укрепления скважин, повышая их эффективность и долговечность.

Эти результаты ставят перед технологами новые задачи по адаптации данных решений в промышленных масштабах и совершенствованию существующих технологий.

В будущем возможна разработка еще более специализированных составов, которые будут учитывать особенные требования конкретных геологических условий. Внедрение данных инноваций существенно повлияет на снижение затрат и повышение экологической безопасности процесса бурения и укрепления скважин.

Список литературы.

1. Акзамов Ф. А., Измухамбетов Б. С., Токунова Э. Ф. «Химия тампонажных и промывочных растворов».
2. Булатов А. И. и др. Влияние сероводородсодержащих пластовых вод на коррозионную стойкость цементного камня / А. И. Булатов, Н. А. Иванова, Д. Ф. Новохатский // Нефтяное хозяйство.— 1981.— №7.— С. 27–30.
3. Живаева В. В., Камаев Д. Р., Камаева Е. А. Обоснование методики моделирования экспериментального процесса сероводородной коррозии и ее влияния на процесс сцепления цемента. Нефть Газ. Новации, 2017, 1 (1), с.75–80.
4. Камаев Д. Р. Методика определения параметров тампонажного материала, подвергнутого влиянию агрессивного агента / Д. Р. Камаев // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 134–136. – EDN HIOSPJ.
5. Kamaev D. R. Study of the effect of corrosive-active agents on the plugging material destruction processes. Topical issues of rational use of natural resources. XVII International forum-contest of students and young researchers. Under the auspices of UNESCO. Scientific conference abstracts. Volume 1. P. 62–64.

Научный руководитель: Нечаева Ольга Александровна, к.т.н., доцент, Самарский государственный технический университет, nechaeva.oa@samgtu.ru.

Технология изготовления пропанта на основе рециклинга бурового шлама

Аннотация. Разработан, изготовлен и испытан в лабораторных условиях пропант для производства работ по гидроразрыву нефтяного пласта в сложных геологических условиях с высоким пластовым давлением. Вопрос рециклинга бурового шлама в настоящее время является актуальным и требует своего решения. С целью получения необходимой прочности на сжатие подобраны эффективные добавки в виде оксида алюминия, молотого стеклосырья и фторида натрия. Использование бурового шлама в качестве основного сырья при изготовлении пропанта позволит заметно снизить стоимость готовой продукции, улучшить экологическую обстановку, уменьшить стоимость ремонтно-восстановительных работ нефтяных скважин. Предлагается из бурового шлама с использованием специальных добавок получать пропант с максимальной прочностью.

Ключевые слова: гидравлический разрыв нефтяного пласта, буровой шлам, изготовление пропанта.

Kirill V. Krivosheev
Platov South Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russia, 210506.tbn@mail.ru

Proppant manufacturing technology based on drilling mud recycling

Abstract. A proppant has been developed, manufactured and tested in laboratory conditions for hydraulic fracturing of oil formations in complex geological conditions with high formation pressure. The issue of drilling mud recycling is currently relevant and requires a solution. Effective additives in the form of aluminum oxide, ground glass cullet and sodium fluoride have been selected to obtain the required compressive strength. Using drilling mud as the main raw material in the manufacture of proppant will significantly reduce the cost of finished products, improve the environmental situation, and reduce the cost of repair and restoration work on oil wells. It is proposed to obtain proppant with maximum strength from drilling mud using special additives.

Keywords: hydraulic fracturing of oil reservoir, drilling mud, proppant production.

Сегодня как никогда остро, перед компаниями стоят вопросы увеличения добычи нефти, особенно в скважинах, которые находятся на поздней стадии разработки, существенно потеряли свой начальный дебет и требуют применения гидроразрыв пластов. Решение этой задачи невозможно без применения качественных расклинивающих материалов в виде пропантов высокой прочности.

Учеными ЮРГПУ (НПИ) разработана технология изготовления пропанта на основе бурового шлама с помощью мобильной установки, при этом, для обжига используется попутный газ, непосредственно получаемый на месторождении.

При сооружении нефтяных и газовых скважин образуются десятки миллионов тонн бурового шлама. Переработка или рециклинг бурового шлама, с целью получения расклинивающего материала (пропанта), до настоящего времени не реализована как в России, так и за рубежом.

Образцы шлама Восточно-Чумаковского нефтяного месторождения были исследованы в лабораторных условиях. Синтез сырьевых смесей выполнялся следующим образом: буровой шлам высушивался при температуре 100 °С, все компоненты измельчались в шаровой мельнице, добавлялось 5 % воды и формировались модельные лабораторные образцы в виде куба с длиной грани 20 мм и массой 10 г., путем одноосного сжатия с нагрузкой 5 МПа. Далее выполнялся обжиг образцов при температуре 1100 °С в течение 5 минут. После остывания образцы подвергались испытаниям на прочность с помощью гидравлического пресса с усилием до полного раздавливания, что позволило корректировать состав добавок (стеклосырьем, оксид алюминия, фторид натрия). Результаты представлены в таблице 1.

Химический состав бурового шлама

Оксиды	Содержание, % по массе
SiO_2	35,14
BaO	15,53
SiO_3	11,89
Al_2O_3	11,01
CaO	9,25
Fe_2O_3	5,07
K_2O	1,64
MgO	1,43
Na_2O	1,36
TiO_2	0,45
Cl	0,06
Другие	0,81

В соответствии с таблицей 1 буровой шлам имеет достаточное количество оксида кремния, но недостаточное количество Al_2O_3 . Поэтому состав пропанта был скорректирован и после обжига было установлено, что оптимальным является состав, содержащий следующие компоненты, % по массе: буровой шлам – 80, стекловой марки БТ-1-20, а также оксид алюминия – 10 и фторид натрия – 5, вводимые сверх 100 % по массе.

В процессе выполнения экспериментальных исследований был установлен химический состав бурового шлама Восточно-Чумаковского нефтяного месторождения и с учетом его подобран оптимальный состав пропанта, получена экспериментальная партия гранул пропанта, обладающего максимальной прочностью – 73,58 МПа, получен 22.12.2023 патент RU № 2823725 С1. На рисунке 1 представлен внешний вид экспериментальной партии пропанта, получаемого из бурового шлама при температуре спекания 950 °С.



Рис.1 Внешний вид экспериментальной партии пропанта

Выполненные лабораторно-экспериментальные исследования позволили разработать и предложить технологию рециклинга бурового шлама. Особо необходимо отметить, что предлагается использовать попутный газ для обжига гранул пропанта. Схема универсального, мобильного, перерабатывающего буровой шлам комплекса, расположенного на платформе автомобиля повышенной проходимости показана на рисунке 2.



Рис.2 Схема универсального, мобильного комплекса для рециклинга бурового шлама

Результаты выполненных исследований по рециклингу бурового шлама Восточно-Чумаковского нефтяного месторождения позволяют получать качественный пропант, используя универсальный мобильный комплекс, и рекомендовать их внедрение в полевых условиях.

Экспериментальные работы по получению пропанта из бурового шлама продолжаются и в настоящее время подана заявка на патент «Сверхпрочный пропант».

Тезис доклада подготовлен по теме гранта Российского научного фонда в рамках соглашения № 20-79-10142 «Разработка эффективной технологии синтеза алюмосиликатных пропантов с использованием отходов бурения нефтегазовых скважин Южного Федерального округа» (руководитель Третьяк А.А.).

Список литературы

1. А. А. Третьяк, Е. А. Яценко, С. А. Онофриенко, Карельская Е. В. Идентификация отходов бурения и их использование // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 2. – С. 36–43. – DOI 10.18799/24131830/2021/2/3041.
2. Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, А. А. Третьяк, А. А. Чумаков Влияние добавок металлургического шлама на процессы синтеза пропантов на основе буровых шламов // Черные металлы. – 2021. – № 8. – С. 49–53. – DOI 10.17580/chm.2021.08.09.
3. 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 KEM. – pp 678–683.
4. А. Я. Третьяк, Ю. Ф. Литкевич, К. В. Кривошеев Мобильная циркуляционная система для очистки бурового раствора // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 4(376). – С. 15–20.
5. А. Чумаков, Е. А. Яценко, А. А. Третьяк [и др.] Исследование свойств бурового шлама с использованием модифицирующих добавок для производства пропантов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2023. – № 4(220). – С. 131–141. – DOI 10.17213/1560-3644-2023-4-131-141.
6. А. А. Чумаков, Е. А. Яценко, А. А. Третьяк Влияние фторида натрия и оксида алюминия на прочностные характеристики алюмосиликатных пропантов, полученных на основе бурового шлама // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 2(214). – С. 40–46. – DOI 10.17213/1560-3644-2022-2-40-46.
7. Патент № 2823725 С1 Российская Федерация, МПК C09K 8/80, C04B 35/16, B09B 3/00. Состав для получения алюмосиликатного пропанта : № 2023134600 : заявл. 22.12.2023 : опубл. 29.07.2024 / Е. А. Яценко, А. А. Чумаков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет».
8. А. А. Чумаков Технология алюмосиликатных пропантов на основе бурового шлама Восточно-Чумаковского нефтяного месторождения. Диссертация. Белгород. 2024 г., 220 с.

Научный руководитель: Третьяк Александр Александрович, д.т.н., профессор, академик РАЕН, декан факультета геологии, горного и нефтегазового дела, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Шаповал Вадим Михайлович*

Шостак Никита Андреевич

Балаев Эйтибар Юсиф Оглы

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

* *vadim_shapoval0503@mail.ru*

Разработка модифицированной модели PDC долот с использованием интеллектуальных материалов

Аннотация. Оборудование для бурения нефтяных и газовых скважин является требовательным к надежности и срока службы, в связи с чем было предложено внедрение интеллектуальных материалов в нефтегазовую отрасль. В данной статье выполнен анализ разработанной конструкции и предложен метод сборки и монтажа резцов PDC долот и сравнение их с существующими в настоящее время конструкциями. Были проведены исследования конструкции крепления элементов бурового оборудования, показавшие значительные преимущества предлагаемого метода при применении эффекта памяти формы как способа геометрической фиксации и монтажа. Также были проведены испытания, доказавшие не только возможность использования предлагаемого метода монтажа, но и раскрывшие его преимущества перед существующими способами.

Ключевые слова: термоупругие фазовые превращения, эффект памяти формы, псевдоупругость/сверхэластичность, PDC долота, буровое оборудование.

Vadim M. Shapoval*

Nikita A. Shostak

Etibar Yusif Ogly Balaev

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

* *vadim_shapoval0503@mail.ru*

Development of a modified model of PDC bits using smart materials

Abstract. Equipment for drilling oil and gas wells is one of the most demanding in terms of reliability and service life, and therefore the introduction of smart materials into the oil and gas industry was proposed. This article analyzes the developed design and proposes a method for assembling and installing PDC bit cutters and comparing them with currently existing designs. Studies were carried out on the design of fastening elements of drilling equipment, which showed significant advantages of the proposed method when using the shape memory effect as a method of geometric fixation and installation. Tests were also carried out that proved not only the possibility of using the proposed installation method, but also revealed its advantages over existing methods.

Keywords: thermoelastic phase transformations, shape memory effect, pseudoelasticity/superelasticity, PDC bits, drilling equipment.

Процесс бурения горных пород является сложным технологическим процессом, требующим значительных экономических затрат. Этот процесс подразумевает не только бурение нефтяных и газовых скважин, к нему также относится сооружение коммуникационных линий под нефте-, газо- и водопроводы, а также капитальный ремонт скважин. Породоразрушающий инструмент является основным звеном в процессе разбуривания пород, его приход в непригодное состояние связан с абразивным износом, повышением температурных режимов и высокими ударными и динамическими нагрузками. Одним из основных решений проблемы регулярного выхода из строя долот буровой установки при его эксплуатации в сложных горно-геологических условиях является их регулярная замена, что в свою очередь приводит к дополнительным затратам, связанным с регулярной закупкой новых долот или их составляющих, простоем оборудования при ремонтных работах. Все вышеперечисленное сказывается на конечной стоимости.

В настоящее время, самым востребованным породоразрушающим инструментом является долото PDC (Polycrystalline diamond compact), которое состоит из основной части (тело долота) с ниппельным соединением и твердосплавной карбидовольфрамовой матрицы, которая крепится к телу долота спеканием, в которой предусмотрены отверстия для посадки твердосплавного резца с алмазным напылением. На данный момент известны две основные конструкции PDC долот: с фиксированными (не вращающимися) резцами, и PDC долото ONYX360 с вращающимися резцами, которое было предложено нефтесервисной компанией Schlumberger. Долота с фиксированными резцами имеют неравномерный износ режущей кромки резца, что не позволяет полностью выработать ресурс инструмента и сказывается на экономической эффективности, в процессе строительства скважин. Решением этой проблемы является использование PDC долота с вращающимися резцами, где происходит равномерный износ резцов. Однако у существующих конструкций долот присутствуют проблемы другого характера. Во-первых, проблемой является наличие концентратора напряжения в кольцевой полости, образованной наружной поверхностью резца и внутренней поверхностью стенки отверстия под резец в корпусе долота, что приводит к образованию трещин как в теле резца, так и долота, что является причиной их преждевременного разрушения. Данная кольцевая полость необходима для установки кольцевого стопорного кольца. Во-вторых, зоны трения, возникающие между стенкой отверстия под резец и самим резцом, вызванные большими нагрузками на породоразрушающий инструмент в процессе бурения, приводят к перегреванию материалов, из которых выполнены резцы и корпус долота, что является причиной снижения их прочностных характеристик. В-третьих, низкие прочностные характеристики резинового стопорного кольца, связанные с низким диапазоном рабочих температур резиновых материалов и низкой абразивной стойкостью (см. рис. 1).

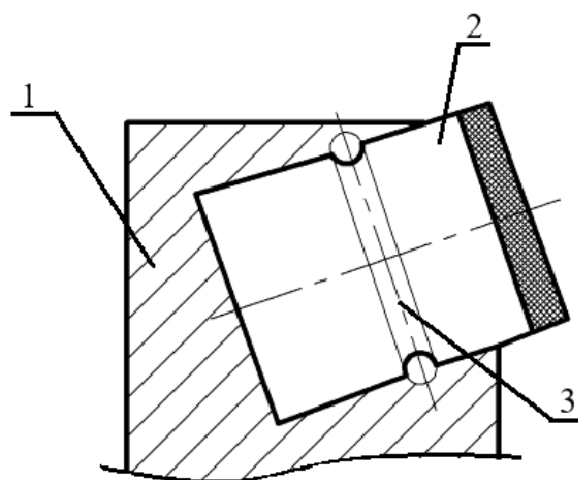


Рис. 1. Фрагмент PDC долота с вращающимися резцами:
1 – Матрица PDC долота; 2 – Резец PDC долота; 3 – Стопорное резиновое кольцо

Для решения проблемы наличия концентратора напряжений предлагается форма резца в виде усеченного конуса, которая не имеет резких изменений в диаметре. Данная форма резца обеспечивает плотную и надежную посадку резца в отверстие под резец. Конический стакан выполнен из материала с эффектом памяти формы, что избавляет от необходимости использования резиновых или иных эластичных стопорных колец. Стакан охлаждается до температуры мартенситной фазы, в которой его легко деформировать так, чтобы в него с легкостью можно было установить резец. Далее стакан нагревают до температуры аустенитной фазы, в результате чего происходит фазовый переход и стакан принимает свою первоначальную форму (см. рис.2).

С целью уменьшения трения между стаканом и резцом предлагается использовать антифрикционные вкладыши. Дiskoобразный вкладыш устанавливается на дно отверстия, а вкладыши в форме сегментов полого конуса – между боковыми поверхностями стакана и резца.

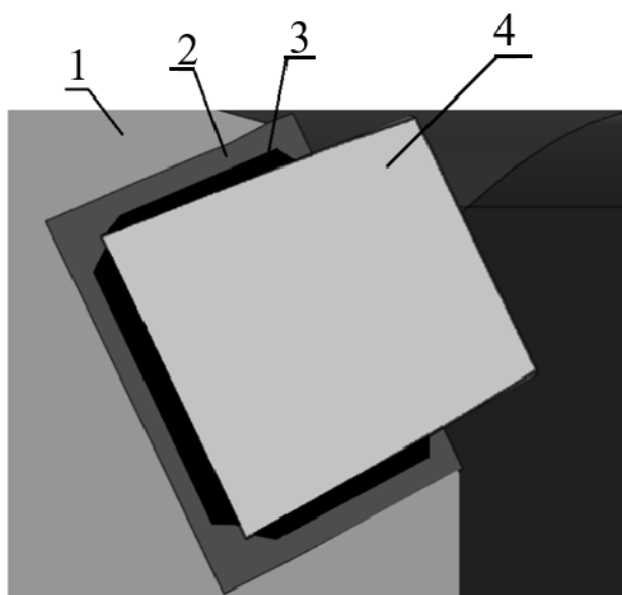


Рис. 2. Предлагаемая конструкция:
1 – Матрица PDC долота; 2 – Стакан из материала с эффектом памяти формы;
3 – Антифрикционный вкладыш; 4 – Резец PDC долота

Были проведены испытания для определения нагрузок выпрессовки резца из матрицы PDC долота на испытательной системе Instron 8801 в лаборатории Кубанского государственного технологического университета, где были применены первые образцы предлагаемой конструкции и прототипа PDC долот с фиксированными резцами. Эксперимент проводился при комнатной температуре, когда материал с эффектом памяти формы находился в мартенситном фазовом состоянии, имеющем низкие физико-механические характеристики в сравнении с аустенитным фазовым состоянием, которые показали, что усилие выпрессовки составляет 15 кН.

В результате эксперимента были получены следующие значения для резца, фиксируемого посадкой с натягом в матрице PDC долота: $R_1^{axial} = 8 \div 15$ кН и резца, фиксируемого формой: $R_2^{axial} = 15 \div 16$ кН.

Данное решение позволит повысить надежность крепления резцов PDC долот путем внедрения материала с эффектом памяти формы в буровое оборудование. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению количества спуско-подъемных операций с целью замены долота, что увеличивает трудоемкость и затраты времени всего процесса бурения.

Преимуществом нашей конструкции над имеющимися является фиксация при помощи формы, которая увеличивает ряд значений нагрузки, требуемой для выпрессовки резцов из матрицы PDC долот, также детали конструкции становятся взаимозаменяемыми, что дает преимущество в скорости сборки.

Предлагаемое конструктивное решение в виду того, что оно не меняет не только техническую составляющую бурового оборудования, но и ускоряет технологию монтажа/демонтажа путем применения материалов с эффектом памяти формы, является достаточно актуальным и обоснованным с экономической точки зрения.

Результаты проведенных математических расчетов и компьютерного моделирования, имеющие сходимость 90–95 %, дают возможность утверждать, что предлагаемая конструкция и способ фиксации зуба обеспечивает высокую степень надежности, а проведенные испытания доказывают эффективность и возможность реализации описанного способа монтажа.

Проект выполнен за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00547, <https://rscf.ru/project/23-29-00547/>.

Список литературы

1. Волик, Д. А. Буровые породоразрушающие инструменты / Д. А. Волик. – Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. – 94 с.
2. Басарыгин Ю. М., Булатов А. И., Проселков Ю. М., Бурение нефтяных и газовых скважин, М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2002, 632 с.
3. Палий П. А., Корнеев К. Е., Буровые долота, М.: Издательство «Недра», 1971, 446 с.
4. Culshaw B. Smart structures and materials. – Boston: Artech House, 1996. – 207 p.
5. Martensitic transformations and shape-memory materials / R. D. James, K. F. Hane // Acta Materialia. – 2000. – V. 48. – P. 197–222.

Научный руководитель: Шостак Никита Андреевич, заместитель директора высшей инженерной школы «Нефтегазовый и энергетический инжиниринг», Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия. Балаев Эйтибар Юсиф Оглы, старший научный сотрудник каф. НГД им. проф. Г. Т. Вартумяна, Краснодар, Россия.

Секция 3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

Абурова Валерия Александровна
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, s225073@stud.spmi.ru

Повышение извлечения благородных металлов из углеродистых руд с применением энергетических воздействий

Аннотация. В работе представлены результаты обоснования возможности укрупнения низкоразмерного серебра в процессе СВЧ обработки. На примере модельных навесок обосновано добавление магнетита для создания активных центров локального нагрева и укрупнения низкоразмерного серебра. Обоснованы параметры СВЧ обработки углеродистого флотационного концентрата для достижения укрупнения низкоразмерного серебра и золота до крупности 20-50 мкм, что позволит снизить потери ценных компонентов с хвостами обогащения и извлечь укрупненные частицы с применением традиционных методов. Представлен механизм укрупнения низкоразмерного серебра в процессе СВЧ обработки на примере модельных навесок.

Ключевые слова: СВЧ обработка, серебро, магнетит, благороднометалльные руды, модельные навески, углеродистый флотационный концентрат.

Valeria A. Aburova
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, s225073@stud.spmi.ru

Increasing the recovery of noble metals from carbonaceous ores using energy impacts

Abstract. The results of substantiation of the possibility of coarsening of low-dimensional silver during microwave treatment are presented in the paper. On the example of model samples the addition of magnetite for creation of active centers of local heating and coarsening of low-dimensional silver is substantiated. Parameters of microwave treatment of carbonaceous flotation concentrate to achieve coarsening of low-dimensional silver and gold to the size of 20–50 microns, which will reduce the loss of valuable components with tailings and recovery of coarsened particles using traditional methods, are substantiated. The mechanism of coarsening of low-dimensional silver in the process of microwave treatment on the example of model samples is presented.

Keywords: microwave treatment, silver, magnetite, noble metal ores, model samples, carbonaceous flotation concentrate.

Вовлечение в переработку упорных благороднометалльных руд, относящихся к стратегическим видам сырья, способствует необходимости в совершенствовании уже существующих технологических схем и в разработке новых решений для повышения извлечения ценных компонентов в концентраты [1]. Упорность руд может быть связана с наличием сорбционно-активного по отношению к растворенным благородным металлам углеродистого органического вещества, включением низкоразмерных благородных металлов в минералы-концентраты, наличием химических депрессоров золота и серебра в составе руды [2]. Преимущественно минералами-концентраторами, включающими в себя низкоразмерные благородные металлы, являются пирит, арсенопирит, галенит

и т.д. К низкоразмерным или «невидимым» формам благородных металлов принято относить те формы, которые не определяются с применением оптической или электронной микроскопии, с диапазоном крупности от 1 до 100 нм [3]. Наличие углеродистого вещества и «невидимых» форм золота и серебра приводит к значительным потерям ценных компонентов как на стадии металлургической переработки, так и при выделении углеродистых продуктов, отправляемых на большинстве фабрик на хвостохранилище. В этой связи актуальной задачей является не только вовлечение в переработку углеродистых продуктов, что позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, но и снижение потерь благородных металлов с хвостами обогащения. В качестве одного из методов энергетического воздействия в работе предлагается принять сверхвысокочастотную (СВЧ) обработку, которая является одним из перспективных методов. К ее преимуществам относятся быстрый и селективный нагрев. Минералы различаются по скорости их СВЧ нагрева, за счет чего и достигается селективность. Цель работы заключается в обосновании возможности укрупнения низкоразмерного серебра в углеродистых материалах, представленных модельными навесками и углеродистым флотационным концентратом, для снижения потерь благородных металлов с хвостами обогащения с применением СВЧ обработки и добавлением магнетита для создания активных центров локального нагрева.

Объектами исследования являются углеродистые материалы, углеродистый флотационный концентрат и модельные навески активированного угля. Для подготовки модельных навесок использовался измельченный активированный уголь и растворенное в выщелачивающем растворе сусальное серебро (с содержанием Ag 99,9 %). Основным ценным компонентом в исходной углеродистой золотосодержащей руде является золото (содержание $5,99 \pm 0,29$ г/т), попутным компонентом является серебро (содержание $0,29 \pm 0,1$ г/т). Содержание органического углеродистого вещества составляет 1,62 %. Минералы породы представлены кварцем, кальцитом, хлоритом, альбитом, мусковитом и т.д.

Углеродистый флотационный концентрат был выделен из исходной упорной благороднометалльной руды с применением пневмомеханической флотомашин Flotation Bench Test Machine фирмы Laarmann (объем камеры 1,5 л). Углеродистая флотация проводилась на руде, измельченной до крупности 60 % класса -0,071 мм с добавлением оксала в качестве пенообразователя. Для СВЧ обработки исследуемых объектов применялась печь фирмы Sineo UWave-2000 (диапазон выставяемой мощности от 100 до 1000 Вт). Для определения температуры СВЧ нагрева применялся лазерный пирометр пирометра FinePower DIN21H (диапазон измеряемых температур составляет от -50 до 1100°C). Для исследования исходной руды и продуктов ее обогащения до и после СВЧ обработки использовался сканирующий электронный микроскоп Vega 3 LMN, совмещенный с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20.

Для подтверждения возможности укрупнения низкоразмерного серебра в модельных навесках проведены серии опытов до и после добавления магнетита при СВЧ обработке. Исходные пробы после сорбции серебра анализировались с применением сканирующей электронной микроскопии для выявления влияния добавления магнетита и СВЧ обработки на укрупнение благородного металла. В ходе проведения исследования установлено, что в пробах без добавления магнетита после СВЧ обработки (параметры: мощность – 1000 Вт, время – 3 минуты) достигается укрупнение низкоразмерного серебра до размеров от 5 до 10 мкм. Извлечение традиционными методами обогащения частиц данной крупности не представляется возможным, поэтому далее были проведены исследования по СВЧ обработке модельных навесок с адсорбированным серебром с добавлением магнетита при идентичных параметрах.

Исследование влияния добавления различного содержания магнетита в модельные навески при СВЧ обработке позволило подтвердить возможность укрупнения частиц серебра до сферической формы, при этом их средний размер составил от 20 до 40 мкм при добавлении 10 % магнетита. При добавлении 3 % укрупнение происходило до крупности от 10 до 15 мкм, при 5 % – от 10 до 20 мкм, при 15 % – от 10 до 15 мкм. Полученные результаты позволили обосновать необходимость добавления 10 % магнетита в модельные навески с последующей СВЧ обработкой для укрупнения низкоразмерного серебра.

По результатам флотационного обогащения золотосодержащей руды установлено, что углеродистый флотационный концентрат содержит 2,91 г/т Au и 0,12 г/т Ag при извлечении 1,19 и 0,94 % соответственно. Поскольку в ранее проведенных исследованиях была подтверждена возможность укрупнения серебра в модельных навесках с добавлением 10 % магнетита при СВЧ обработке, дальнейшее исследование проводилось на полученном углеродистом флотационном концентрате при мощности 1000 Вт и времени обработки равном 5 минутам. Интерпретация полученных данных позволила подтвердить возможность укрупнения низкоразмерного серебра до размеров от 20 до 50 мкм в процессе СВЧ обработки углеродистого флотационного концентрата с добавлением 10 % магнетита. С применением сканирующей электронной микроскопии в обработанных пробах обнаружены укрупненные сферы со значительным содержанием серебра, а также выявлены пики характерные для золота.

На основе проведенных исследований был схематически изображен механизм укрупнения низкоразмерного серебра при СВЧ обработке модельной навески, представленный на рисунке 1.

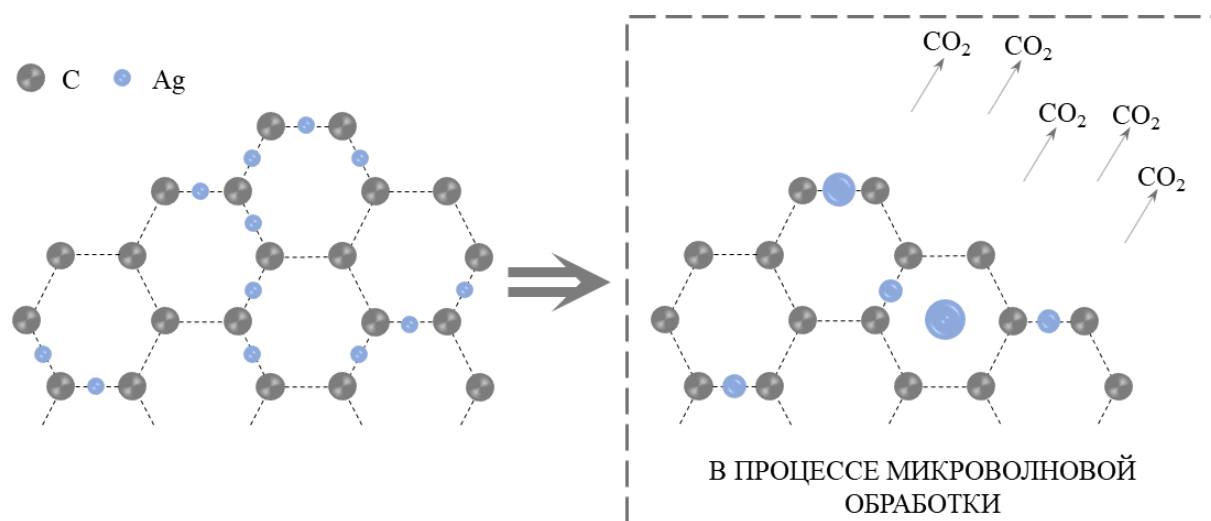


Рис. 1. Механизм укрупнения низкоразмерного серебра в процессе СВЧ обработки модельной навески [4]

Поскольку большая часть модельной навески представлена активированным углем и при воздействии увеличивается температура нагрева материала, в процессе СВЧ обработки происходит его возгорание в окислительной среде, что приводит к образованию CO_2 , плавлению адсорбированного низкоразмерного серебра в процессе сгорания активированного угля и нагрева магнетита, а также укрупнение благородного металла за счет перемещения в образовавшиеся в процессе горения поры.

В результате проведенных исследований обоснована необходимость добавления магнетита для создания активных центров локального нагрева в процессе СВЧ обработки и укрупнения низкоразмерного серебра. Определено содержание магнетита в количестве

10 % от массы навески для достижения наибольшего укрупнения низкоразмерного серебра в модельных навесках – средняя крупность от 20 до 40 мкм. При обработке углеродистого флотационного концентрата с добавлением ранее установленного содержания магнетита установлено образование сферических частиц крупностью от 20 до 50 мкм с содержанием как серебра, так и золота. Крупность полученных в ходе СВЧ обработки укрупненных частиц позволяет рассмотреть в качестве возможного метода извлечения центробежную концентрацию [5], что тем самым позволит снизить потери благородных металлов с хвостами обогащения.

Список литературы

1. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита. Записки Горного института. 2020;242:218–227. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218.
2. Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т. Т. 1. Иркутск: ОАО «Иргиредмет»; 1999. 452 с.
3. Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. М.: ИД «Руда и Металлы»; 2013. 452 с.
4. Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Абурова В.А. «Невидимые» благородные металлы в углеродистых породах и продуктах обогащения: возможность выявления и укрупнения. Горные науки и технологии. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-22.
5. Амдур А. М., Федоров С. А., Матушкина А. Н. Извлечение золота из труднообогатимых руд и техногенных отходов путем их высокотемпературной обработки и последующей центробежной сепарации. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022;(11–1):95–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_95.

Научный руководитель: Александрова Татьяна Николаевна, зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Ананенко Екатерина Сергеевна^{1*}
Алгебраистова Наталья Константиновна¹
Гуревич Юрий Леонидович²
Теремова Маргарита Ивановна²

¹ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

² Международный научный центр исследований экстремальных состояний организма КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

* ananenkoes@inbox.ru

Биообработка продуктов обогащения с целью удаления собирателя с минеральной поверхности

Аннотация. В работе показаны результаты исследования влияния биообработки на минеральную поверхность антимонита и арсенопирита, на коллективный золотосурьмяной концентрат, на водные растворы бутилового ксантогената. Зафиксированы изменения краевых углов смачивания антимонита и арсенопирита, снижение технологических показателей флотации коллективного золотосурьмяного концентрата, снижение концентрации ксантогената после биообработки.

Ключевые слова: биообработка, арсенопирит, антимонит, коллективный концентрат, золотосурьмяная руда, ксантогенат.

Ekaterina S. Ananenko^{1*}
Natalia K. Algebraistova¹
Yuri L. Gurevich²
Margarita I. Teremova²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² International Research Center for Extreme Body States, Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

* ananenkoes@inbox.ru

Bioprocessing of beneficiation products for removal of collectors from mineral surfaces

Abstract. The findings of the study demonstrate the impact of microbiological treatment on the mineral surface state of antimonite and arsenopyrite, the technological indicators of flotation of collective gold-antimony concentrate, and the composition of aqueous solutions of butyl xanthogenate. The study revealed a reduction in the limiting angles of wetting for both antimonite and arsenopyrite, a decline in the technological indicators of flotation for the collective gold-antimony concentrate, and a decrease in the concentration of xanthogenate following microbiological treatment.

Keywords: bioprocessing, arsenopyrite, antimonite, collective concentrate, gold-antimony ore, xanthogenate.

Проблема переработки золотосурьмяных руд заключается в том, что сурьма и золото отрицательно влияют друг на друга в гидрометаллургических процессах, что предъявляет значительные требования к полноте разделения этих элементов в разноименные концентраты до поступления их в соответствующие гидрометаллургические операции [1, 2, 3].

Реализация коллективно-селективных схем флотации, получивших наибольшее распространение в практике переработки золотосурьмяных руд, осложнена процессом подготовки коллективных золотосурьмяных концентратов к циклу селекции, где основная проблема заключается в удалении остаточных концентраций собирателя [4].

Чтобы обеспечить эффективное разделение коллективного золотосурьмяного концентрата в цикле селективной флотации необходимо очистить поверхность сульфидов ценных минералов от закрепившегося в операции коллективной флотации реагентов-собирателей.

На сегодняшний день существует немалое количество способов подготовки коллективных концентратов к циклам селекции: отмывка и репульпация, поглощение реагентов активированным углем, пропарка, обжиг, десорбция реагентов сернистым натрием, ультразвуковая обработка. Однако все эти способы подготовки коллективных концентратов к селекции характеризуются высокой стоимостью из-за применения высоких температур и высоких расходов реагентов, сложностью и громоздкостью аппаратного оформления, а также не всегда обеспечивают удаление реагента с минеральной поверхности [4].

В этих условиях разработка нового технологически эффективного, экологически безопасного и экономически выгодного способа подготовки коллективных золотосурьмяных концентратов к селективному разделению является актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений в области подготовки коллективных концентратов к циклу селекции является использование микробиологических приемов [5]. Биотехнологические подходы уже доказали свою эффективность в металлургических процессах, включая технологии биовыщелачивания, биофлотации, биосорбции, биообезвреживания водных ресурсов и отходов.

Первые поисковые лабораторные исследования в области деструкции и разрушения флотационных реагентов бактериями и микроорганизмами успешно выполнены сотрудниками индийского института науки, китайскими исследователями, японскими учеными, отечественными исследователями. Они показали возможность использования микроорганизмов для деградации пленок флотационных собирателей с минеральной поверхности сульфидов, однако тема селективного разделения металлов с помощью микроорганизмов остается малоизученной областью и требует дополнительных исследований для оптимизации этого процесса.

Проведен научно-технический анализ существующих научных публикаций по теме современного состояния технологии обогащения золотосурьмяных руд и роли биотехнологий в горном деле. Химический и фазовый состав коллективного концентрата исследован с применением химического, пробирного, рентгенофазового и спектрального методов анализа. Выделение микроорганизмов осуществлялось методом культивирования бактерий в среде Зака. Идентификация продуктов биodeградации ксантогената проведена с использованием методов хроматографического анализа, ультрафиолетовой спектрофотометрии с помощью оптоволоконного спектрофотометра AvaSpec2048L в диапазоне длин волн от 220 до 760. Остаточная концентрация ксантогената определялась колориметрически. Технологические исследования выполнены флотационным методом с использованием классического метода планирования экспериментов. Изменения поверхности сульфидов до и после биообработки фиксировались измерением краевых углов смачивания с помощью автоматизированного оптического анализатора OCA 15EC с температурным блоком TPC-160, измерением дзета-потенциала на приборе Zetasizer Nano ZS, электронной микроскопией с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000Plus. Для обработки результатов исследований использовались методы математической статистики.

Объект исследования – золотосурьмяная руда одного из месторождений Восточной Сибири. Руда относится к умеренно-сульфидному типу руд. Содержание основных элементов: Sb – 5,14 %, As – 0,51 %, Au – 0,86 г/т.

В рамках исследования предложена схема коллективно-селективной флотации с выделением богатого сурьмяного концентрата в голове схемы. Предложенный реагентный режим коллективной флотации, обеспечивает получение коллективного золотосурьмяного концентрата, содержания золота и сурьмы в хвостах по данной схеме коррелирует с проектным значением переработки руды текущей добычи.

Культура бактерий для исследований выделена сотрудниками «Международного научного центра исследований экстремальных состояний организма КНЦ СО РАН» из пробы хвостов, отобранной на хвостохранилище одного из месторождений Восточной

Сибири. В результате культивирования на селективной среде произошло накопление только тех бактерий, которые способны к росту на среде с ксантогенатом в качестве единственного источника серы. По результатам секвенирования микроорганизмы были идентифицированы как *Pseudomonas japonica* [6,7].

Результаты исследования и обсуждение. Периодическое культивирование на селективной среде, не содержащей серу в составе минеральных солей, подтвердило способность культуры использовать серу, содержащуюся в молекуле ксантогената в качестве источника питания:

- начиная с 13 часа процесса на дне культуральных колб обнаружены капли сероуглерода;
- по результатам колориметрического анализа ксантогенат был утилизирован в течение 17 часов.

В результате анализа спектров растворов ксантогената до и после взаимодействия с бактериальными клетками отмечено влияние бактериальных клеток и их метаболитов на разложение КХБ на сероуглерод и спирт, о чем говорит наличие пика сероуглерода в образцах КХБ после взаимодействия с клетками, в то время как на спектре исходного образца КХБ пик сероуглерода CS_2 отсутствует. Помимо этого, отмечено снижение концентрации иона ксантогената на 10 % в образцах КХБ после взаимодействия с клетками бактерий по сравнению с образцом исходного КХБ, что также свидетельствует о влиянии бактериальных клеток и их метаболитов на разложение КХБ на сероуглерод и спирт.

Также зафиксировано, что рост культуры микроорганизмов наблюдается только на той поверхности, где в качестве источника питания привнесен ксантогенат.

По данным электронной микроскопии отмечено, что бактериальные клетки отдают предпочтение и фиксируются предпочтительно на минеральной поверхности антимонита и арсенопирита, предварительно обработанных ксантогенатом по сравнению с чистой минеральной поверхностью.

Результаты измерения краевых углов смачивания свидетельствуют о том, что бактериальные клетки и их метаболиты гидрофилизуют минеральную поверхность антимонита и арсенопирита независимо от того, обработана минеральная поверхность ксантогенатом или нет. Уменьшение краевого угла смачивания чистой минеральной поверхности антимонита и арсенопирита после биообработки составило $18,4^\circ$ и 11° соответственно. Уменьшение краевого угла смачивания после биообработки минеральной поверхности антимонита и арсенопирита, предварительно обработанных раствором ксантогената, составило $22,9^\circ$ и 15° соответственно.

Влияние биообработки на флотационную активность чистых минералов оценивали флотацией мономинеральных фракций антимонита и арсенопирита. За функцию отклика был принят выход пенного продукта. Исследовали влияния биообработки на поведение сульфидов во флотационном процессе в зависимости от времени контактирования (от 0 до 24 часов) и концентрации бактериальных клеток в объеме пульпы (от 0 до 0,15 г/л). Полученные результаты свидетельствуют о том, что биообработка чистых минералов в течение 1 часа приводит к снижению выхода пенного продукта арсенопирита и антимонита на 36 % и 13 % соответственно. Дальнейшее увеличение времени контактирования монофракций снижает выход пенного продукта незначительно (на 1–2 %). Поэтому в дальнейших опытах время контактирования концентрата с биокulturой принято за 1 час. Увеличение концентрации бактериальных клеток в объеме пульпы от 0 до 0,15 г/л сухого веса влияет на флотацию чистых минералов следующим образом: выход пенного продукта арсенопирита снижается на 60 %, выход пенного продукта антимонита снижается на 35 %.

Влияние биообработки на флотацию коллективного золотосурьмяного концентрата оценивали флотацией. В качестве материала для опытов использовали коллективный золотосурьмяной концентрат, полученный из исходной руды одного из месторождений

Восточной Сибири. В исследовании варьировали концентрацией бактериальных клеток в объеме пульпы (в диапазоне от 0 до 0,66 г/л). Отмечено, что с увеличением концентрации бактериальных клеток в объеме пульпы до 0,50 г/л наблюдается снижение выхода пенного продукта на 25 % и извлечения сурьмы, мышьяка и золота в пенный продукт на 25, 30 и 30 % соответственно. Что говорит о том, что бактерии закрепляются на поверхности минералов коллективного концентрата, снижая флотуемость и технологические показатели процесса.

В результате исследования сделаны следующие выводы:

- микроорганизмы *Pseudomonas japonica* способны использовать серу, содержащуюся в молекуле ксантогената в качестве источника питания;
- бактериальные клетки и их метаболиты оказывают влияние на разрушение ксантогената;
- бактериальные клетки и их метаболиты гидрофилизуют минеральную поверхность антимонита и арсенопирита, уменьшая краевой угол смачивания;
- биообработка мономинеральных фракций антимонита и арсенопирита приводит к снижению флотационной активности минералов;
- биообработка коллективного концентрата снижает технологические показатели дальнейшего процесса флотации.

Таким образом, биообработка может быть использована и дать положительные результаты при подготовке коллективных концентратов к циклу селекции, эффективность которой в значительной степени зависит от степени удаления адсорбированной пленки гидрофобизатора с поверхности разделяемых сульфидов.

Список литературы

1. Соложенкин П. М., Зинченко З. А. Обогащение сурьмяных руд. – М.: Наука, 1985.
2. Лодейщиков В. В. Извлечение золота из упорных и концентратов. М.: Недра, 1968. 204 с.
3. В. В. Лодейщиков, А. Ф. Панченко. Основы извлечения золота и сурьмы из комплексных руд // Интенсификация процессов обогащения минерального сырья. Издательство «Наука», Москва 1981 год, С. 189–192.
4. Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, Горная книга, «Мир горной книги», 2008. С. 710.
5. Адамов Э. В., Панин В. В. Биотехнология металлов, М: «Учеба», 2003.
6. Н. К. Алгебраистова, И. В. Прокопьев, Ю. Л. Гуревич, М. И. Теремова. О новом способе подготовки коллективных концентратов к селекции // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 406–413. – EDN TZJUVР.
7. N. K. Algebraistova, A. V. Razvyaznaya, M. I. Teremova, E. V. Mazurova Effect of *Pseudomonas Japonica* bacteria on selection of sulfides // Journal of Mining Science. – 2016. – Vol. 52, No. 1. – P. 190–194. – DOI 10.1134/S1062739116010297. – EDN XFHWZH.

Научный руководитель: Алгебраистова Наталья Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Флотация апатита и ионный состав флотационной пульпы в зависимости от минерального состава апатит-нефелиновых руд

Аннотация. Методом беспенной флотации чистой разности апатита исследовано действие ионов, присутствующих в жидкой фазе минеральной суспензии после измельчения апатит-нефелиновых руд. Показано, что взвешенные частицы гидроксидов железа и алюминия, а также сульфат- и фосфат-ионы оказывают депрессирующее действие на флотацию апатита, снижая ее эффективность.

Ключевые слова: беспенная флотация, апатит, ионный состав пульпы, флотация, гипергенно-измененные руды, апатит-нефелиновые руды.

Alexandra P. Baeva
Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, a.baeva@ksc.ru

Apatite flotation and ionic composition of flotation pulp depending on the mineral composition of apatite-nepheline ores

Abstract. The effect of ions present in the liquid phase of a mineral suspension after grinding of apatite-nepheline ores has been studied by the method of non-saturated flotation of the pure difference of apatite. It has been shown that suspended particles of iron and aluminum hydroxides, as well as sulfate and phosphate ions, have a depressing effect on apatite flotation, reducing its effectiveness.

Keywords: non-saturated flotation, apatite, ionic composition of pulp, flotation, hypergenically altered ores, apatite-nepheline ores.

Флотационный метод обогащения, который применяется при переработке большинства руд, сопровождается использованием большого количества воды. Важным условием работы обогатительных фабрик является замкнутый водооборот, при котором используется оборотная вода из хвостохранилища. Состав оборотной воды, как правило, варьируется незначительно.

Известно, что ионы оборотной воды могут оказывать влияние на процесс обогащения [1].

Существенным аспектом, оказывающим влияние на флотацию, является ионный состав флотационной пульпы, образующейся непосредственно при измельчении руды. И если при измельчении рядовой апатит-нефелиновой руды состав жидкой фазы практически не отличается от состава оборотной воды, на которой проводилось измельчение, то в случае руды с высоким содержанием гипергенных минералов концентрация некоторых ионов может в десятки раз превышать их количество в оборотной воде. Количество гипергенных минералов, таких как гидрослюда, цеолиты, глинистые и гидроксиды железа в рудах может достигать до 30 %. При этом именно в результате растворения этих минералов в жидкую фазу пульпы переходит до 100 мг/л железа, до 300 мг/л алюминия, до 50 мг/л ионов кальция. Кроме того, в ходе исследования было установлено, что при измельчении некоторых проб апатит-нефелиновой руды в жидкой фазе определяется до 700–800 мг/л ионов SO_4^{2-} , что связано, по-видимому, с наличием в руде сульфидных минералов.

Известно, что ионы кальция при концентрации выше 40–50 мг/л оказывают негативное влияние на флотацию апатита, образуя нерастворимые соли собирателя [2].

Определяемые в пульпе железо и алюминий находятся там в виде коллоидных частиц соответствующих гидроксидов. Такие частицы могут осаждаться на поверхности минералов, нарушая флотационный процесс. Как нарушая селективность закрепления собирателя на поверхности минералов, так и снижая выход концентрата.

Оценку влияния тонких частиц гидроксидов железа и алюминия на флотацию апатита проводили методом беспенной флотации чистого минерала в трубке Халлимонда (рисунок 1). К суспензии апатита перед собирателем добавляли определенное количество взвеси свежеприготовленного $\text{Fe}(\text{OH})_3$ или $\text{Al}(\text{OH})_3$.

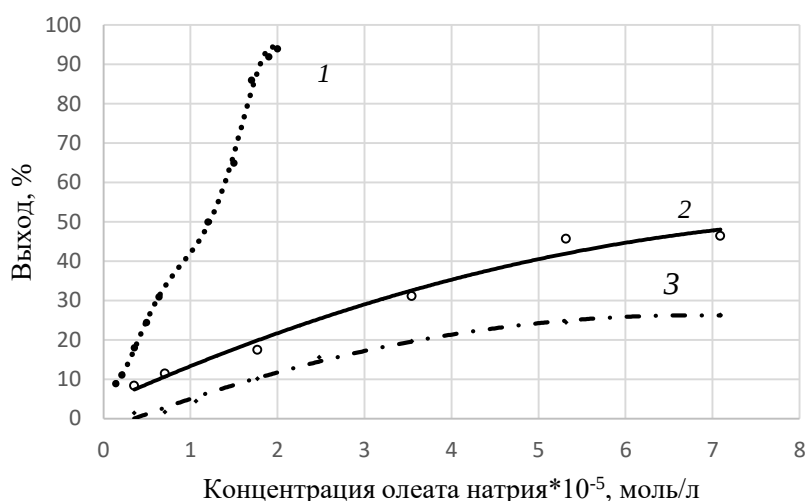


Рис. 1. Результаты беспенной флотации апатита олеатом натрия (1), и в присутствии $\text{Al}(\text{OH})_3$ (2) и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (3)

Из полученных результатов видно, что при наличии в растворе тонких частиц гидроксидов алюминия и железа приводит к значительному подавлению флотации апатита. Аналогичные результаты наблюдаются при флотации непосредственно руды из зон разрушения (таблица 1) – извлечение P_2O_5 в апатитовый концентрат составило всего 79,7 %. Проведя операцию обесшламливания удалось, снизить негативное влияние таких частиц и повысить извлечение P_2O_5 .

Таблица 1

Результаты флотации апатит-нефелиновой руды с высоким содержанием гипергенных минералов

Содержание P_2O_5 в концентрате, %	Извлечение P_2O_5 в концентрат, %	Содержание P_2O_5 в хвостах, %
39,02	79,7	4,07
После обесшламливания		
39,00	89,0	1,32

Наличие в рудах сульфат-ионов так же способно различным образом влиять на процесс обогащения. К примеру, при проведении беспенной флотации видно как сульфат-ионы депрессируют апатит (рисунок 2). Так же было замечено, что при высокой концентрации сульфата образуется большое количество пены, что в случае флотации руды может влиять на селективность процесса. В концентрат могут попадать частицы других минералов, ухудшая его качество.

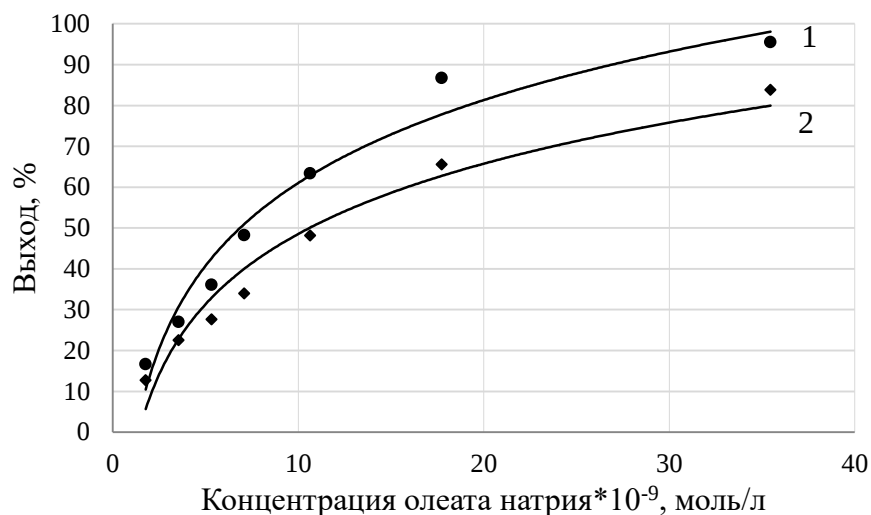


Рис. 2. Результаты беспенной флотации апатита олеатом натрия (1), и в присутствии Na₂SO₄ (2)

Отрицательное влияние сульфат ионов было показано и при флотации апатит-нефелиновой руды (таблица 2).

Таблица 2

Результаты флотации апатит-нефелиновой руды с высоким содержанием сульфат ионов

SO ₄ ²⁻ , мг/л	Апатитовый концентрат			Содержание P ₂ O ₅ в хвостах, %
	Выход, %	Содержание P ₂ O ₅ , %	Извлечение P ₂ O ₅ , %	
100	28,9	39,22	91,0	1,58
800	12,9	38,87	39,7	8,76

Фосфаты так же способны оказывать депрессирующее действие на флотацию апатита. При флотации апатит-содержащих руд из-за некоторого растворения апатита в оборотной воде могут накапливаться фосфат-ионы. Адсорбция PO₄³⁻ на поверхности минерала устраняет действие гидрофобного собирателя. В жидкую фазу они могут быть принесены и с реагентами, которые используются в качестве собирателей.

Из полученных результатов (рисунок 3) видно, что выход апатита при добавлении фосфат-ионов снижается [3]. Фосфат-ионы активно адсорбируются на поверхности минерала, препятствуя закреплению на нем гидрофобного собирателя (рисунок 4) [4].

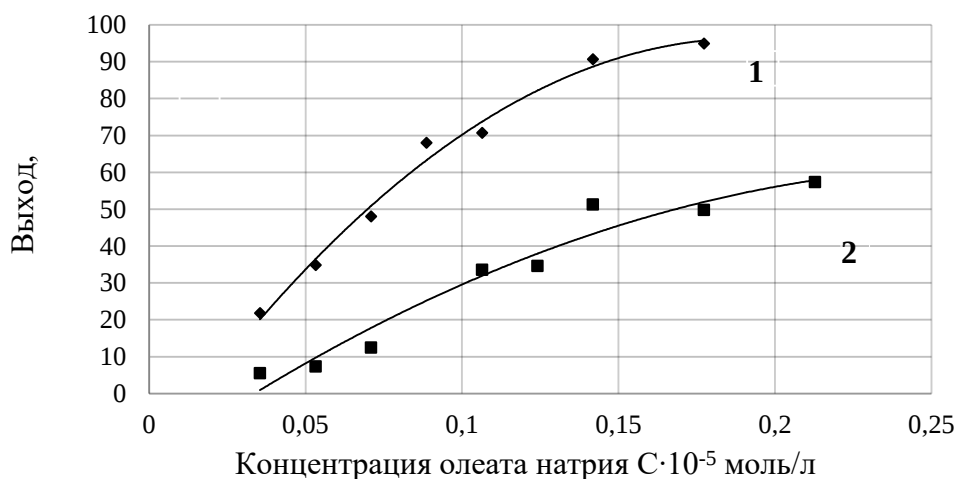


Рис. 3. Результаты беспенной флотации апатита олеатом натрия (1) и в присутствии фосфат-ионов (2)

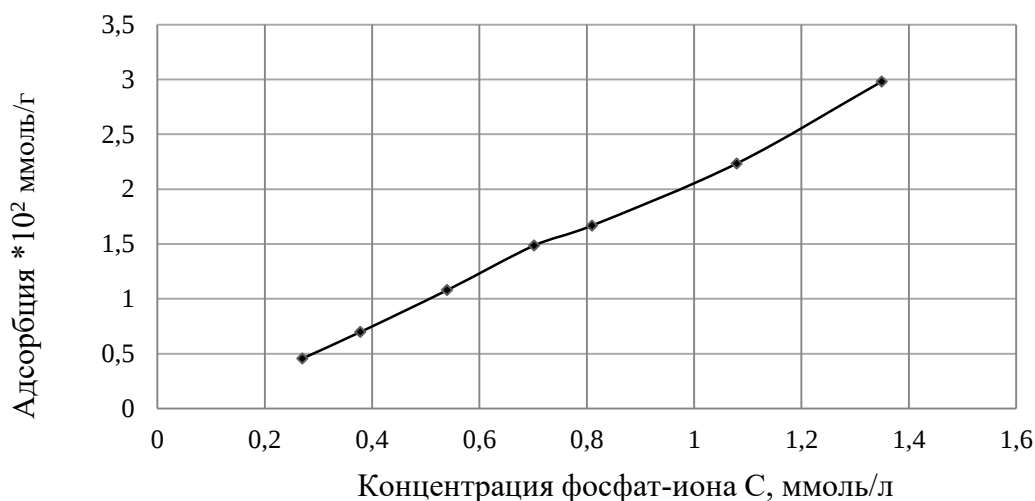


Рис. 4. Адсорбция фосфата на апатите, крупность апатита -0.05 мм

Таблица 3

Результаты флотации апатита в открытом цикле при добавлении в пульпу фосфата натрия

Концентрация PO_4^{3-} в ОВ, мг/л	Апатитовый концентрат		
	Выход, %	Содержание P_2O_5 , %	Извлечение P_2O_5 , %
7	27,9	39,82	89,8
17	21,2	39,43	67,6
57	3,8	38,07	11,7

Таким образом, ионы, оказывающие влияние на флотацию могут оказаться в пульпе в результате измельчения самой руды. И это является одним из факторов, определяющим неудовлетворительные показатели обогащения гипергенно-измененных апатит-нефелиновых руд.

Список литературы

1. Брыляков, Ю. Е. Развитие теории и практики комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений : автореферат дис. доктора технических наук : 25.00.13 / Ин-т проблем комплекс. освоения недр. – Москва, 2004. – 40 с.
2. Гершенкоп А. Ш., Артемьев А. В. Влияние оборотной воды на флотацию апатито-нефелиновых руд и способы регулирования ее состава [текст] / Гершенкоп А. Ш., Артемьев А. В. // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2014. – № 2 (74). – С. 36–40.
3. Глембоцкий В. А. Флотация Москва : Госгортехиздат, 1961. – 547 с
4. Глембоцкий В. А. Основы физико-химии флотационных процессов Недр, Москва, 1980 г., 471 стр.

Научный руководитель: Митрофанова Галина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия.

Исследование влияния параметров брикетирования коксовой пыли алюминиевого производства на их прочность

Аннотация. В статье рассмотрена проблема утилизации мелкодисперсной коксовой пыли, образующейся при прокалке кокса в цехе анодной массы. Были рассмотрены физико-химические характеристики пыли: плотность (1,98 г/см³), зольность (0,97 %), летучие (1,45 %), содержание серы (2,16 %) и других элементов. По данным из предыдущих экспериментов было предложено брикетирование с лигносульфонатом натрия, но с добавлением других материалов в шихту помимо коксовой пыли: опилок, древесного и каменного углей. Изучено влияние содержания добавочных материалов в шихту на сопротивление сбрасыванию: наилучшие результаты были получены при добавлении каменного угля, который дал наибольшее сопротивление сбрасыванию (97,8 %) при минимальном содержании (10 %).

Ключевые слова: коксовая пыль, угольная пыль, брикетирование, брикет, связующее.

Mikhail I. Vasilev
INRTU, Irkutsk, Russia, vasiljev_mihail@mail.ru

Research of influence of briquetting parameters of coke dust briquettes of aluminum production on their strength

Abstract. The article considers the problem of utilisation of fine coke dust generated during coke calcination in the anode mass workshop. The physical and chemical characteristics of the dust were considered: density (1.98 g/cm³), ash content (0.97 %), volatiles (1.45 %), sulphur concentration (2.16 %) and other elements. According to the data from the previous experiments, briquetting with sodium lignosulfonate was proposed, but with the addition of other materials in the charge besides coke dust: sawdust, wood and stone coal. The influence of the concentration of the added materials in the charge on the dumping resistance was studied: the best results were obtained with the addition of hard coal, which gave the highest dumping resistance (97.8 %) at the minimum concentration (10 %).

Keyword: coke dust, coal dust, briquetting, briquette, binder.

Основным промышленным способом получения алюминия является электролиз криолито-глиноземных расплавов [1–3]. В данном процессе применяются следующие компоненты: глинозем, криолит, фтор соли, анодная масса или обожженные аноды, электроэнергия. При их производстве и транспортировке возникают потери и отходы, в особенности при производстве анодной массы на этапах предварительного дробления кокса, его прокалки и сушки (рис. 1) [4].

Как видно из рисунка 1, основным отходом при производстве анодной массы и обожженных анодов является коксовая пыль. Она улавливается газоочистными установками, и лишь незначительная ее часть возвращается в процесс, а остальная пыль отправляется на отвальные поля. Одним из вариантов переработки данной пыли является ее брикетирование с дальнейшим использованием полученных брикетов в качестве восстановителя [5].

В качестве объекта исследования выбрана углеродистая пыль, улавливаемая электрофильтрами при прокаливании нефтяного кокса с барабанной печи отделения производства анодной массы «РУСАЛ Братск» филиале в г. Шелехов. Пыль представляет собой мелкодисперсный (пылевидный) материал темно-серого цвета с плотностью 1,98 г/см³. Класс крупности которого составляет –60 мкм, при этом 90 % составляет класс –26 мкм, 50 % – класс –10 мкм. Зольность коксовой пыли составляет 0,97 %, а содержание серы 2,16 % (табл. 1), что свидетельствует о недостаточной прокалке материала в печи.



Рис. 1. Упрощенная технологическая схема производства анодной массы

Таблица 1

Состав исследуемой пыли

Зольность, %	0,97	Элемент	Содержание, ppm
		Si	735
Летучие, %	1,45	Fe	3852
		V	498
S _{общ} , %	2,16	Ti	21
		Cr	6
ρ, г/см ³	1,98	Mn	40
		Na	159

При разработке технологии брикетирования пыли электрофильтров большое значение имеет выбор связующих. Связано это с логистикой (транспортировка пыли или связующего), доступностью связующего и влиянием его на свойства полученного брикета.

На первоначальном этапе исследований были выбраны следующие связующие: лигносульфонат натрия, цемент, пыль электрофильтров (пыль очистки анодных газов электролизеров), жидкое стекло и карбоксиметилцеллюлоза. Содержание связующего изменялось в диапазоне 3–7 %. Механическая прочность брикетов на сбрасывание определялась согласно ГОСТ 21289-75 [6].

По итогу было получено, что наиболее лучшими связующими по сопротивлению сбрасыванию полученных брикетов являются лигносульфонат натрия и цемент [7]. Из этих двух связующих наиболее предпочтительным будет лигносульфонат натрия, так как цемент вносит большее количество примесей. Оптимальное содержание связующего находится в диапазоне 5–6 %. При этом сопротивление сбрасыванию составило 90–94 % (рис. 2).

Далее для увеличения прочностных характеристик было решено коксовую пыль смешать с другими материалами: опилки, древесный и каменный уголь. При этом используемые материалы образуются в большом количестве в виде пыли и крошки на угольных,

пиromеталлургических и деревообрабатывающих предприятиях. Для получения более прочного брикета необходимо использовать частицы разного гранулометрического состава. В случае использования только пыли крупностью частиц менее 60 мкм возникают сложности при получении прочных брикетов и большой расход связующих [8]. Так как полученные брикеты рекомендуются для использования в качестве восстановителя, то внесенные добавки незначительно повлияют на восстановительные свойства брикетов.

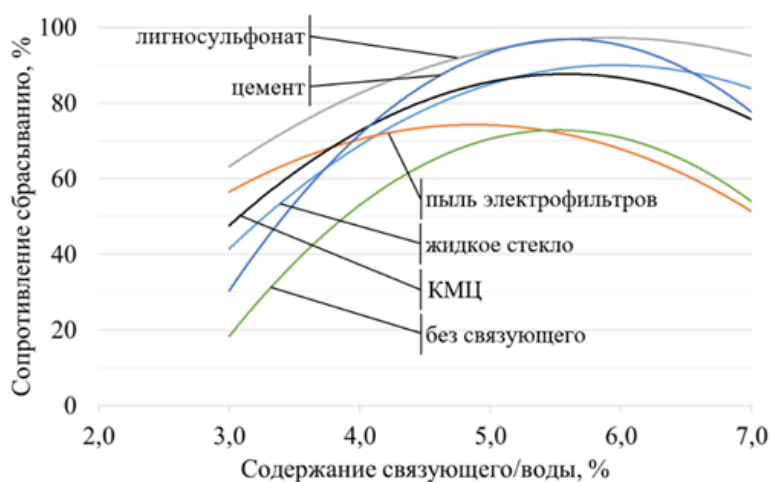


Рис. 2. Зависимость сопротивления сбрасыванию брикетов от содержания связующего

Для опытов применялись добавки крупностью -500 мкм в соотношениях с коксовой пылью 50:50, 75:25, 90:10 (коксовая пыль:добавка). В каждый брикет также добавлялось 5 % лигносульфоната натрия, оптимальное содержание которого определено в предварительных испытаниях, и 32,5 % воды от общей массы брикета.

Изготовление брикетов проводилось на ручном гидравлическом прессе ПРГ-1-50 с максимальной нагрузкой 5 т. Формирование брикетов производилось в форме, которая помещалась в пресс.

Полученные брикеты сушились на воздухе при комнатной температуре и далее проходили испытание на прочность при сбрасывании. Брикет, полученные с добавлением опилок, не имели достаточной прочности и не использовались при испытаниях. Возможно, это связано с геометрией материала и высоким влагопоглощением. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

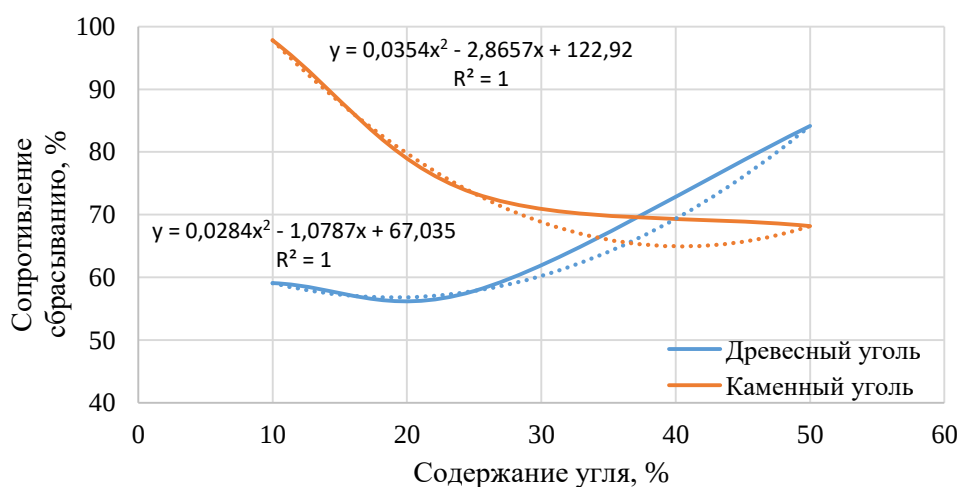


Рис. 3. Влияние содержания добавки древесного и каменного углей на прочностные характеристики полученных брикетов

Из полученных данных видно, что у брикетов с древесным углем наблюдается увеличение прочности на сбрасывание с увеличением содержания древесного угля. Поэтому наилучшим соотношением будет 1:1, при котором прочность на сбрасывание составит 84,15 %, дальнейшее повышение содержания древесного угля не целесообразно. Прочность брикета, полученного с применением каменного угля, наоборот снижается при увеличении его содержания. Поэтому наилучшим соотношением будет 1:9, при котором прочность на сбрасывание составит 97,80 %. Результаты прочности брикетов, полученных с применением древесного угля, показывает низкую эффективность данной добавки. В то время как применение каменного угля позволило повысить значение сопротивления сбрасыванию до 97,80 %.

В результате проведенных исследований установлено, что коксовая пыль печей прокали кокса представляет собой мелкодисперсный материал плотностью 1,98 г/см³ и крупностью частиц менее 60 мкм. Применение данного вида отхода значительно ограничено ввиду класса крупности и одним из решений данной проблемы является брикетирование данного материала. По результатам эксперимента было получено, что наилучшим связующим для коксовой пыли является лигносульфонат натрия в количестве 5–6 % от общей массы брикета. Также установлено, что применение добавки 10 % каменного угля повышает сопротивление сбрасыванию до 97,8 %. Прочность брикетов позволяет рекомендовать их к применению в различных областях промышленности в качестве топлива, в частности, для тепловых электростанций или в качестве восстановителя для производства ферросплавов, кремния и стали. В дальнейшем планируется исследование физико-химических свойств полученных брикетов и оценка удовлетворения требованиям их восстановителям.

Список литературы

1. Kvande H. Production of primary aluminium // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, processing and applications*. – 2011. – P. 49–69.
2. Mann V. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 / V. Mann, V. Buzunov, N. Pitertsev, V. Chesnyak, P. Polyakov // *Light Metals*. – 2015. – P. 757–762.
3. Гринберг И. С., Зельберг Б. И., Чалых В. И., Черных А. Е. *Электрометаллургия алюминия: учеб. пособие*. Иркутск: ИрГТУ, 2009. – 350 с.
4. Янко Э. А. *Аноды алюминиевых электролизеров*. – М.: Руда и металлы, 2001. – 671 с.
5. Немчинова Н. В., Леонова М. С., Тютрин А. А., Бельский С. С. Определение оптимальных параметров окомкования шихты для выплавки кремния на основе техногенного сырья // *Металлург*. – 2019. – № 2. – С. 6–11.
6. ГОСТ 21289-75. Брикеты угольные. Методы определения механической прочности. – М., 1985. – 7 с.
7. Tyutrin A. A., Burdonov A. E., Bushuev K. S. Expanding the Application Scope of Fine Dust from Petroleum Coke Calcining Furnaces in Aluminum Production / *Materials Science Forum*, 2022. – 1052 MSF. – P. 482–487.
8. Елишевич А. Т., *Брикетирование полезных ископаемых: Учеб. для вузов*. – М.: Недра, 1989. – 300 с.

Научный руководитель: Тютрин Андрей Александрович, к.т.н., доцент кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», Иркутск, Россия.

Обогащение руд редких металлов: состояние и перспективы

Аннотация. В представленной работе на основе проведенного анализа современной литературы приведена систематизация существующих методов обогащения и переработки руд редких металлов, в том числе редкоземельных металлов. Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования существующих разработок новых отечественных технологий переработки сырья с учетом их минеральных особенностей. Приведена систематизация флотационных реагентов для извлечения минералов редкоземельных металлов, а также для подавления минералов породы. Рассмотрены особенности существующих технологий переработки руд редких металлов, определены нерешенные проблемы в данной области. Показаны перспективы развития процессов обогащения руд редких металлов.

Ключевые слова: флотация, РЗМ, минералы породы, редкие металлы, стратегические металлы, обогащение.

Sergey A. Vertiev
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, s201202@stud.spmi.ru*

Rare Metal Ore Beneficiation: Current Status and Prospects

Abstract. In the presented paper on the basis of the analysis of modern literature provides a systematisation of existing methods of beneficiation and processing of ores of rare metals, including rare earth metals. The relevance of the work is due to the need to improve the existing development of new domestic technologies for processing of raw materials, taking into account their mineral characteristics. The systematisation of flotation reagents for recovery of minerals of rare-earth metals, and also for depression of minerals of a rock is resulted. Features of existing technologies of processing of ores of rare metals are considered, unresolved problems in this field are defined. Prospects for the development of processes of beneficiation of rare metal ores are shown.

Keywords: flotation, REM, rock minerals, rare metals, strategic metals, beneficiation.

Минерально-сырьевой комплекс страны является одним из показателей, определяющих развитие страны [1, 2]. Редкие металлы включают в себя комплекс из пяти групп металлов, среди которых отдельно выделены редкоземельные металлы, относящиеся к категории стратегических видов сырья. Уникальные свойства данных металлов позволяют их применять во многих областях промышленности, включая химическую, атомную, авиационную и другие. Руды редких металлов представляют собой комплексное сырье, что предопределяет необходимость применения сложных технологических схем, включающих магнитное, электрическое, гравитационное, флотационное обогащение в совокупности с комплексом металлургических операций [3]. На рисунке 1 представлены примеры комплексных руд редких металлов.



Рис. 1. Комплексные руды редких металлов

Анализ текущего состояния переработки руд редких металлов позволил установить, что единственным работающим предприятием по переработке руд редкоземельных металлов является Ловозерский ГОК. Стоит отметить при этом значительные запасы редкоземельных металлов в крупных месторождениях, отработка которых в настоящее время не проводится, однако уже существуют возможные технологии для их переработки, в таких месторождениях можно отнести Томторское, Чуктуконское и др. Возможным нетрадиционным источников редкоземельных металлов также являются хвосты переработки апатит-нефелиновых руд.

На основе анализа отечественной и зарубежной литературы по существующим технологиям обогащения редкоземельных месторождений определены основные комбинированные технологии [4]:

- магнито-гравитационно-флотационные;
- флотационно-радиометрические;
- магнито-электрические;
- магнито-радиометрические.

Флотационные методы обогащения являются наиболее универсальными с позиции селективного выделения минералов редкоземельных металлов. В отечественной практике известен реагент ИМ-50, в настоящее время не синтезируемый. При этом в мировой практике для извлечения минералов концентраторов РЗМ возможно применение амидов, карбоновых кислот, гидроксамовых кислот, оксимов [5] и др. (рис. 2).

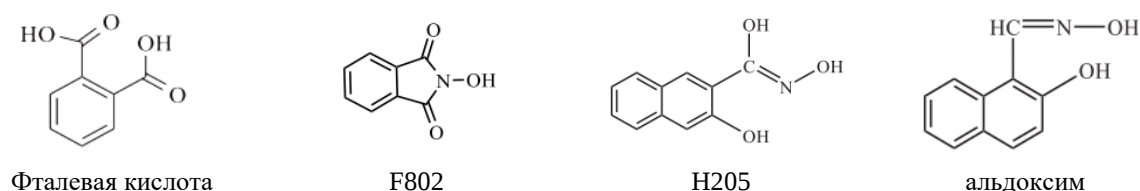


Рис. 2. Возможные собиратели для редкоземельных минералов

Для подавления минералов породы при этом возможно применение силиката натрия, гексафторсиликата натрия, модифицированного лигнина и депрессоров группы полисахариды, подбираемых в зависимости от состава минералов породы.

Сложность селективного выделения минералов, содержащих редкоземельные металлы предопределяет необходимость и актуальность разработки новых технологических решений для их флотационного извлечения и определения критериев выбора реагентов.

На основании проведенных исследований проведена систематизация данных в области существующих реагентов собирателей минералов, концентрирующих редкие и редкоземельные металлы, депрессоров для подавления минералов породы. Рассмотрены существующие предприятия по переработке руд редких металлов, проведена систематизация существующих технологических схем переработки руд, в том числе комбинированных. Определены нерешенные проблемы в данной области. Показаны перспективы развития процессов обогащения руд редких металлов.

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.
2. Litvinenko, V. S.; Petrov, E. I.; Vasilevskaya, D. V.; Yakovenko, A. V.; Naumov, I. A.; Ratnikov, M.A. 2022. Assessment of the Role of the State in the Management of Mineral Resources. J. Min. Inst. 1–17.
3. Чантурия В. А., Николаев А. И., Александрова Т. Н. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65. – № 5. – С. 402–415.
4. Cheng, S., Li, W., Han, Y., Sun, Y., Gao, P., & Zhang, X. (2024). Recent process developments in beneficiation and metallurgy of rare earths: A review. Journal of rare earths, 42(4), 629–642.
5. Shuai, Z., Zhu, Y., Gao, P., & Han, Y. (2024). Rare earth elements resources and beneficiation: A review. Minerals Engineering, 218, 109011.

Научный руководитель: Александрова Татьяна Николаевна, зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Моделирование кинетических параметров флотационного обогащения с использованием нейронных сетей

Аннотация. Кинетическая модель является одним из эффективных методов описания флотационного процесса, поэтому одной из актуальных задач является разработка методов оперативного извлечения данных о кинетических параметрах обогащения. В работе представлен метод определения кинетических зависимостей в процессе флотации с использованием технологий глубокого обучения, включая машинное зрение, как средство фиксации высоты пенного слоя и нейронная сеть с полносвязными слоями, как основа для регрессионной модели. Предложенные в работе подходы и методы позволили установить связь между величиной скорости флотации и значением высоты пенного слоя в камере флотационной машины.

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

Bulat L. Gatiatullin
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Peterburg, Russia, mister.bulat2000@gmail.com*

Modelling of kinetic parameters of ore flotation using neural networks

Abstract. Flotation kinetics model is one of the most effective methods of flotation process description, so list of actual tasks includes development of methods of operational extraction of the flotation kinetics parameters. In this work the method of defining kinetics dependencies during flotation with usage of deep learning technologies was introduced, including machine vision for measuring froth layer height and fully connected neural network as regression model. The proposed method allows to associate results of laboratory tests of the flotation process speed with the froth layer height parameter, mentioned above.

Keywords: flotation, flotation kinetics, machine vision, neural networks.

Флотационные методы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в связи с этим их развитие имеет большое практическое значение. Для эффективного описания и управления любого процесса, требуются какие-либо модели, позволяющие строить прогнозы, проектировать процесс и оптимизировать его. Одним из наиболее развитых и эффективных методов математического описания флотационного обогащения, является построение кинетических зависимостей, основанное на аналогии рассматриваемого процесса с химической реакцией [1, 2].

Однако для возможности применения упомянутой модели требуется проведение специальных лабораторных экспериментов, включающих в себя как непосредственно процесс обогащения, так и последующий анализ продуктов операции, что, в свою очередь, выражается в значительных затратах по времени. Упомянутый факт накладывает ограничения с позиции применения данной формы описания процесса, в качестве средства управления процессом на производствах.

При этом, в научных работах отмечено существование связи между характеристиками пенного слоя и кинетическими параметрами, что открывает возможности для создания так называемых *soft sensors* – датчиков, определяющих интересующий параметр, которым, в данном случае, выступает скорость флотации, с косвенными показателями, относящимися к пенному слою, посредством программной обработки [3, 4].

Таким образом, целью данной работы являлось создание модели, устанавливающей связь между скоростью флотации и высотой пенного слоя.

Исходные кинетические зависимости, использовавшиеся при реализации нейросетевой модели, были получены при проведении лабораторных экспериментов по флотации сульфидных руд, содержащих золото. При проведении экспериментов использовалась стандартная методика, подразумевающая флотацию с отдельным взятием проб за фиксированные промежутки времени с последующим их анализом и представлением в виде кривой кумулятивного извлечения по времени. Варьируемым фактором выступали различные вспениватели: МИБК, неонол АФ 9-12 и сосновое масло.

Для установления элементного состава пенного продукта флотации использовался рентгенофлуоресцентный анализ. Математическое описание извлечения компонентов в пенный продукт производилось с использованием уравнений кинетики флотации 1-го и 2-го рода.

Одним из требований при проведении эксперимента являлась возможность измерения высоты пены в процессе флотации. Используемые при флотации лабораторные флотационные машины имели прозрачную камеру, что позволило использовать для определения высоты систему на базе машинного зрения.

Измерение высоты пенного слоя проводилось с применением нейронной сети YoloV5, которая зарекомендовала себя в аналогичных задачах в других исследованиях [5,6]. Указанная сеть предназначена для решения задач обнаружения объектов, с последующим выделением их в ограничивающие рамки, размеры этих же рамок могут быть использованы, как габаритные размеры интересующего объекта, то есть пены. Исходная модель была настроена на обнаружение флотационной пены методами трансферного обучения, с последующим использованием при обработке записей экспериментов. Пример процесса обнаружения пены представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Процесс обнаружения пенного слоя в кадре записи эксперимента

Совокупность данных о высоте пенного слоя с вычисленными из уравнений кинетики значениями скорости флотации за соответствующие промежутки времени использовалась при обучении регрессионной нейросетевой модели. Данный тип нейронных сетей ранее успешно использовался при решении аналогичных задач [7,8].

Обученная нейронная сеть позволила связать закономерности между высотой пенного слоя и кинетическими параметрами. В процессе обучения нейронной сети была достигнута средняя абсолютная ошибка прогнозирования на уровне 0,003 %/с. Затем результаты были проверены на экспериментальных данных, полученных путем отбора проб пенного продукта в лабораторных условиях с последующим расчетом значений извлечений за заданные интервалы времени. Средняя относительная ошибка между экспериментальными и прогнозируемыми данными составила 4,1 %.

В рамках проведенного исследования был рассмотрен подход к моделированию скорости флотации на основании данных о высоте пенного слоя в камере флотационной машины. В работе показана возможность применения решений на базе цифровых технологий как для обработки и измерения исследуемых параметров, так и на этапе математического описания.

Созданная регрессионная модель позволяет прогнозировать кинетические параметры процесса флотации с относительной погрешностью, не превышающей 4 %. Этот результат свидетельствует о высокой точности предложенного подхода.

Разработанная методика имеет потенциал для внедрения в производственные процессы после соответствующей доработки и адаптации. Перспективным методом повышения точности прогнозирования является увеличение количества исходных параметров, связанных с целевой переменной; применение более сложных архитектур сетей, таких как рекуррентные сети, операторные сети; а также увеличение объема данных, на базе которых производится обучение нейронной сети.

Список литературы

1. Vinnett L., Waters K.E. Representation of Kinetics Models in Batch Flotation as Distributed First-Order Reactions // *Miner.* 2020, Vol. 10, Page 913. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 10, № 10. P. 913.
2. Bu X. et al. Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery // *Physicochem. Probl. Miner. Process. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, 2017. Vol. 53, № 1. P. 342–365.
3. Ostadrahimi M. et al. Effect of air flow rate and froth depth on the flotation performance: An industrial case study in a 10 m 3 cell // *Physicochem. Probl. Miner. Process. Politechnika Wrocławska*, 2022. Vol. 58, № 5. P. 154852.
4. Murhula E., Hashan M., Otsuki A. Effect of Solid Concentration and Particle Size on the Flotation Kinetics and Entrainment of Quartz and Hematite // *Met.* 2023, Vol. 13, Page 53. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 13, № 1. P. 53.
5. Rana M. M. et al. Improved vehicle detection: unveiling the potential of modified YOLOv5 // *Discov. Appl. Sci.* Springer Nature, 2024. Vol. 6, № 7.
6. Jung H. K., Choi G. S. Improved YOLOv5: Efficient Object Detection Using Drone Images under Various Conditions // *Appl. Sci.* MDPI, 2022. Vol. 12, № 14.
7. Bataineh M., Marler T. Neural network for regression problems with reduced training sets // *Neural Networks*. Pergamon, 2017. Vol. 95. P. 1–9.
8. Tretiak K., Schollmeyer G., Ferson S. Neural network model for imprecise regression with interval dependent variables // *Neural Networks*. Pergamon, 2023. Vol. 161. P. 550–564.

Научный руководитель: Александрова Татьяна Николаевна, зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Перспективы развития системы механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок

Аннотация: Обоснованы перспективы дальнейшего развития системы для подачи шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В статье сформулированы основные критерии, предъявляемые к механизмам для подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ, представлены отличительные особенности, разработанного проекта установки с гибким транспортирующим органом, численны основные технологические параметры механизмов подачи и распределения ШОС.

Ключевые слова: шлакообразующая смесь, установка для подачи шлакообразующей смеси, МНЛЗ, кристаллизатор, гибкий шнековый дозатор.

Fedor S. Zozulya*

Pavel A. Petrov

Donbas State Technical University, Alchevsk, LPR, Russia

* zoferik@gmail.com

Prospects for the development of a system for mechanized supply of slag-forming mixture into the crystallizer of a slab continuous casting machine

Abstract. The prospects of further development of the system for feeding slag-forming mixture (SFM) into the crystallizer of continuous casting machine (CCM) are substantiated. The paper formulates the main criteria for the mechanisms for feeding slag-forming mixture into the crystallizer of continuous casting machine, presents the distinctive features of the developed project of the system with flexible conveying organ, calculates the main technological parameters of the mechanisms for feeding and distribution of the slag-forming mixture.

Keywords: slag-forming mixture, slag-forming mixture feeding unit, CCM, crystallizer, flexible screw doser.

В настоящее время на современных металлургических предприятиях практически полностью завершён переход на непрерывную разливку стали. Доля выплавляемого металла на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) составляет 95 % [1]. Несмотря на это, совершенствование технологии и оборудования установок непрерывной разливки стали продолжается. Ключевыми направлениями дальнейшего развития являются улучшение качества товарной продукции и повышение производительности МНЛЗ.

Достижение необходимого уровня качества непрерывнолитой заготовки на большинстве предприятий реализуется за счёт покрытия в процессе разливки поверхности жидкого металла в кристаллизаторе шлакообразующей смесью (ШОС). Благодаря использованию смеси улучшается формирование корочки слитка, а также уменьшается силовое воздействие между кристаллизатором и затвердевшей корочкой заготовки [1].

На большинстве современных предприятий, для подачи смеси в кристаллизатор МНЛЗ оператор разливки использует деревянный гребок. Использование ручной подачи смеси не позволяет достичь необходимой точности дозирования подаваемого материала и качественного распределения его по зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе, что может сопровождаться рядом характерных дефектов непрерывнолитой

заготовки и приводить к снижению качества продукции [2]. Перспективой замены ручной подачи ШОС является механизированная установка, позволяющая регулировать процесс распределения смеси, увеличить точность дозирования ШОС в кристаллизатор и снизить расход смеси в зависимости от типа используемой установки до 15 % [7].

В результате анализа литературных источников [1, 3–6] авторами были сформулированы основные требования, предъявляемые к установкам для подачи шлакообразующей смеси:

- возможность работы с различными типами вводимой смеси по гранулометрическому составу (гранулированная, порошкообразная);
- простота конструкции установки;
- возможность парковки исполнительно механизма для улучшения доступа к кристаллизатору в штатных и нештатных (аварийных) ситуациях;
- возможность удаленного управления.

Комплексное решение проблемы качественной подачи и распределения ШОС можно разделить на два уровня:

1) создание механической установки, обладающей необходимыми физическими и кинематическими показателями, обеспечивающими требуемый режим подачи смеси к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе;

2) автоматизация процесса подачи смеси, направленная на поддержание оптимального режима поступления ШОС на поверхность жидкого металла в кристаллизаторе, реализуемая посредством разрабатываемых программных алгоритмов с учетом сигналов дополнительно устанавливаемых специальных датчиков, фиксирующих показания основных технологических параметров процесса непрерывной разливки стали.

На текущий момент, в соответствии с соглашением о научно-техническом сотрудничестве между кафедрой механического оборудования заводов черной металлургии ДонНТУ, имеющей опыт разработки подобных установок для условий металлургических предприятий Донбасса и кафедрой машин металлургического комплекса Дон ГТУ намечена перспектива дальнейшего развития системы механизированной подачи ШОС. В представленной работе предпринята попытка аккумулировать академические знания и производственный опыт. В должной мере этому поспособствовало участие студенческой команды ДонГТУ в проведении межвузовской акселерационной программы поддержки проектных команд и студенческих инициатив «Акселератор БГТУ им. В.Г. Шухова» реализуемой в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства». После посещения участниками команды отделения непрерывной разливки кислородно-конвертерного цеха ООО «ЮГМК» и общения с технологическим персоналом цеха был выдвинут ряд дополнительных требований к конструкции установки подачи ШОС. В дальнейшем, с учетом проведенного анализа и пожеланий эксплуатационного персонала ООО «ЮГМК» был разработан проект механизированной установки подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (рисунок 1) в значительной мере удовлетворяющий предъявляемым требованиям.

Отличительной особенностью разрабатываемого проекта системы автоматической подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ является: компактность установки; возможность работы с различными типами ШОС; функция удаленного управления; блочно-модульная конструкция машины; режим парковки установки; возможность регулировки в широких пределах распределения ШОС по поверхности металла в кристаллизаторе.

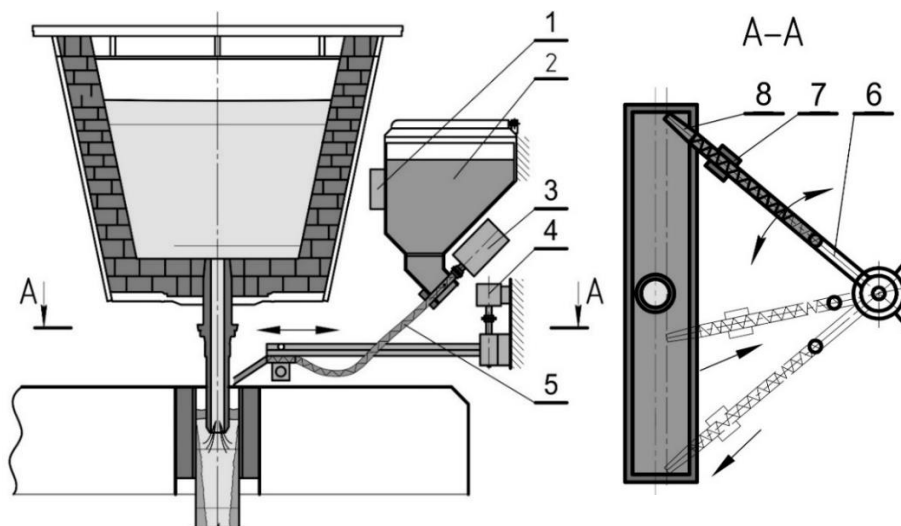


Рис. 1. Принципиальная схема системы механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

Установка состоит из электромагнитного встряхивателя 1, закрепленного на бункере 2 с ШОС, у которого в нижней части установлен гибкий шнековый дозатор 5, приводимый в движение мотор-редуктором 3 с регулируемой частотой вращения выходного вала; поворотной консоли 6, приводимой в движение при помощи привода 4. Консоль 6 совершает качательное движение вдоль широкой стенки кристаллизатора, позиционирование носка 8 над поверхностью жидкого металла обеспечивает привод 7.

Машина работает по следующему принципу: ШОС из бункера 2 поступает к открытой поверхности кристаллизатора через гибкий шнековый дозатор 5. Подача смеси задается вращением спирального шнека от мотор-редуктора 3, расход смеси регулируется частотой вращения приводного вала.

За плавное движение консоли отвечает мотор-редуктор 4, который задает ей качательное движение с необходимой скоростью вдоль широкой стенки кристаллизатора. В свою очередь за позиционирование носка 8 относительно продольной оси поворотной консоли отвечает привод 7, который обеспечивает изменение длины рабочего органа, что, дает возможность равномерно распределять смесь как в центре, так и на периферии сечения отливаемой заготовки.

Имеющее практическое значение определение основных технологических параметров (табл. 1) проектируемой установки с гибким транспортирующим органом применительно к подаче шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ было реализовано на основе разработанных ранее зависимостей [8] с учетом принятых авторами физико-механических характеристик используемых на производстве типов ШОС.

Реализация проекта механизированной установки с гибким транспортирующим органом и выдвижной консолью позволит обеспечить равномерное распределение смеси по поверхности жидкого металла в кристаллизаторе. Дальнейшим перспективным развитием проекта является автоматизация функционирования установки, что значительно улучшит качество распределения ШОС и повысит безопасность работы обслуживающего персонала участка.

**Технические характеристики механизмов подачи ШОС
проектируемой системы распределения шлакообразующей смеси**

Наименование параметра	Значение
Механизм подачи ШОС	
Момент сопротивления вращению шнека, Нм	7,47
Мощность привода, Вт	103,94
Угловая скорость вращения шнека, с ⁻¹	10,02
Наружный диаметр витков шнека, мм	49,30
Толщина витка шнека, мм	3,30
Шаг витков, мм	40
Механизм распределения ШОС	
Мощность привода, Вт	0,501
Угловая скорость, с ⁻¹	0,104
Момент трения в подшипниках, Нм	2,76
Максимальная / минимальная длина консоли, мм	1,625 / 1,24
Угол поворота консоли – $\varphi_{\max}$ / $+\varphi_{\max}$	$\pm 54,3^\circ$

Расчетные параметры станут подспорьем для дальнейшего построения лабораторной установки с гибким транспортирующим органом и проведения экспериментальных исследований направленных на выявление особенностей функционирования механизма подачи ШОС и уточнения представлений о сопротивлении движению мелкодисперсных материалов в гибком изогнутом трубопроводе. Кроме того, представленная идея в рамках программы «Студенческий стартап», реализуемой при участии Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере («Фонд содействия инновациям»), получила грантовую поддержку и осуществляется участниками команды в настоящее время.

Список литературы

1. Вдовин К. Н., Точилкин В. В., Ячиков И. М. Непрерывная разливка сталей : монография. 3-е изд., стер. Санкт Петербург : Лань. 2023. 732 с.
2. Ботников С. А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. 2-е изд., Волгоград. 2011. 97 с.
3. Новые системы дозированной подачи порошкообразных и гранулированных шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. 2009. № 2 (16). С. 34–38.
4. Еронько, С. П. Усовершенствованная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слывовой МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 4 (34). С. 74–81.
5. Еронько С. П., Ющенко М. В. Высокоэффективная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слывовой МНЛЗ // Инновационные перспективы Донбасса : Материалы международной научно-практической конференции, Донецк, 20–22 мая 2015 года. Том 3. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2015. С. 32–37.
6. Ганин Д. Р., Лицин К. В., Шевченко Е. А. Обзор и анализ устройств для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 1 (1417). С. 58–65.
7. Еронько С. П., Цыхмистро Е. С., Назаренко В. В. Проектирование систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ // Материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов по направлению «Машиноведение» : Материалы ВУЗовской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Посвящается 100-летию ДонНТУ, Донецк, 11 июня 2020 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. С. 20–23.
8. Расчет и конструирование системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блывовой МНЛЗ / С. П. Еронько, Е. С. Цыхмистро, П. А. Петров, Ф. С. Зозуля // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 24 (67). С. 91–98.

Исследование влияния ультразвука на измельчаемость полиметаллических руд

Аннотация. В настоящее время основными проблемами при переработке минерального сырья являются значительные энергетические затраты на процессы рудоподготовки и низкая степень раскрытия сростков минералов, содержащих полезные компоненты. Кроме того, очень часто наблюдается переошламование материала, что в последствии негативно сказывается на последующих процессах переработки минерального сырья. Для интенсификации процесса дезинтеграции могут быть использованы физические воздействия. В данной работе приведены результаты по установлению взаимосвязи ультразвукового воздействия на эффективность процесса измельчения полиметаллических руд с учетом достижения необходимого значения по выходу готового класса.

Ключевые слова: рудоподготовка, измельчаемость, ультразвук, полиметаллические руды, эффективность.

Arina A. Kukhtina*

Ibragim T. Kallaev

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

* arisha362@mail.ru

Research of ultrasound influence on grindability of polymetallic ores

Abstract. Currently, the main problems in the processing of mineral raw materials are significant energy costs for ore preparation processes and low degree of disclosure of mineral aggregates containing useful components. In addition, very often over-sludging of the material is observed, which subsequently negatively affects the subsequent processing of mineral raw materials. To intensify the process of disintegration can be used physical impacts. This paper presents the results on the relationship between ultrasonic influence on the efficiency of the grinding process of polymetallic ores, taking into account the achievement of the required value of the yield of the finished grade.

Keywords: ore treatment, grindability, ultrasound, polymetallic ores, efficiency.

На сегодняшний день наблюдается тенденция к исчерпанию богатых, легкообогащаемых месторождений, содержащих руды цветных, редких и благородных металлов [1, 2]. В следствие чего в отработку вовлекаются более сложные руды с более низким содержанием ценных компонентов.

Одним из важных металлов, который широко используется в различных отраслях промышленности, является медь. В России значительная часть запасов меди заключена в месторождениях медно-порфирового типа. Сложность переработки данного типа руд заключается в их характерных особенностях, в частности: невысокое содержание меди, комплексность оруденения, тонковкрапленный, жильный и прожилково-вкрапленный характер рудной минерализации [3]. В связи с этим, для поддержания показателей качества готового концентрата при обогащении и снижении энергозатрат в процессах рудоподготовки, ведутся поиски новых технологических решений и совершенствование существующих схем переработки медных полиметаллических руд, позволяющих сократить затраты и увеличить степень раскрытия сростков [4].

Актуальным направлением исследования на сегодняшний день является изучение предварительных физико-механических воздействий на минеральное сырье. Предварительная обработка способствует образованию дислокаций, трещин и микротрещин, что в последствии снижает прочность материала. Кроме того, за счет контраста физико-механических и структурных характеристик ценных компонентов в сростках минералов направленное образование трещин обеспечит возможность селективного раскрытия сростков пустой породы и рудных минералов. Целью работы является изучение влияния ультразвукового воздействия на измельчаемость полиметаллических руд с позиции максимизации выхода готового класса. В качестве объекта исследования были выбраны полиметаллические руды, содержащие в себе оксиды меди и молибдена.

Перечень используемого оборудования: щековая дробилка, валковая дробилка, шаровая мельница, ситовой анализатор «Laagmann со стандартным набором сит, ультразвуковая установка INLAB I100-6/1-1.

При подготовке материала, руда была подвержена дроблению на щековой и валковой дробилках. Далее материал просеивался на сите 2 мм, с целью получения класса крупности – 2 мм. Для проведения эксперимента были отобраны навески массой 100 г.

Для установления зависимости влияния времени обработки УЗ на эффективность измельчения проводились исследования при следующих параметрах: 0, 15, 30, 45 и 60 мин. с частотой 23,2 кГц. После обработки УЗ материал измельчался в лабораторной шаровой мельнице в течении 15 минут. Затем готовый продукт рассеивался на стандартном наборе сит для определения выхода готового класса.

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что имплозия пузырьков способствует дополнительному разрушению структурных элементов раскрытия минералов. В следствие чего, можно сделать предположение о снижении прочности материала, за счет образования микротрещин, дефектов и дислокаций после обработки ультразвуком. Таким образом, это позволит снизить энергетические затраты в процессе измельчения. Кроме того, при взрыве пузырька в локальных точках достигаются крайне высокие температуры, что было подтверждено результатами эксперимента, целью которого было установление зависимости изменения температуры от времени обработки ультразвуковым воздействием. Температура фиксировалась каждые 5 минут с помощью мобильного тепловизора TR526i. На рисунке 1 представлены результаты данных исследований.

Из рисунка 1 видно, что температура стремительно возрастала на протяжении 20 минут обработки до температуры 63 °С, после чего при последующей обработке в течение 40 минут была достигнута температура 70 °С.

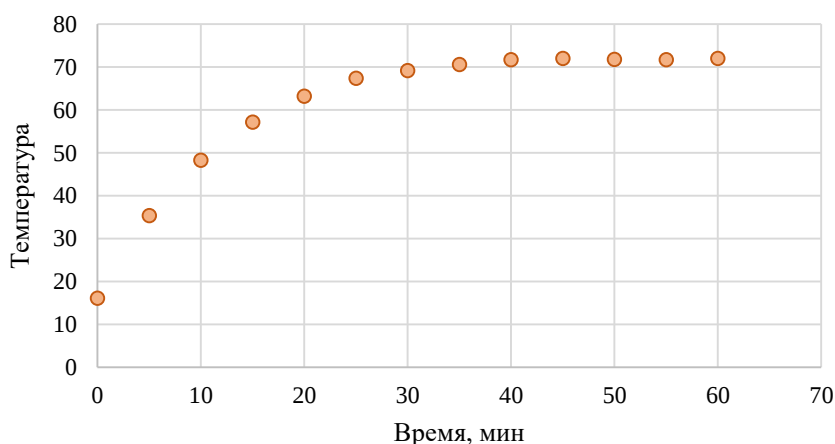


Рисунок 1. Зависимость температуры от времени обработки ультразвуком

Анализ полученных результатов показал, что при предварительном ультразвуковом воздействии в течение 60 минут достигается максимальный прирост готового класса крупности – 71 мкм при одинаковых условиях измельчения. Ультразвуковая обработка позволила получить прирост требуемого класса 12,1 % по сравнению с результатами традиционного измельчения. Таким образом, явление кавитации, вызванное ультразвуковым воздействием, создает пузырьки, при имплозии которых образуется энергия, расходуемая как на нагрев окружающей среды, так и на разрушение частиц. Это позволит снизить энергетические затраты при работе измельчающего оборудования и повысить эффективность последующих процессов обогащения.

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. Мигачев И. Ф., Звездов В. С., Минина О. В. Формационные типы медно-порфировых месторождений и их рудно-магматические системы // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 26–48. DOI:10.47765/0869-7175-2022-10002.
4. 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.

Научный руководитель: *Николаева Надежда Валерьевна, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.*

Исследование возможности применения высокоградиентной магнитной сепарации при обогащении руд различного состава

Аннотация. Истощение богатых месторождений железосодержащей руды с высоким содержанием полезных компонентов приводит к необходимости вовлечения в переработку трудноизвлекаемых, забалансовых и нетрадиционных источников сырья. В связи с этим, возникает необходимость в создании новых и модернизации существующих схем обогащения такого типа сырья. В работе представлены результаты по исследованию влияния технологических параметров работы высокоградиентного магнитного сепаратора на эффективность извлечения тонкоизмельченных слабомагнитных минералов из золошлаковых отходов ТЭЦ.

Ключевые слова: высокоградиентная магнитная сепарация, золошлаковые отходы ТЭЦ, магнитная восприимчивость, извлечение, эффективность.

Polina A. Kukhtina
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, pkuhtina@gmail.com*

Study of the possibility of application of high-gradient magnetic separation in enrichment of ores of different composition

Abstract. Depletion of rich iron ore deposits with high content of useful components leads to the need to involve hard-to-recover, off-balance and unconventional sources of raw materials in processing. In this connection, there is a necessity in creation of new and modernization of existing schemes of enrichment of such type of raw materials. The paper presents the results on the study of the influence of technological parameters of operation of high-gradient magnetic separator on the efficiency of extraction of finely size weakly magnetic minerals from ash and slag wastes of thermal power plant.

Keywords: high-gradient magnetic separation, ash and slag waste of thermal power plant, magnetic susceptibility, recovery, efficiency.

В настоящее время в связи с ухудшением минерально-сырьевой базы, поддержание темпов роста добычи и переработки полезных ископаемых становится все более затруднительным [1, 2]. На данный момент богатые месторождения с высоким содержанием ценных компонентов и легкообогащаемого сырья практически исчерпаны. В связи с этим, постоянно возрастающая потребность в полезных ископаемых приводит к увеличению объемов добычи и переработки сырья. Основные проблемы при переработке добываемого сырья обусловлены снижением содержания ценных компонентов, близкими физико-химическими свойствами, тонкой вкрапленностью минералов и др. Поэтому возникает необходимость более эффективного использования сырья, модернизации и увеличения производительности действующих предприятий. Актуальным становится вопрос по разработке оптимального метода, схемы, технологии по переработке нетрадиционных источников полезных ископаемых [3]. Одним из возможных примеров такого нетрадиционного сырья являются золошлаковые отходы ТЭЦ. В их состав входит значительное количество различных минералов, обладающих различной магнитной восприимчивостью (рисунок 1), в связи с чем применение процессов магнитного обогащения позволяет эффективно их извлекать. Целью данного исследования является установление зависимости влияния технологических параметров работы высокоградиент-

ного магнитного сепаратора на эффективность извлечения тонкоизмельченных слабомагнитных минералов. Объектами исследования в данной работе стали: золошлаковые отходы ТЭЦ.



Рис. 1. Классификация минералов по магнитной восприимчивости

Используемое в работе оборудование: вертикальный пульсационный высокоградиентный магнитный сепаратор Slon-100 (Outotec, Эспоо, Финляндия) (рисунок 2), рентгенофлуоресцентный анализатор Shimadzu EDX 700 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).



Рис. 2. Вертикальный пульсационный высокоградиентный магнитный сепаратор Slon-100

Исследование включало в себя три серии экспериментов, в ходе которых изучалось влияние различных параметров и режимов работы высокоградиентного магнитного сепаратора. Для проведения экспериментов были подготовлены исходные навески крупностью -500 мкм, массой 100 гр.

На первом этапе проведения опытов изучалось влияние пульсации промывной воды в рабочей зоне сепаратора на технологические показатели (содержание и извлечение) железосодержащих минералов в концентрате и хвостах. Постоянными параметрами работы сепаратора в процессе разделения магнитных частиц были: размер рабочей матрицы – 6 мм, расход воды – 10 л/мин, индукция магнитного поля – 0,2 Тл. Менялась только частота пульсации: 200, 250 и 300 мин⁻¹.

На основе полученных данных, было установлено, что с увеличением частоты пульсации улучшается качество концентрата, за счет увеличения содержания железосодержащих компонентов.

Второй этап исследования включал в себя изучение эффективности извлечения в зависимости от величины индукции магнитного поля. Опыты проводились при следующем режиме работы сепаратора: размер стержневой матрицы – 6 мм, расход воды – 10 л/мин, частота пульсации – 300 мин⁻¹ (выбрана на основе результатов первой серии экспериментов), индукцию магнитного поля изменяли следующим образом – 0,2, 0,5, 1,1 Тл.

Анализ полученных результатов позволил установить, что эффективный процесс извлечения был достигнут при индукции магнитного поля равного 1,1 Тл. При данной индукции магнитного поля были получены наибольшие значения содержания и извлечения железа в концентрат.

Третья серия экспериментов была направлена на изучение влияния диаметра стержней матрицы на эффективность магнитного обогащения. Опыты проводились при следующих условиях: диаметр стержней – 1,5, 3 и 6 мм (рисунок 3), расход промывной воды – 10 л/мин, индукция магнитного поля – 1,1 Тл, частота пульсации – 300 мин⁻¹.

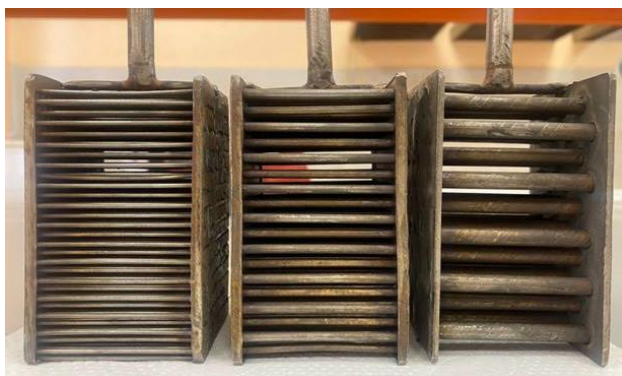


Рис. 3. Стержневые матрицы

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением диаметра стержней матрицы содержание железосодержащих минералов увеличивается, но вместе с тем снижается их выход в концентрате. Таким образом, оптимальными условиями работы высокоградиентного магнитного сепаратора для эффективного извлечения магнитных частиц являются следующие параметры: магнитная индукция 1,1 Тл, размер матрицы – 6 м, частота пульсации пульпы 300 мин⁻¹.

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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3390/min14090943>.

Научный руководитель: *Николаева Надежда Валерьевна, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.*

Обоснование возможности извлечения меди из комплексных медных руд с учетом их фазового состава

Аннотация. В работе представлены обоснования возможности извлечения меди во всех фазовых состояниях при переработке комплексных медных руд. Анализ результатов исследования минералогических и технологических особенностей руд, включающих в себя медные минералы, относящиеся к классам сульфидов, карбонатов и силикатов, позволил обосновать параметры переработки данного типа руд для увеличения извлечения меди в флотационный медный концентрат и продуктивный раствор выщелачивания.

Ключевые слова: медные руды, флотация, выщелачивание, азурит, малахит, хризоколла, халькопирит.

Valeria A. Lyublyanova
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, s245070@stud.spmi.ru

Justification of the possibility of copper extraction from complex copper ores taking into account their phase composition

Abstract. The paper presents substantiation of the possibility of copper extraction in all phase states in the processing of complex copper ores. Analysis of the results of the study of mineralogical and technological features of ores that include copper minerals belonging to the classes of sulfides, carbonates and silicates, allowed to justify the parameters of processing of this type of ores to increase copper recovery in flotation copper concentrate and productive leaching solution.

Keywords: copper ores, flotation, leaching, azurite, malachite, chrysocolla, chalcopyrite.

В мировой практике обогащения полезных ископаемых фиксируется постепенное истощение богатых медных руд, легко поддающихся процессам обогащения, приводящее к необходимости вовлечения в переработку комплексных медных руд [1]. Для данного типа руд характерны такие ограничивающие условия, как низкое содержание извлекаемых компонентов, непостоянный минералогический состав, тонкая вкрапленность минералов между собой и минералами породы [2]. Анализ вышеперечисленных аспектов позволяет выявить потребность в разработке новых технологических решений для переработки комплексных медных руд. В работе была поставлена цель разработки технологических решений переработки комплексных медных руд, включающих в себя комбинацию флотационного обогащения и выщелачивания.

При выполнении работы применялись такие методики, как: методика определения элементного состава медных минералов и руды с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu EDX 7000, методика фазового анализа медных руд с использованием метода йодометрического титрования, методика флотационного обогащения руды и медных минералов с применением флотационной машины Flotation Bench Test Machine Laarmann, методика проведения опытов выщелачивания с применением йодометрического титрования для определения извлечения меди в продуктивный раствор, методика СВЧ обработки материалов, методика ультразвуковой обработки материалов.

Посредством фазового анализа определено соотношение фазовых состояний меди, входящих в состав исследуемой руды. Выявлено наличие в объекте исследования четырех фазовых состояний меди в количестве: $\text{Cu}_{\text{водораств.}} = 0,67 \%$, $\text{Cu}_{\text{ок.своб.}} = 27,66 \%$, $\text{Cu}_{\text{ок.связ.}} = 33,74 \%$, $\text{Cu}_{\text{сульф.}} = 37,93 \%$.

Для определения возможности применения флотационного обогащения при переработке объекта исследования, выбраны мономинеральные фракции азурита и малахита, хризоколлы и халькопирита, как наиболее распространенных представителей четырех типов меди, входящих в состав руды. Проведены серии опытов флотации данных минералов с применением различных комбинаций собирателей и активаторов, результаты представлены на рисунке 1.

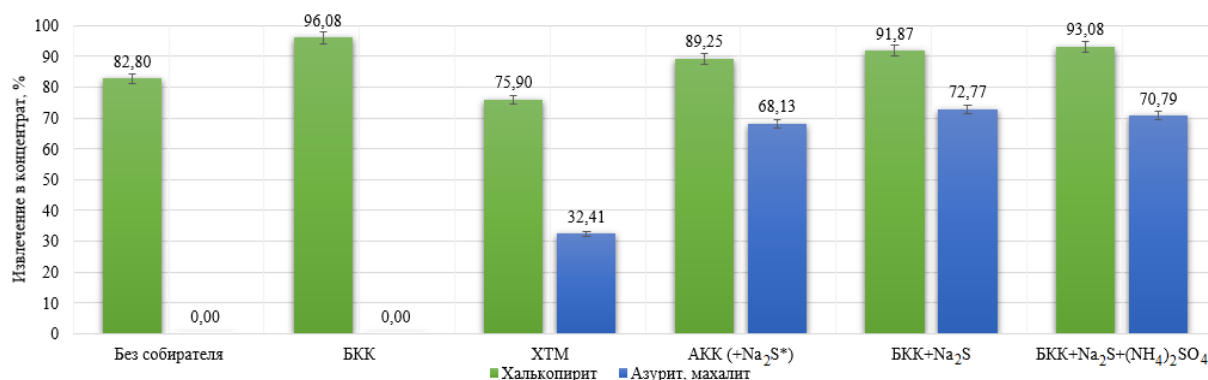


Рис. 1. Зависимость извлечения в концентрат монофракций от применяемых реагентов (* для флотации азурита и малахита)

Обработка результатов проведенных исследований позволила установить, что:

- 1) флотационное обогащение хризоколлы оксигидрильными или сульфгидрильными собирателями не представляется возможным ввиду крайне низкого извлечения минерала в пенный продукт;
- 2) извлечение халькопирита при его флотации максимально при применении БКК;
- 3) в отличие от флотации карбонатов меди оксигидрильными собирателями, их предварительная обработка сульфидом натрия и дальнейшая сульфидная флотация позволила достичь значительно более высоких показателей извлечения.

После установления реагентов, проведены дополнительные опыты флотации, для установления расхода бутилового ксантогената для халькопирита и сернистого натрия для азурита и малахита. В результате достигнуто извлечение халькопирита $\epsilon=96,08$ % при расходе БКК, равном 20 г/т; извлечение азурита и малахита $\epsilon=72,91$ % при расходе БКК, равном 100 г/т и расходе сернистого натрия 90 г/т.

С целью установления влияния различных форм меди, входящих в состав руды, на ее извлечение в пенный продукт, проведен трехфакторный эксперимент по модели сокращенного плана эксперимента Бокса-Бенкена. В результате опыта получена математическая модель, адекватно описывающая извлечение меди, входящей в состав минералов, в концентрат флотации, в зависимости от содержания халькопирита, азурита и малахита и хризоколлы:

$$\epsilon_{Cu} = 53,09 + 67,81 \cdot x_1 + 81,07 \cdot x_2 - 68,15 \cdot x_3 - 59,33 \cdot x_1 \cdot x_2 + 6,83 \cdot x_1 \cdot x_3 + 3,11 \cdot x_2 \cdot x_3 - 20,88 \cdot x_1^2 - 36,79 \cdot x_2^2 + 34,62 \cdot x_3^2,$$

где: x_1 – содержание халькопирита, %; x_2 – содержание азурита и малахита, %; x_3 – содержание хризоколлы, %.

Так как в исследуемой руде содержится 33,74 % окисленной связанной меди, вторым этапом работы стало проведение опытов выщелачивания выбранных медных минералов, для установления наиболее эффективных режимных параметров выщелачивания меди в продуктивный раствор.

Анализ диаграммы Пурбе для системы медь-вода, позволил установить, что медь переходит в состояние двухвалентного иона, следовательно, выщелачивается, в окислительной среде при значении $pH < 4$.

Для определения термодинамического потенциала реакций выщелачивания азурита, малахита, халькопирита и хризоколлы, были составлены уравнения реакций взаимодействия данных минералов с серной кислотой соответственно [3]:

- 1) $(CuCO_3)_2 \cdot Cu(OH)_2 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3CuSO_4 + 2CO_2 + 4H_2O$
- 2) $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2CuSO_4 + CO_2 + 3H_2O$
- 3) $2CuFeS_2 + 18H_2SO_4 \rightarrow 2CuSO_4 + Fe_2(SO_4)_3 + 17SO_2 + 18H_2O$
- 4) $Cu_6Si_6O_{18} \cdot 6H_2O + 6H_2SO_4 \rightarrow 6CuSO_4 + 6SiO_2 + 12H_2O$

Для анализа термодинамической вероятности протекания данных реакций, для каждого уравнения была рассчитана энергия Гиббса при стандартной температуре. В результате получены значения для сернокислотного выщелачивания: азурита $\Delta G = -264$ кДж/моль; малахита $\Delta G = -167$ кДж/моль; халькопирита $\Delta G = -145$ кДж/моль; хризоколлы $\Delta G = -492$ кДж/моль. Полученные значения позволяют сделать вывод о том, что данные реакции протекают самопроизвольно.

В ходе проведения исследования рассмотрена возможность интенсификации процессов выщелачивания при помощи применения дополнительных воздействий, таких как: температура, СВЧ излучение, УЗ воздействие. Наиболее низкий прирост извлечения меди в продуктивный раствор выщелачивания отмечен при применении теплового воздействия – нагрева.

При применении СВЧ излучения в виде последовательной смены периодов по 10 секунд с общим временем выщелачивания 2 минуты СВЧ воздействия и его отсутствия, зафиксировано увеличение извлечения меди в среднем в 1,8 раз для карбонатов и силикатов меди и почти в 10 раз для сульфида меди – халькопирита.

Применение УЗ излучения на протяжении 10 минут при выщелачивании, позволило достичь прироста в извлечении меди примерно в 3 раза для карбонатов, в 6 раз для силикатов меди, и приблизительно в 5 раз для халькопирита. При этом наблюдалось явление кавитации, способствовавшее увеличению площади контакта минерала с раствором и нагреву выщелачивающего раствора.

Интерпретация результатов анализа выщелачивания меди из медных минералов, содержащих ее в окисленной форме (свободной и связанной), позволил обосновать снижение извлечения меди при увеличении доли хризоколлы в пробе, по сравнению с карбонатами меди. Наблюдаемое снижение показателя извлечения возникает вследствие образования в процессе выщелачивания гелеобразного осадка SiO_2 , который оседая на поверхности минералов, препятствует их контакту с выщелачивающим раствором, снижая таким образом интенсивность протекания процесса во времени.

Основываясь на полученных в ходе проведения опытов, а также проведенного анализа литературы данных, сформулированы в виде схемы (рисунок 2) рекомендуемые технологические решения для эффективной переработки руд, включающих в себя исследуемые в данной работе фазовые состояния меди, а именно: связанную и свободную окисленную, а также сульфидную.

В соответствии с приведенной схемой, основной объект данного исследования находится во второй слева зоне. Рекомендациями по переработке руд такого состава являются: 1) коллективная флотация сульфидрильными собирателями с предварительной сульфидизацией карбонатов меди; 2) доизвлечение меди посредством ее сернокислотного выщелачивания из несфлотированной части медных минералов, находящихся в хвостах цикла.

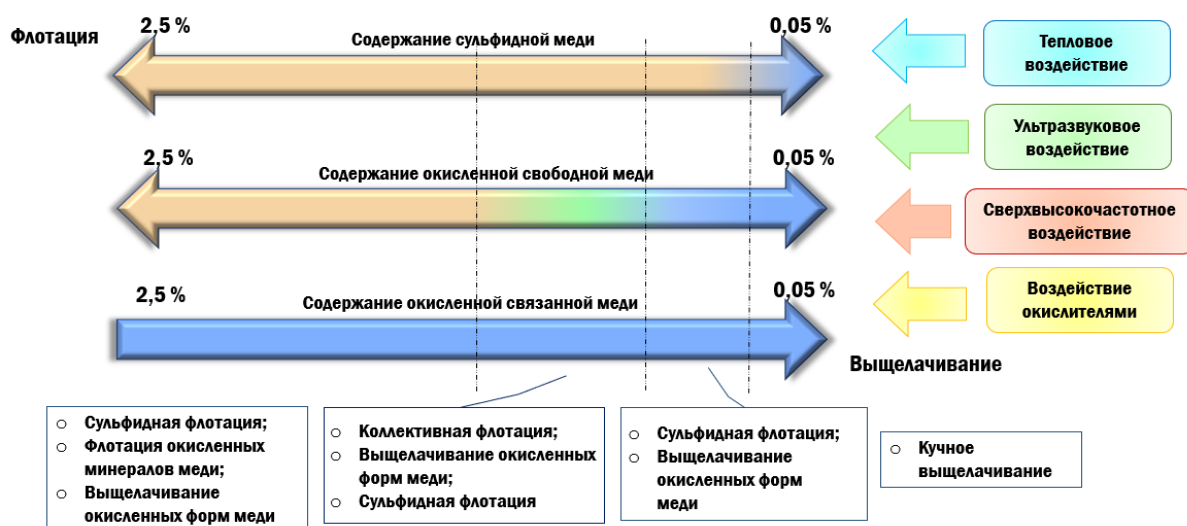


Рис. 2. Технологические решения для комплексной переработки медных руд

Итогом приведенной выше работы стали полученные закономерности флотационного обогащения выбранных для работы медных минералов, в том числе определение точного расхода реагентов, позволившего достичь наиболее высокого извлечения из полученных. Также получено, что флотационное обогащение хризоколлы анионными собирателями не представляется возможным.

Анализ возможности применения выщелачивания для извлечения меди из выбранных мономинеральных фракций показал, что процессы выщелачивания азурита, малахита, халькопирита и хризоколлы являются самопроизвольными, однако скорость выщелачивания халькопирита и хризоколлы значительно ниже скорости выщелачивания карбонатов меди. В связи с этим рассмотрена возможность применения дополнительных воздействий для интенсификации процесса. На основании полученных данных сформулированы рекомендации по переработке комплексных медных руд, содержащих в себе три фазовых состояния меди: сульфидную и окисленную связанную и свободную, направленные на максимизацию извлечения меди в концентрат флотационного цикла, а также в продуктивный раствор выщелачивания.

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.
2. Абрамов, А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Т. 3 : учебное пособие : в 2 книгах – М: Горная книга, 2005. – 575 с.
3. Бейсембаев Б. Б., Кунаев А. М., Кенжалиев Б. К. Теория и практика кучного выщелачивания меди – Алматы: Гылым, 1998 – 348 с.

Научный руководитель: Александрова Татьяна Николаевна, зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Влияние применения аполярного собирателя на процессы обогащения углеродсодержащего материала

Аннотация. Используемые в настоящее время способы обогащения являются недостаточно эффективными вследствие ухудшения качества добываемого сырья. Применение анализа действия применяемых реагентов способствуют пониманию поведения материала в процессах обогащения при обработке им поверхности материала. В работе рассматривается возможность оценки действия аполярного собирателя на поверхностные свойства углеродсодержащего материала, а также применение комбинированного метода обогащения для получения более чистого продукта обогащения. Эффективное разделение угля крупностью - 1 мм и минералов породы на концентрационном столе было достигнуто за счет применения аполярного собирателя, что привело к увеличению гидрофобных свойств угля.

Ключевые слова: краевой угол смачивания, свободная поверхностная энергия, аполярный собиратель, флотогравитация.

Evgeniya O. Prokhorova
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, s225074@stud.spmi.ru

Influence of apolar collector application on processes of preparation of carbon-containing material

Abstract. The currently used preparation methods are not efficient enough due to the deterioration of the quality of the extracted raw materials. The application of the analysis of the action of the reagents used contribute to the understanding of the behavior of the material in the preparation processes when they treat the surface of the material. This paper considers the possibility of evaluating the effect of apolar collector on the surface properties of carbon-containing material, as well as the application of a combined preparation method to obtain a cleaner preparation product. Effective separation of coal with coarseness -1 mm and rock minerals on the concentrating table was achieved through the use of apolar collector, which led to an increase in the hydrophobic properties of coal.

Keywords: wetting contact angle, free surface energy, apolar collector, flotogravity.

Сокращение минеральных ресурсов земной коры и необходимость их рационального использования становятся основными факторами, требующими разработки и эксплуатации новых месторождений [1, 2], на 2023 г. планировались работы по поиску и оценке угля на 22 объектах. Вышесказанное также подразумевает внедрение инновационных технологий и усовершенствованных методов переработки полезных ископаемых, что прослеживается в новой стратегии управления минеральными ресурсами государственными структурами. В мировой экономике уголь, как важный вид твердого топлива, играет большую роль, учитывая, что его доли достигли 31,51 % и 26,73 % в производстве первичных энергоресурсов и потреблении за 2022 г., соответственно [3]. Стремление сократить его добычу и использование рядом государств из-за рисков изменения климата и загрязнения экосистем не повлияло на мировой спрос на уголь, который продолжает расти, особенно в развивающихся странах. Следует отметить, что процесс добычи и переработки угля остается трудоемким.

Развивающаяся горная промышленность подразумевает совершенствование технологических решений для повышения качества получаемой продукции. В качестве современных способов для повышения качества получаемых концентратов используют применение направленного химического воздействия на поверхностные свойства материала [4, 5], физико-энергетические воздействия [6, 7], а также применение комбинированных процессов [8].

Для эффективной переработки угольной продукции в промышленности используются такие процессы, как флотация. Применение комбинированного метода, состоящего из флотации и гравитации, необходимо для получения более чистой угольной продукции с помощью увеличения эффективности разделения материала по нескольким параметрам [9].

Для работы было выбрано в качестве объекта исследования – углеродсодержащее сырье, в том числе уголь разных марок Кузнецкого угольного бассейна. Для получения информации об объекте исследования были использованы такие методы, как дифрактометрический анализ на дифрактометре фирмы «Shimadzu», рентгенофлуоресцентный и термогравиметрический анализы образцов. Параметры зольности и влажности как исходных образцов, так и продуктов проводились при помощи муфельной печи фирмы «Тула-Терм» согласно ГОСТ Р 55661-2013. Оценку смачиваемости производили с применением метода ОВРК (Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле) через измерение краевого угла и последующим определением полярной и дисперсионной составляющих свободной поверхностной энергии. Вычисления свободной поверхностной энергии производили при использовании двух жидкостей, для получения более точных результатов была использована третья, уточняющая, жидкость. Опыты по флотогравитационному обогащению проводились на концентрационном столе.

В первой части исследования были изучены изменения поверхностных свойств при применении аполярных собирателей: веретенного масла, дизельного топлива и керосина. Применение аполярных собирателей привели к увеличению краевого угла смачивания с водой (рис. 1), что свидетельствует о повышении гидрофобных свойств материала.

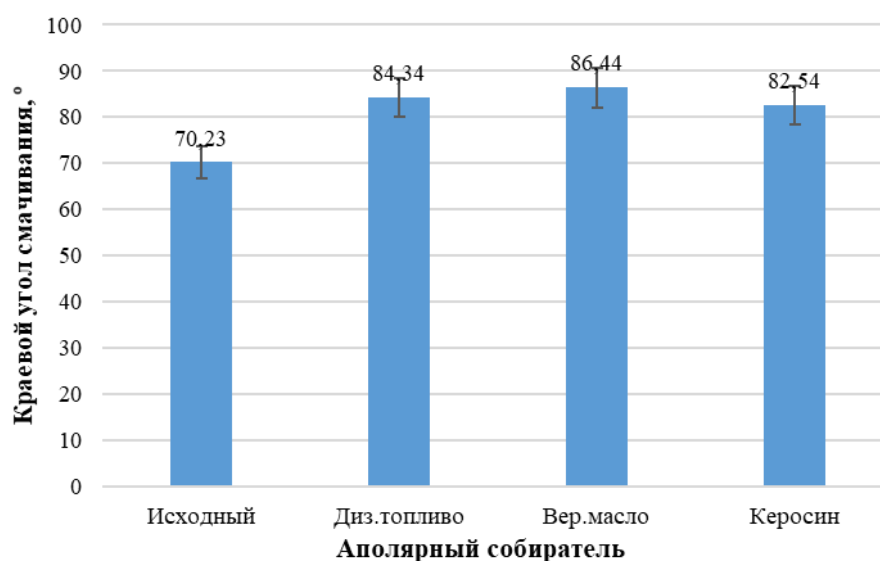


Рис. 1. Результаты изменения краевого угла смачивания при обработке поверхности аполярным собирателем

Свободная поверхностная энергия угля марки Д при этом снизилась на 2,14 мН/м и 4,38 мН/м при обработке дизельным топливом и веретенным маслом, соответственно. При обработке керосином свободная поверхностная энергия образца угля марки Д увеличилась на 0,18 мН/м, что может быть связано с особенностями закрепления аполярного собирателя на поверхности материала, а также с химическим составом самого реагента. Применение аполярного собирателя, керосина, для обработки поверхности шунгита, графита и угля марки Г также привели к увеличению свободной поверхностной энергии на 2,18 мН/м, 0,32 мН/м и 17,97 мН/м, соответственно.

Вторая часть исследования была посвящена проведению опытов с применением комбинированного метода обогащения, флотогравитации (рис. 2). Данным способ обогащения позволяет повысить эффективность отделения угля от минералов породы.



Рис. 2. Процесс флотогравитации на концентрационном столе

Уголь крупностью более 1 мм извлекается непосредственно гравитационным методом. В то же время, применение реагентов помогает увеличить гидрофильные свойства минералов породы, а аполярный собиратель способствует эффективному извлечению частиц угля крупностью менее 1 мм.

В работе были проведены оценка и анализ обработки поверхности материалов аполярными собирателями (веретенным маслом, дизельным топливом и керосином). Анализ действия данных реагентов на поверхностные свойства минералов способствует прогнозированию поведения материалов в процессах их обогащения. Закрепление аполярного собирателя на поверхности углеродсодержащего материала способствует увеличению их гидрофобных свойств, и как следствие, более эффективному извлечению. Также, для увеличения технологических показателей переработки угля были проведены исследования применения комбинированного метода обогащения, флотогравитации, что позволило повысить извлечение угля крупности -1 мм на концентрационном столе.

Список литературы

1. Ponomarenko T., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I. Mineral resource depletion assessment: Alternatives, problems, results // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 2. Article 862. DOI: 10.3390/su13020862.
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. Плакиткина Л. С., Плакиткин Ю. А., Дьяченко К. И. Современные тренды и прогноз развития угольной промышленности мира и России в условиях трансформации мировой экономики // Уголь. 2024. № 3. С. 44–51. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-44-51.
4. An M., Liao Y., Cao Y., Hao X., Ma L. Improving low rank coal flotation using a mixture of oleic acid and dodecane as collector: A new perspective on synergetic effect // Processes. 2021. Т. 9, № 3. DOI: 10.3390/pr9030404.
5. Chen Y., Feng B., Yan H., Zhang L., Zhong Ch., Wang T., Wang H., Xu L. Adsorption and depression mechanism of an eco-friendly depressant dextrin onto fluorite and calcite for the efficiency flotation separation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022. Т. 635. С. 127987. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127987.
6. Cao S., Yin W., Yang B., Zhu Zh., Sun H., Sheng Q., Chen K. Insights into the influence of temperature on the adsorption behavior of sodium oleate and its response to flotation of quartz // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Т. 32, № 2. С. 399–409. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.12.006.
7. Александрова Т. Н., Прохорова Е. О. Модификация свойств породообразующих минералов при флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 123–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_123.
8. Дьяков В. Е. Центробежный аппарат для флотогравитации // Патент № 2501609 (РФ). Заявл. 28.08.2012. № 2012136771/03. Оpubл. 20.12.2013. Бюлл. № 35.
9. Александрова Т. Н., Кусков В. Б., Прохорова Е. О. Способ обогащения угля // Патент № 2812378 (РФ). Заявл. 27.07.2023. 2023119782. Оpubл. 30.01.2024. Бюлл. № 4.

Научный руководитель: *Александрова Татьяна Николаевна*, зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Направленное регулирование поверхностных свойств для эффективной флотации углеродсодержащих материалов

Аннотация. В связи с ухудшением качества исходного сырья, вовлекаемого в переработку на обогатительных фабриках, актуальность модернизации существующих технологий и открытия новых достаточно высока. Флотационное обогащение – процесс, основанный на различии в смачиваемости различных минеральных частиц, который требует обеспечения условий для максимально эффективной селективности разделения. Для улучшения селективности разделения частиц и получения более качественных продуктов обогащения необходимо понимание действия флотационных реагентов на поверхностные свойства обогащаемых минералов. В работе рассматривается селективное действие наиболее распространенных реагентов-депрессоров на поверхность кварца и кальцита, как наиболее часто встречаемых минералов породы углеродсодержащего сырья, с анализом изменения свободной поверхностной энергии и ее составляющих. Анализ проведенных исследований позволил обосновать корреляцию между изменением свободной поверхностной энергии и депрессирующим действием реагентов на вмещающие породы для увеличения эффективности флотации угля.

Ключевые слова: свободная поверхностная энергия, краевой угол смачивания, флотация, депрессоры, уголь.

Andrey Yu. Smirnov
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, s191198@stud.spmi.ru

Directional control of surface properties for efficient flotation of carbonaceous materials

Abstract. Due to the deterioration of the quality of the feedstock involved in processing at the enrichment plants, the relevance of modernization of existing technologies and discovery of new ones is quite high. Flotation enrichment is a process based on the difference in wettability of different mineral particles, which requires providing conditions for the most effective selectivity of separation. In order to improve the selectivity of particle separation and obtain better quality beneficiation products, it is necessary to understand the action of flotation reagents on the surface properties of enriched minerals. In the work the selective action of the most common reagents-depressors on the surface of quartz and calcite, as the most common minerals of waste rock of carbon-containing raw materials, with the analysis of the change of free surface energy and its components. The analysis of the conducted studies allowed to substantiate the correlation between the change of free surface energy and depressing effect of reagents on the host rocks to increase the efficiency of coal flotation.

Keywords: free surface energy, edge wetting angle, flotation, depressors, coal.

Углеродсодержащее сырье представляет собой широкий спектр материалов, содержащих в своем составе углерод. К данному виду сырья относятся угли, сланцы, шунгитовые породы, руды благородных металлов, а также золошлаковые отходы, содержание ценных компонентов в которых может превышать промышленно значимое, ввиду высокой сорбционной активности органической составляющей исходного сырья, из которого они были получены. Обогащение углеродсодержащих материалов является важной промышленной отраслью в современном мире и становится все более актуально, при решении задач, связанных с экологической, энергетической и экономической сферами развития разных стран.

Для экологической сферы обогащение углеродсодержащего сырья важно, так как позволяет отделить вредные примеси, такие как сера, зола, которые оказывают негативное влияние на процесс сгорания угля и вызывают загрязнение окружающей среды.

В энергетической сфере обогащение, например угля, повышает его теплотворную способность, и делает его сжигание более энергоэффективным, что особенно важно в условиях ограниченности природных ресурсов и необходимости их рационального использования.

В экономической сфере эффект от обогащения углеродсодержащих материалов достигается за счет получения более качественного сырья, которое конкурентоспособно на мировом рынке, а также снижении затрат на конечных стадиях переработки.

Решение экологических проблем, повышение эффективности использования ресурсов, обеспечение энергонезависимости стран, вовлечение в переработку вторичных минеральных ресурсов (золошлаковых отходов) актуализируют задачу разработки новых технологических решений и исследований в области обогащения углеродсодержащего сырья [1, 2].

Органическая составляющая углеродистых материалов, благодаря своей пористой структуре и высокой поверхностной энергии, предрасположена к концентрации в себе минеральных включений и микроэлементов, которые могут быть ценными для последующей переработки. Поэтому сочетание высокой сорбционной активности, а также природной гидрофобности органической части и склонности к ошламованием может способствовать флотационному обогащению углеродсодержащего сырья с извлечением ценных компонентов в пенный продукт.

Флотационное обогащение зависит от поверхностных свойств минеральных частиц, поэтому оценка смачиваемости и энергетических характеристик поверхности имеет большое значение. Смачиваемость можно оценить через свободную поверхностную энергию (СПЭ) минерала, которая вычисляется с помощью краевого угла смачивания. На данные параметры поверхности влияют различные минеральные характеристики, такие как шероховатость поверхности и морфология частиц. Тем не менее, на взаимоотношения минеральных поверхностей с окружающей средой в наибольшей степени влияет разрыв связей кристаллической решетки, что особенно проявляется во время измельчения при рудоподготовке. Также следует отметить, что сила взаимодействия поверхности минерала с окружающими атомами и молекулами определяется не только типом разрываемых связей кристаллической решетки, но и их количеством, а также кристаллическим строением самой поверхности [3].

Модификация поверхности минералов, а также их способности смачиваться, возможна при помощи различных реагентов, что может способствовать увеличению селективности разделения частиц ценного компонента и вмещающей породы.

Таким образом, целью представленной работы являлось установление взаимосвязи между изменением СПЭ при применении реагентов-депрессоров и возможностью направленного регулирования поверхностными свойствами кварца и кальцита, как наиболее распространенных минералов породы, для повышения эффективной флотации угля.

Значения СПЭ определялись по методу ОВРК, для которого необходимо определять краевые углы смачивания минеральной поверхности каплями двух жидкостей: дистиллированной воды (полярной жидкостью) и дийодометаном (неполярной жидкостью). По полученным значениям краевых углов смачивания вычислялись полярная и дисперсная составляющие свободной поверхностной энергии до обработки поверхности реагентами и после. Значения краевых углов смачивания получали с помощью анализатора формы капли, после нанесения капли исследовательской жидкости на поверхность исследуемых образцов. В качестве реагентов-депрессоров использовались: карбоксиметил

целлюлоза (КМЦ), низкозамещенный карбоксиметил крахмал (КМК), жидкое стекло, пирофосфат натрия, органический депрессор класса полисахаридов.

С позиции теории существует четыре основных механизма действия реагентов депрессоров при флотации:

- вытеснение с поверхности минерала реагента собирателя, закрепленного в ионной форме с последующим предотвращением возможности его закрепления посредством образования гидрофильных комплексов на поверхности;
- растворение собирателя, закрепленного на поверхности минерала, с последующим предотвращением его закрепления;
- повышение смачиваемости минеральной поверхности за счет неоднородности раскрытия минералов в процессе подготовки и дефектов кристаллической решетки осуществляемое в присутствии собирателя;
- закрепление на минеральной поверхности депрессируемого вещества посредством значительно больших, чем собиратель молекул депрессора [3].

На рисунке 1 представлены результаты исследования изменений СПЭ и ее полярной составляющей при обработке поверхности угля реагентами-депрессорами.

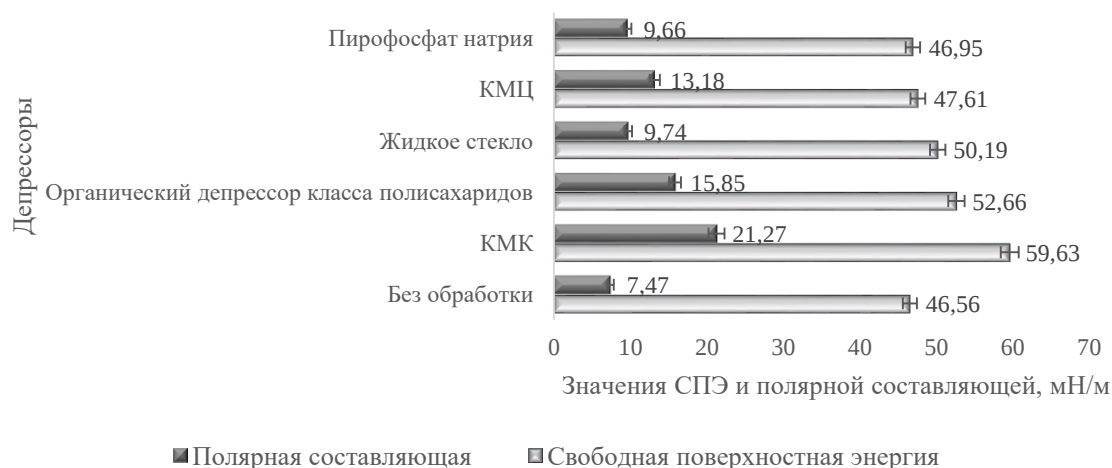


Рис. 1. Результаты исследования влияния реагентов-депрессоров на поверхностные свойства угля [составлено авторами]

Интерпретируя полученные результаты, представленные на рисунке 1, можно сделать вывод, что обработка поверхности реагентами увеличивает значения СПЭ. При этом происходит увеличение полярной составляющей, что в свою очередь может свидетельствовать об увеличении количества нескомпенсированных связей на поверхности адсорбционного слоя материала, наиболее вероятно обусловленных структурой реагента и формой его закрепления на поверхности в виде линзовидных капель. Увеличение нескомпенсированных связей приводит к увеличению гидрофильности и возможной депрессии угля при флотационном обогащении [4, 5]. Таким образом, наибольшее влияние на увеличение полярной составляющей оказал карбоксиметил крахмал, пирофосфат натрия и жидкое стекло, в свою очередь, оказали наименьшее влияние на поверхностные свойства угля.

Анализ результатов исследования поверхностных свойств кварца и кальцита показал, что наиболее селективным депрессором для минералов породы является пирофосфат натрия. Полученные результаты при обработке поверхностей жидким стеклом, также свидетельствуют об увеличении свободной поверхностной энергии для минералов породы, что может вызывать повышение гидрофильных свойств этих минералов после обработки их поверхности.

Ввиду полученных данных, были проведены опыты флотации угля с применением в качестве реагентов-депрессоров жидкого стекла, пирофосфата натрия, и их смеси в отношении 2:1. [6, 7] Анализ результатов проведенных исследований позволил обосновать корреляцию между результатами изменения свободной поверхностной энергии при обработке реагентами и подавлением породы при флотации для получения более чистых концентратов.

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. Плакиткина Л. С., Плакиткин Ю. А., Дьяченко К. И. Современные тренды и прогноз развития угольной промышленности мира и России в условиях трансформации мировой экономики // Уголь. 2024. № 3. С. 44–51. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-44-51.
3. Абрамов, А. А. (2008). Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. Том 4, 710 с.
4. Александрова Т. Н., Прохорова Е. О. Модификация свойств породообразующих минералов при флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 123–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_123.
5. Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационноаналитический бюллетень. 2022. № 6–2. С. 161–174. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.
6. Deng Y., Xu L., Lu H., Wang H., Shi Yo. Direct measurement of the contact angle of water droplet on quartz in a reservoir rock with atomic force microscopy // Chemical Engineering Science. 2018. Т. 177. С. 445–454. DOI: 10.1016/j.ces.2017.12.002.
7. Shi Q., Feng Q., Zhang G., Deng H. A novel method to improve depressants actions on calcite flotation // Minerals Engineering. 2014. № 55. P. 186–189. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.010.

Научный руководитель: Александрова Татьяна Николаевна, зав. каф. ОПИ, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Высокоградиентная магнитная сепарация: возможности применения и перспективы развития

Аннотация. В представленной работе на основе проведенного анализа современной литературы рассмотрены актуальные проблемы переработки руд в условиях ухудшения качества сырья и истощения высокорентабельных месторождений. Особое внимание уделяется применению магнитных методов обогащения, в частности, высокоградиентной магнитной сепарации. Описаны преимущества высокоградиентной магнитной сепарации, такие как обогащение мелких классов и слабомагнитных минералов, а также экологичность процесса. Рассматриваются основные направления исследований в области высокоградиентной магнитной сепарации, включающие моделирование физических процессов, разработку новых технологических решений и усовершенствование конструкций.

Ключевые слова: магнитная сепарация, ВГМС, техногенное сырье, руды цветных металлов, конструкции сепараторов.

Dmitry V. Stepanov
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, s245066@stud.spmi.ru

High-gradient magnetic separation: application possibilities and development prospects

Abstract. In the presented work, based on the analysis of modern literature, the actual problems of ore processing in conditions of deterioration of the quality of raw materials and depletion of highly profitable deposits are considered. Special attention is paid to the application of magnetic beneficiation methods, in particular, high-gradient magnetic separation. The advantages of high-gradient magnetic separation are described, such as the beneficiation of small classes and weakly magnetic minerals, as well as the environmental friendliness of the process. The main directions of research in the field of high-gradient magnetic separation are considered, including modeling of physical processes, development of new technological solutions and improvement of structures.

Keywords: magnetic separation, HGMS, technogenic raw materials, ores of non-ferrous metals, separator designs.

Для месторождений большинства руд характерна тонкая вкрапленность рудных минералов в пустую породу, а также друг в друга; снижение содержания ценных компонентов и изменение качества сырья по мере разработки месторождения.

Снижение содержания ценных компонентов и сложное взаимное прорастание минералов приводят к необходимости оптимизации процессов переработки. Ухудшение характеристик сырья требует модификации и усложнения схем переработки для снижения затрат и повышения эффективности. Стоит отметить, что проблемы переработки руд металлов актуальны не только для обогащения, но и для дальнейшего металлургического передела.

В современном мире тенденция к истощению богатых и высокорентабельных месторождений цветных металлов является глобальным долгосрочным трендом; поддержание и увеличение текущего уровня производства предопределяют переработку накопленных промышленных отходов и использования все более бедных видов руд [1,2].

С учетом возрастающих требований к экологичности процессов переработки все большую распространенность приобретают магнитные методы обогащения. В настоящее

время операции магнитной сепарации применяются во многих направлениях и отраслях производства (рис. 1).

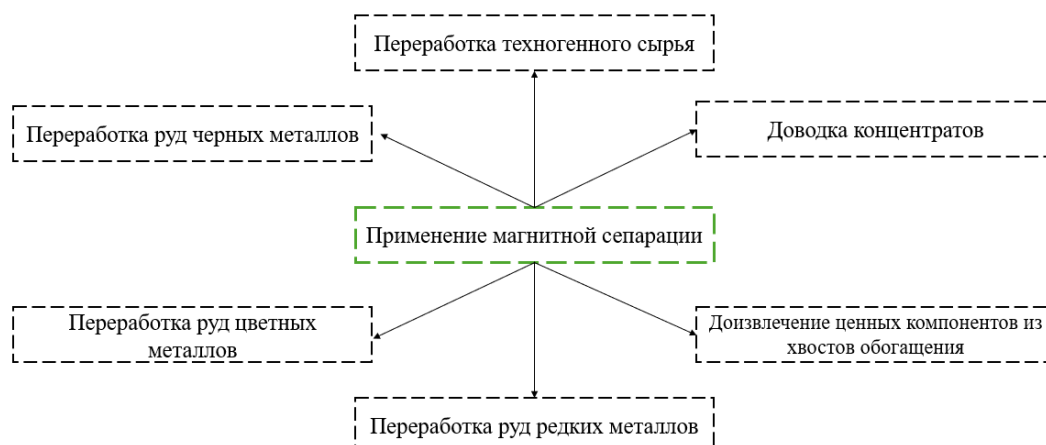


Рис. 1. Основные области применения магнитной сепарации [составлено авторами]

Таким образом, магнитная сепарация представляет собой важный и достаточно универсальный инструмент в обогащении, позволяя максимально эффективно использовать минеральные ресурсы и снижать негативное воздействие на окружающую среду [3].

Цель данной работы заключается в систематизации данных в области применения магнитной сепарации, в том числе высокоградиентных магнитных сепараторов (ВГМС), для обогащения руд и переработки промышленных отходов.

Под магнитным сепаратором понимают устройство для разделения минералов по различию в магнитной восприимчивости в магнитном поле. Среди лидирующих мировых компаний, производящих магнитные сепараторы, стоит отметить Metso (Финляндия), STEINERT (Германия) и Magquip (Южная Африка). Российские производители и поставщики магнитных сепараторов представлены на рис. 2.



Рис. 2. Основные производители и поставщики магнитных сепараторов в РФ [составлено авторами]

Среди конструкций магнитных сепараторов наиболее перспективными являются ВГМС (отличаются от традиционных сепараторов наличием в их рабочей зоне полиградиентной среды), которые имеют ряд ключевых преимуществ: возможность обогащения мелких классов и слабомагнитных минералов, экологичность, эффективность.

Стоит отметить, что высокоградиентные магнитные сепараторы (ВГМС) с повышенной производительностью отечественными предприятиями на сегодняшний день не производятся, несмотря на то, что их конструкции были разработаны еще в СССР.

Можно выделить несколько основных направлений исследований в области ВГМС:

1. Моделирование протекающих при ВГМС физических процессов, в том числе изучение методов оценки силового режима разделения минералов; картографирование магнитного поля; инновационный подход к определению магнитной восприимчивости [4, 5], основанный на возникающих магнитных моментах и структуре минералов.

2. Разработка технологических решений с применением ВГМС. К данному блоку относятся исследования, подтверждающие возможность: применения ВГМС для дообогащения гематитовых руд некоторых ГОКов [6]; включения операций ВГМС в комбинированные схемы для получения гематитового и ильменитового концентратов из хвостов переработки магнетитовых руд; повышения сортности выпускаемых товарных концентратов. Здесь также стоит отметить работы, в которых обосновано переработки отходов угольной промышленности (золашлаковых отходов) [7].

3. Разработка эффективных конструктивных решений. Перспективные исследования в этой области в основном направлены на создание различных способов формирования магнитного поля и магнитной системы, а также подбор оптимальных конструкций матриц [8].

Таким образом, в современном мире горно-обогатительная промышленность сталкивается с проблемами ухудшения качества сырья и истощения руд, что требует применения более эффективных методов переработки. Магнитная сепарация выступает как важный метод обогащения, особенно с учетом возрастающих экологических требований. Высокоградиентные магнитные сепараторы (ВГМС) представляют особый интерес благодаря их способности обогащать руды, содержащие слабомагнитные минералы, и мелкие классы. Однако в России пока не налажено массовое производство этих устройств, несмотря на перспективность их применения. Исследования в области ВГМС сосредоточены на моделировании процессов, разработке новых технологических решений и создании конструктивных усовершенствований для повышения эффективности переработки руд и промышленных отходов

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.
2. Litvinenko, V. S.; Petrov, E. I.; Vasilevskaya, D. V.; Yakovenko, A. V.; Naumov, I. A.; Ratnikov, M. A. 2022. Assessment of the Role of the State in the Management of Mineral Resources. J. Min. Inst. 1–17. DOI:10.31897/PMI.2022.100.
3. Абрамов, А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Т. 3 : учебное пособие : в 2 книгах – М: Горная книга, 2005. – 575 с.
4. Dai, P., Xue, Z., Li, X., Wei, Z., Zeng, J., & Chen, L. (2024). Magnetic property of malachite for high-gradient magnetic separation. Minerals Engineering, 213, 108734. Dai P. et al. Magnetic properties of chalcopyrite and arsenopyrite for high-gradient magnetic separation with Crystal-Field Theory //Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 189. – С. 107893. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108734.
5. Пелевин А. Е. Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3–1. – С. 422–430. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-422-430.
6. Aleksandrova T. et al. Increase in Recovery Efficiency of Iron-Containing Components from Ash and Slag Material (Coal Combustion Waste) by Magnetic Separation //Minerals. – 2024. – Vol. 14. – №. 2. – С. 136. DOI:10.3390/min14020136.
7. 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.

Исследование прочностных свойств руд для обоснования технологии циклов рудоподготовки

Аннотация. Эффективное освоение месторождений и дальнейшая переработка полезных ископаемых возможны на основе достоверной информации не только о запасах минерального сырья, но и на основе данных о физико-механических свойствах, для определения которых, на сегодняшний день, существует большое количество методов. Для всех этих методов важным является временный фактор, наряду с которым стоит доступность оборудования для тестирования. В этой связи, в данной работе рассматривается возможность использования результатов тестирования на сопротивляемость точечному нагружению для определения коэффициента крепости по М. Протодяконову. В результате обработки данных получено уравнение, позволяющее производить перерасчет показателей прочности без дополнительных времязатрат на проведение тестирования. Средняя относительная ошибка уравнения, проверенная экспериментальным путем, не превысила 4 %.

Ключевые слова: дезинтеграция, тест на воздействие сосредоточенной нагрузкой, рудоподготовка, крепость по М. Протодяконову, индекс сосредоточенного нагружения, раскрытие минералов.

Gleb V. Struk
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, s245018@stud.spmi.ru

Research of ore strength properties to substantiate the technology of comminution circuits

Abstract. Effective development of deposits and further processing of minerals is possible on the basis of reliable information not only on mineral reserves, but also on the basis of data on physical and mechanical properties, for the determination of which, to date, there are a large number of methods. For all these methods the time factor is important, along with which is the availability of equipment for testing. In this regard, this paper considers the possibility of using the results of testing for resistance to point loading to determine the strength coefficient according to M. Protodyakonov. As a result of data processing, an equation was obtained that allows recalculation of strength indices without additional time-consuming testing. The average relative error of the equation, verified by experiment, did not exceed 4 %.

Keywords: disintegration, point load test, comminution, M. Protodyakonov strength index, point load index, mineral liberation.

Оценка физико-механических свойств минерального сырья играет важную роль при расчетах технологических процессов и обоснования конструктивных параметров оборудования как на этапе добычи, так и на этапах обогащения и переработки минерального сырья (получения товарных продуктов) [1]. Одним из важных и энергоемких этапов в этой технологической цепочке является подготовка сырья к обогащению. Существует комплекс методов определения физико-механических параметров минерального сырья, которые позволяют получить информацию, необходимую для последующего выбора, обоснования и расчета схем рудоподготовки. При этом получение полной информации о свойствах исследуемого сырья без дополнительных временных и финансовых затрат является достаточной актуальной задачей [2–4].

Таким образом, целью данного исследования являлось обоснование необходимого и достаточного комплекса методов изучения физико-механических свойств полиметаллического минерального сырья для достижения максимального раскрытия сростков

в процессах рудоподготовки. Исходя из поставленных целей были сформулированы следующие задачи: анализ научно-технической литературы в области рудоподготовки минерального сырья: f – коэффициент крепости по шкале М. Протодяконову и $I_{s(50)}$ – индекс сосредоточенного нагружения для различных типов горных пород для выявления корреляционных зависимостей; испытание материала на воздействие сосредоточенной нагрузкой; обработка и анализ полученных данных [5].

В качестве объектов исследования были выбраны 13 типов горных пород, отличающиеся по своему минералогическому составу и прочностным свойствам: медная руда, медно-никелевая руда, доломит, известняк, габбро, сланец, песчаник, кварцит, андезит, базальт, гранит, сиенит, гипс и уголь [5].

Экспериментальное исследование по определению индекса $I_{s(50)}$ исследованных типов горных пород проводилось с использованием установки точечного нагружения PLT-2W производства «GCTS Testing Systems» в соответствии с методикой, разработанной «Международным обществом по механике горных пород». Подготовка образцов к исследованию производилась следующим образом: исходный материал, представленный кернами медно-никелевой руды диаметром 64 мм и длиной 100–150 мм, подвергался резке алмазной пилой до получения кусков, соответствующих по своим размерам и количеству осевому типу испытания на воздействие точечной нагрузкой. Для данных образцов были произведены измерения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, вычислен эквивалентный диаметр, после чего производилось сосредоточенное разрушение. Процедура разрушения продолжалась до тех пор, пока количество испытанных образцов не достигло 10 шт., при этом регистрировались только те разрушения, поверхность которых проходила через две точки нагружения образца [6].

Результаты испытания на воздействие сосредоточенному нагружению, а также принятые по литературным данным показатели $I_{s(50)}$ и f исследованных типов горных пород представлены в таблице 1 (столбцы 2–3) [5].

Обработка данных по прочностным индексам, представленная на рисунке 1, показала, что показатели устойчивости к сосредоточенной нагрузке исследованных типов горных пород имеют высокую сходимость с соответствующими показателями крепости по М. Протодяконову ($R^2=0,98$), что позволяет переходить от данных одного теста к другому без дополнительных экспериментальных исследований, используя уравнение:

$$f^* = -0,1909I_{s(50)}^2 + 3,4315I_{s(50)} - 1,6865. \quad (1)$$

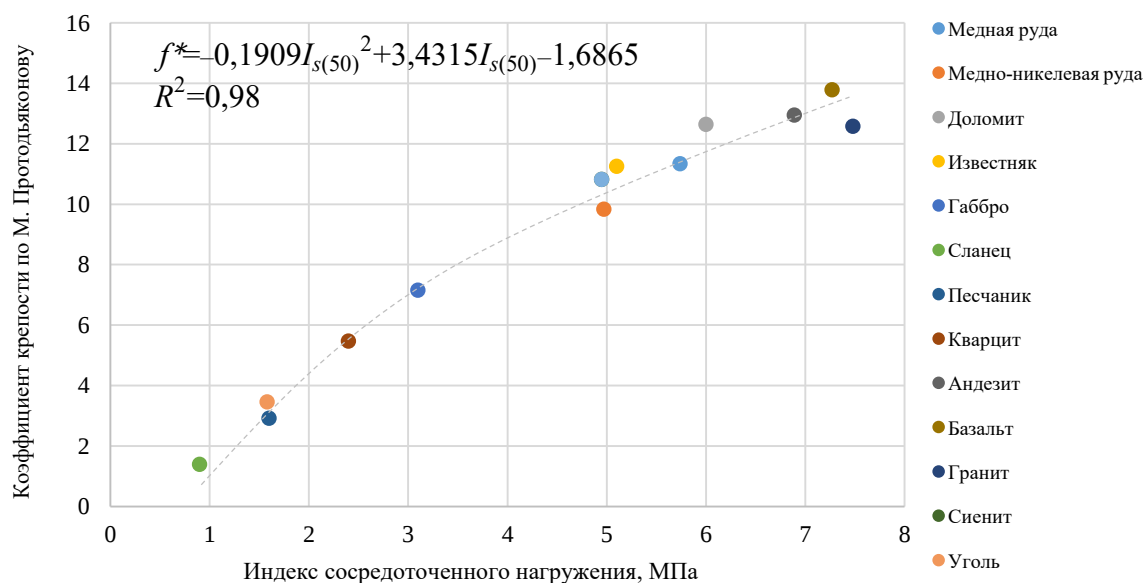


Рис. 1. Зависимость $f=f(I_{s(50)})$ [материалы автора]

Результаты обработки литературных источников [7–9]

Объект	$I_{s(50)}$, МПа	f , ед.	f^* , ед.
1	2	3	4
Медная руда	5,74	10,31	11,37
Медно-никелевая руда	4,97	9,84	10,20
Доломит	6,00	12,64	11,73
Известняк	5,10	11,26	10,41
Габбро	3,10	7,16	6,68
Сланец	0,9	1,4	1,28
Песчаник	1,60	3,50	3,15
Кварцит	2,40	5,47	5,11
Андезит	6,89	12,95	12,81
Базальт	7,27	13,79	13,21
Гранит	7,48	12,58	13,41
Сиенит	4,95	10,82	10,17
Уголь	1,58	3,46	3,10

Проверка полученной зависимости, путем перерасчета показателя f^* (столбец 4) по экспериментально определенному показателю $I_{s(50)}$, для выбранных объектов исследования, показала удовлетворительный результат – средняя относительная ошибка полученных данных не превышает 6 %.

Список литературы

1. Antoninova N. Yu., Rybnikova L. S., Slavikovskaya Yu. O., Shubina, L. A. Improvement of Mineral Processing Methods in Mining Structurally-Complex Deposits // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). 2022. No 1. Pp. 63–70.
2. Morrell S. Helping to reduce mining industry carbon emissions: A step-by-step guide to sizing and selection of energy efficient high pressure grinding rolls circuits // Minerals Engineering. 2022. Vol. 179. Pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107431.
3. Starkey J., Moussaid H., Boucher D., Bobicki E. R. Keys to best practice comminution // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107432.
4. Rahimi M. R., Mohammadi S. D. The Effect of Mineral Composition on the Correlation between Point Load Index with the Uniaxial Compressive Strength of Sulfate Rocks and their Point Loading Deformation // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2024. Vol. 68, no 4. Pp. 1281–1313. DOI: 10.3311/PPci.37013.
5. Струк Г. В. Исследование зависимости между энергетическими индексами Ф. Бонда и индексом сосредоточенной нагрузки // XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых: тезисы докладов. 2023. С. 168–169. URL: <https://clck.ru/385Gou>.
6. Standard D 5731-07. Standard test method for compressive strength and elastic modulus of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures / ASTM International. 2009. Pp. 1–11.
7. Hoek E. Practical Rock Engineering. North Vancouver: Evert Hoek Consulting Engineer Inc., 2023. 341 p.
8. Bravo A. H., Lieberwirth H., Popov O. Evaluation of Ni-Cu ore from Zapolyarnoe based on mineralogical and physical properties before and after comminution // Minerals. 2024. Vol. 14, no 5. Pp. 1–22. DOI: 10.3390/min14050493.
9. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Hajihassani M., Yagiz S., Motaghedi H. Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances // Engineering with Computers. 2015. Vol. 32, no 2. Pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00366-015-0410-5.

Секция 4.
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ПРИРОДНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ,
УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
И ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

УДК 66.095.134

Аветисов Артем Саркисович*
Косолапова Софья Михайловна**
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия
** s230688@stud.spmi.ru*
*** sofy.k.97@mail.ru*

**Влияние содержания воды на конверсию сырья
в реакции переэтерификации растительных масел**

Аннотация. В данной работе было установлено влияние концентрации воды в реакционном спирте и свободных жирных кислот в растительном масле на конверсию сырья в реакции переэтерификации. Определены параметры содержания воды в реакционном этаноле, обеспечивающие стабильный выход целевого продукта реакции при переэтерификации рафинированного и нерафинированного масла.

Ключевые слова: биотопливо, биодизельное топливо, переэтерификация, подсолнечное масло, рапсовое масло, отработанное растительное масло.

Artem S. Avetisov*
Sofia M. Kosolapova**
Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia
** s230688@stud.spmi.ru*
*** sofy.k.97@mail.ru*

**Effect of water content on feedstock conversion
in the transesterification reaction of vegetable oils**

Abstract. The effect of water concentration in reaction alcohol and free fatty acids in vegetable oil on the conversion of raw materials in the transesterification reaction was established. The parameters of water content in reaction ethanol were determined, ensuring a stable high yield of the target reaction product during the transesterification of refined and unrefined oil.

Keywords: biofuel, biodiesel, transesterification, sunflower oil, rapeseed oil, waste vegetable oil.

Альтернативные источники энергии приобретают высокое значение в настоящее время благодаря стремлению стран мира к экономической стабильности через уменьшение потребления нефти и газа и нивелирование зависимости от поставок данного сырья [6]. С другой стороны, применение таких источников энергии способствует развитию мировой энергетики в направлении уменьшения техногенного влияния на экологию окружающей среды. Среди них особое внимание уделяется биодизельному топливу, которое состоит из сложных эфиров жирных кислот [1, 2].

Известно, что биодизельное топливо при использовании выделяет в разы меньше углекислого газа, который приводит к парниковому эффекту и как следствие изменению среднего уровня океанов, изменению климатических условий и режима осадков [3, 4].

Кроме того, при эксплуатации биодизеля образуется меньше вредоносных оксидов и твердых частиц, чем при использовании традиционного топлива [5]. Топливо, получаемое из природных материалов, таких как растительные масла, животные жиры или отработанные масла, само по себе может разлагаться в природе и является возобновляемым ресурсом.

Несмотря на преимущества и потребность в биодизельном топливе, получение данного продукта из определенного растительного сырья требует решения ряда технических и задач, в том числе подбор параметров синтеза, позволяющих достичь максимальной конверсии сырья [7].

Одним из немаловажных параметров синтеза сложных эфиров жирных кислот посредством щелочной переэтерификации масел является предельно допустимое содержание воды в реакционном спирте. Целью данной работы было установление диапазонов содержания примесной воды в реакционном этаноле, позволяющих поддерживать максимальную конверсию растительных масел с разным содержанием свободных жирных кислот.

В качестве материалов исследования использовались, подсолнечное рафинированное (ПМ), рапсовое нерафинированное (РМ). Для реакции переэтерификации были приготовлены спиртовые растворы КОН концентрацией 0,5 % и 1,0 % по массе, содержание воды в этаноле варьировалось в диапазоне 0–10 %.

Кислотное число растительных масел определяли по ГОСТ 31933-2012 по титрометрическому методу с визуальной индикацией. Реакцию переэтерификации проводили в реакторах смешения объемом 250 мл в системе параллельных реакторов HEL с нагревательной рубашкой и магнитным перемешиванием. Время реакции составляло 5 мин и 2,5 часа. Далее провели саму реакцию этерификации. Для увеличения спектра представления результата пусть реакция будет идти 5 минут и 2,5 часа. Скорость перемешивания реакционных смесей и температуру поддерживали на уровне 250 об/мин и 70 °С. После синтеза реакционные смеси охлаждали и отбирали пробы эфирных фаз для газовой хроматографии. Массу продукта в эфирной фазе определяли методом газовой хроматографии с внутренним стандартом. Расчет производили по формуле (1)

$$w_i = \frac{S_i}{S_{\text{доо}}} \cdot \frac{m_{\text{см}} \cdot w_{\text{см}}}{m_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $\frac{S_i}{S_{\text{доо}}}$ – отношение площадей пика эфира к пику додекана; $m_{\text{ст}}$ – масса раствора внутреннего стандарта; $w_{\text{см}}$ – массовая доля додекана в растворе внутреннего стандарта; $m_{\text{пр}}$ – масса объема образца, взятого для анализа.

Влияние концентрации воды в реакционном этаноле на степень конверсии растительного масла в процессе щелочной переэтерификации в течение 5 минут и 2,5 часов отражено на графиках (рисунок 1).

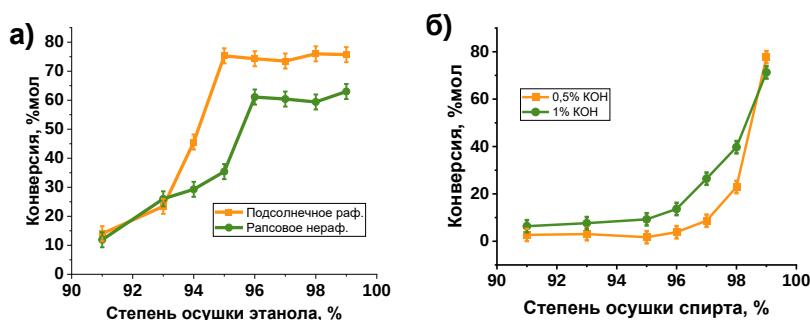


Рис. 1. Влияние воды в этаноле на конверсию ПМ и РМ:
а) время синтеза 2,5 часа, 1 % КОН в этаноле; б) время синтеза 5 минут, сырье РМ

Из результатов, полученных при синтезе в течение 2,5 часов видно, что при концентрациях воды в спирте $> 4\%$ выход целевого продукта начинает резко снижаться и не превышает 30% для нерафинированного масла и не превышает 45% для рафинированного. При уменьшении воды в спирте в диапазоне $0-4\%$ наблюдается плавный рост до наивысшего показателя при 99% -й сухости спирта (рисунок 1, а). Предварительное рафинирование подсолнечного масла позволило сместить «скачок» выхода целевого продукта влево на 1% , расширив диапазон содержания воды в спирте, при котором потери конверсии сырья будут минимальными. При уменьшении времени синтеза наблюдается иная картина (рисунок 1, б). При содержании воды в этаноле менее 4% возможно достижение высокой конверсии масел, однако для этого потребуется более 5 минут, что может повлиять на производительность непрерывного процесса синтеза. В диапазоне сухости спирта от 91 до 93% конверсия сырья остается одинаково низкой в пределах погрешности эксперимента для $0,5\%$ и 1% КОН в спирте, что позволяет предположить, что при таком количестве примесная вода влияет не столько на активацию побочного процесса омыления, сколько на баланс реакции переэтерификации. Это предположение подтверждают результаты переэтерификации ПМ и РМ, где конверсия сырья обоих масел достигала близких значений независимо от разницы кислотного числа масел (рисунок 1, а).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что вода в этаноле влияет на дезактивацию катализатора, снижая скорость реакции, а при содержании выше 7% также воздействует на баланс реакции, снижая конверсию сырья независимо от концентрации КОН и кислотного числа масла. При длительном синтезе возможно поддержание высокой степени конверсии при содержании до 4% воды в спирте для нерафинированного масла и до 5% для рафинированного масла.

Список литературы

1. Капустин В. М., Карпов С. А., Сайдахмедов А. И. Биодизельное топливо: преимущества, недостатки и перспективы промышленного производства // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2011. – № 4. – С. 49–54. – 963.
2. Гафуров Н. М., Хисматуллин Р. Ф. Преимущества биодизельного топлива // Инновационная наука. – 2016. – № 5–2 (17). – С. 72–74.
3. Гончаров С. В., Карпачев В. В. Перспективы развития биодизеля в России // Масличные культуры. 2021. Вып. 3 (187). С.71–77.
4. Юсиф-заде А. А., Гасанов А. А. Получение биодизельного топлива с улучшенными экологическими свойствами. М.: «Нефтепереработка и нефтехимия», № 2, 2017. – С. 22–25.
5. Васильев Р. Г. Перспективы развития производства биотоплива в России. Сообщение 1: биодизель / Вестник биотехнологии, 2007, 3, № 1. С. 47–54.
6. Праманик Т., Трипати С. Биодизельное топливо-чистое топливо будущего // Нефтегазовые технологии 2005, № 6. С. 65–70.
7. Девянин С. Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей / С. Н. Девянин, В. А. Марков, В. Г. Семенов. – М.: Изд. центр ФГОУ ВПО МГАУ, 2007. – 340 с.

Научный руководитель: Рудко Вячеслав Алексеевич, к.т.н., исполнительный директор НЦ «Переработки ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Артамонов Александр Александрович*

Нечаев Владислав Андреевич

Бессонов Владислав Витальевич

Абиев Руфат Шовкетович

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург, Россия*

* giperbol123@gmail.com

Применение вихревых контактных устройств для получения окисленных битумов

Аннотация. В представленной работе оценивается возможность применения нового вихревого контактного устройства в процессе получения окисленных битумов. Приведены сравнительные характеристики существующего аппаратного оформления процесса по удельным скоростям диссипации энергии и Заутеровским диаметрам газовых пузырей. Данные, полученные в результате литературного обзора и численного моделирования, указывают на целесообразность применения разработанного контактного устройства для интенсификации процесса путем увеличения площади поверхности контакта реагирующих фаз.

Ключевые слова: битумы, окисление, интенсификация процессов, вихревое контактное устройство.

Alexander A. Artamonov*

Vladislav A. Nechaev

Vladislav V. Bessonov

Rufat Sh. Abiev

Saint Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia

* giperbol123@gmail.com

Application of vortex contact devices for the production of oxidized bitumen

Abstract. In the presented work, the possibility of using a new vortex contact device in the process of obtaining oxidized bitumen is evaluated. Comparative characteristics of the existing technical equipment of the process in terms of specific energy dissipation rates and Sauter diameters of gas bubbles are presented. The data obtained as a result of a literature review and numerical modeling indicate the expediency of using the developed contact device to intensify the process by increasing the contact surface area of the reacting phases.

Keywords: bitumen, oxidation, process intensification, vortex contact devices.

Получение окисленных битумов – один из важнейших процессов переработки вакуумных остатков. Несмотря на простоту аппаратного оформления, окисление гудронов является сложным комплексным процессом не только с точки зрения описания гидродинамики, но и с точки зрения описания кинетики по причине постоянно изменяющихся состава и свойств жидкой фазы в процессе [1].

Основная проблема получения окисленных битумов – низкая производительность существующих установок ввиду длительности проведения окисления, до 8–12 часов [2]. Необходимость такой продолжительности процесса обусловлена тем, что кислород воздуха, подаваемый в реактор окисления, реагирует с гудроном крайне медленно.

Ускорение процессов взаимодействия кислорода и гудрона путем повышения температуры выше средних значений (240–270 °С, коэффициент динамической вязкости μ 1,44 мПа·с) приведет к избыточной наработке тяжелых углеводородов – асфальтенов, которые при дальнейшем повышении температуры преобразуются в карбены и карбоиды. Избыточное наличие данных веществ приводит к нежелательному утяжелению продукта, что негативно сказывается на характеристиках битума, такие как температура размягчения,

показатели пенетрации, растяжимость, хрупкость, а также способствует образованию коксовых отложений на стенках аппарата, что ведет за собой ухудшение их теплопроводности, приводящее к локальным нарушениям температурного режима процесса [2].

К подобным ограничениям технологии получения окисленных битумов можно отнести нелинейную экстремальную зависимость эффективности процесса от расхода воздуха (окислителя). Согласно литературным данным [3], увеличение расхода воздуха увеличивает значения пенетрации и теплостойкости получаемого битума. Максимум эффективности достигается при значении расхода 1,4 м³/мин. Дальнейшее увеличение расхода воздуха приводит к переокислению продукта, обуславливающему повышение температуры хрупкости, снижению показателей дуктильности и эластичности.

Ввиду указанных ограничений технологии, эффективность процесса получения окисленных битумов будет определяться параметрами диспергации воздуха в объеме сырья, а также гидродинамическими условиями процесса.

В качестве традиционного аппаратного оформления процесса получения окисленных битумов используются аппараты с мешалкой, трубчатые реакторы, барботажные колонны и кавитационно-вихревые аппараты [4]. Указанные типы оборудования характеризуются большими диаметрами газовых пузырей, а следовательно, малой площадью поверхности контакта фаз. В таблице 1 представлены данные по средней скорости диссипации энергии ϵ и диаметры газовых пузырей d_{32} для различных типов аппаратов.

Таблица 1

Сравнительная характеристика аппаратного оформления процессов получения окисленных битумов

Тип аппарата	Средняя удельная скорость диссипации энергии ϵ , Вт/кг	Средний поверхностно-объемный диаметр газовых пузырьков d_{32} , мм	Ссылка
Аппарат с мешалкой	0,3-3,2	4,5	[5]
Барботажная колонна	0,5-2,0	5-15	[6]
Кавитационно-вихревой аппарат	3,8	5-5,5	[4]

На сегодняшний день разработано и апробировано множество различных диспергирующих устройств для распределения пузырей воздуха в объеме реактора, однако, до сих пор не удается достичь желаемого времени проведения процесса. Одним из наиболее перспективных вариантов интенсификации окисления битумов является увеличение площади поверхности контакта фаз за счет дробления пузырей воздуха посредством его диспергации в аппарате.

Следует отметить, что уменьшение доли кислорода, не вступившего в реакцию, обеспечит безопасность процесса окисления, так как взрывоопасные концентрации газов будут не достигнуты. Согласно литературным данным, концентрация кислорода в отходящих газах процесса окисления в традиционных аппаратах составляет 3–6 % [7].

В данной работе исследовался аппарат с вихревым контактным устройством (далее – ВКУ), представляющим собой тарелку с закрепленными на ней аксиальными статическими завихрителями. Методом численного моделирования с использованием ПО COMSOL Multiphysics были получены значения удельной скорости диссипации энергии ϵ для процесса окисления битумов на ВКУ. В качестве исходных данных были взяты характеристики потоков существующего трубчатого реактора [8–9], в качестве рабочей среды рассматривался битум БНД 70/100. Кроме этого, средняя линейная скорость течения сырья в реакторе была приведена к общему сечению «на просвет» двух завихрителей тарелки. Диаметры газовых пузырей рассчитаны в соответствии с теорией Колмогорова по уравнению 1 [10]:

$$\delta = 3,48 \left(\frac{\sigma^3}{\rho^3 \epsilon^2} \right)^{0,2}, \quad (1)$$

где δ – диаметр газовых пузырей, мм; σ – поверхностное натяжение среды при температуре 250°C, равное 20,39 мН/м; ρ – плотность среды при температуре 250°C, равная 895 кг/м³.

Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты исследований разработанного ВКУ

Скорость течения среды, приведенная к сечению завихрителя w_{sw} , м/с	Удельная скорость диссипации энергии ϵ , отнесенная к объему рабочей зоны ВКУ*, Вт/кг	Диаметр газовых пузырей согласно теории Колмогорова δ в рабочей зоне ВКУ, мм
2,5	7,1	2,6

*от ВКУ на расстоянии 168 мм, что соответствует двум диаметрам трубы (сечение 2D)

Результаты численного моделирования, представленные в таблице 2, указывают на то, что исследованная конфигурация контактного устройства обеспечивает значительно большую поверхность контакта гудрона и воздуха, что позволяет предполагать целесообразность использования таких устройств в процессах получения окисленных битумов.

Список литературы

1. Максимов М. В., Анищенко О. В. Проблемы производства битума высокого качества и способы их решения // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 2. С. 131–136.
2. Гунн, Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гунн. –М.: Химия, 1973. – 432 с
3. Гуреев А. А., Чернышева Е. А., Коновалов А. А., Кожевникова Ю. В. Производство нефтяных битумов. – М. Изд. Нефть и газ, 2007, 102 с
4. Нечаев А. Н. Разработка конструкции и метода расчета кавитационно-вихревых аппаратов для процесса окисления нефтяных остатков: дис. кандидата технических наук Нефтепереработка наук: 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы (машиностроение в нефтеперерабатывающей промышленности). – Уфа, 2003. – 76 с.
5. Абиев Р. Ш. Химические и биохимические реакторы для контролируемого синтеза органических и неорганических веществ // «Традиции и Инновации»: тезисы докл. конф. (Санкт-Петербург, 20–23 ноября 2023 г.). – СПб, 2023. – 477.
6. Shi W. et al. A Modified Bubble Breakage and Coalescence Model Accounting the Effect of Bubble-Induced Turbulence for CFD-PBM Modelling of Bubble Column Bubbly Flows //Flow, Turbulence and Combustion. – 2020. – Т. 105. – С. 1197-1229.
7. Максимов, М. В. Способ повышения эффективности процесса получения окисленного битума / М. В. Максимов, О. В. Анищенко. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2018. – № 14 (200). – С. 8–9. – URL: <https://moluch.ru/archive/200/49220/> (дата обращения: 11.11.2024).
8. Грудников, И. Б. Производство нефтяных битумов. / И. Б. Грудников. –М.: Химия, 1983. – С. 57.
9. ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ КОЛОННА. Патент РФ 2341506 С1. Заявка 2007109523/15, подана 15.03.2007. Опубликовано 20.12.2008. Авторы: Нурмухаметов Р. С., Габдрахманов Р. А., Вафин И. З., Киямов Р. Н., Гайнанов Ф. Ф., Ахметзянов З. С. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Татнефть» им. В. Д. Шашина (RU).
10. Островский Г. М. Прикладная механика неоднородных сред / Г. М. Островский – СПб.: Наука, 2000 – 359 с.

Научный руководитель: *Абиев Руфат Шовкетович, доктор технических наук, заведующий кафедрой Оптимизации Химической и Биотехнологической Аппаратуры, Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), Санкт-Петербург, Россия.*

Диспергаторы для нефтяных топлив (обзор)

Аннотация. В работе приведены краткие сведения о необходимости добавления диспергаторов парафинов в дизельное топливо для предотвращения расслоения при холодном хранении. Дана классификация диспергаторов по составу: полимерные, гибридные. Наиболее распространены диспергирующие присадки на основе азотсодержащих соединений: амидов фталевой и алкенилantarной кислоты, эфиры β -аминопропионовой кислоты и другие. Также описаны основные методы анализа эффективности диспергаторов, установлено, что она оценивается по степени расслоения топлива после выдерживания его при температуре ниже температуры помутнения. Также предложен механизм действия диспергаторов, основанный на создании двойного электрического слоя на поверхности кристаллов парафинов за счет поверхностной активности диспергатора, в результате чего образующиеся кристаллы становятся менее склонными к седиментации.

Ключевые слова: диспергирующие присадки, дизельное топливо, низкотемпературные свойства, коагуляция кристаллов парафинов.

Artem P. Bogatko
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, s230682@stud.spmi.ru*

Dispersants for petroleum fuels (review)

Abstract. The paper summarises the necessity of adding paraffin dispersants to diesel fuel to prevent stratification during cold storage. Classification of dispersants by composition is given: polymeric, hybrid. The most common dispersing additives are based on nitrogen-containing compounds: amides of phthalic and alkenilantaric acid, esters of β -aminopropionic acid and others. The basic methods of analysing the efficiency of dispersants are also described, it is established that it is estimated by the degree of fuel separation after keeping it at a temperature below the turbidity temperature. The mechanism of dispersants action is also proposed, based on the creation of a double electric layer on the surface of paraffin crystals due to the surface activity of the dispersant, as a result of which the formed crystals become less prone to sedimentation.

Keywords: dispersant additives, diesel fuel, low-temperature properties, coagulation of paraffin crystals.

Одной из главных проблем, связанных с использованием дизельного топлива, в странах с холодным климатом является ухудшение качества топлива при понижении температуры. В качестве решения данной проблемы наиболее эффективным способом является изменение фракционного и компонентного состава. Однако более перспективным и экономичным способом является использование депрессорно-диспергирующих присадок [1]. В качестве депрессорной присадки обычно используются полимерные соединения, например, сополимер этилена с винилацетиленом. Данные соединения снижают температуру застывания (ТЗ) и предельную температуру фильтруемости (ПТФ). Однако они не решают проблему расслоения дизельного топлива при холодном хранении. По достижении топливом температуры помутнения в нем начинают образовываться кристаллы парафинов, которые растут, коагулируют и осаждаются на дно резервуара или топливного бака. Из-за этого возникает неоднородность в составе и свойствах различных слоев топлива, приводящая к ухудшению его эксплуатационных характеристик, а также затрудняющая транспортировку, хранение топлива и нормальную работу двигателей.

Диспергирующие присадки – вещества, способствующие повышению антиседиментационных свойств дизельного топлива при холодном хранении. Топливо расслаивается, образуя 2 фазы, при понижении температуры образуются кристаллы парафинов, растут и слипаются, осаждаясь на дно резервуара. Так как нижний слой имеет большое количество осевших парафинов, то поступление в двигатель такого топлива, может привести к неустойчивой работе двигателя или невозможности его запуска, в силу высокой плотности нижнего слоя [2].

Диспергаторами парафинов зачастую выступают азотсодержащие высокомолекулярные органические соединения, в том числе:

- Диамиды фталевой и терефталевой кислот, аммонийные соли данных кислот [4];
- Имиды производных янтарной кислоты [3];
- Алкиловые эфиры-β-аминопропионовой кислоты [4];
- Соплимеры малеинового ангидрида, олефинов и аминопропилталловых аминов [5].

Помимо азотсодержащих диспергаторов парафинов существуют диспергаторы на основе норборена (метатезисной сополимеризации функционализированного норборена и синтетического дивинилового каучука и 1-гексена) [6]. Однако сложность их получения, в связи с использованием рутениевого катализатора, значительно повышает сложность производства.

Кроме полимерных веществ существуют перспективные разработки в области гибридных диспергаторов, они представляют собой смесь модифицированных наночастиц и полимерной основы. Известны гибридные диспергаторы на основе наночастиц (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , нано-оксида графена) [7]. Однако, несмотря на то, что они показывают высокую эффективность в стабилизации частиц парафинов, их применение ограничено сложностью получения и высокой стоимостью.

В настоящее время наиболее используемой коммерческой диспергирующей присадкой является Keroflux 3614 [8] производства компании BASF, в ее составе также присутствуют азотсодержащие соединения, а именно амиды.

Для оценки эффективности диспергирующих присадок, а также для определения склонности дизельного топлива к расслоению применяется методика СТО 11605031-041–2010 (метод АО «ВНИИ НП»), которая заключается в измерении предельной температуры фильтруемости верхнего и нижнего слоев топлива, выдержанного 16 часов при температуре на 5 °С ниже температуры помутнения. Степень расслоения топлива оценивается как разность между ПТФ нижнего и верхнего слоев и для седиментационно устойчивого топлива должна составлять не более 2 °С. Кроме этого, оценка стабильности топлива при холодном хранении оценивается визуально по различию в мутности между слоями топлива, если такое различие отсутствует, значит содержащиеся в топливе парафины не склонны к седиментации [9].

Механизм действия диспергаторов заключается в том, что молекулы присадки являются веществами, обладающими поверхностной активностью и содержащими полярные функциональные группы, из-за чего они адсорбируются на поверхности кристаллов парафинов и образуют двойной электрический слой, благодаря которому не происходит процесс коагуляции и седиментации кристаллов парафинов. Вследствие чего топливо не расслаивается при его длительном хранении при температуре ниже температуры помутнения [2, 4].

Обобщая все выше сказанное, определенно точно можно сказать, что проблема использования топлива в условиях холодного климата, будет оставаться актуальной. Поэтому поиск новых депрессорно-диспергирующих присадок, в частности диспергаторов парафинов, будет довольно перспективным направлением в области улучшения низкотемпературных характеристик топлива, за счет предотвращения седиментации парафинов и расслоения топлив при холодном хранении. Чаще всего применяются полимерные

азотосодержащие диспергирующие присадки, ввиду простоты их получения, мягких условий синтеза и широкой сырьевой базы. Помимо азотосодержащих – перспективными являются гибридные диспергаторы. Существующие методы определения седиментационной стойкости топлив, в том числе методика ВНИИНП, позволяют оценить эффективность действия диспергирующих присадок, однако ввиду своей значительной продолжительности сложна в применении. В связи с чем дальнейшие исследования могут быть направлены как на поиск новых компонентов диспергирующих присадок, совершенствование технологий их получения, так и на разработку более быстрого способа оценки эффективности диспергаторов.

Список литературы

1. Сибиряков К., Тархов Л. Research of the effect of depressant-dispersant additives on low-temperature properties of diesel fuel // PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology. 2018. № 1. P. 86–91.
2. Данилов, А. М. Применение присадок в топливах для автомобилей: Справ. изд. – М.: Химия, 2000 – 232 с.
3. Iovleva E. L. Use of a depressant-dispersant additive during storage of diesel fuel // IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2022. Vol. 990, № 1. P. 012003.
4. Патент № 2561279, Российская Федерация, C10L 1/22 C10L 1/222 C08F 22/22 C08G 73/10(2006.01). Диспергатор парафинов, способ его получения и топливная композиция, его содержащая : № 2014137962/04 : заявл. 19.09.2014 : опубл. 27.08.2015 / Мухторов Н. Ш., Чугунов М. А., Рыбин А. Г., Меджибовский А. С., Колокольников А. С., Дементьев А. В. – 13 с.
5. Патент № 2647858 Российская Федерация C10L 1/10 (2006.01) C08L 33/04 (2006.01) C08F 4/80 (2006.01). Способ получения диспергирующей присадки к дизельному топливу и диспергирующая присадка к дизельному топливу : № 2017107054 : заявл. 03.03.2017 : опубл. 21.03.2018 / Земцов Д. Б., Афанасьев В. В., Верещагина Н. В., Шелоумов А. М., Бовина М. А., Беспалова Н. Б. Рудяк К.Б.– 14 с.– 10 с.
6. Патент № 2684412 Российская Федерация C10L 1/18, C10L 1/196, C10L 1/192, C08F 8/46, C08F 36/00, C08F 136/00, C08F 236/00. Депрессорно-диспергирующая присадка к дизельному топливу, способ ее получения и способ получения депрессорного и диспергирующего компонентов депрессорно-диспергирующей присадки : № 2017138248 : заявл. 02.11.2017 : опубл. 09.04.2019 / Полянский К.Б. (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 02.11.2017 Земцов Д. Б., Афанасьев В. В., Верещагина Н. В., Шелоумов А. М., Бовина М. А., Беспалова Н. Б. Рудяк К. Б.– 14 с.
7. Iijima M. et al. Effect of structure of cationic dispersants on stability of carbon black nanoparticles and further processability through layer-by-layer surface modification // Chem Eng Sci. 2013. Vol. 85. P. 30–37.
8. Разработка технологии изготовления депрессорных прокладок с композицией, улучшающей свойства дизельного топлива, полученного на основе газового конденсата / Р. Н. Ражабов, С. Ф. Фозилов, А. А. Фазилов [и др.] // Universum: технические науки. – 2022. – № 11. – С. 61-64.
9. Патент № 2129587 Российская Федерация МПК C10L 1/18 (1995.01) C10L 1/22 (1995.01). Состав жидкого топлива и концентрат присадок : № 95113443/04 : заявл. 21.10.1993 : опубл. 27.04.1999 / Брайен Уильям Дэвис (GB), Кеннет Льюкас (GB), Аллессандро Ломбарди (GB) – 20 с.

Научный руководитель: Рудко Вячеслав Алексеевич, к.т.н., исполнительный директор НЦ «Переработки ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Боженко Екатерина Александровна*

Зубков Иван Николаевич

Пономарев Денис Алексеевич

Яковенко Роман Евгеньевич

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова,
Новочеркасск, Россия,*** bogenkoekaterina@mail.ru*

Синтез Фишера-Тропша в 3D напечатанном стальном реакторе

Аннотация. В работе рассматривается инновационный подход к изготовлению микроканальных реакторов (МКР) синтеза Фишера-Тропша с целью интенсификации теплообмена. МКР обладают большей поверхностью теплообмена по сравнению с трубчатыми реакторами синтеза ФТ. Представлены результаты испытаний микроканального стального реактора, изготовленного с применением аддитивных технологий, в процессе получения синтетических углеводородов (проточный режим, давление 2,0 МПа, температура 260 °С, отношение $H_2/CO = 2,0$, объемная скорость газа 10000 ч^{-1}) с использованием бифункционального кобальтового катализатора. Установлено, что одним из ключевых преимуществ МКР является высокая производительность по C_{5+} , что указывает на способность микроканального реактора работать при высокой нагрузке по газу, обеспечивая при этом стабильный выход целевых продуктов.

Ключевые слова: микроканальный реактор, синтез Фишера-Тропша, кобальтовый катализатор, аддитивные технологии, 3D-печать.

Ekaterina A. Bozhenko*

Ivan N. Zubkov

Denis A. Ponomarev

Roman E. Yakovenko

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia*** bogenkoekaterina@mail.ru*

Fischer-Tropsch Synthesis in a 3D Printed Steel Reactor

Abstract. The paper considers an innovative approach to the fabrication of microchannel reactors (MCR) for Fischer-Tropsch synthesis with the aim of heat transfer intensification. MCRs have a larger heat exchange surface compared to tubular reactors for FT synthesis. The paper presents the results of testing a microchannel steel reactor manufactured using additive technologies in the process of obtaining synthetic hydrocarbons (flow mode, pressure 2.0 MPa, temperature 260 °C, H_2/CO ratio = 2.0, gas space velocity 10000 h^{-1}) using a bifunctional cobalt catalyst. It has been established that one of the key advantages of MCRs is high productivity for C_{5+} , which indicates the ability of the microchannel reactor to operate at a high gas load, while providing a stable yield of target products.

Keywords: microchannel reactor, Fischer-Tropsch synthesis, cobalt catalyst, additive manufacturing, 3D printing.

В условиях глобального изменения климата и истощения традиционных источников углеводородов поиск устойчивых и экологически чистых альтернатив топлив и углеводородного сырья становится все более важным. Синтетические углеводороды, получаемые из приборных газов или возобновляемой биомассы, являются одним из наиболее перспективных решений, способных не только удовлетворить потребности энергетической и химической промышленности, но и сократить выбросы парниковых газов. Синтез углеводородов из CO и H_2 , известный как синтез Фишера-Тропша (ФТ),

открывает возможности для получения широкого спектра высококачественных синтетических углеводородов, таких как бензиновое, дизельное и реактивное топлива, парафиновые масла, парафины и церезины [1].

Наиболее значимой из проблем в случае промышленной реализации синтеза ФТ, является необходимость эффективного теплообмена, так процесс идет с выделением большого количества тепла (165 кДж/моль СО). Управление температурой и теплом реакции является критически важным аспектом для достижения высокой эффективности процесса и стабильности работы реактора. Это связано с тем, что, во-первых, при перегреве реакционной среды возрастает вероятность нежелательных побочных реакций, таких как образование метана и низкомолекулярных углеводородов, что снижает селективность по отношению к жидким углеводородам. Во-вторых, локальное повышение температуры может привести к агломерации частиц активного компонента катализатора (Co, Fe), его зауглероживанию, снижению механической прочности и полной его деактивации.

Одним из способов, позволяющих интенсифицировать теплоотвод из зоны реакции, является использование микроканальных реакторов (МКР). Их конструкция, отличающаяся большой площадью поверхности для теплообмена, позволяет проводить процесс при более высоких нагрузках, оперативно отводить избыток тепла и поддерживать равномерную температуру в зоне реакции. Кроме того, использование микроканалов может способствовать более равномерному распределению потока реагентов и оптимизировать условия реакции, что повышает общую селективность и производительность процесса. [2, 3]. Высокое отношение поверхности к объему МКР обеспечивает оптимальный контроль температуры, что имеет решающее значение для синтеза ФТ. Однако изготовление микроканальных реакторов традиционными методами является сложным и трудоемким процессом. Ключевым решением является применение аддитивных технологий при изготовлении таких реакторов. 3D-печать позволяет изготавливать уникальные прототипы реакторов со сложными внутренними структурами, оптимизированные под определенные процессы. Аддитивные технологии не только упрощают изготовление реактора, но и открывает новые возможности для оптимизации конструкций реакторов для дальнейшего улучшения теплопередачи, масштабируемости и общей производительности в нефтехимических процессах.

Нами разработана 3D-модель микроканального реактора, представляющего собой кожухотрубчатый аппарат с пятью реакционными микроканалами и контуром охлаждения. Реактор был изготовлен из стали марки 316L с использованием технологии 3D-печати (технология селективного лазерного плавления (SLM), материал печати – стальной порошок) совместно с ЗАО «БИОГРАД», г. Санкт-Петербург.

Бифункциональный кобальтовый катализатор синтеза углеводородов, разработанный в НИИ «Нанотехнологии и новые материалы» был изготовлен согласно способу, описанному в работе [4]. Катализатор был измельчен до фракции 0,315-0,160 мм загружен в каналы реактора, масса загруженного катализатора 0,51 гр. (объем катализатора $V_{\text{кат.}} = 1,3 \text{ см}^3$). Предварительно перед загрузкой в реактор катализатор был обработан по методике ROR, подробно описанной в работе [5].

Испытания проводились в проточном режиме при давлении $P = 2,0 \text{ МПа}$, температуре $t = 260 \text{ }^\circ\text{C}$, отношении $\text{H}_2/\text{CO} = 2,0$ и объемной скорости газа $\text{ОСГ} = 10000 \text{ ч}^{-1}$. Данные, полученные в ходе испытаний (Таблица 1), сравнивались с результатами, полученными при работе стандартного трубчатого реактора в проточном режиме при $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 2,0 \text{ МПа}$, $\text{ОСГ} = 1000 \text{ ч}^{-1}$. Трубчатый реактор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, изготовленный из нержавеющей легированной стали марки 08X18H10, с внутренним диаметром 16 мм.

Установлено, что степень превращения СО в микроканальном реакторе значительно ниже, чем в трубчатом реакторе. Это связано с тем, что увеличение ОСГ приводит к снижению времени контакта реагентов с катализатором, что уменьшает степень превращения. Селективность по углеводородам C_{5+} для трубчатого реактора (72,8 %) выше по сравнению с микроканальным (59,5 % при ОСГ = 10000 ч⁻¹), Производительность по C_{5+} в микроканальном реакторе при ОСГ=10000 ч⁻¹ составляет 268,8 г/(м³_{кат}·ч), что значительно выше, чем в трубчатом реакторе (130,3 г/(м³_{кат}·ч) при ОСГ=1000 ч⁻¹). Это указывает на способность микроканального реактора работать при высоких объемных скоростях газа, обеспечивая при этом стабильный выход целевых продуктов.

Таблица 1

Результаты испытаний МКР в синтезе Фишера-Тропша

Тип реактора	ОСГ, ч ⁻¹	Степень превращения СО, %	Селективность, %				Производительность по C_{5+} , г/(м ³ _{кат} ·ч)
			CH ₄	C ₂ -C ₄	C ₅₊	CO ₂	
Микроканальный	10000	21,8	22,7	16,7	59,5	1,1	268,8
Трубчатый*	1000	85,9	13,8	8,2	72,8	3,3	130,3

* – испытания в трубчатом реакторе (t = 250 °С, P = 2,0 МПа, ОСГ = 1000 ч⁻¹)

Микроканальный реактор демонстрирует высокий выход н-алканов ряда C₁₁ и выше и низкое соотношение олефинов к парафинам, что делает его предпочтительным для производства синтетического дизельного топлива и высокомолекулярных парафинов. В свою очередь, трубчатый реактор более склонен к образованию легких и разветвленных углеводородов (таблица 2).

Таблица 2

Состав продуктов синтеза углеводородов

Тип реактора	Группа	Содержание, % масс.			Сумма		о/п	изо/н
		C ₅ -C ₁₀	C ₁₁ -C ₁₈	C ₁₉ +				
Микроканальный	н-алканы	6,7	17,2	29,5	53,3	69,8	0,7	0,4
	изо-алканы	3,3	7,8	5,4	16,5			
	алкены	3,6	1,0	0,0	4,6	30,2		
	разв-алкены	16,5	8,8	0,3	25,6			
	Сумма	30,1	34,8	35,2	100,0			
Трубчатый*	н-алканы	12,3	7,2	1,1	20,6	46,7	2,3	1,14
	изо-алканы	14,2	10,6	1,3	26,1			
	алкены	9,0	0,5	0,1	9,6	53,3		
	разв-алкены	29,7	13,7	0,3	43,7			
	Сумма	65,2	32,0	2,8	100,0			

Микроканальный реактор продемонстрировал высокую селективность по линейным н-алканам в C₁₁-C₁₈ и C₁₉₊ фракциях, что делает его перспективным для производства синтетического дизельного топлива и восков. Более равномерное распределение температуры и улучшенный теплообмен способствуют снижению нежелательных побочных реакций и уменьшению образования метана (CH₄), что положительно сказывается на общем выходе целевых продуктов.

Таким образом, микроканальные реакторы, изготовленные методом аддитивного производства, представляют собой эффективное решение для синтеза Фишера-Тропша,

сочетающее в себе высокую производительность и гибкость в управлении тепловым режимом. Эти преимущества открывают возможности для масштабирования и промышленного применения микроканальных реакторов, что может повысить экономическую и экологическую эффективность процесса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания FENN-2024-0002 с использованием оборудования ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова.

Список литературы

1. Tugce N. Eran. Kinetics, catalyst design, and hydrodynamic analysis in Fischer–Tropsch synthesis: Fixed Bed vs Fluidized Bed Reactors / Tugce N. Eran, Jean Guyot, Daria C. Boffito, Gregory S. Patience // Chemical Engineering Journal, Vol.500. – 2024.
2. Michela Martinelli. An Overview of Fischer Tropsch Process: Catalysts, Reactors and XtL Processes / M. Martinelli etc. // Applied Catalysis A, General. – 2020.
3. Mohammad N. Fischer-Tropsch Studies in a 3D-Printed Stainless Steel Microchannel Microreactor Coated with Cobalt-based Bimetallic-MCM-41 Catalysts / Mohammad N, Abrokwhah RY, Stevens-Boyd RG., Aravamudhan S., Kuila D. // Catalysis Today. – 2020.
4. Yakovenko, R. E. Selective Synthesis of a Gasoline Fraction from CO and H₂ on a Co-SiO₂/ZSM-5/Al₂O₃/ Yakovenko, R. E., Narochnyi, G. B., Zubkov, I. N., Bozhenko, E. A., Kataria, Y. V., Svetogorov, R. D., Savost'yanov, A. P. // Catalysts, 13, 1314–2023. <https://doi.org/10.3390/catal13091314>.
5. Яковенко Р. Е. Разложение аммиака на Co-Al₂O₃/SiO₂ катализаторах: влияние способов восстановления кобальта / Яковенко Р. Е., Краснякова Т. В., Салиев А. Н., Светогоров Р. Д., Соромотин В. Н., Волик А. В., Савостьянов А. П., Митченко С. А. // Катализ в промышленности. 2024;24(5):25-32. <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2024-5-25-32>.

Научный руководитель: Яковенко Роман Евгеньевич, кандидат технических наук, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Волик Андрей Владимирович*
Салиев Алексей Николаевич
Савостьянов Александр Петрович
Яковенко Роман Евгеньевич

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, Новочеркасск, Россия
* Andron98and@mail.ru*

Синтез и разложение аммиака – эффективный способ хранения и транспортировки водорода

Аннотация. в рамках развития водородной энергетики предложено транспортировать и хранить водород в химически связанном состоянии в виде аммиака. Аммиак имеет наибольшее массовое содержание водорода в единице объема, а продукты его разложения не содержат вредных и экологически опасных соединений. В качестве катализатора разложения аммиака применяется разработанная композиция $\text{Co-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. Подобраны оптимальные режимы работы катализатора. Степень разложения достигает 95 % при температуре 550 °C.

Ключевые слова: водород, водородная энергетика, разложение аммиака, катализатор разложения аммиака, катализатор $\text{Co-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

Andrey V. Volik*
Aleksey N. Saliev
Aleksandr P. Savostyanov
Roman E. Yakovenko

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia
* Andron98and@mail.ru*

Synthesis and decomposition of ammonia – an efficient way to store and transport hydrogen

Abstract. Within the framework of the development of hydrogen energy, it is proposed to transport and store hydrogen in a chemically bound state in the form of ammonia. Ammonia has the highest mass content of hydrogen per unit volume, and its decomposition products do not contain harmful and environmentally hazardous compounds. The developed composition $\text{Co-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ is used as a catalyst for the decomposition of ammonia. Optimal operating modes of the catalyst have been selected. The degree of decomposition reaches 95 % at a temperature of 550 °C.

Keywords: hydrogen, hydrogen energy, ammonia decomposition, ammonia decomposition catalyst, $\text{Co-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ catalyst.

Введение. Развитие водородной энергетики сопряжено с решением ряда проблем. На сегодняшний день основной является проблема хранения и транспортировки водорода. Существуют различные пути решения. Жидкофазное хранение водорода хорошая альтернатива методу компримирования, однако требует дополнительных энергетических затрат на работу криогенного оборудования, а к материалам для резервуаров хранения предъявляются особые требования по хладостойкости. Метод хранения водорода в металлгидридах характеризуется большей плотностью содержания водорода, чем в криогенных системах, однако такие металлгидридные аккумуляторы водорода имеют значительную массу и лимитированное время сорбции/десорбции водорода. Альтернативой перечисленным методам является хранение водорода в химически связанном состоянии. К таким средам относятся метанол, этанол, метан, пропан, бензин и т.д. Однако перспективным направлением является использование аммиака. Производство аммиака и его транспортировка хорошо освоены, он содержит 17,6 % масс. водорода, обладает наибольшим значением объемной плотности по водороду в сравнении с остальными носителями, его продукты разложения не содержат вредных и экологически опасных веществ [1, 2].

В качестве катализаторов разложения известны различные композиции на основе Ru, Fe, Co, Ni и т.д. В настоящее время наблюдается тенденция перехода от благородных

металлов к более доступным. В рамках исследования изучены характеристики катализаторов на основе железа, кобальта и никеля [3].

Методы. Катализатор $\text{Co-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ готовили методом пропитки носителя водным раствором нитрата кобальта и нитрата алюминия [4]. Промышленные катализаторы НИАП-03-01, НИАП-07-01 были предоставлены ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР». В качестве железного катализатора был выбран катализатор синтеза аммиака AmoMax 10 компании Clariant.

Для определения активности катализаторов была создана лабораторная проточная установка с интегральным реактором. Технологическая схема установки представлена на рисунке 1.

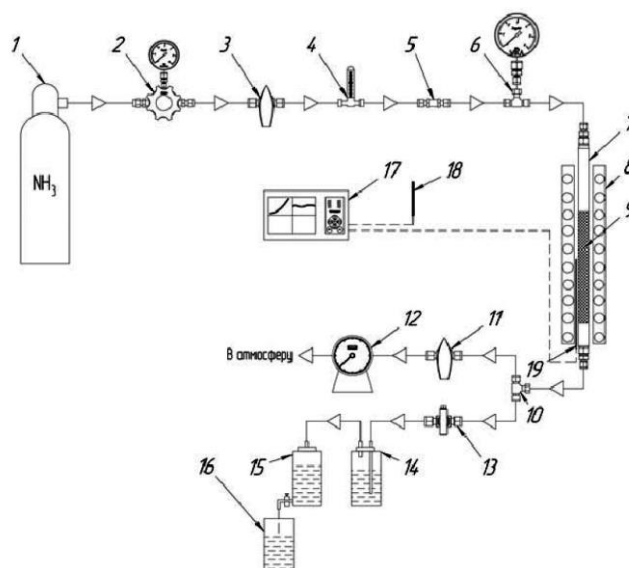


Рис. 1. Технологическая схема лабораторной установки разложения аммиака:
1 – газовый баллон с аммиаком; 2 – регулятор давления в системе; 3, 11, 13 – газовые краны; 4 – ротаметр;
5 – обратный клапан; 6 – манометр давления в системе; 7 – трубчатый реактор; 8 – электрическая печь;
9 – катализатор; 10 – тройник; 12 – газовые часы; 14 – склянка Дрекслея; 15 – аспиратор;
16 – мерная емкость; 17 – регулятор температуры «Термодат»; 18, 19 – термопары

Результаты. Результаты исследований каталитического разложения аммиака представлены на рисунке 2.

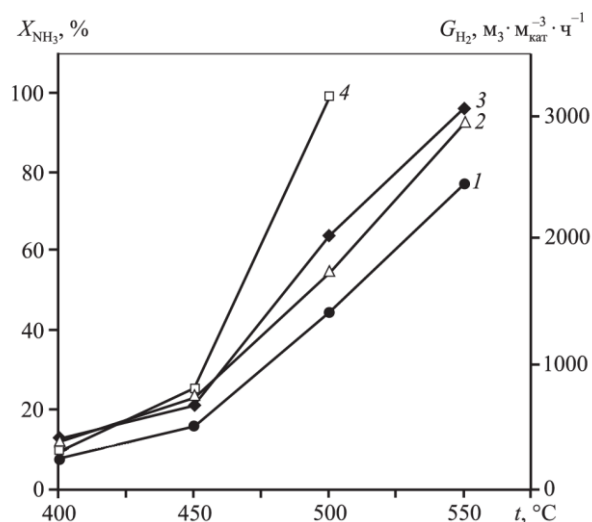


Рис. 2. Температурные зависимости конверсии аммиака (X_{NH_3}) и производительности по водороду (G_{H_2}) на катализаторах при ОСГ 3000 ч⁻¹:
1 – НИАП-03-01; 2 – НИАП-07-01; 3 – $\text{Co-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$; 5 – AmoMax 10

Все катализаторы, исследованные в настоящей работе, проявляют активность в реакции разложения аммиака. При увеличении температуры степень разложения аммиака и производительность по водороду увеличиваются. Активность катализаторов в исследованном температурном диапазоне увеличивается в последовательности НИАП-03-01 < НИАП-07-01 < Co-Al₂O₃/SiO₂ < AmoMax 10. Выявлено, что оптимальные условия работы для кобальтового катализатора следующие: объемная скорость газа 3000 ч⁻¹, температура 550 °С, давление 0,1 МПа. С точки зрения удельной каталитической активности катализатор на основе кобальта привлекательнее, чем массивный железный катализатор.

Заключение. Изучены каталитические и физико-химические характеристики Ni, Fe и Co катализаторов. Разработанный в НИИ «Нанотехнологии и новые материалы» Co-Al₂O₃/SiO₂ катализатор перспективен для промышленного применения в установках генерации водорода. Данный катализатор может быть использован в установках для генерации защитных атмосфер, в мало- и крупномасштабных генераторах водорода.

Список литературы

1. Тарасов Б. П., Лотоцкий М. В., Яртысь В. А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулялирования водорода // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 50. – №. 6. – С. 34–48.
2. Bell T. E., Torrente-Murciano L. H₂ production via ammonia decomposition using non-noble metal catalysts: A review // Topics in Catalysis. – 2016. – V. 59. – P. 1438–1457.
3. Яковенко Р. Е., Краснякова, Т. В., Дульнев, А. В., Салиев, А. Н., Шилов, М. А., Волик, А. В., Савостьянов А. П., Митченко, С. А. Оценка эффективности ряда промышленных отечественных катализаторов в реакции разложения аммиака // Катализ в промышленности. – 2023. – Т. 23. – № 3. – С. 32–42.
4. Яковенко Р. Е., Зубков И. Н., Нарочный Г. Б., Папета О. П., Денисов О. Д., Савостьянов А. П. Влияние промотирования Re и Al₂O₃ на стабильность работы кобальтовых катализаторов синтеза Фишера–Тропша // Кинетика и катализ. – 2020. – Т. 61. – №. 2. – С. 278–286.

Научный руководитель: Гасанов Бадрудин Гасанович, д.т.н, профессор каф. «Международные логистические системы и комплексы», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Влияние термообработки отработанной отбелочной глины на процесс ионного обмена

Аннотация. В работе изложены результаты исследования влияния термообработки отработанной отбелочной глины, полученной после ее использования на предприятии по производству растительных масел. Приведены данные рентгенофазового анализа термообработанной и исходной отбелочной глины, в результате которого выявлено присутствие в них таких глинистых минералов, как каолинит, монтмориллонит, калиевые полевые шпаты, пиррофиллит, кварц, арагонит. Описаны некоторые особенности каолинита. Отмечено, что глинистые минералы обладают способностью к катионному обмену за счет изоморфного замещения в тетраэдрах кристаллических решеток минералов. В ходе экспериментов выявлено, что термообработка глин приводит к их активации. Это подтверждено различиями катионного состава водных вытяжек, в которых содержание катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} оказалось выше в том случае, если глина подвергалась термообработке. При этом содержание ионов Ni^{2+} и Cu^{2+} было ниже в фильтратах термообработанных глин.

Ключевые слова: катионный состав, термообработка, активация, пористые сорбенты, отходы промышленности, ионный обмен.

Reshat R. Gafarov

*Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,
Belgorod, Russia, beldevid94@mail.ru*

The effect of heat treatment of spent bleach clay on the ion exchange process

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of heat treatment of used bleach clay obtained after its use at a plant for the production of vegetable oils. The data of X-ray phase analysis of heat-treated and initial bleached clay are presented, as a result of which the presence of clay minerals such as kaolinite, montmorillonite, potassium feldspar, pyrophyllite, quartz, aragonite is revealed in them. Some features of kaolinite and montmorillonite are described. It is noted that clay minerals have the ability to cation exchange due to isomorphic substitution in tetrahedra of crystal lattices of minerals. During the experiments, it was revealed that the heat treatment of clays leads to their activation. This is confirmed by differences in the cationic composition of aqueous extracts, in which the content of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} cations turned out to be higher if the clay was subjected to UV activation. At the same time, the content of Ni^{2+} and Cu^{2+} ions were lower in the filtrates of heat-treated clays.

Keywords: cationic composition, heat treatment, activation, porous sorbents, industrial waste, ion exchange.

Глинистые минеральные вещества и побочные продукты производства находят применение в качестве эффективных сорбентов при очистке сточных вод [1, 2]. Для оптимизации сорбционных свойств глины осуществляют ее модификацию. Существующие методы активации поверхности глинистых минералов подразумевают химические и физические воздействия, направленные на повышение их сорбционной емкости. Однако традиционные подходы могут приводить к образованию нежелательных отходов, что создает экологические проблемы.

Термическая обработка выступает перспективным методом активации глин. Усиление сорбционного действия термоактивированных глин объясняется ослаблением химических связей $\text{O} - \text{Me}$ в их кристаллической решетке и ростом емкости ионного обмена [3, 4].

Рентгенофазовое исследование термоактивированной отработанной отбеливающей глины (ООГ350) (рис. 1) позволило выявить наличие в ее составе различных глинистых минералов, таких как каолинит, палыгорскит, монтмориллонит и др.

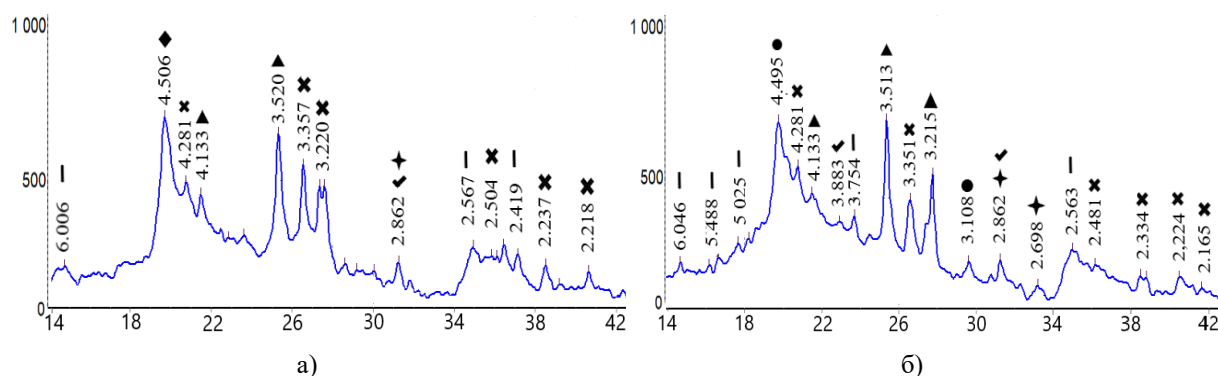


Рис. 1. Рентгеновские порошковые дифрактограммы а) исходного отхода; б) ООГ350
 ▲ – калиевые полевые шпаты, ● – пиррофиллит, ◆ – палыгорскит, ┐ – монтмориллонит,
 × – кварц, ✓ – каолинит, ✦ – арагонит, ⬆ – галлуазит

Эти минералы образуют двойные параллельные кремний-кислородные тетраэдрические решетки (обозначенные как слои Т), между которыми располагаются октаэдрические слои (обозначенные как слои О) с активными атомами кислорода. Связь между этими слоями осуществляется за счет сравнительно слабых ван-дер-ваальсовых сил. Пластинчатая форма кристаллической структуры данного минерала обуславливает легкое скольжение слоев относительно друг друга [5,6].

Каолинит, химическая формула которого $Al_4[Si_4O_{10}][OH]_8$ или $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, является основным компонентом многих глин. Каолинит, минерал, составляющий основу глины, обладает уникальной структурой, определяющей его свойства. В его кристаллической решетке кремнекислородные тетраэдры, соединенные тремя вершинами, образуют плоские слои. Четвертая вершина тетраэдра, кислородный атом, направлена вниз и участвует в формировании октаэдрического слоя гидроксидов алюминия.

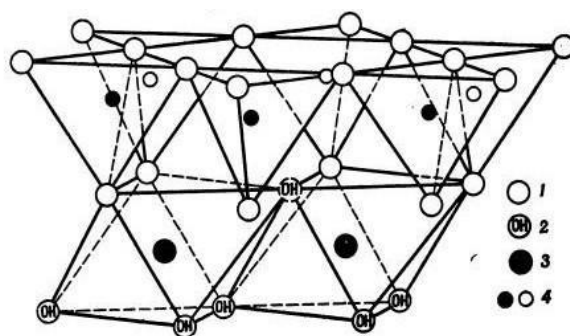


Рис. 2. Схема кристаллической решетки каолинита:
 1 – кислород; 2 – гидроксиды; 3 – алюминий; 4 – кремний.

Каолинит отличается двухслойной структурой, где отсутствуют изоморфные замещения. Это значит, что его базальные поверхности несут стабильный, неизменный нейтральный заряд. В октаэдрическом слое гидроксидов алюминия значительная часть атомов кислорода замещена гидроксильными группами, что способствует образованию прочных водородных связей между соседними пакетами [7, 8].

Как уже упоминалось, термообработка глин должна приводить к ослаблению связей О – Ме в кристаллической решетке, что вызывает выход части ионов металлов из кристаллической решетки и замены их на ионы, содержащиеся в растворе.

Для проверки данного предположения о влиянии термообработки на свойства глины, был проведен эксперимент, включающий следующие этапы:

1. Термообработка: Исходный отход отбелной глины подвергался обжигу при температуре 350 °С.

2. Приготовление суспензий: Как исходная, так и термообработанная глины были добавлены в дистиллированную воду, а также в модельные растворы, содержащие ионы Cu^{2+} и Ni^{2+} концентрацией 50 мг/дм³ или 1,72 мг-экв/дм³ для Ni^{2+} и 1,56 мг-экв/дм³ для Cu^{2+} .

3. Перемешивание и фильтрация: Суспензии тщательно перемешивались в течение 20 минут, после чего фильтровались.

4. Анализ фильтрата: в фильтрате определяли концентрации ионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также Cu^{2+} и Ni^{2+} методом атомно-абсорбционного анализа.

Среда для обработки	Катион, мг-экв/дм ³											
	Na^+		K^+		Ca^{2+}		Mg^{2+}		Ni^{2+}		Cu^{2+}	
	Исх	350 С°	Исх	350 С°	Исх	350 С°	Исх	350 С°	Исх	350 С°	Исх	350 С°
Вода	2,0	1,4	0,8	0,6	10,3	19,0	1,4	1,1	-	-	-	
Р-р, содержащий $[\text{Ni}^{2+}] = 1,72$ мг-экв/дм ³	1,7	1,3	0,5	0,5	7,2	13,5	0,6	0,7	1,1	0,4		
Р-р, содержащий $[\text{Cu}^{2+}] = 1,56$ мг-экв/дм ³	1,3	1,3	0,5	0,5	5,5	14	0,7	0,7			0,9	0,5

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что остаточная концентрация катионов Cu^{2+} и Ni^{2+} ниже в фильтратах для глины, подвергнутой термообработке при температуре 350 °С. Катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} являются основными межслоевыми катионами глинистых минералов. Эффект воздействия термообработки на отход отбелной глины, вероятно, вызван изменениями строения и свойств межслоевой дисперсионной среды глинистых минералов.

Таким образом, термообработка является эффективным методом активации глины, позволяющим повысить ее ионообменную емкость по отношению к ионам металлов. Этот процесс основан на разрыве химических связей в кристаллической решетке глины, что приводит к выходу ионов металлов в раствор и созданию новых активных центров, готовых к взаимодействию с другими ионами.

Список литературы

1. S. V. Svergzova, R. R. Gafarov, O. S. Zubkova. Changes in the Physicochemical and Sorption Properties of Bleaching Clay in the Course of Thermal Treatment // Colloid Journal. – 2024. – Vol. 86, No. 4. – P. 571–579. – DOI 10.1134/S1061933X24600490. – EDN VKQEYI.
2. И. Г. Шайхиев, С. В. Свергузова, Р. Р. Гафаров, Ж. А. Сапронова. Рациональное использование отхода маслоэкстракционного производства – отработанной отбелной глины // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28, № 7. – С. 14–19. – DOI 10.18412/1816-0395-2024-7-14-19. – EDN OHKHIB.

3. Т. А. Краснова, О. В. Беляева, М. П. Кирсанов, Н. Ю. Шишляникова. Влияние предварительной термической обработки активных углей на адсорбцию пиридина из водных растворов // Журнал физической химии. – 2004. – Т. 78, № 8. – С. 1531–1534. – EDN TXBMLN.
4. Н. А. Кидалов, Н. И. Габельченко, А. С. Адамова. Исследование способов активации глин и их влияние на свойства формовочных смесей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 7(230). – С. 41–45. – EDN RYCQGA.
5. Беспалова, М. А. Изменение технологических характеристик бентонитовых глин месторождений республики Хакасия при активации их карбонатом натрия / М. А. Беспалова, Е. П. Ворожцов, С. В. Бортников // Modern Science. – 2022. – № 1–1. – С. 26–30. – EDN TBCXHW.
6. Тилинин, М. С. Активация монтмориллонит содержащей глины воздействием сверхвысоко-частотного излучения / М. С. Тилинин, А. И. Везенцев // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 58–62. – DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_3_58. – EDN QVOXDX.
7. Б. Д. Тотурбиев, А. Б. Тотурбиев, М. Ш. Абдуллаев, Т. И. Абдулганиева. Использование ар-гиллитовых глин для производства керамзита // Горный журнал. – 2018. – № 3. – С. 58–62. – DOI 10.17580/gzh.2018.03.09. – EDN YWEMXQ.
8. Гришин, И. А. Улучшение качества огнеупорных глин Кумакского месторождения / И. А. Гришин, К. В. Бурмистров, А. В. Соколовский // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 63–67. – DOI 10.17580/gzh.2017.12.12. – EDN TVWIBO.

Научный руководитель: Свергузова Светлана Васильевна, д.т.н., проф., Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия.

Влияние полимерной модификации сырья нефтяного кокса на свойства получаемого дистиллята

Аннотация. Проведен анализ свойств дистиллятных фракций, получаемых при коксовании модифицированного полимером декантированного тяжелого газойля каталитического крекинга с получением игольчатого кокса. Присутствие модификатора в сырье изменяет соотношение узких фракций в суммарном дистилляте и их углеводородный состав, что существенно сказывается на качественных характеристиках жидких продуктов замедленного коксования.

Ключевые слова: замедленное коксование, полимерные добавки, плотность, углеводородный состав, дистиллятные фракции, товарное топливо.

Ksenia Yu. Govkelevich
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, ksushevich0208@gmail.com

The effect of polymer modification of petroleum coke raw materials on the quality of the coking distillate

Abstract. The quality of the distillate fractions produced by coking decanted heavy catalytic cracking gas oil with the production of needle coke is investigated. The presence of a modifier in the raw material changes the fractional composition of distillate and its hydrocarbon composition, which significantly affects the qualitative characteristics of liquid products of delayed coking.

Keywords: delayed coking, polymer additives, density, hydrocarbon composition, distillate fractions, commercial fuel.

Применение технологии замедленного коксования декантированного тяжелого газойля каталитического крекинга с добавлением полимерных добавок, в частности полистирола, позволяет получить нефтяной кокс с улучшенной микроструктурой и обеспечить полезную утилизацию полимерных отходов [1]. Кроме того, применение модификатора оказывает существенное влияние на жидкие продукты коксования, изменяет их состав и физико-химические свойства.

В связи с увеличивающимся спросом на моторные топлива, а также активным внедрением процесса замедленного коксования в существующие мощности нефтеперерабатывающих заводов для увеличения глубины переработки нефти исследование свойств получаемых жидких продуктов коксования и изучение влияния состава сырья на показатели качества дистиллятных фракций является актуальной задачей.

В ходе исследования были определены основные физико-химические свойства и углеводородный состав дистиллятных фракций замедленного коксования, полученных из базового и модифицированного полимером тяжелого газойля каталитического крекинга [2]. Изучено влияние добавки модификатора в сырье коксования на качественные характеристики компонентов моторных топлив [3, 4].

Влияние модификатора на сырье коксования наиболее существенно проявляется для бензиновой фракции. Содержание бензиновой фракции в суммарном дистилляте увеличивается в два раза при сохранении высокого выхода кокса и легкого газойля. Для бензиновой фракции модифицированного сырья по сравнению с аналогичной фракцией немодифицированного тяжелого газойля каталитического крекинга характерны более высокая плотность и преобладание моноароматических углеводородов, в частности

этилбензола и толуола (таблица 1). Использование данной фракции в компаундировании бензинов будет ограничено, однако узкие фракции могут быть направлены на получение индивидуальных углеводородов.

Таблица 1

Плотностные характеристики и состав фракции нк – 180 °С

Показатель	Дистиллят 001 (декантоиль)	Дистиллят 002 (декантоиль + 10 % полистирола)
Углеводородный состав, % в т. ч.		
моноароматика	2,02	92,78
алканы	34,66	3,03
алкены	5,44	0,37
алкины	0,39	-
диены	0,66	-
циклоалканы	12,34	-
циклоалкены	1,08	-
изоалканы	34,28	0,92
остальное	9,17	2,89
Плотность, г/см³		
при 20 °С	0,7799	0,8297
при 15 °С	0,7835	0,8330

Список литературы

1. Патент № 2740500 Способ переработки полимерных отходов на установках замедленного коксования: № 2020114369: заявл. 22.04.2020: опубл. 14.01.2021 / Р. Р. Гималетдинов, М. Р. Усманов, И. Б. Подвинцев, Ф. Р. Зейналов, С. Ф. Валеев, М. В. Железнов; заявитель, патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ЛУКОЙЛ-Нижегородниинепфтепроект». – 8 с.
2. Патент № 2753008. Способ получения нефтяного игольчатого кокса: № 2020138863: заявл. 27.11.2020: опубл. 11.08.2021 / Н. К. Кондрашева, Р. Р. Габдулхаков, Д. О. Кондрашев, В. А. Рудко; заявитель, патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 8 с.
3. Красникова, О. В. Карбонизация каменноугольных и нефтяных пеков, модифицированных термообработкой полистиролом / О. В. Красникова, Е. И. Мандриков, Ю. А. Диковинкова // Химия и химическая технология. – 2012. – № 6. – С. 41–44.
4. Мирзаев, С. С. Исследование свойств сырья и продуктов процесса замедленного коксования и производства нефтяных коксов. / С. С. Мирзаев, Д. З. Тешаев // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технологии» (Курск, 27 декабря 2013) / [ответственный редактор А. А. Горохов]. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2013. – Т. 1. – С. 237–242.

Научный руководитель: *Габдулхаков Ренат Раилевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научного центра «Переработки минеральных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Синтез биодобавок из отработанных масел для получения дизельного топлива с улучшенными экологическими свойствами

Аннотация. Одним из возможных решений насущной проблемы роста выбросов парниковых газов является переход на возобновляемые источники энергии, примером которого служит смесевое дизельного топлива, соответствующего улучшенным экологическим стандартам. Биодобавка к данному топливу представляет собой метиловые эфиры жирных кислот, получаемые реакцией переэтерификации растительных масел или животных жиров с низкомолекулярными спиртами в присутствии катализатора. Основным недостатком представленной технологии является более высокая стоимость продукта по сравнению с дизельным топливом. Решением может служить использование отработанных масел в качестве сырья для производства биодобавки, поскольку оно обладает меньшей стоимостью, по сравнению с растительными маслами. Эффективность синтеза обеспечивается тем, что добавка, полученная из отработанного сырья, содержит на 6,36 % больше сложных эфиров по сравнению с аналогичной биодобавкой из подсолнечного масла.

Ключевые слова: биодизельное топливо, экологически чистое дизельное топливо, отработанные масла, биодобавка, эфиры жирных кислот, переэтерификация.

Anzhelika M. Eremeeva¹

Anastasia R. Marinets²

¹ Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Geoecology,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

² Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, marinets_ar@mail.ru

Synthesis of bioadditives from waste oils to produce diesel fuel with improved environmental properties

Abstract. One possible solution to the pressing problem of rising greenhouse gas emissions is the transition to renewable energy sources, an example of which is blended diesel fuel that meets improved environmental standards. The bioadditive to this fuel is methyl esters of fatty acids obtained by the transesterification reaction of vegetable oils or animal fats with low-molecular alcohols in the presence of an alkaline or acid catalyst. The main disadvantage of the presented technology is the higher cost of the product compared to diesel fuel. The solution can be the use of waste oils as a raw material for the production of the bioadditive, since it has a lower cost compared to vegetable oils. The efficiency of the synthesis is ensured by the fact that the additive obtained from waste raw materials contains 6.36 % more esters compared to a similar bioadditive from sunflower oil.

Keywords: biodiesel fuel, environmentally friendly diesel fuel, waste oils, bioadditive, fatty acid esters, transesterification.

Введение. В наше время нефтяное топливо является основным, несмотря на ограниченность традиционных источников энергии [1–3]. Использование органических топлив сопряжено с увеличением выбросов парниковых газов, что к 2100 году может привести к глобальному повышению температуры на 3–4 °С. Предотвратить катастрофическое потепление можно с помощью развития новых технологий и перехода на возобновляемые

источники энергии, например, на жидкое моторное биодизельное топливо, синтезируемое с помощью реакции переэтерификации растительных масел или животных жиров с низшими спиртами в присутствии различных катализаторов [4–6]. На практике чаще используются смеси дизельного топлива и биодобавки, состоящей из моноалкильных эфиров жирных кислот.

Однако представленная смесь обладает большей стоимостью по сравнению с нефтяными топливами. Актуальным решением может стать использование отработанных масел, обладающих меньшей стоимостью по сравнению с растительными маслами [7]. Кроме этого, утилизация переработанного масла создает значительные экологические и экономические проблемы с учетом объемов их образования. Неправильная переработка отработанных масел может привести к загрязнению почвы и воды, в то время как их переработка в биотопливо способна решить представленную проблему.

Цель исследования: получение и сравнение составов биодобавок на основе подсолнечного и отработанного масел.

Методы. Биодобавки получали реакцией переэтерификации масел со спиртом в присутствии кислотного катализатора при постоянном перемешивании и температуре порядка 70–75 °C [8].

Кинематическую вязкость определяли на вискозиметре ВПЖ-2 по ГОСТ 33-2003. Состав реагентов и продуктов определяли с помощью газовой хромато-масс-спектрометрии.

Результаты. Кинематическая вязкость биодобавок примерно в 20 раз меньше вязкости масел, из которых они получены.

В случае биодобавки из растительных масел значительно превышено содержание эфиров линолевой кислоты, нормируемых документом ГОСТ Р 53605-2009 (ЕН 14214:2003). Содержание эфиров в биодобавке из растительного масла на 6,36 % меньше, чем в добавке из отработанного масла. Кроме этого, содержание кислот в биодобавке на основе растительного сырья на 2,08 % больше, чем в продукте из отработанного.

Обсуждение. Переработка отработанного сырья в дизельное топливо с улучшенными экологическими свойствами является многообещающим путем развития возобновляемой энергетики. Сходство составов биодобавок, полученных из различных масел, делает это возможным. Результаты показывают, что представленный подход эффективен при разработке биотоплив, поскольку биодобавка, полученная из отработанных масел, лучше вписывается в требуемые стандарты по сравнению с биодобавкой, полученной из растительного масла. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями в данной области [9, 10].

Заключение. Успешный синтез биодобавок к дизельному топливу с улучшенными экологическими свойствами был достигнут с использованием как растительного (подсолнечного), так и отработанного масел. Результаты показывают, что биодобавка, полученная из отработанного масла, более полно соответствует техническим стандартам по сравнению с биодобавкой из растительного масла. Это говорит о том, что отработанные масла имеют потенциал стать перспективным источником энергии. Представленный подход может снизить затраты на производство биотоплив и способствовать переходу на возобновляемые источники энергии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Список литературы

1. Litvinenko V. S. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas. Resources. – 2020. – № 9. – <https://doi.org/10.3390/resources9050059>.
2. Bezergianni S., Chysilou L. P. Application of life-cycle assessment in biorefineries // Waste Biorefinery. Integrating Biorefineries for Waste Valorization. – 2020. – pp. 455–480. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818228-4.00017-4>.
3. Симанков В. С., Бучацкий П. Ю. Оценка эффективности вовлечения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в экобаланс региона // Вестник Адыгейского государственного университета. – 2012. – № 4 – С. 37.
4. Бoryчев С. Н., Шемякин А. В., Терентьев В. В., Иванов А. А. Анализ способов применения биологических видов топлива в дизельных двигателях // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2017. – № 3. – С. 84–87.
5. Руднев В. А., Маслов И. В., Елисеев В. В. Анализ возможности использования биотоплива из растительных масел // Актуальные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. – 2018. – С. 107–110.
6. Кучкина А. Ю., Сушик Н. Н. Источники сырья, методы и перспективы получения биодизельного топлива // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2014. – №7. – С. 14–42.
7. Zhang Y., Dube M. A., McLean D. D., Kates M. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis // Bioresource Technology. 2003. Vol. 90, no. 3. pp. 229–240. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00150-0).
8. Патент 2632671 С2. Способ получения биодизельного топлива алкиловых эфиров жирных кислот / Бакшаев Ю. В., Подопригора С. П., Анохина И. В. // Общество с ограниченной ответственностью «Дизель для агропрома» (ООО «Дизагро»). 2017.
9. Зернина И. А., Вольхин В. В. О возможности утилизации отработанного растительного масла путем переработки на биодизель // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2009. – № 10.
10. Кондрашева Н. К., Еремеева А. М. Производство биодизельного топлива из растительного сырья // Журнал Записки горного института. – 2023. – № 260. – С. 248.

Вклад авторов:

Еремеева Анжелика Михайловна: формулирование идеи и постановка задачи, ресурсное обеспечение исследования, редактирование текста статьи, составление выводов.

Маринец Анастасия Романовна: проведение исследования, выполнение опытов, обработка результатов, подготовка и создание черновика статьи.

Копейкин Максим Федорович*

Косолапова Софья Михайловна**

Рудко Вячеслав Алексеевич***

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

Санкт-Петербург, Россия,

** siouxsiee@mail.ru, ** sofya.k.97@mail.ru, *** rva1993@mail.ru*

Влияние бактерицидной присадки на микробиологический фон в судовых топливах с биокомпонентом

Аннотация. В данной работе было проведено экспериментальное исследование микробиологического фона чистого судового остаточного топлива (ТОС) и биокомпонента на базе отработанного растительного масла (ОРМ), а также их смеси с добавлением бактерицидной присадки. В результате было установлено, что биокомпонент в составе ТОС способствует увеличению роста бактерий. Эффективная концентрация биоцида в смеси ТОС и ОРМ, позволяющая уменьшить распространение микроорганизмов в два раза, составила 1000–1500 ppm.

Ключевые слова: биодизельное топливо, бактерицидная присадка, микроорганизмы, судовое остаточное топливо.

Maxim F. Kopeikin*

Sofia M. Kosolapova**

Vyacheslav A. Rudko***

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,

** siouxsiee@mail.ru, ** sofya.k.97@mail.ru, *** rva1993@mail.ru*

The influence of bactericidal additive on the microbiological background in marine fuels with a biocomponent

Abstract. In this work, an experimental study of the microbiological background of pure marine residual fuel (MRF) and a biocomponent based on waste vegetable oil (WVO), as well as their mixture with the addition of a bactericidal additive, was conducted. As a result, it was found that the biocomponent in the MRF contributes to an increase in bacterial growth. The effective concentration of the biocide in the MRF and WVO mixture, which made it possible to reduce the spread of microorganisms by half, was 1000–1500 ppm.

Keywords: biofuel, biodiesel, transesterification, sunflower oil, rapeseed oil, waste vegetable oil.

Вовлечение биокомпонентов в традиционные нефтяные топлива по-прежнему остается наиболее предпочтительным способом увеличения их экологичности и снижения потребления нефтепродуктов, получаемых из ископаемых источников. При сгорании таких топлив образуется меньше твердых частиц, полиароматических углеводородов, диоксида серы, оксида углерода, альдегидов и кетонов, чем при использовании чистого ископаемого топлива, что делает их менее вредоносными для человека и окружающей среды [1, 2].

Наиболее широко в энергетической отрасли применяется компонент биодизельного топлива, получаемый из растительных масел, животного жира и биомассы микроводорослей. В его состав как правило входят моноалкиловые эфиры жирных кислот [3, 4]. В последние годы активно развивается вовлечение биокомпонентов в судовые остаточные топлива. В 2023 году ООО «Газпромнефть Марин Бункер» произвела первую в России бункеровку морского транспорта судовым топливом с добавлением биокомпонента – отработанного растительного масла. Изменение в политике транспортных компаний обусловлено принятым в 2020 году решением Международной морской организации (ИМО)

о снижении максимального допустимого количества серы в топливе до 0,5 % и сокращении выбросов парниковых газов до 50 %.

Разработка биотопливных смесей служит решением поставленной задачи, однако для реализации данного решения важно учитывать сопутствующие проблемы, связанные с эксплуатацией биотоплив. Одной из таких проблем является коррозия топливной системы и загрязнение продуктами жизнедеятельности микроорганизмов вследствие их роста и распространения в топливе в процессе его хранения и транспортировки [5]. Чувствительность биодизельного топлива к содержащимся в нем микроорганизмам обусловлена его химическим составом и эксплуатационными свойствами. Так, например, биотопливо обладает хорошей биоразлагаемостью, что с одной стороны делает его экологически безопасным, но в то же время способствует развитию микроорганизмов в среде биотопливных смесей по сравнению с чистым нефтяным топливом [6, 7].

Для предотвращения роста микроорганизмов в среде биодизельного топлива используются бактерицидные присадки (биоциды). Биоциды представляют собой химические вещества или микроорганизмы, предназначенные для борьбы с вредными и болезнетворными организмами. В основе биоцидов лежат вещества, которые могут препятствовать жизнедеятельности биологических организмов. Биоциды можно разделить на несколько групп: пестициды, альгициды, фунгициды, гербициды, инсектициды, акарициды, зооциды и другие [8]. Результативность бактерицидного средства определяется различными видами микроорганизмов, на которые оно направлено. В частности, изотиазолиноны изначально проявляют свои биостатические свойства, вызывая потерю тиоловой группы (SH), которая связывает полимерные цепи белков, важных для клеточной структуры и функционирования [9]. В отношении содержания биоцидов в биодизельном топливе, которые уже являются загрязненными системами, рекомендуется использовать концентрацию 1000 ppm. В качестве альтернативы можно использовать дозировку 100 ppm, 200 ppm или 400 ppm [9].

Чтобы изучить, как биоциды воздействуют на микроорганизмы в составе топлив, ученые применяли различные методы, однако большинство исследовательских работ направлено на уменьшение микробиологического фона в биодизельных топливах [10]. В связи с появлением биотопливных смесей в сфере морского транспорта, в настоящее время обостряется необходимость в подборе правильных бактерицидных присадок для предотвращения роста микроорганизмов в остаточных судовых топливах.

Таким образом, цель данной работы заключалась в исследовании влияния бактерицидной присадки на микробиологический фон в смеси остаточного судового с биокомпонентом.

В качестве материалов исследования использовались остаточное судовое топливо (ТОС), отработанное растительное масло (ОРМ) и присадка-биоцид, представленная суспензией ПАВ в органическом растворителе. Для приготовления смеси биосудового топлива в ТОС добавляли 10 % ОРМ. Были приготовлены смеси ТОС, ОРМ и ТОС+ОРМ с вовлечением присадки биоцида в количестве 100, 500, 1000 и 1500 ppm.

Микробиологический фон в испытуемых образцах определяли по стандарту IP 385 «Определение содержания жизнеспособных аэробных микроорганизмов в топливах и топливных компонентах, выкипающих ниже 390 °С». Сущность метода заключается в фильтрации в стерильных условиях через мембранные фильтры известного объема топлива. Жизнеспособные микроорганизмы, собранные на фильтрах, испытывают путем помещения фильтров непосредственно на питательную среду (агар). После инкубации в течение 3 и 5 суток подсчитывают число колоний образующих единиц (КОЕ), развившихся на поверхности контакта мембранного фильтра с питательной средой.

Исходя из результата подсчета число жизнеспособных бактерий и грибов в топливе рассчитывается как количество КОЕ на литр образца по формуле (1):

$$N = \frac{CC \times 1000}{V} \quad (1)$$

где СС – количество посчитанных колоний, шт.; V – объем фильтрованного образца, мл.

Первичные результаты показали, что микробиологический фон всех образцов находится в допустимых пределах менее 50 000 КОЕ/л. При этом в образцах, содержащих ТОС, не было обнаружено роста КОЕ грибов в установленный гостом период, из чего можно сделать вывод о том, что ТОС ингибирует развитие грибных мицелиев.

Результаты анализа бактериального фона образцов ТОС, ОРМ и ТОС+ОРМ представлены в таблице (1).

Таблица 1

Результаты измерения бактериального фона в исходных образцах

Параметр	ОРМ		ТОС		ТОС+ОРМ	
	3 сут	5 сут	3 сут	5 сут	3 сут	5 сут
Грибы, КОЕ/л	320	520	Отсутствие роста			
Бактерии, КОЕ/л	3 200	20 000	4 000	9 840	3 700	17 500
Итого:	3 520	20 520	4 000	9 840	3 700	17 500

Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что добавление ОРМ в судовое остаточное топливо повлияло на увеличение количества колоний образующих единиц на 5-е сутки инкубации, что свидетельствует о целесообразности применения превентивных мер подавления роста микроорганизмов в среде биосудового топлива. Результаты анализа бактериального фона образцов ТОС, ОРМ и ТОС+ОРМ с добавлением бактерицидной присадки представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерения бактериального фона в компонентах биосудового топлива с бактерицидной присадкой, КОЕ/л

Концентрация биоцида, ppm	ОРМ				ТОС		ТОС+ОРМ	
	Грибы, КОЕ/л		Бактерии, КОЕ/Л		Бактерии, КОЕ/Л			
	3 сут	5 сут	3 сут	5 сут	3 сут	5 сут	3 сут	5 сут
100	40	120	4 000	6 000	40	2 000	5 400	11 200
500	0	80	2 800	5 600	0	2 000	2 400	8 000
1 000	0	0	3 000	6 000	0	4 000	2 000	7 600
1 500	0	0	0	280	0	4 000	2 000	6 800

Добавление бактерицидной присадки в образцы привело к уменьшению развития колоний бактерий и грибов по прошествии трех и пяти суток инкубации. При добавлении 1000 и 1500 ppm присадки наблюдается существенное уменьшение числа колоний образующих единиц в образце смеси. Таким образом, для судового остаточного топлива с добавлением биокомпонента на базе отработанного растительного масла целесообразно добавлять 1000–1500 ppm биоцида.

Список литературы

1. Маккормик Р.Л. Влияние биодизеля на выбросы загрязняющих веществ и здоровье населения. *Inhal Toxicol.* 2007 Sep;19(12):1033-9. doi: 10.1080/08958370701533509. PMID: 17917919.
2. Патель А., Микес Ф., Матсакас Л. Обзор современных методов предварительной обработки, используемых для улучшения экстракции липидов из олеагиновых микроорганизмов. *Molecules.* 2018 Jun 28;23(7):1562. doi: 10.3390/molecules23071562. PMID: 29958398; PMCID: PMC6100488.
3. Пун Р., Ригден М., Эдмондс Н., Чарман Н., Лами С. Влияние 5-хлор-2-метил-4-изотиазолин-3-она и других биоцидов-кандидатов на альвеолярные макрофаги и клетки NR8383 крысы. *Arch Toxicol.* 2011 Nov;85(11):1419-27. doi: 10.1007/s00204-011-0689-y. Epub 2011 Mar 29. PMID: 21445588.
4. Гайларде К., Бенто Ф., Келли Дж. Микробное загрязнение хранящихся углеводородных топлив и его контроль. *Реиста де Микробиология*, 1999, т. 30, № 1, с. 3714–3721.
5. Стэмпе Б. В., Бояновский К. Л., Дрейк К. А., Нанн Х. С., Ллойд П. Ф., Флорид Дж. Г., Эммерих К. А., Нил А. Р., Крукс-Гудсон У. Дж., Стивенсон Б. С. Связь *in situ* размножения грибов и бактерий с микробиологической коррозией в резервуарах для хранения биодизеля B20. *Передняя микробиол.* 2020, 25 февраля; 11: 167. doi: 10.3389/fmicb.2020.00167. PMID: 32174893; PMCID: PMC7055474.
6. Комария Л. Н., Арита С., Рендана М., Рамаянти С., Суриани Н. Л., Эрисна Д. Микробное загрязнение смесей дизельного и биодизельного топлива в резервуаре для хранения; анализ морфологии колоний. *Гелион.* 9 апреля 2022 г.;8(4):e09264. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09264. PMID: 35464710; PMCID: PMC9018388.
7. да Сильва Г. С. и др. Взгляд на поведение микроорганизмов: Имитация разлива биодизеля (B100) в песчано-суглинистой почве // *Топливо.* – 2019. – Т. 235. – С. 589-594.
8. Бабаев Э. Р. Биоцидные присадки к топливам и маслам // *Нефтегазохимия.* 2022. № 4. С. 25–30.
9. Луз Г. В. С., Соуза БАСМ, Гуедес А. В., Баррето К. С., Бразил Л. М. Биоциды, используемые в качестве технологии для биодизеля, и их риски для окружающей среды и здоровья населения: обзор. *Молекулы.* 19 октября 2018 г.; 23 (10): 2698. doi: 10.3390/molecules23102698. PMID: 30347718; PMCID: PMC6222844.
10. Шлейхер Т., Веркмайстер Р., Расс В., Мейер-Питтрофф Р. Микробиологическая стабильность смесей биодизель-дизель. *Биоресурсные технологии.* Январь 2009 г.; 100(2):724-30. doi: 10.1016/j.biortech.2008.07.029. Epub, 14 сентября 2008 г. PMID: 18793842.

Научный руководитель: Пягай Игорь Николаевич, д.т.н., научный руководитель НЦ «Переработки ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Макаров Руслан Денисович***Югов Егор Данилович***Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,**Санкт-Петербург, Россия*** makaroff_03@mail.ru*

Пленкообразующие ингибированные составы на основе ПБВ

Аннотация. Эксплуатация металлических конструкций и оборудования требует обеспечение защиты от коррозии в агрессивных средах, таких как морская вода и почвы. Для создания антикоррозионного покрытия должного качества используют пленкообразующие ингибированные составы. Эффективными и недорогими являются составы на основе полимерно-битумного вяжущего. В данной работе были получены битумные составы различных рецептур, а также была определена их эффективность защиты от почвенной коррозии. Наилучшие результаты были получены введением в битум модификатора (СБС-полимера) и антикоррозионной присадки (С-150).

Ключевые слова: пленкообразующий ингибированный состав, грунтовая коррозия, битумные мастики, полимерно-битумные вяжущие, ингибиторы коррозии, коррозионные испытания.

Ruslan D. Makarov***Egor D. Yegov***Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,**St. Petersburg, Russia,*** makaroff_03@mail.ru*

Film-forming inhibited compositions based on PBB

Abstract. The operation of metal structures and equipment requires protection against corrosion in aggressive environments such as seawater and soils. To create an anticorrosive coating of proper quality, film-forming inhibited compositions are used. Compositions based on polymer-bitumen binder are effective and inexpensive. In this work, bitumen compositions of various formulations were obtained, and their effectiveness of protection against soil corrosion was determined. The best results were obtained by introducing a modifier (SBS polymer) and an anticorrosive additive (C-150) into bitumen.

Keywords: film-forming inhibited composition, soil corrosion, bitumen mastics, polymer-bitumen binders, corrosion inhibitors, corrosion tests.

Коррозия – важная проблема, возникающая при строительстве и эксплуатации металлических объектов и конструкций, таких как сваи, трубопроводы транспортировки нефти и газа. В основном стальные изделия подвергаются электрохимической коррозии. Самые разрушительные действия оказывают такие агрессивные среды, как морская вода и почва (грунтовые воды). Интенсивность коррозии в таких средах зависит от наличия сильных электролитов и кислот, от аэрации, то есть от содержания кислорода, и от жизнедеятельности бактерий (биологическая коррозия – ускорение коррозии за счет микроорганизмов, проживающих в среде). Для защиты конструкций и оборудования необходимо использовать специальные покрытия. Требуемую защиту от действия агрессивных сред могут обеспечить пленкообразующие ингибированные нефтяные составы (ПИНС). Кроме того, ПИНС имеют хорошие гидроизоляционные свойства.

Существуют различные варианты составов, но важна высокая эффективность против коррозии и дешевизна композиции. К пленкообразующим составам относят битумные мастики и их модификации, в частности, полимерно-битумные вяжущие (ПБВ). В настоящее время, наиболее распространенным способом модификации битумов является введение полимеров, например, стиролбутадиенстирола (СБС).

Актуальностью исследования является необходимость защиты конструкций и оборудования из металла от коррозионного действия агрессивных сред и стремление к получению недорогих антикоррозионных составов за счет использования ПБВ. Цель работы: получение и изучение оптимального соотношения компонентов ПИНС на основе битума, модифицированного СБС и присадкой С-150, определение эффективности коррозионной защиты в грунтовой воде в сравнении с ПИНС НГ-222А.

В работе поставлен ряд испытаний согласно ГОСТ 9.054-75 (метод 4). Коррозионные испытания проводились на стальных образцах, покрытых ПИНС, в растворе электролита, имитирующего грунтовые воды. Состав наносился на поверхность образцов окунанием в раствор ПИНС. Для оценки результатов эксперимента производились замеры массы и геометрических размеров стальных образцов. Масса образцов измерялась на аналитических весах с точностью до 0,0001 г, а размеры – штангенциркулем с точностью до 0,05 мм.

Основными параметрами для оценки защитных свойств являются толщина защитной пленки, глубинный показатель коррозии и защитный эффект. Толщина пленки вычисляется как отношение разницы масс образца, покрытого антикоррозионным составом, и образца до испытаний к площади поверхности образца и к плотности пленки. Данная величина позволяет оценить адгезионные свойства ПИНС. Глубинный показатель коррозии – средняя глубина коррозионного разрушения металла в единицу времени. Данный параметр является наиболее универсальным, так как является удельным, то есть определен на единицу площади и единицу времени. Это позволяет достаточно достоверно производить сравнение коррозионного действия в рамках испытаний. Защитный эффект – относительная величина, характеризующая эффективность ингибитора коррозии. Для определения защитного эффекта необходимо проводить испытания в присутствии образца-свидетеля.

Оценку защитных свойств определяли с доверительной вероятностью 95 %.

В отличие от ГОСТ 9.054-75 в раствор электролита вместо раствора карбоната натрия добавили раствор щавелевой кислотой, чтобы довести «грунтовую воду» до pH=4. Система такого состава является моделью кислых (торфяных и илистых) почв, в которых наблюдается высокая скорость коррозии.

В экспериментальных ПИНС в качестве пленкообразующего компонента использовался модифицированный битум БНД 70/100 (ГОСТ 33133-2014) с добавлением СБС и присадки С-150. За счет добавления СБС полимера увеличиваются адгезионные свойства, а также механическая и термическая стойкость, что способствует увеличению срока службы состава [1]. Присадка С-150 является раствором среднещелочного сульфоната кальция в минеральном масле. Данная присадка обладает хорошими антикоррозионными свойствами, считается, что действие присадки основано на образовании на поверхности металла защитной пленки за счет химического взаимодействия между металлом и сульфоантом [2].

В качестве растворителя использовалась смесь Нефраса С2-80/120 и Нефтяного Сольвента в соотношении 3:2. Такой состав растворителя обусловлен тем, что Нефрас С2-80/120 является недорогим растворителем органических соединений, а для более полного растворения высокомолекулярных соединений (в том числе СБС) используется Нефтяной Сольвент, состоящий на 50 % из ароматических соединений. Смесь растворителей составляет 50 % от всей массы экспериментального ПИНС.

Испытания проводили параллельно для экспериментального ПИНС и ПИНС НГ-222А. Так как ПИНС НГ-222А имеет достаточно большую толщину пленки равную (150 ± 30) мкм, было принято решение разбавить его Нефтяным Сольвентом в соотношении 3 части ПИНС НГ-222А на 1 часть Нефтяного Сольвента. Таким образом, получилось достичь толщины пленки для ПИНС НГ-222А равной (67 ± 8) мкм, что соизмеримо с пленкой экспериментального ПИНС. Средний глубинный показатель для ПИНС

НГ-222А составляет (57 ± 11) мм/год. В испытаниях использовался образец-свидетель, по которому определяли защитный эффект пленкообразующих ингибированных нефтяных составов, средний глубинный показатель для образца-свидетеля составляет 136 мм/год. Среднее время испытаний составляет 200 часов.

В работе были приготовлены 4 раствора с различным содержанием СБС полимера. Экспериментальные ПИНС имели следующие составы, % масс.: Нефрас С2-80/120 – 30 %, Нефтяной Сольвент – 20 %, композиция (битум БНД 70/100 + СБС полимер) – 50 %. Концентрация полимера в композиции варьировалась от 0 до 1,5 % масс.

Результаты коррозионных испытаний представлены в таблице 1. Наилучшие характеристики имеет состав с содержанием СБС 1,5 % масс. Такая концентрация позволяет обеспечить наиболее полное покрытие образца пленкой и снизить глубинный показатель коррозии при относительно невысоких экономических затратах. Эта композиция уже на данном этапе имеет хорошие характеристики в сравнении с ПИНС НГ-222А.

Таблица 1

Характеристика экспериментальных ПИНС на основе ПБВ

Показатель	Концентрация СБС полимера, % масс.			
	0	0,5	1,0	1,5
Толщина пленки b, мкм	38,1	41,1	45,1	49,6
Глубинный показатель коррозии П, мм/год	67,6	64,4	54,4	31,7
Защитный эффект z, %	47,1	49,8	63,5	63,9

Композиция с содержанием СБС 1,5 % (далее ПИНС №1) является наиболее предпочтительной для модификации путем добавления ингибитора коррозии С-150. Данное решение позволяет обеспечить не только высокую механическую защиту металлической поверхности за счет большой толщины пленки, но и высокую химическую защиту благодаря образованию химического соединения между ингибитором и поверхностью металла.

Концентрация присадки С-150, добавляемой к ПИНС №1, была выбрана 1 % масс. Композиция с полимером и присадкой (далее ПИНС №2) показала наилучшие результаты в коррозионных испытаниях из всех экспериментальных ПИНС. ПИНС № 2 имел следующий состав, % масс.: Нефрас С2-80/120 – 30 %, Нефтяной Сольвент – 20 %, битум БНД 70/100 – 47,5 %, СБС полимер – 1,5 %, присадка С-150 – 1 %. Сравнение экспериментальных и эталонного ПИНС представлено в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика лучших образцов ПИНС

Показатель	ПИНС №1	ПИНС №2	ПИНС НГ-222А
Толщина пленки b, мкм	49,6	65,6	67,3
Глубинный показатель коррозии П, мм/год	31,7	19,8	56,6
Защитный эффект z, %	63,9	82,3	60,3

Таким образом, экспериментальный состав (ПИНС №2) образует защитные пленки соизмеримые ПИНС НГ-222А и способен снижать скорость коррозии в агрессивных средах до 19,8 мм/год, что является хорошим показателем эффективности.

На основании полученных данных был сделан ряд выводов. Во-первых, модификация методики проведения коррозионных испытаний (ГОСТ 9.054-75) путем замены карбоната натрия на раствор щавелевой кислоты для снижения pH до 4 способствовало

с моделировать достаточно агрессивную среду (кислые почвы). Таким образом, возможно исследование защитных свойств ПИНС в более коррозионной среде, чем морская вода. Во-вторых, введение в битумный раствор полимера (СБС) способствует увеличению толщины защитной пленки, что приводит к повышению антикоррозионных свойств композиции. Должно эффекта возможно добиться даже при небольших концентрациях полимера. В-третьих, добавление антикоррозионных присадок в раствор ПБВ является хорошим способом повышения защитных свойств за счет частичного увеличения механической защиты (увеличение толщины пленки) и образования ингибиторной пленки на поверхности металла (повышение химической защиты). В-четвертых, в работе удалось получить недорогой, относительно известного ПИНС НГ-222А, ПИНС на основе ПБВ с присадками. Экспериментальная композиция состоит в основном из дешевых компонентов (битум, нефтяные растворители) с маленьким количеством дорогостоящих добавок (полимер и присадка), что позволяет добиться невысокой стоимости конечного продукта.

Выбор толщины пленки b от 38 до 67 мкм ($\Pi = 19,8 - 67$ мм/год) обусловлен необходимостью определения сравнительного глубинного показателя коррозии за 8-10 дней. Для обеспечения низкого глубинного показателя ($\Pi < 0,1$ мм/год) необходимо увеличить толщину пленки до 100-150 мкм путем корректировки состава композиции ПИНС.

Список литературы

1. Основные способы модификации битумов различными добавками / Х. Х. Ахмадова, Ж. Т. Хадисова, Л. Ш. Махмудова [и др.] // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2019. – Т. 15, № 3(17). – С. 42–56.
2. Антикоррозионные свойства сульфонатных присадок / Г. Аннаев, А. А. Ермак, Н. А. Советников, Б. М. Маммедов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1(49). – С. 107–111.

Научный руководитель: Саламатова Елена Валентиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий и переработки энергоносителей, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Численное моделирование и экспериментальное исследование двухступенчатого микрореактора с закрученными потоками жидкости

Аннотация. Двухступенчатый микрореактор с интенсивно закрученными потоками жидкости (микро-ВСА-2) позволяет эффективно проводить две последовательные реакции синтеза наноразмерных частиц. Качество микросмешения играет решающую роль в сверхбыстрых реакциях соосаждения и зависит как от удельной скорости диссипации энергии, так и от геометрии реактора, а так же способа подачи растворов. Подача растворов в микро-ВСА-2 может осуществляться разными способами: через верхний и/или нижний тангенциальный подводящий патрубок и через центральный (осевой) подводящий патрубок. Целью данной работы является экспериментальное и численное сравнение трех способов подачи жидких растворов в микро-ВСА-2 с целью найти условия наибольшей удельной скорости диссипации энергии.

Ключевые слова: микрореактор, закрученные потоки, микросмешение, удельная скорость диссипации энергии, йодид-иодатная реакция

Irina V. Makusheva*

Rufat Sh. Abiev

Saint Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia,

* makusheva2012@yandex.ru

Numerical simulation and experimental study of a two-stage microreactor with intensely swirling flows

Abstract. A two-stage microreactor with intensely swirling flows (MRISF-2) allows to perform effectively two subsequent reactions in synthesis of nanosized particles. Micromixing quality plays crucial role in ultrafast co-precipitation reactions, and depends both on the specific energy dissipation rate and on the geometry of the reactor as well as the solutions feeding manner. Solutions in MRISF-2 could be supplied by different ways: through the upper and/or lower tangential inlet pipes and through the central (axial) inlet pipe. This paper is aimed to compare experimentally and numerically three ways of liquid solutions feeding in MRISF-2 with objective to find the conditions of the highest specific energy dissipation rate.

Keywords: microreactor, swirling flows, micromixing, energy dissipation rate, iodide-iodate reaction technique.

В последнее время применение микроструктурированных реакторов в химической промышленности приобретает все более значительные масштабы. Основной отличительной характеристикой микрореакторного синтеза от традиционного «капельного» метода является подача растворов с сопоставимыми расходами. Использование микрореакторов в химической технологии позволяет повысить управляемость процессами переноса вещества и энергии, а за счет приближения к масштабу наноразмерных и субмикронных частиц удастся получать более узкое распределение частиц по размерам, а также избавиться от примесных фаз [1].

Целью данной работы стало сопоставление способов подачи жидкостей в двухступенчатый микрореактор с интенсивно закрученными потоками (далее микро-ВСА-2) [2].

Для выявления особенностей гидродинамики исследуемого аппарата было выполнено несколько серий численных расчетов с использованием программы COMSOL Multiphysics v. 5.6 (модуль Turbulent Flow, SST).

Экспериментальные исследования микро-ВСА-2 проводились с точки зрения двух аспектов: гидродинамики и качества микросмешения.

Определение качества микросмешения проводилось с использованием йодид-иодатной методики [3], которая основана на использовании системы конкурентных параллельных реакций.

Расчеты и эксперименты проводились для трех способов подачи (рисунок 1).

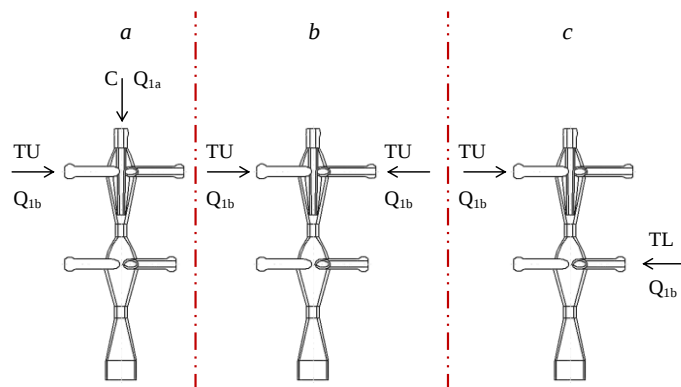


Рис. 1. Способы подачи жидкости в микро-ВСА-2

Результаты численного моделирования демонстрируют преобладающую диссипацию энергии в зоне горловины, что имеет принципиальное значение при конструировании микрореакторов. Удельная скорость диссипации энергии в зоне смешения достигает 48,9 кВт/кг для способа ТВ+Ц, 23,9 кВт/кг для способа ТВ+ТВ и 4,5 кВт для способа ТВ+ТН.

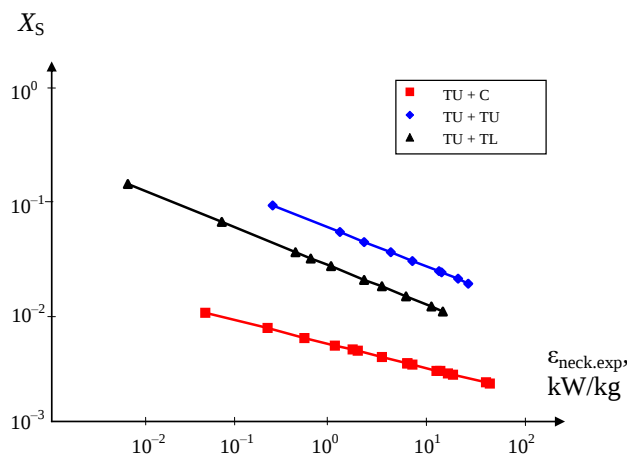


Рис. 2. Зависимости индекса сегрегации X_S от локальной удельной скорости диссипации энергии $\varepsilon_{\text{neck,exp}}$ (kW/kg) для трех изученных способов подачи жидкостей (результаты эксперимента): точки – экспериментальные данные, линии – результат аппроксимации по уравнению $X_S = A_2 \varepsilon_{\text{neck,exp}}^{\eta_2}$

Оптимальным способом подачи растворов в микро-ВСА2 является способ $\text{TU} + \text{C}$ – в этом случае наблюдаются наименьшие значения индекса сегрегации $X_{S(\text{TU} + \text{C})} = 1.89 \times 10^{-3} \dots 1.10 \times 10^{-2}$ при наибольших значениях удельной скорости диссипации энергии $\varepsilon_{(\text{TU} + \text{C})} = 2.30 \dots 41.25$ кВт/кг.

Из трех способов подачи растворов в микро-ВСА2 по качеству микросмешения наихудшим является способ $\text{TU} + \text{TU}$ ($X_{S\text{TU} + \text{TU}} = 7.17 \times 10^{-3} \dots 8.50 \times 10^{-2}$).

Это можно объяснить тем, что смешение происходит в объеме верхней камеры, а не в горловине, как при способе TU+C, а так же, тем, что оба потока имеют сравнительно низкую скорость, в отличие от способа TU+TL ($X_{STU+TL} = 1.31 \times 10^{-2} \dots 5.80 \times 10^{-2}$), где смешение так же происходит в камере микроаппарата, а не в горловине, но один из потоков приходит к зоне смешения, наделенный большей скоростью (рисунок 3).

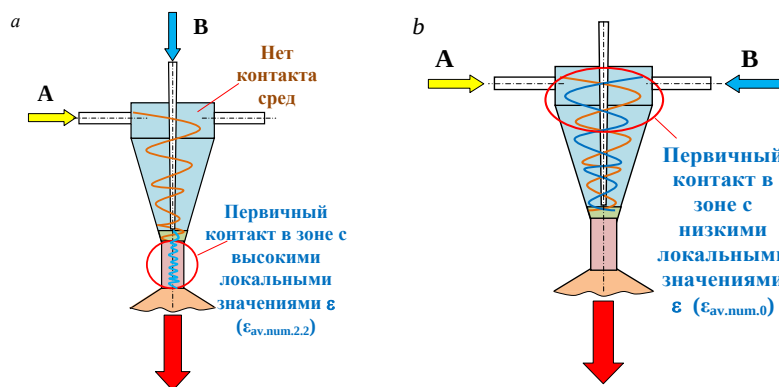


Рис. 3. Влияние удельной скорости диссипации энергии в зоне первичного контакта растворов на качество микросмешения

Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования потребляемой мощности (рисунок 4а), средней удельной скорости диссипации энергии по всему объему (рисунок 4б) и удельной скорости диссипации энергии в горловине (рисунок 4в) представлено на рисунке 4. Для сравнения использовалась скорость диссипации энергии в верхней горловине для методов TU+C и TU+TU, и в нижней горловине для метода TU+TL.

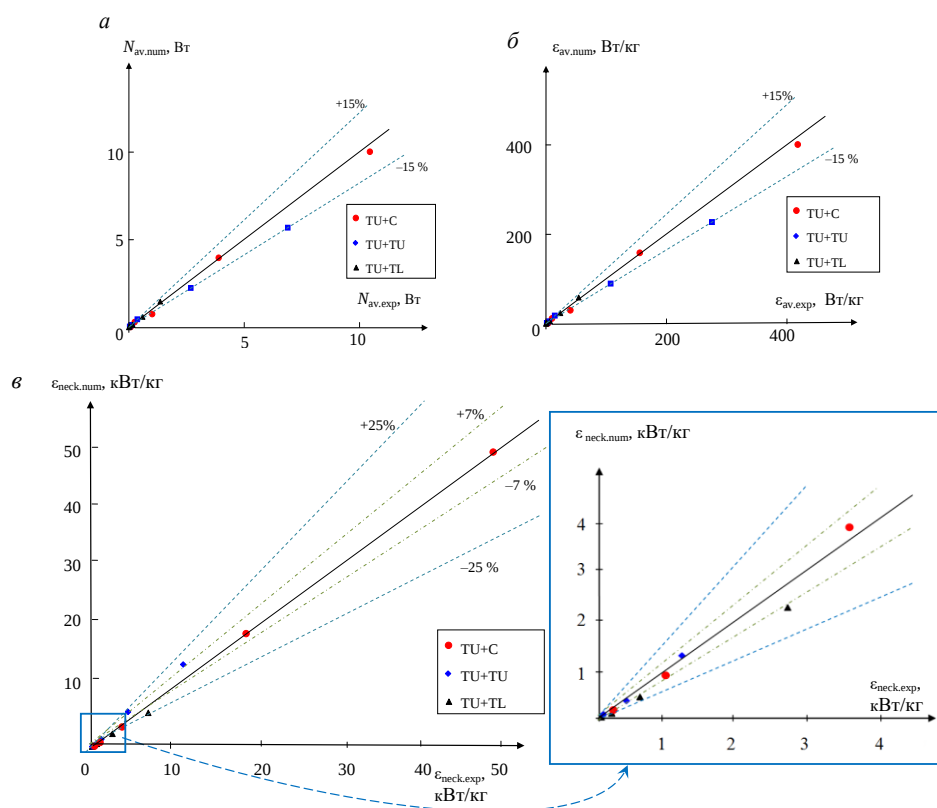


Рис. 4. Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования
а – рассеиваемая мощность; б – средняя удельная скорость диссипации энергии по всему объему аппарата; в – удельная скорость диссипации энергии в зоне горловины

По данным, полученным экспериментально в данной работе, был найден лучший способ подачи растворов в микро-ВСА-2, а именно метод TU+C. Этот метод обеспечивает максимальные значения удельной скорости диссипации энергии, что приводит к наилучшему качеству микросмешения [4].

Улучшенное микросмешение приводит к зародышеобразованию и образованию наночастиц без примесей, а из-за меньшего времени смешивания снижается риск агломерации [5].

Список литературы

1. Абиев Р. Ш., Макушева И. В. Влияние макро- и микросмешения на процессы растворного синтеза частиц оксидных материалов в микроаппаратах с интенсивно закрученными потоками // Теор. основы хим. технол. 2022. Т. 56. С. 137–147.
2. Абиев Р. Ш. Патент РФ №2748486. Микрореактор-смеситель многоступенчатый с закрученными потоками. Заявка: 2020111799, 20.03.2020. Опубликовано: 26.05.2021 Бюл. № 15.
3. Fournier C. A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency – experimental approach / C. Fournier, L. Falk, J. Villiermaux // Chem. Eng. Sci. – 1996. – V. 22. – P. 5053–5064.
4. R. S. Abiev *, I. V. Makusheva. Two-stage microreactor with intensely swirling flows: Comparison of three methods of liquids feeding// Chemical Engineering and Processing – Process Intensification V. 205, November 2024, 109991 DOI:10.1016/j.cep.2024.109991.
5. Olga V. Proskurina, Rufat Sh. Abiev, Vladimir N. Nevedomskiy. Influence of using different types of microreactors on the formation of nanocrystalline BiFeO₃// Наносистемы: физика, химия, математика, 2023, Т. 14, выпуск 1, 120–126 DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-1-120-126.

Научный руководитель: Абиев Руфат Шовкетович, доктор технических наук, заведующий кафедрой Оптимизации Химической и Биотехнологической Аппаратуры, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия.

Вовлечение промышленных отходов 3–5 классов опасности в технологию изготовления блочных катализаторов газоочистки

Аннотация. Большие объемы образования промышленных отходов требуют поиска эффективных технологий их переработки и вторичного использования. В исследовании оценена возможность использования отходов металлообработки, отходов глиноземных и алюминиевых производств, отработанных катализаторов, сорбентов и суспензий в производстве блочных катализаторов газоочистки. Рассматривались различные первичные носители: блоки с неорганизованными каналами на основе отходов металлообработки и блоки сотовой структуры. Получена покрывная суспензия путем смешения отработанного катализатора окисления СО и суспензии-отхода от производства катализаторов. Определены основные физико-химические свойства суспензий и их оксидных композиций. Готовые изделия испытаны в реакции окисления СО. Определены газодинамические характеристики готовых изделий. По результатам экспериментов образцы можно охарактеризовать как эффективные среднетемпературные катализаторы окисления СО.

Ключевые слова: переработка промышленных отходов 3–5 классов опасности, блочные катализаторы, газоочистка, окисление СО.

Ivan D. Nikitin
*St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University),
St. Petersburg, Russia, kuzmolovo2011@gmail.com*

The involvement of industrial waste of hazard classes 3–5 in the technology of manufacturing block catalysts for gas purification

Abstract. Large volumes of generated technological waste require the search for effective technologies for their processing and reuse. This study considers the possibility of using metalworking waste, waste from alumina and aluminum industries, spent catalysts, sorbents, and suspensions in the production of block catalysts for gas purification. Various primary media were considered, including blocks with disorganized channels based on metalworking waste and blocks of a cellular structure. A coating suspension was prepared by mixing a spent catalyst for CO oxidation and a slurry waste from the production of catalysts. The main physico-chemical properties of the suspensions and their oxide compositions were determined. The finished products were tested in the reaction of CO oxidation, and the gas dynamic characteristics were determined. Based on the experimental results, the samples were found to be effective medium-temperature catalysts for CO oxidation.

Keywords: processing of industrial waste of hazard classes 3–5, block catalysts, gas purification, CO oxidation process.

По данным Росстата на территории РФ к настоящему времени накоплено около 40 млрд. тонн твердых и жидких промышленных отходов, которые, по экспертным оценкам, занимают от 4 до 7 млн га земли. Ежегодный объем образования промышленных отходов составляет до 7,0 млрд. тонн. Более 90 % отходов, образующихся на предприятиях добывающего сектора экономики, появляются при добыче и переработке полезных ископаемых: карбонатов, природного гипса, гранитного щебня, песка и глины, фосфорных удобрений, глинозема, горючих сланцев, угля, нефти, газа, алмазов, оксидов железа, цветных и полиметаллических руд и др.

Большие объемы образующихся технологических отходов требуют поиска эффективных технологий их переработки и вторичного использования. Поэтому нами

была выдвинута гипотеза, о применимости таких отходов в качестве сырья для получения блочных катализаторов окисления СО.

Монооксид углерода в больших количествах выделяется химическими и тепло-энергетическими производствами, а также транспортом. С целью соблюдения экологических норм требуется доокисление СО до СО₂. Одним из путей интенсификации каталитических процессов газоочистки является замена гранулированных катализаторов на блочные катализаторы, что позволяет сократить объем реакторов почти в 2 раза и массу катализатора в единице объема до 4 раз [1].

Основной причиной, ограничивающей эффективное использование как гранулированных, так и блочных катализаторов окисления в условиях аварийной очистки воздуха изолированных помещений, является то, что для обеспечения низкой температуры зажигания и быстрого выхода на режим со степенью превращения (X) не менее 90 % в рабочем диапазоне температур необходимо высокое содержание каталитических контактов, содержащих благородные металлы, распределенных на поверхности пористого оксидного промежуточного покрытия [1, 2].

Снижение, а в некоторых случаях и полное исключение содержания благородных металлов, возможно за счет введения в структуру катализаторов композиций из соединений переходных металлов, которые содержатся в значительных (для катализаторного производства) количествах в различных техногенных отходах. Целью данной работы является оптимизация технологии изготовления патронированных блочных катализаторов с использованием промышленных отходов 3–5 классов опасности в качестве сырьевой базы.

Синтез блоков с тонкослойными оксидными покрытиями различного состава включает три основных этапа: приготовление блока (патронированного, сотового); получение суспензии на основе суспензии-отхода и отработанного катализатора; формирование оксидного покрытия на блоке путем нанесения суспензии и последующей термообработки [3].

В качестве сырья рассматривались: отходы металлообработки, отходы глиноземных и алюминиевых производств, отработанные катализаторы, сорбенты и суспензии. Они содержат в себе ценные компоненты в виде металлов, сплавов, оксидов переходных и редкоземельных металлов.

Использование отходов металлообработки при изготовлении патронированных блочных носителей взамен сотовых дало возможность увеличить поверхность контакта катализатора с реакционной средой за счет создания системы искривленных каналов.

Были изготовлены блоки из Al-стружки и стружки стали 12X18H10T. Запрессовка производилась с помощью гидравлического пресса при давлении 50 и 25 атм. Перед запрессовкой стружка взвешивалась. Была оценена доля свободного объема для каждого блока путем сравнения объема блока и собственного объема запрессованной стружки.

Дополнительно был изготовлен блочный носитель сотовой структуры методом скрутки гладкой и гофрированной фольги стали X23Ю5 толщиной 50 мкм с образованием цилиндрического блока с продольными сквозными каналами треугольного сечения. Он был заключен в обечайку диаметром 1 см.

Для всех блочных носителей было определено газодинамическое сопротивление до нанесения активного компонента и после. Определение производилось с использованием дифференциального микроманометра при расходе воздуха 5 л/мин.

При приготовлении покрывной суспензии в качестве активного компонента использовался тонкодисперсный порошок отработанного катализатора окисления СО и отходы суспензии от производства катализаторов. Компоненты смешивались на шаровой мельнице. Получена суспензия ($\rho=1,28$ г/см³, pH=3,95) состава (в % масс.): Al₂O₃ – 86,25, CeO₂ – 3,5, ZrO₂ – 5,0, CuO – 3,6, Co₃O₄ – 1,65 (по твердым остаткам).

Исследованы реологические характеристики суспензии (вискозиметр Реотест-2). По характеру зависимости вязкости от давления сделан вывод, что суспензия является аномально-вязкой жидкостью с непрочной пространственной структурой и является тиксотропной за счет значительного количества дисперсной фазы.

Были определены структурно-прочностные и кислотно-основные характеристики образуемого суспензией оксидного покрытия: кажущаяся плотность ($\delta_{\text{каж}}$, г/см³); суммарный объем пор (V_{Σ} , см³/г); прочность на раздавливание (P , МПа); удельная поверхность пористого слоя ($S_{\text{уд}}$, м²/г); функция кислотности поверхности (H_0).

На каждый из изготовленных блоков было нанесено 4 слоя покрывной суспензии с последующей термообработкой. Завершающей стадией является высокотемпературное прокаливание блока с нанесенным покрытием для перевода композита в оксидное состояние.

Каталитическую активность в реакции окисления СО определяли на динамической проточной установке при следующих условиях: объем образца $V_r = 4$ см³, объемный расход газовой смеси $V_{\text{ГВП}} = 1$ л/мин, относительная влажность потока 70 %, концентрация СО в смеси $C_{\text{СО}} = 0,44$ % об., время контакта $\tau = 0,24$ с. Концентрации СО в исходном потоке и после каталитического реактора определяли методом реакционной газовой хроматографии с использованием ГХ ЦВЕТ-100.

Таблица 1

Структурно-прочностные и кислотно-основные характеристики оксидного композита

$\delta_{\text{каж}}$, г/см ³	V_{Σ} , см ³ /г	P_0 , МПа	P_r , МПа	$S_{\text{уд}}$, м ² /г	H_0
0,88	0,31	23,0	66,5	118	8,9

Полученные зависимости степени превращения ($X(\text{CO})$, %) от температуры (T , °С) для изготовленных каталитических патронированных блоков из стружки в сравнении с блоком сотовой структуры из кондиционной фольги Х23Ю5 на рисунке 1.

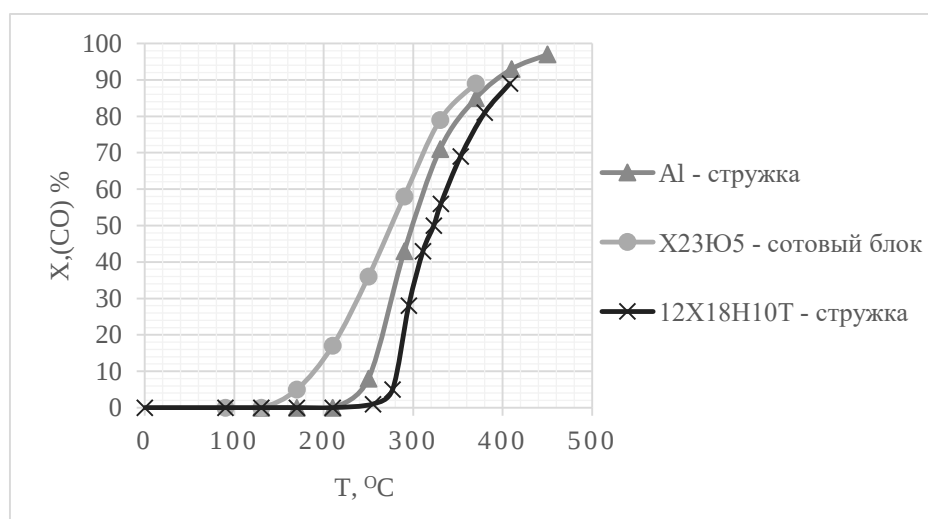


Рис. 1. Зависимости $X(\text{CO})$, % от T , °С для изготовленных блочных катализаторов

На данном этапе работы показано, что изготовленные катализаторы можно охарактеризовать как эффективные среднетемпературные катализаторы окисления СО за счет их высокой активности в диапазоне температур 350-450 °С. Можно отметить, что патронированные блоки имеют более выраженный рост степени превращения СО при повышении температуры чем блок сотовой структуры. Это связано с большим количеством нанесенной оксидной композиции на их поверхность.

Реологические характеристики покрывной суспензии позволили получить на разных носителях тонкослойное покрытие величиной 30–140 мг/см³ блока. Добавление отработанного катализатора в покрывную суспензию привело к увеличению прочностных характеристик оксидного композита.

За счет хаотично расположенных разветвленных каналов в патронированном блоке удалось нанести более толстый слой (в 2 раза и более) оксидной композиции в сравнении с блоком сотовой структуры за 4 нанесения.

В результате проведенных экспериментов можно заключить, что:

1. Разработана технология изготовления эффективных среднетемпературных блочных катализаторов окисления СО с использованием технологических отходов в качестве сырьевой базы.

2. Возможность использования твердых отходов металлообработки, отработанных катализаторов и суспензий для изготовления катализаторов окисления СО подтверждает выдвинутую гипотезу о их применимости.

3. Актуальна проблема снижения температуры зажигания патронированного блочного катализатора для расширения области его применения. Для ее решения необходимо рассмотреть варианты организации внутреннего пространства носителя так, чтобы увеличить время контакта газового потока с поверхностью катализатора.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №21-79-30029 «Разработка технологий переработки отходов 3–5 классов опасности с получением полезных продуктов».

Список литературы

1. Патент № 2614147 Российская Федерация, МПК В01J 37/025(2006.01), В01J 23/89 (2006.01). Способ приготовления катализатора и катализатор окисления СО: №2015153925 / Власов Е. А., Постнов А. Ю., Мальцева Н. В. – 21 с.

2. Патент № 2470708 Российская Федерация, МПК В01J 37/025(2006.01), В01J 21/04 (2006.01). Способ приготовления катализатора и катализатор окисления и очистки газов: №2011102737 / Мальцева Н. В., Власов Е. А., Постнов А. Ю. – 15 с.

3. Мальцева, Н. В. Блочные Al-Zr-Ce-катализаторы окисления водорода / Н. В. Мальцева, А. Ю. Постнов, С. А. Лаврищева, А. И. Кишин // Известия СПбГТИ(ТУ) – 2016 – № 32 – с. 28–33.

Научный руководитель: Постнов Аркадий Юрьевич, заведующий кафедрой общей химической технологии и катализа, кандидат технических наук, доцент, ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия.

Массообмен в двухфазном потоке в системе жидкость-жидкость в микрореакторе при снарядном режиме течения

Аннотация. В данном исследовании изучена эффективность массопереноса в условиях двухфазного снарядного режима течения, используя модельную систему вода – н-бутанол – янтарная кислота. Экспериментальная установка снабжена стеклянным микроканалом с соосно-сферическим диспергатором и внутренним диаметром 1,3 мм. Определены зависимости коэффициентов массопереноса от частоты циркуляции в капле сплошной фазы в снарядном режиме с высокими коэффициентами детерминации, что подтверждается результатами данного исследования. Эти данные подтверждают влияние вихрей Тейлора на интенсивность массопереноса, открывая новые перспективы для оптимизации условий в микрореакторах.

Ключевые слова: коэффициент массопереноса, массообмен, микросмешение, микрореактор, частота циркуляции, снарядный режим течения.

Veronika V. Romanova^{1, 2 *}

Rufat Sh. Abiev²

¹ Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia,

* venjo@mail.ru

Mass transfer by two-phase slug flow for liquid-liquid in a microreactor

Abstract. This study investigates the efficiency of mass transfer under two-phase slug flow conditions, using a model system of water, n-butanol, and succinic acid. The experimental setup is equipped with a glass microchannel featuring a co-axial spherical disperser with an internal diameter of 1.3 mm. Dependencies of mass transfer coefficients on the circulation frequency in the continuous phase droplet are determined in the slug flow regime, exhibiting high determination coefficients, which is confirmed by the results of this study. These data confirm the influence of Taylor vortices on the intensity of mass transfer, opening new perspectives for optimizing conditions in microreactors.

Keywords: mass transfer coefficient, mass transfer, micro mixing, microreactor, circulation frequency, slug flow regime.

Двухфазный снарядный режим в микроканалах проявил свою эффективность как метод интенсификации процессов. В ходе химических реакций, связанных с межфазным переносом, данный режим течения демонстрирует наивысшую эффективность. Это обусловлено наличием достаточного времени пребывания, высокой удельной поверхности и, что особенно важно, тейлоровской циркуляцией как в сплошной, так и в дисперсной фазе. Массоперенос снарядного режима течения в микрореакторах, по-прежнему, трудно предсказать, в основном из-за конкурирующей природы между конвекцией и диффузией [1–3].

Целью данного исследования было определить влияние частоты циркуляции на коэффициент массопереноса в микроканале в системе жидкость-жидкость для выявления роли конвекции.

Для проведения жидкостной экстракции с низким межфазным натяжением использовалась модельная система, предложенная Европейской Федерацией химической технологии (EFCE) [4], н-бутанол, насыщенный водой, с заранее подготовленными двумя фазами: сплошной фазой 1 – водой и дисперсной фазой 2 – н-бутанол, в котором растворили янтарную кислоту концентрацией $C_{2,0} = 0,127$ моль/л.

Микрореактор состоял из Т – образного блока, который сопряжен трубками подвода фаз, через которые жидкости подавались при помощи шприцевого насоса к стеклянному микроканалу диаметром $d = 1,3$ мм с соосно-сферическим диспергатором в самом его начале. При расходах фаз сплошной q_c и дисперсной q_d от 0,67 до 2,67 мл/мин, которые соответствовали снарядному режиму, производилась фотосъемка камерой Canon 40D со вспышкой, поддерживающий стробоскопическую съемку, фотографии с которой в дальнейшем обрабатывались в программах Компас – 3D и Microsoft Point для определения скорости капель U_d и длин слаггов L_c и капель L_d (рисунок 1).

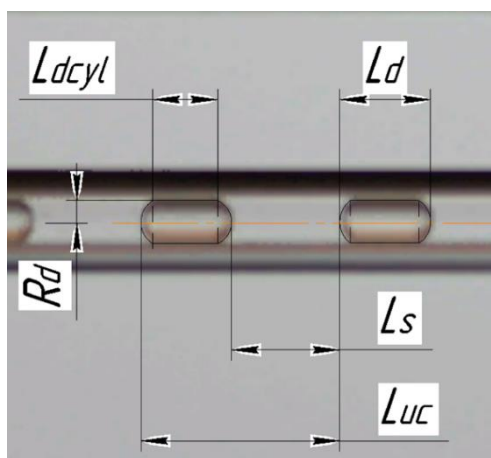


Рис. 1. Схема измерения длин капель (дисперсная фаза, капли) и жидкостных снарядов (сплошная фаза, слагги) в микроканале при устойчивом снарядном течении при помощи программного обеспечения Компас 3D

Далее жидкость из микроканала длиной $L = 455$ мм, поступала в сепаратор, в котором за счет разности плотностей, водная фаза отделялась от органической и отводилась при помощи шприца. Концентрации янтарной кислоты $C_{1,L}$ определялись в пробах водной фазы (рисунок 2).

Для расчета коэффициента массопереноса была использована двухплеченная модель Льюиса-Уитмена. Учитывая скорость дисперсной фазы U_2 , поверхность контакта фаз a (в $\text{м}^2/\text{м}^3$) и длину микроканала L , и зная начальные $C_{2,0}$ и конечные $C_{2,L}$ концентрации янтарной кислоты в органической (дисперсной) фазе (в моль/м³), получим формулу для экспериментального определения объемного коэффициента массопереноса по второй фазе:

$$k_L a = \frac{U_2}{L} \ln \left(\frac{C_{2,0} - C_{2,0}^*}{C_{2,L} - C_{2,L}^*} \right), \quad (1)$$

где $C_{2,0}^*$ – равновесная концентрация растворенного вещества в начале микроканала, моль/м³; $C_{2,L}^*$ – равновесная концентрация растворенного вещества в конце микроканала

Для расчета удельной поверхности контакта фаз использовались формулы, приведенные ниже:

$$a = \frac{S_d}{V_{uc}}, \quad (2)$$

где S_d – площадь поверхности капли дисперсной фазы, м²; V_{uc} – объем ячейки (капля плюс жидкостной снаряд), м³.

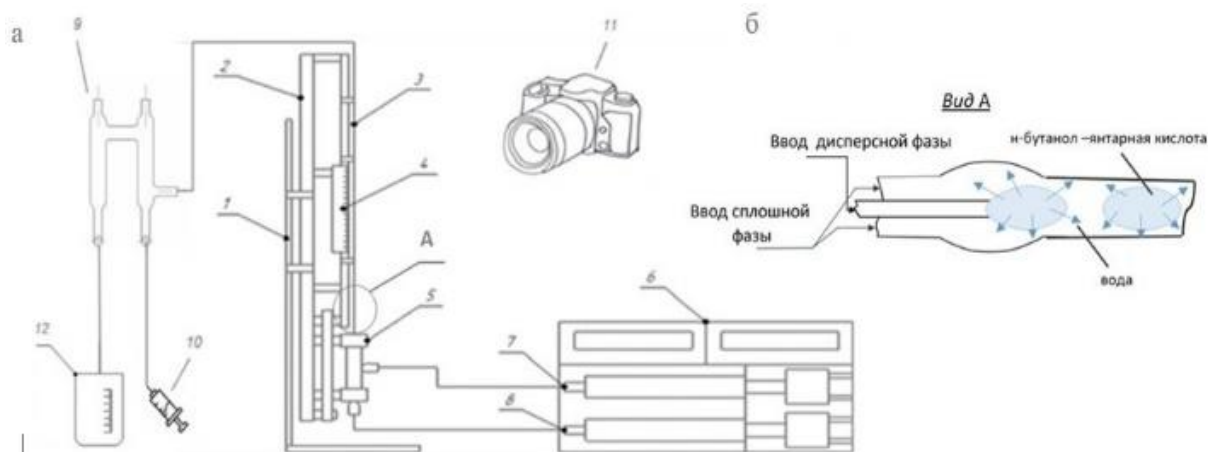


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а), общий вид соосно-сферического диспергатора (б):
 1 – штатив; 2 – держатель; 3 – микроканал; 4 – прозрачная линейка (цена деления 1 мм);
 5 – Т-образный блок сопряжения трубок подвода фаз; 6 – шприцевой насос;
 7, 8 – шприцы для ввода сплошной и дисперсной фаз; 9 – сепаратор; 10 – шприц для отбора проб;
 11 – цифровая фотокамера Canon 40D со вспышкой; 12 – сборник

При применении данной модели для исследуемого микроканала в системе жидкость-жидкость при снарядном режиме течения было выявлено, что оба коэффициента массопереноса k_L и k_{LA} хорошо коррелируют с частотой циркуляций f_{circ} (в Гц) внутри сплошной фазы, которая была определена следующим образом [5]:

$$f_{circ} = \frac{U_{tp} - U_a/2}{2L_s}, \quad (3)$$

где U_{tp} – скорость двухфазного потока, м/с.

В ходе экспериментов было установлено, что коэффициенты массопереноса k_L и k_{LA} пропорциональны частоте циркуляции f_{circ} в микроканале для системы вода – янтарная кислота – н-бутанол. Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0,80$ и $R^2 = 0,82$) подтверждают значительное влияние конвективных процессов на общий массоперенос в системе жидкость-жидкость.

Список литературы

1. Abiev R. Sh. Taylor vortex center, film thickness, velocity and frequency of circulations in slugs and plugs for non-Newtonian and Newtonian fluids in two-phase Taylor flow in microchannels // Chemical Engineering Science 2022. V. 250. 117380 p. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117380.
2. Liu Y., Zhao Q., Yue J., Yao C., Chen G. Effect of mixing on mass transfer characterization in continuous slugs and dispersed droplets in biphasic slug flow microreactors // Chemical Engineering Journal. 2021. V. 406. 126885 p. DOI 10.1016/j.cej.2020.126885.
3. Ghainia A., Kashid M. N., Agara D. W. Effective interfacial area for mass transfer in the liquid-liquid slug flow capillary microreactors // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2010. V. 49. № 4. Pp. 358–366. DOI 10.1016/j.cep.2010.01.004.
4. Misek, T. Working Party on Distillation, Absorption and Extraction: Recommended Systems for Liquid Extraction Studies // Institution of Chemical Engineers. 1978. 71 p.
5. Dehkordi A. M., Ghasemian S., Bastani D., Ahmadpour N. Model for Excess Mass-Transfer Resistance of Contaminated Liquid-Liquid System // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2007. V. 46. № 5. Pp. 1563–1571. DOI 10.1021/ie061032j.

Научный руководитель: Абиев Руфат Шовкетович, доктор технических наук, заведующий кафедрой Оптимизации Химической и Биотехнологической Аппаратуры, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия.

Влияние низкомолекулярных азотсодержащих соединений на состав тяжелой нефти и агрегативную устойчивость асфальтенов

Аннотация. В работе проведено исследование влияния химической природы азотсодержащих гетероциклических веществ на состав тяжелой нефти и динамику агрегации и седиментации асфальтенов. В качестве объектов исследования использовались модельные нефтяные системы, а также асфальтены этих систем с содержанием азота (1,0–3,5 % мас.), полученные смешением тяжелой нефти с пиридином и пирролом. Анализ агрегативной устойчивости асфальтенов проводился спектрофотометрическим методом. Установлено, что с увеличением концентрации азота в нефтяных системах до 3,5 % мас. содержание смолисто-асфальтеновых веществ снижается в среднем на 7–8 % мас. Асфальтены нефтяных систем с содержанием азота 3,5 % мас. характеризуются коллоидной стабильностью, достигающей 95 %. В заданных экспериментальных условиях N-метилпиррол практически полностью ингибирует образование асфальтенового осадка.

Ключевые слова: тяжелая нефть, асфальтены, состав, агрегативная устойчивость, 2-метилпирдин, N-метилпиррол.

Alina S. Savchenko
Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia,
lina_savchenko13@mail.ru

The effect of fragments of low molecular weight nitrogen-containing compounds on the composition of heavy oil and the aggregate stability of asphaltenes

Abstract: The paper investigates the influence of the chemical nature of nitrogen-containing heterocyclic substances on the composition of heavy oil and the dynamics of aggregation and sedimentation of asphaltenes. The objects of the study were model oil systems, as well as asphaltenes of these systems with a nitrogen content (1.0–3.5 % by weight) obtained by mixing heavy oil with pyridine and pyrrole. The analysis of the aggregative stability of asphaltenes was carried out by the spectrophotometric method. It was found that with an increase in nitrogen concentration in oil systems up to 3.5 % by weight, the content of resinous asphaltene substances decreases by an average of 7–8 % by weight. Asphaltenes of oil systems with a nitrogen content of 3.5 % by weight. They are characterized by colloidal stability reaching 95 %. Under the specified experimental conditions, N-methylpyrrol almost completely inhibits the formation of asphaltene sediment.

Keywords: heavy oil, asphaltenes, composition, aggregate stability, 2-methylpyridine, N-methylpyrrol.

С увеличением в мире добычи трудноизвлекаемых запасов тяжелой нефти [1], растет необходимость в создании новых и оптимизации существующих технологий для ее добычи и переработки в ценные продукты. Одной из ключевых проблем такого сырья является неуправляемая агрегация асфальтенов, приводящая к образованию отложений в технологическом оборудовании. Считается, что наибольший вклад в процессы агрегации асфальтенов вносят π - π взаимодействия ароматических фрагментов и силы Ван-дер-Ваальса [2], а также кислотно-основные взаимодействия, водородные связи и координационные комплексы металлов [3]. В связи со сложной структурной организацией асфальтенов до сих пор не установлено влияние различных гетероатомных групп в молекулах компонентов нефтяных дисперсионных систем на образование надмолекулярных частиц.

Особый интерес вызывает изучение влияния азотсодержащих органических соединений на процессы формирования асфальтовых агрегатов. Известно, что концентраты азотистых оснований, выделенные из нефтяных смол, могут в значительной степени как снижать образование асфальтенов [4], так и способствовать увеличению их агрегации [5]. Это обусловлено различными механизмами самосборки асфальтенов, которые недостаточно изучены в связи с отсутствием данных по влиянию каждой функциональной группы и структурного элемента молекул на образование коллоидных частиц в нефтяных системах. В связи с этим, целью работы является исследование влияния структуры низкомолекулярных азотсодержащих органических соединений на состав тяжелой нефти и агрегативную устойчивость асфальтенов.

В качестве объектов исследования использовались модельные нефтяные системы, а также асфальтены этих систем с содержанием азота (1,0–3,5 % мас.), полученные смешением тяжелой нефти с 2-метилпиридином и N-метилпирролом. Определение вещественного состава проводили по стандартной методике, основанной на осаждении асфальтенов в 40-кратном избытке н-гексана. Динамику агрегации и седиментации асфальтенов исследовали спектрофотометрическим методом.

Для оценки влияния химической природы моноароматических азотсодержащих гетероциклических соединений на состав нефтяных дисперсных систем к исходным нефтям были добавлены 2-метилпиридин и N-метилпиррол в различных концентрациях, представленных в таблице 1. По данным вещественного состава видно, что с увеличением концентрации азота в нефтяных системах до 3,5 % мас. содержание масел возрастает на 8–11 % мас., тогда как содержание смол и асфальтенов снижается в среднем 5 и 3,5 % мас. Снижение содержания смолисто-асфальтовых веществ в нефтяных системах связано с их разбавлением азотсодержащими добавками, а также изменением дисперсионной среды, в результате чего наблюдается эффект растворения и стабилизации части асфальтовых компонентов с последующим их переходом во фракцию смолистых веществ.

Таблица 1

Вещественный состав исходных и модельных нефтяных систем

Нефтяная система	Содержание компонентов, % мас.		
	Масла	Смолы	Асфальтены
Н _{исх.}	57,7	30,7	11,6
НП _{дн1,0}	58,9	30,2	10,9
НП _{дн1,5}	60,9	29,2	9,9
НП _{дн2,5}	62,9	28,1	9,0
НП _{дн3,5}	65,9	26,0	8,1
НП _{рл1}	59,8	29,2	11
НП _{рл1,5}	61,4	28,9	9,7
НП _{рл2,5}	64,0	27,1	8,9
НП _{рл3,5}	66,7	25,3	8,0
Примечания 1 Н _{исх.} , НП _{дн1,0} , НП _{дн1,5} , НП _{дн2,5} , НП _{дн3,5} – Исходная (содержание N 0,5 мас. %) и модельные нефтяные системы с содержанием N 1,0, 1,5, 2,5 и 3,5 мас. % соответственно, полученные смешением исходной нефти и 2-метилпиридина. 2 Н _{исх.} , НП _{рл1,0} , НП _{рл1,5} , НП _{рл2,5} , НП _{рл3,5} – Исходная (содержание N 0,5 мас. %) и модельные нефтяные системы с содержанием N 1,0, 1,5, 2,5 и 3,5 мас. % соответственно, приготовленные смешением исходной нефти и N-метилпиррола.			

Добавление 2-метилпиридина к тяжелой нефти (рисунок 1) способствует формированию асфальтенов с повышенной агрегативной устойчивостью. С увеличением содержания азота в составе нефтяных систем до 3,5 % время до начала осаждения асфальтенов увеличивается в 1,5 раза. Стоит отметить, что количество асфальтенов модельных систем с максимальным содержанием азота, способных оставаться в стабильном состоянии, в 7 раз выше по сравнению с асфальтенами исходной нефти.

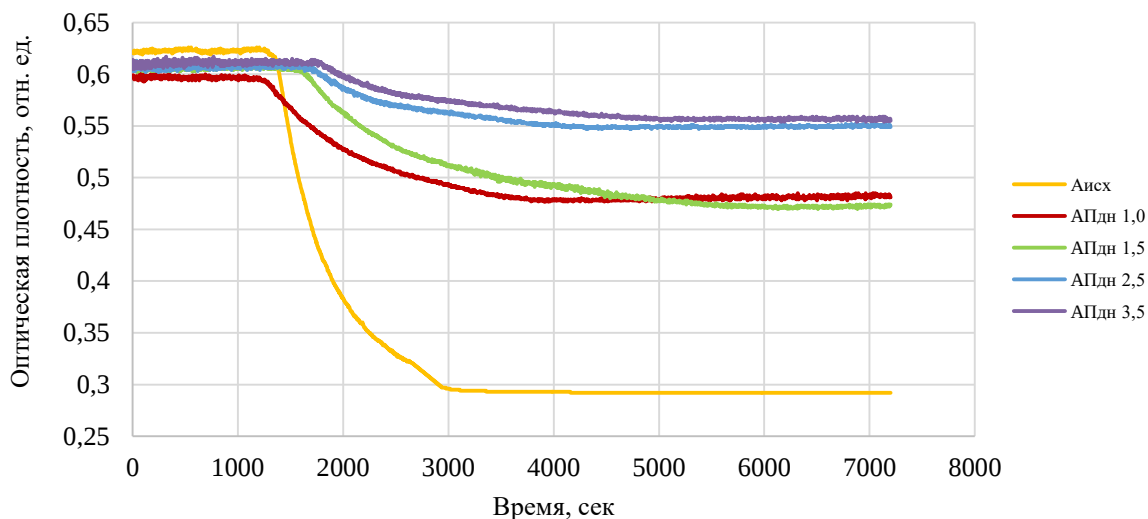


Рис. 1. Агрегативная устойчивость асфальтенов на основе исходной нефти с добавлением 2-метилпиридина

Добавление в тяжелую нефть N-метилпиррола также способствует повышению агрегативной устойчивости асфальтенов (рисунки 2). Наблюдается планомерное увеличение времени начала осаждения асфальтенов до 2,5 раз. При этом, содержание азота (1,5 % мас.) в нефтяной системе приводит к достижению максимального увеличения времени начала седиментации асфальтенов.

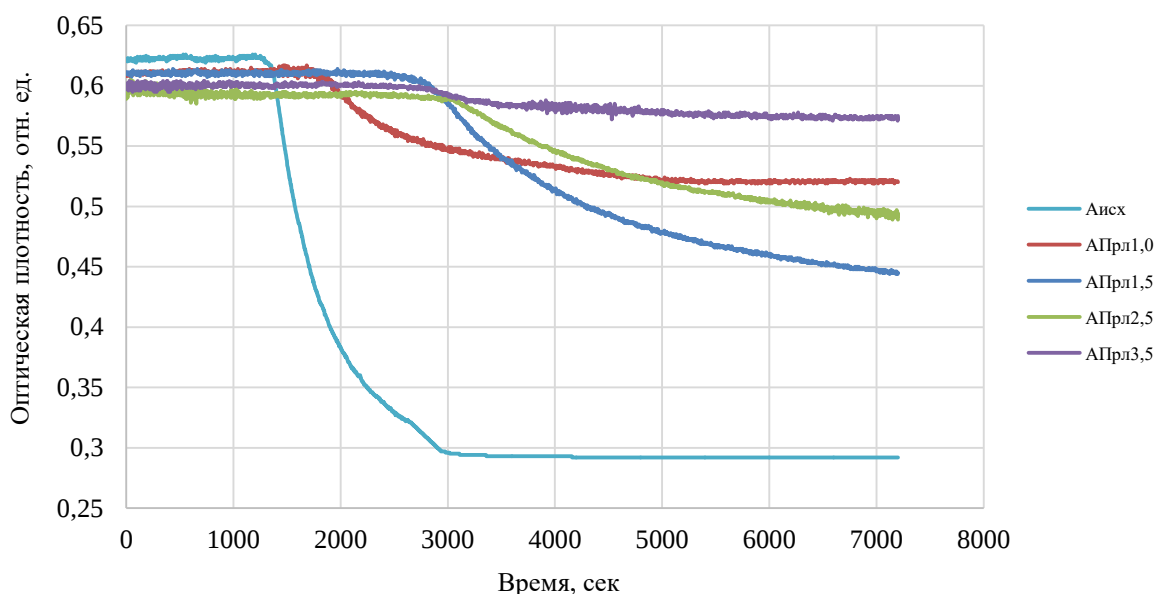


Рис. 2. Агрегативная устойчивость асфальтенов на основе исходной нефти с добавлением N-метилпиррола

С увеличением содержания азота в нефтяной системе до 3,5 % мас. содержание асфальтенов в стабильном коллоидном состоянии достигает 95 %. Таким образом, в данных условиях N-метилпиррол практически полностью ингибирует образование асфальтенового осадка.

Список литературы

1. Абукова, Л. А. Перспективы развития нефтегазового комплекса России [Текст] / Л. А. Абукова, В. Л. Шустер // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – Т. 53. – № 7. – С. 12–15.
2. Mullins O. C., Sabbah H., Eyssautier J., Pomerantz A. E., Barré L., Andrews A. B., Ruiz-Morales Y., Mostowfi F., McFarlane R., Goual L., Lepkowitz R., Cooper T., Orbulescu J., Leblanc R. M., Edwards J., Zare R. N. Advances in asphaltene science and the Yen-Mullins model // Energy Fuels. 2012. Vol. 26, No. 7. P. 3986–4003.
3. Gray, M. R. Supramolecular assembly model for aggregation of petroleum asphaltenes / M. R. Gray, R. R. Tykwinski, J. M. Stryker, X. Tan // Energy Fuels. – 2011. – V. 25, No 7. – P. 3125–3134.
4. Особенности состава смол тяжелых нефтей и их влияние на стабильность асфальтенов [Текст] / Г. Р. Ахметова, Э. Г. Тазеева, С. Г. Якубова, П. И. Грязнов, Д. И. Тазеев, А. И. Фейзрахманов, Л. Э. Турабова // Химия и технология топлив и масел. – 2023. – Т. 635. – № 1. – С. 21–24.
5. Коваленко, Е. Ю. Влияние азотистых соединений нефти на образование агрегатов асфальтенов / Е. Ю. Коваленко, Т. А. Сагаченко, Р. С. Мин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 3. – С. 119–126.

Научный руководитель: Корнеев Дмитрий Сергеевич, кандидат химических наук, доцент ВНИИ, ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск, Россия.

Стельмах Екатерина Александровна
Булавка Юлия Анатольевна*

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь
* u.bylavka@psu.by*

Способ рационального использования нефтяных шламов в производстве битумных материалов

Аннотация. Предложен рациональный способ использования нефтяного шлама, образующегося при синтезе сульфонатной моющей присадки. Выполнен анализ стабильности показателей качества шлама при его производстве на предприятии, а также комплексный анализ структурно-группового состава отхода производства. Установлена оптимальная концентрация шлама для вовлечения в битумное вяжущее, которая не ухудшает пожароопасность, растворимость, стойкость к старению и адгезию, но повышает теплостойкость, пластичность и морозоустойчивость готового товарного продукта (нефтяного дорожного битума).

Ключевые слова: нефтяной шлам, сульфонатная присадка, концентрат кальциевых соединений, нефтяной дорожный битум

**Ekaterina A. Stelmakh
Yuliya A. Bulauka***

*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
Novopolotsk, Republic of Belarus,
* u.bylavka@psu.by*

Method of rational use of oil sludge in the production of bitumen materials

Abstract. A rational method for using oil sludge formed during the synthesis of sulfonate detergent additive is proposed. An analysis of the stability of sludge quality indicators during its production at the enterprise, as well as a comprehensive analysis of the structural-group composition of production waste, is performed. An optimal concentration of sludge for inclusion in bitumen binder is established, which does not worsen fire hazard, solubility, resistance to aging and adhesion, but increases heat resistance, plasticity and frost resistance of the finished commercial product (petroleum road bitumen).

Keywords: oil sludge, sulfonate additive, calcium compound concentrate, petroleum road bitumen.

Нефтяные шламы образуются на этапах разведки и добычи нефти, транспорта нефти и нефтепродуктов, их хранения, переработки нефти [1]. Ежегодные общемировые объемы накопления таких высокотоксичных и пожароопасных отходов достигают 100 миллионов тонн [2, 3]. Утилизация подобных опасных отходов путем их использования в качестве заменителей компонентов (также в рамках программ импортозамещения) для производства продуктов различного назначения, в том числе битумных материалов, или в качестве модификаторов свойств готового продукта, упрощающих и удешевляющих технологии их получения является актуальной научной задачей, что и определило цель настоящего исследования; которая заключается в разработке способа рационального использования нефтяных шламов, образующихся при синтезе сульфонатной моющей присадки (концентрата кальциевых соединений (ККС)) с получением битумных материалов с технически заданными свойствами. Ежегодные объемы образования ККС только в странах СНГ составляют около 50 тыс. т/год [4].

В качестве объекта исследования использовали ККС, образующийся при производстве сульфонатных присадок в ООО «ЭддиТек» (Республика Беларусь) после отгонки

растворителя и воды, ККС в основном состоит из смеси карбоната кальция (с содержанием до 30–40 % масс.), сульфонатной моющей присадки (до 25–30 % масс.), сульфата кальция (до 25–30 % масс.) и гидроксида кальция (до 3–5 % масс.).

Выполненный анализ стабильности показателей качества ККС при его производстве в ООО «ЭддиТек» за период 2022–2023 гг., показал, что такие показатели как температура вспышки в открытом тигле, условная вязкость при 80 °С и массовая доля воды ККС поддерживается на достаточно стабильном уровне от партии к партии, вместе с тем регистрируются единичные периоды с выпуском брака связанные с недостаточной отпаркой растворителя [5, 6]. Достаточная стабильность свойств отхода производства подтверждает целесообразность его использования как более дешевого и доступного компонента либо модификатора битумных материалов.

Проведен комплексный анализ структурно-группового состава ККС производимого ООО «ЭддиТек» [7, 8]. ИК-спектральные исследования, выполненные при помощи ИК-спектрометра Фурье Кауспан, подтвердили, что базовой основой ККС являются сульфонаты, сульфат и карбонат кальция, и ароматические углеводороды. Результаты термогравиметрического анализа остатка ККС на приборе LR-TGA101 позволили установить, что при температуре 319–356 °С выгорает органическая часть ККС (потеря массы всего 0,34 % масс.) и наблюдается экзотермический эффект. При температурах 426–469 и 657–763 °С наблюдается эндотермический эффект, вероятно, обусловленный дегидратацией с потерей массы 7,16 и 14,8 % масс. соответственно.

В качестве технического решения предложено вовлекать ККС в производство нефтяных дорожных битумов. Получены композиции битумных вяжущих на основе дорожного битума марки БНД 70/100 производимого ОАО «Нафтан» (Республика Беларусь) с 1, 3 и 5 % масс. ККС; предварительно смешанные компоненты при постоянном перемешивании мешалкой якорного типа с 60 об/мин подвергали термообработки при температуре около 120–130 °С в течение двух часов на лабораторной установке. Тестирование основных свойств нефтяных дорожных битумов осуществляли по таким показателям качества как: температуры размягчения и хрупкости, растворимость, глубина проникания иглы при 25 °С, адгезия по песчано-гравийной смеси, интервал пластичности и индекс пенетрации, а также стойкость к затвердеванию. Результаты тестирования основных эксплуатационных свойств дорожных битумов приведены в таблице. Температура вспышки исходного битума и модифицированных образцов превышала 230 °С.

Таблица

Результаты анализа показателей качества модифицированных битумных вяжущих

Основные показатели качества	По СТБ EN 12591-2010	Фактическое значение для БНД 70/100	Модифицированный битум БНД 70/100		
			1 % масс. ККС	3 % масс. ККС	5 % масс. ККС
Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25 °С	70–100	78,1	77,5	87,3	84,2
Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С	43–51	43,3	45,3	43,5	45,8
Температура хрупкости по Фраасу, °С	<–10	–11	–12	–12	–11
Индекс пенетрации	–1,5–0,7	–2,03	–1,43	–1,68	–1,05
Растворимость, %	>99	99,9	99,2	98,9	96,4
Стойкость к затвердеванию при 163 °С:					
- остаточная пенетрация, %	> 46	71	82	80	87
- увеличение температуры размягчения, °С,	<9	5,4	6,2	5,1	7,3
- изменение массы, %	<0,8	0,05	0,07	0,09	0,12

В результате исследований установлено, что вовлечение ККС в битумное вяжущее позволяет повысить его теплостойкость (растет температура размягчения) и морозоустойчивость (снижается температура хрупкости), в целом расширяется интервал пластичности битума, что приведет к повышению деформационной способности дорожного полотна, большей стойкости к образованию трещин при низких температурах и стойкости против сдвига при высоких летних температурах. Рост глубины проникания иглы, и как следствие, повышение мягкости модифицированного битума, вероятно связано с образованием мицелл сульфонатов ККС, обусловленных высоким остаточным содержанием присадки. По значению индекса пенетрации видно, что дисперсная структура модифицированного ККС битума близка к типу золь-гель, наиболее оптимальному с точки зрения качества дорожного битума, при этом введение всего 1 % масс. ККС позволяет регулировать данный показатель для достижения значений требуемых нормами для исходного битумного вяжущего. Анализ стойкости к старению (затвердеванию при 163 °С) модифицированных ККС битумов по таким показателям как остаточная пенетрация, увеличение температуры размягчения и изменение массы показал, что измеренные значения находятся в пределах нормативных значений. Вместе с тем, показатель растворимости битумного вяжущего при вовлечении более 2 % масс. ККС превышает допустимые значения. Анализ изменения адгезии модифицированных ККС битумов с поверхностью песчано-гравийной смеси приведен на рисунке, видно, что введение шлама в концентрациях 1–3 % масс. ККС не ухудшает данный показатель.

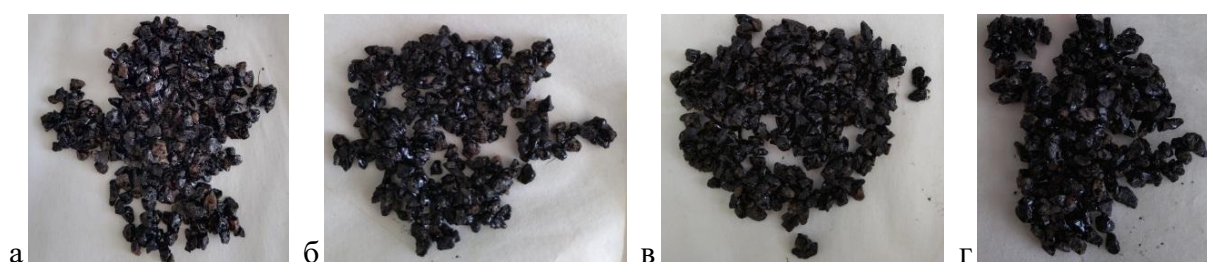


Рис. Результаты анализа адгезии по песчано-гравийной смеси:

а – битум без добавок, б – битум с 1 % масс. ККС;
в – битум с 2 % масс. ККС; г – битум с 3 % масс. ККС

Таким образом, для промышленной реализации с целью расширения ассортимента и снижения нагрузки на окружающую среду предлагается вовлекать до 1 % масс. ККС в битумное вяжущее, что не ухудшит его пожароопасность, растворимость, стойкость к старению и адгезию, но повысит теплостойкость, пластичность и морозоустойчивость товарного продукта – нефтяного дорожного битума.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь на 2024 год на тему «Разработка способа рационального использования нефтяных шламов в производстве битумных материалов», номер государственной регистрации №20240725 от 26.04.2024 г.

Список литературы

1. Catalytic pyrolysis of oil sludge using the nano alumina powder / M. Sajadi, N. Mokhtarani // Energy. – Vol. 270, –2023. – 126954. – doi.org/10.1016/j.energy.2023.126954.
2. Optimization of an oil recovery process from oily sludge using a combined technique of froth flotation and centrifugal treatment / W. Li et al. //Journal of Cleaner Production. –Vol.400. – 2023, – 136752.– doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136752.

3. Study on the performance and stability of oily sludge, hydrocracking tail oil, and water mixture / S. Yang, W. Zhang, T. Li, M. Zhong, Z. Dai, F. Wang // *Journal of Molecular Liquids*. – Vol. 415, Part B, 1 December 2024. – 126362. – doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126362.
4. Модифицирование битумных вяжущих отходами нефтехимии / Булавка Ю. А., Гришанин К. А., Слепенков В. С., Стельмах Е. А. // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. – 2023. – № 2 (48). – С. 75–79.
5. Анализ физико-химических свойств шламов, образующихся при синтезе моюще-диспергирующих присадок сульфонатного типа Е. А. Стельмах, Т. Л. Беляй, Ю. А. Булавка // *Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой [Электронный ресурс]*. – Новополоцк : Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. – Вып. 50(120). Промышленность. С. 127–130.
6. Способ рационального использования нефтяных шламов в производстве битумных материалов / Булавка Ю. А., Беляй Т. Л., Стельмах Е. А. // *Проблемы экологии и экологической безопасности. Создание новых полимерных материалов: сб. материалов XI международной заочной научно-практической конференции* – Минск: УГЗ, 2024. – С.19–21.
7. Анализ структурно-группового состава шламов, образующихся при синтезе моюще-диспергирующих присадок сульфонатного типа / Стельмах Е. А., Беляй Т. Л. // *Tatarstan UpExPro 2024. Сборник научных трудов по материалам VIII Международной молодежной научной конференции*. Новокузнецк, – 2024. – С. 232–235.
8. Исследование структуры шламов, образующихся при производстве моюще-диспергирующих присадок / Е. А. Стельмах. Ю. А. Булавка // *ПУТЬ В НАУКУ. ПРИКЛАДНЫЕ НАУКИ. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ [Электронный ресурс]* : электрон. сб. науч. тр. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – Вып. 55(125). – URL: https://journals.psu.by/specialists_industry –С.182–184.

Чебыкина Анастасия Александровна*

Утенкова Татьяна Геннадьевна

Габдулхаков Ренат Раилевич

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

Санкт-Петербург, Россия

** anastasiya.chb@mail.ru*

Влияние температуры сольвентной экстракции на групповой углеводородный состав каменноугольного пека

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния температуры экстракции на групповой состав каменноугольного пека и на выход пека. Получены зависимости содержания α -, β - и γ -фракций в пеке после экстрагирования двухкомпонентным растворителем от температуры экстракции. Обоснован состав двухкомпонентного растворителя. Зависимости были получены в диапазоне температур – 50–100 °С, соотношение пек/растворитель ароматического ряда/растворитель парафинового ряда – 1/1,5.

Ключевые слова: каменноугольный пек, групповой состав, экстракция, экстракт, рафинат, двухкомпонентный растворитель, материальный баланс.

Anastasia A. Chebykina*

Tatiana G. Utenkova

Renat R. Gabdulkhakov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia,

** anastasiya.chb@mail.ru*

Influence of solvent extraction temperature on the group hydrocarbon composition of coal tar pitch

Abstract. The paper presents the results of investigation of the influence of extraction temperature on the group composition of coal ash and on the ash yield. Dependences of α -, β - and γ -fractions content in the pitch after extraction by two-component solvent on extraction temperature were obtained. The composition of the two-component solvent was substantiated. The dependences were obtained in the temperature range – 50 – 100 °C, the ratio of pecks/solvent of aromatic series/solvent of paraffin series – 1/1,5.

Keywords: coal pitch, group composition, extraction, extract, raffinate, two-component solvent, material balance.

Игольчатый кокс – это высококачественный углеродный материал с низким коэффициентом термического расширения, высокой действительной плотностью, и низким удельным электрическим сопротивлением [1]. Игольчатый кокс используется в качестве материала для производства графитовых электродов сверхвысокой мощности, графитовых электродов высокой мощности, для литий-ионных аккумуляторов, электродных материалов для суперконденсаторов [2]. В зависимости от типа исходного сырья игольчатый кокс делится на угольный и нефтяной [3, 4]. Среди них игольчатый кокс на угольной основе производится в основном из каменноугольной смолы или из каменноугольного пека [5].

Процесс приготовления игольчатого кокса из каменноугольного сырья включает в себя три основных этапа: предварительную обработку угольного сырья, коксование подготовленного угольного сырья для приготовления сырого кокса и кальцинирование сырого кокса для получения товарного прокаленного игольчатого кокса. Предварительная обработка пека является необходимым этапом и заключается как правило в снижении

содержания нерастворимых в хинолине веществ (α_1 -фракция) методом экстракции и дальнейшей корректировке углеводородного группового состава [6].

Экстракция двухкомпонентным растворителем является универсальным и наиболее распространенным методом регулирования состава и свойств угольного сырья для получения анизотропного кокса. На основе распределения молекулярной структуры и молекулярной массы углеводородов, каменноугольный пек в ходе экстракции разделяется на растворимый (экстракт) компонент и нерастворимый (рафинат) компонент [7].

Для определения типа ароматического компонента растворителя был проведен ряд экспериментов с толуолом, декалином, ортоксиллом и хинолином. Температура экстракции была выбрана исходя из температуры кипения растворителя, то есть на 15–20° ниже точки кипения растворителя. Исходя из полученных данных, самое высокое содержание пека на выходе (64 %) получилось в результате экстракции пека с хинолином и керосином в соотношении 1:1,5. Поэтому в качестве растворителя ароматического ряда был выбран хинолин, который обладает хорошей растворяющей способностью, а в качестве растворителя парафинового ряда – керосин, как наиболее доступный парафиновый компонент.

Химический состав каменноугольных пеков весьма сложен, в настоящий момент было определено около двух сот соединений из нескольких тысяч, поэтому состав пека классифицируют по группам углеводородов, например, конденсированные ароматические углеводороды (антрацены, фенантрены, бензапирены, пентацены и т.д.) и гетероциклические соединения. Одним из важнейших свойств пека является содержание веществ, нерастворимых в толуоле (TI) – $\alpha_{\text{общ}}$ -фракция, в хинолине (QI) – α_1 -фракция, растворимых в гептане (HS) – γ -фракция. β -фракция – это вещества не растворимые в гептане, но растворимые в толуоле, определялась по формуле:

$$\beta = 100 - (\alpha_{\text{общ}} + \gamma), \text{ \%}.$$

Была установлена зависимость изменения группового углеводородного состава каменноугольного пека, подготовленного методом сольвентной экстракции, от температуры экстракции. Углеводородный состав пека в диапазоне температур от 50 до 110 °C не претерпевает значительных изменений, поэтому при экстрагировании пека двухкомпонентным растворителем температура должна быть не менее 110 °C. Содержание $\alpha_{\text{общ}}$ -фракции в зависимости от температуры описывается полиномиальной функцией ($R^2 > 0,9$). В промежутке температур от 50 до 110 °C наблюдается незначительное снижение содержания α -фракции, далее после 110 °C – увеличение. Взаимосвязь между содержанием γ -фракции и температурой экстракции средней величины ($R^2 = 0,6$) и описывается полиномиальной функцией. При этом наблюдается тенденция к снижению содержания γ -фракции при увеличении температуры экстракции. Взаимосвязь между содержанием β -фракции температурой экстракции слабая ($R^2 = 0,4$), наблюдается увеличение содержания данной фракции в экстракте.

Список литературы

1. Xian Xu, Louwei Cui, Junhe Shi, Jiaojiao Liu, Yonghong Zhu, Yafei Tian, Mingming Ma, Tao Liu, Huaan Zheng, Dong Li, Effects of co-carbonization of medium and low temperature refined pitch and high temperature refined pitch on the structure and properties of needle coke, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 169, 2023, 105783, doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105783.
2. Yuzhu Zhang, Xiang Liu, Miaomiao Tian, Yaming Zhu, Chaoshuai Hu, Xuefei Zhao, Generation and characterization of coal-based needle coke produced by the co-carbonization of coal liquefaction pitch and anthracene oil, RSC Advances, Volume 12, Issue 40, 2022, Pages 25860–25871, doi.org/10.1039/d2ra03602a.

3. Kondrasheva, N. K., Rudko, V. A. & Nazarenko, M. Y. Influence of Pressure in the Coking of Heavy Oil Tar and Asphalt on the Coke Properties and Structure. *Coke Chem.* 61, 483–488 (2018). doi.org/10.3103/S1068364X18120049.
4. Zhichen Zhang, Bin Lou, Ning Zhao, Enqiang Yu, Zenghao Wang, Hui Du, Zhaojun Chen, Dong Liu, Co-carbonization behavior of the blended heavy oil and low temperature coal tar for the preparation of needle coke, *Fuel*, Volume 302, 2021, 121139, doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121139.
5. Isao Mochida, You Qing Fei, Yozo Korai, Kenichi Fujimoto, Ryo Yamashita, Carbonization in the tube bomb leading to needle coke: III. Carbonization properties of several coal-tar pitches, *Carbon*, Volume 27, Issue 3, 1989, Pages 375–380, doi.org/10.1016/0008-6223(89)90069-9.
6. Long Gao, Yonggang Wang, Yiting Zhao, Jingdong Yang, Haiyong Zhang, Xiongchao Lin, The effect of n-heptane soluble content on the composition and structure of coal tar pitch and the preparation of needle coke, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 175, 2023, 106201, doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106201.
7. Chaoshuai Hu, Hongyu Chu, Yaming Zhu, Yunliang Xu, Junxia Cheng, Lijuan Gao, Shiquan Lai, Xuefei Zhao, Differences and correlations between microstructure and macroscopic properties of mesophase cokes derived from the components of high temperature coal tar pitch, *Fuel*, Volume 310, Part A, 2022, 122330, doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122330.

Научный руководитель: Утенкова Татьяна Геннадьевна, к.т.н., научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Чемес Анастасия Александровна*

Зубков Иван Николаевич

Зубкова Мария Алексеевна

Яковенко Роман Евгеньевич

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ),**Новочеркасск, Россия,*** nastaukuc1@mail*

Синтез изопарафиновых базовых масел из природного газа

Аннотация. В работе представлены результаты исследований глубокой переработки природного газа в синтетические изопарафиновые масла. Исследования включают: получение синтез-газа из природного газа, синтез Фишера-Тропша, гидроизомеризация длинноцепочечных углеводородов C_{19+} . Синтез-газ получали пароуглекислотной конверсией при давлении 2 МПа, температуре 900 °С на катализаторе марки НИАП03-01. Синтез углеводородов осуществлялся на катализаторе $Co-Al_2O_3/SiO_2$ при давлении 2,0 МПа, ОСГ 300 ч⁻¹, температуре 190 °С в течение 540 ч. Получение базовых изопарафиновых масел проводили при давлении 5,0 МПа, температуре 330 °С, объемная скорость подачи сырья 2 ч⁻¹, соотношение H_2/P_2 – 800 нл/л. Показано, что полученная масляная фракция относится к III+ группе масел, низкотемпературные свойства соответствует ГОСТ Р 59107-2020 Базовые масла.

Ключевые слова: технология GTL, синтез Фишера-Тропша, синтез-газ, углеводороды C_{19+} , гидропереработка, базовые масла.

Anastasia A. Chemes*

Ivan N. Zubkov

Maria A. Zubkova

Roman E. Yakovenko

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),**Novocherkassk, Russia,*** nastaukuc1@mail*

Synthesis of C_{19+} hydrocarbons and gas-based products based on them

Abstract. The paper presents the results of studies of deep processing of natural gas into synthetic isoparaffinic oils. The studies include: production of synthesis gas from natural gas, Fischer-Tropsch synthesis, hydroisomerization of long-chain hydrocarbons C_{19+} . Synthesis gas was obtained by steam-carbon dioxide conversion at a pressure of 2 MPa, a temperature of 900°C on a catalyst of the NIAP03-01 brand. Hydrocarbons were synthesized on a $Co-Al_2O_3/SiO_2$ catalyst at a pressure of 2,0 MPa, a GVV of 300 h⁻¹, a temperature of 190°C for 540 h. Production of base isoparaffinic oils was carried out at a pressure of 5,0 MPa, a temperature of 330 °C, a feedstock space velocity of 2 h⁻¹, and a H_2/P_2 ratio of 800 nl/l. It is shown that the obtained oil fraction belongs to group III+ oils, low-temperature properties correspond to SAUS R 59107-2020 Base oils.

Keywords: GTL technology, Fischer-Tropsch synthesis, synthesis gas, C_{19+} hydrocarbons, hydroprocessing, base oils.

В последние годы вопрос эффективного использования углеводородных ресурсов стал особенно актуальным в контексте экологической устойчивости и перехода на более чистые источники энергии. Одной из серьезных проблем являются ресурсы попутного нефтяного газа, шахтного метана и газа малодобитных месторождений, которые в настоящее время остаются практически не востребованными. Это связано с низкой рентабельностью существующих технологий их переработки. В связи с этим, перспективным решением переработки природного газа является технология GTL (gas to liquid). Основным процессом технологии GTL является синтез Фишера-Тропша (ФТ), позволяющий получать

широкий спектр углеводородов: углеводородный газ, бензиновую и дизельную фракции, парафин (мягкий воск) и церезины [1, 2]. Наиболее востребована предприятиями пищевой, фармацевтической, косметической и оборонной промышленности церезинсодержащий продукт (фракция углеводородов C_{19+}). На ее основе изготавливают биотехнологические добавки, термоплавкие клеи, краски и полироли, косметику и парфюмерию, флегматизаторы для взрывчатых веществ. Гидропереработка парафинов C_{19+} позволяет получать высококачественные моторные топлива и базовые масла III+ группы в соответствии с классификацией Американского института нефти [3].

В НИИ «Нанотехнологии и новые материалы» проводятся исследования в области изучения процесса каталитического синтеза углеводородов с использованием лабораторных установок, работающих в непрерывном режиме. Так, в качестве исходного сырья для производства синтез-газа с соотношением $H_2/CO = 2,3$ использовали природный газ, полученный парокислотной конверсией метана (объемное отношение пар/ CO_2 /газ = 1/0,5/1, температура 870 °C). Нарботку углеводородов C_{5+} , обогащенных фракцией C_{19+} , осуществляли при использовании в качестве исходного сырья синтез-газа, полученного на стадии конверсии метана в течение всего периода непрерывной работы (540 ч) при ОСГ = 300 ч⁻¹, температуре 190 °C, давлении 2,0 МПа в трубчатом реакторе со стационарным слоем катализатора. В качестве катализатора использовали разработанный в НИИ «Нанотехнологии и новые материалы» кобальтовый катализатор на основе оксида кремния, промотированный 1 % оксидом алюминия [4], предназначенный для селективного синтеза длинноцепочечных углеводородов. Показатели процесса синтеза углеводородов C_{5+} представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Показатели процесса синтеза углеводородов C_{5+}
в течение всего периода непрерывной работы**

τ, час	X_{CO} , %	Селективность, %				$G_{C_{5+}}$, кг/(м ³ _{кат.} ·ч)
		CH_4	C_2-C_4	C_{5+}	CO_2	
0-62	48,7	16,7	13,4	69,3	0,5	19,2
63-124	52,6	17,3	11,4	70,9	0,3	22,0
125-349	52,3	19,0	15,2	65,3	0,3	20,2
350-416	50,7	19,3	15,1	65,1	0,3	20,0
417-480	51,2	18,7	14,9	66,1	0,2	20,4
481-540	49,8	19,8	15,5	64,3	0,3	19,1

τ – время работы катализатора в часах;

X_{CO} – степень превращения CO в %;

$G_{C_{5+}}$ – производительность по углеводородам C_{5+} в кг/(м³_{кат.}·ч)

В начальный период работы катализатора селективность по углеводородам C_{5+} варьируется в пределах 69,3–70,9 %, в то время как селективность по газообразным продуктам (C_1-C_4) не превышает 30,1 %, а производительность по углеводородам C_{5+} составляет 19,2–22,0 кг/(м³_{кат.}·ч). По мере увеличения продолжительности синтеза, вероятно, происходит накопление продуктов в порах катализатора, что осложняет перенос реагентов к активным центрам. Это приводит к снижению производительности по углеводородам C_{5+} на 7–10 %, замедлению скорости реакции (выражается в степени превращения CO), и увеличению метанообразования (рисунок 1).

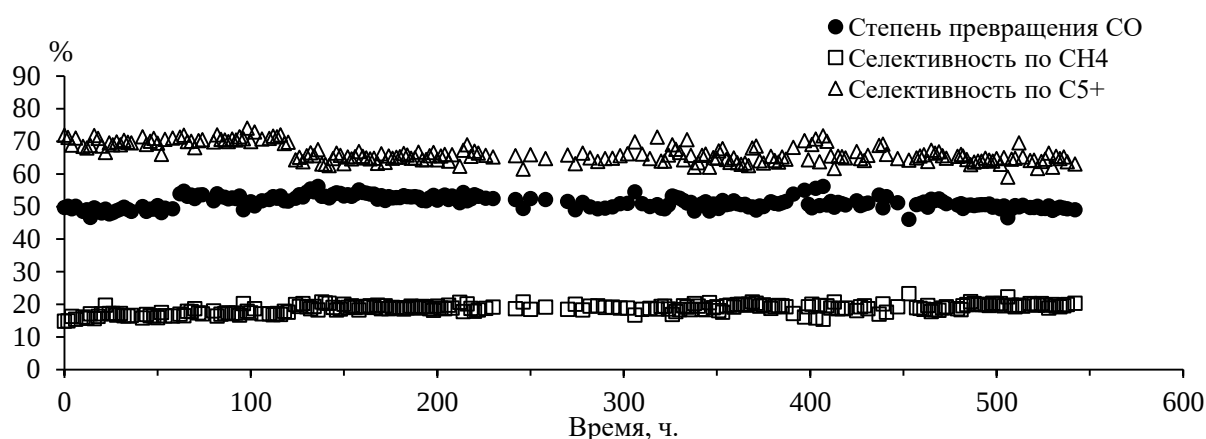


Рис. 1. Изменение степени превращения СО, селективности по СН₄ и С₅+ в зависимости от продолжительности работы

Содержание и производительность по углеводородам С₁₉+ в течение всего периода непрерывной работы составило 3,9–5,0 масс. % и 20,6–22,7 кг/(м³_{кат.}·ч) соответственно. При этом после 125 часов непрерывной работы содержание и производительность углеводородов с температурой кипения более 300 °С стабилизируются и сохраняются на уровне 3,9–5,0 % и 20,6–22,7 кг/(м³_{кат.}·ч) соответственно (рисунок 2).

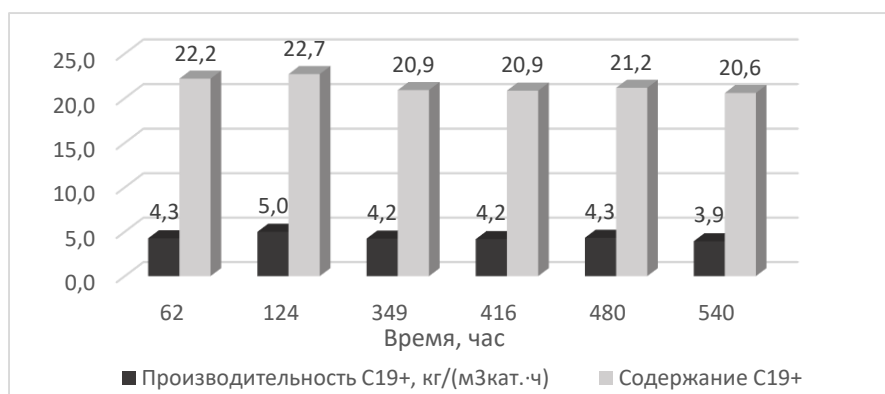


Рис. 2. Содержание и производительность по углеводородам С₁₉+ в зависимости от продолжительности работы

Синтезированные по методу Фишера-Тропша углеводороды С₁₉+ находят применение в производстве базовых изопарафиновых масел. Гидрокрекинг и гидроизомеризацию осуществляли на бифункциональном Pt/SAPO-11 катализаторе с иерархической пористой структурой и высокой дисперсностью платины (разработан совместно с ИНК УФИЦ РАН). Получение базовых изопарафиновых масел проводили при давлении 5,0 МПа, температуре 330 °С, объемная скорость подачи сырья 2 ч⁻¹, соотношение Н₂/П₂ – 800 нл/л. Результаты гидроизомеризация GTL воска представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты гидроизомеризация GTL воска

t, °C	Выход, % масс.			Низкотемпературные свойства фракция продуктов > 300 °C
	C ₁ -C ₅	н.к.-300 °C	> 300 °C	
				t _{зм.} , °C
330	4	26	70	минус 29

При выбранных технологических параметрах выход фракции продуктов > 300 °С составляет 70 % масс. Основные эксплуатационные свойства полученного базового масла представлены в таблице 3. Полученные базовые масла по эксплуатационным свойствам соответствуют III+ группе по классификации американского института нефти (API).

Таблица 3

Основные эксплуатационные свойства

№	Показатель	Метод испытания	Результат
	Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333	181
1	Плотность при 20 °С, кг/м ³	ГОСТ 3900	802,5
2	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	8,668
3	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	2,558
4	Индекс вязкости	ГОСТ 25371	131
5	Температура застывания	ГОСТ 20287	минус 29

Таким образом, на отечественном катализаторе в ходе непрерывной работы (540 ч) наработаны углеводороды C₅₊, обогащенные фракцией C₁₉₊ из синтез-газа, полученного на стадии конверсии метана. За счет гидрокрекинга и гидроизомеризации на бифункциональном Pt/SAPO-11 катализаторе, из полученного церезинсодержащего продукта получено базовое масло, по эксплуатационным свойствам соответствующее III+ группе.

Список литературы

1. Karaba, A. Fischer-Tropsch Wax from Renewable Resources as an Excellent Feedstock for the Steam-Cracking Process / A. Karaba, J. Rozhon, J. Patera, J. Hájek, P. Zámotný // Chemical Engineering & Technology. – 2021. – V. 44. – № 2. – P. 329338.
2. Sahir A. H., Zhang Y., Tan E. C. D., Tao L. Understanding the role of Fischer-Tropsch reaction kinetics in techno-economic analysis for co-conversion of natural gas and biomass to liquid transportation fuels // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2019. V. 13. № 5. P. 1306–1320.
3. Bekker M., Louw N. R., Jansen Van Rensburg V. J., Potgieter J. The benefits of Fischer-Tropsch waxes in synthetic petroleum jelly // International journal of cosmetic science. 2013. V. 35. P. 99–104.
4. Промышленный катализатор селективного синтеза длинноцепочечных углеводородов по методу Фишера-Тропша / А. П. Савостьянов, Р. Е. Яковенко, Г. Б. Нарочный [и др.] // Кинетика и катализ. – 2017. – Т. 58, № 1. – С. 86–97.

Научный руководитель: Яковенко Роман Евгеньевич, кандидат технических наук, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), Новочеркасск, Россия.

Секция 5. СОВРЕМЕННЫЕ ГОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 622.363.2:550.834

Любимов Артем Сергеевич

*ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»;
Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь, Россия, a.s.liubimov@gmail.com*

Анализ способов определения газонасыщенных зон геофизическими методами

Аннотация. С целью дополнения и уточнения локального и регионального прогноза газодинамических явлений на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей в статье рассмотрена перспектива применения геофизических методов на данном направлении. Путем анализа и сопоставления геологических маркеров зон опасных по газодинамическим явлениям с предметом исследования актуальных геофизических методов установлено, что наиболее перспективными методами являются электрометрия и сейсморазведка.

Ключевые слова: газодинамические явления, локальный прогноз, калийные соли, сейсморазведка, электрометрия.

Artem S. Liubimov

*Perm National Research Polytechnic University;
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russia, a.s.liubimov@gmail.com*

Analysis of ways to determine gas-saturated zones by geophysical methods

Abstract. This article explores the potential of geophysical methods for supplementing and refining local and regional predictions of gas-dynamic events in the Upper Kama potassium-magnesium salt deposit. By analyzing and comparing geological markers of gas-dynamically hazardous zones with the subject of research of current geophysical methods, it was found that the most promising methods are electrometric and seismic surveys.

Keywords: gas-dynamic events, local prediction, potassium salts, seismic survey, electrometric.

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС) характеризуется сложным геологическим строением, в частности складчатостью, зонами замещения, трещиноватостью, газонасыщением. Подобные особенности геологического строения способствуют развитию газодинамических явлений (ГДЯ), которые существенно осложняют технологические процессы и представляют угрозу здоровью и жизни шахтеров. Исследования, направленные на предупреждение ГДЯ, повышают безопасность ведения горных работ, способствуют увеличению добычи и снижению затрат на производство.

С газонасыщенностью связаны: разного рода газовыделения, динамические выбросы руды в выработку, обрушения кровли камер и отжимы стенок [1]. Межслоевые и приконтактные скопления свободного газа способствуют развитию ГДЯ в виде внезапных разрушений пород кровли и почвы выработок, сопровождающихся газовыделениями. По результатам научных исследований ГДЯ внедрены в практику горного дела локальный, региональный и текущий прогноз зон, опасных по ГДЯ. Прогнозирование ГДЯ делится на региональное, локальное и текущее, при решении задач возникающих по мере освоения месторождения: проектных, строительных и эксплуатационных [2]. Региональное

прогнозирование основывается на данных бурения разведочных скважин, выполняется на стадии проектирования рудника и позволяет оценить общую вероятность развития ГДЯ в пределах всего месторождения. Локальный прогноз, в свою очередь, детализирует региональный прогноз на уровне отдельных участков шахтных полей. Он основан на данных эксплуатационной геологической разведки и позволяет определить вероятность развития ГДЯ на конкретных пластах рудника. С целью дополнения и уточнения методик прогноза ГДЯ, проводимого прямыми методами исследования, предлагается использовать данные, полученные косвенными геофизическими методами.

Основываясь на опыте отработки сильвинитовых пластов АБ и КРП в условиях ВКМКС можно сделать вывод о связи ГДЯ и участков развития интенсивной складчатости [3]. Складки отличаются не только по размерам, но и глубине распространения. Для вскрытой подземными горными выработками части разреза соляной толщи в основном можно выделить 4 порядка складок [4]: I порядок – мелкая внутрислоевая и внутрислойная складчатость. Высота от 3 до 90 см., размер по ширине до 1 м, по длине до 5–7 м. Амплитуда отдельных лежащих внутрислоевых складок до 1,5–2,0 м.; II порядок – складки, охватывающие отдельные пласты и слои солей. Высота складок 0,5–2,0 м, ширина от 3 до 15 м, длина 10–40 м, амплитуда отдельных лежащих складок, до 6 м.; III порядок – складки, охватывающие ряд пластов внутри соляной толщи, Высота складок 3–12 м, ширина от 20 до 100 м, длина до 300 м (отдельных складок – до 370 м.); IV порядок складок, это линейные синклинали, длина складок 700–1300 м, ширина 120–250 м, высота 20–30 м.

Согласно статистическому анализу, при отработке пласта АБ к антиклинальным складкам третьего порядка приурочено порядка 2/3 от общего числа ГДЯ. Исходя из этого, основной задачей, при внедрении геофизического мониторинга в существующую методику прогнозирования станет выявление складок III порядка в массиве [3].

С целью выбора оптимального для выявления опасных по ГДЯ участков метода геофизики, следует произвести анализ актуальных методов. На сегодняшний день распространение получили следующие геофизические методы: гравиметрический, магнитометрический, электрометрический, сейсмоакустический, геотермический и гаммаматрический. Для выявления подходящих для решения задачи методов следует для каждого определить метод и предмет исследования, после чего, оценить перспективу применения для выявления зон опасных по ГДЯ. Существуют методы, предмет исследования которых не позволит определить наличие складчатости в массиве, а также очагов возникновения ГДЯ: магнитометрический, гаммаматрический, и термический.

Гравиметрия исследует аномалии силы тяжести. Описание прямой задачи гравиметрии: объект с заданным радиусом и плотностью залегает на определенной глубине в однородной среде. График Δg будет иметь максимум над телом и асимптотически стремиться к нулю при удалении от шара. Однако, в следствии довольно большой погрешности относительно размеров складки, несущественной разности плотностей каменной соли и пород, а также неоднородности пород, слагающих складку, применение данного метода в целях выявления опасных по ГДЯ зон на практике маловероятно [5].

Электроразведка базируется на изучении электрических и электромагнитных полей массива с целью изучения геологического строения. Естественные электрические поля различны при изменении геомеханических свойств породы. Шахтная электроразведка позволит определить разупрочение соответствующее зоне опасной по ГДЯ, поскольку данный участок спровоцирует возникновение аномалий при интерпретации данных, однако метод не даст точных координат геологической аномалии [5].

Сейморазведка базируется на исследовании массива на основании изучения закономерностей распространения искусственно созданных упругих волн. Немаловажной характеристикой массива является степень поглощения сейсмической энергии. Параметр отражает насколько эффективно породы поглощают сейсмические волны. Для выполнения

задачи поиска зон опасных по ГДЯ возможно использование как наземной, так и шахтной сейсморазведки, однако для поиска складок III порядка применима только наземная сейсморазведка. Шахтная сейсморазведка ограничена развитием горных работ, тогда как наземная обладает большими пространственными возможностями. С целью теоретического обоснования применения наземной сейсморазведки для выявления складки третьего порядка рассчитана разрешающая способность метода.

Длина волны:

$$\lambda = TV = \frac{V}{f} = 43.75 \text{ м}$$

Диаметр зоны Френеля:

$$d\Phi = \sqrt{\frac{2VH}{f} + \frac{(\frac{V}{f})^2}{4}} = \sqrt{\frac{2 * 3500 * 250}{80} + \frac{(\frac{3500}{80})^2}{4}} = 149,51 \text{ м}$$

Горизонтальная и вертикальная разрешающая способность:

$$\Delta h_r = \frac{d\Phi}{5} = \frac{149,51}{5} = 29,9 \text{ м}; \Delta h_v = \frac{\lambda}{4} = \frac{43,75}{4} = 10,93 \text{ м}$$

Приведенные расчеты показывают, что горизонтальная разрешающая способность наземного исследования позволяет выделить складку III порядка. По результатам анализа доступных методов геофизического исследования составлена таблица с выделением наиболее перспективных в плане заблаговременного выявления ГДЯ методов.

Таблица 1

Оценка перспектив применения геофизических методов

Метод	Предмет исследования	Перспективы применения с целью выявления зон опасных по ГДЯ
Гравиметрическая разведка	Аномалии силы тяжести	Отсутствуют, складка III порядка создает аномалии силы тяжести, однако разрешающая способность метода не позволит определить их
Магнитометрическая разведка	Аномалии магнитного поля	Отсутствуют, в связи с незначительной намагниченностью пород ВКМКС
Электроразведка (шахтная)	Аномалии электромагнитного поля	Существуют, так как трещины отрыва и скола характеризуются повышенной пористостью, заметной при интерпретации кривых УЭС
Сейсмическая разведка	Скоростные аномалии, поглощение сейсмической энергии	Существуют, так как за счет разупрочения массива в зоне скопления газа данная область выделяется пониженными скоростями
Термическая разведка	Аномалии термического градиента	Отсутствуют, несмотря на выделяющееся изменение температуры относительно термического градиента, невозможно точно утверждать о генезисе изменения градиента в отдельно взятом случае
Ядерная геофизика	Естественная радиоактивность руд	Отсутствуют, так как в местах скопления газа не происходит изменения гамма-фона

В табл.1 представлены результаты исследования, разделенные по столбцам метод, предмет исследования, перспективы применения с целью выделения зон опасных по ГДЯ. Кратко резюмируя исследование можно выделить методы не применимые к решению данной задачи: магнитометрия, термометрия, ядерная геофизика. Метод гравиметрии не применим к решению задачи при его сегодняшних возможностях, однако может

быть применен в будущем, поскольку локальная складчатость создает аномалии силы тяжести. Сейсморазведка и электрометрия выделены, как имеющие перспективы применения при выявлении зон опасных по ГДЯ, поскольку при формировании зон, подходящих под определение, изменяются параметры массива, измеряемые данными методами. Также, разрешающая способность и направленность данных методов позволяют утверждать о том, что именно опасная по ГДЯ зона явилась причиной возникновения аномалий. Однако, сейсморазведка выгодно отличается возможностью выявления складчатости III порядка, а также возможностью точного определения местоположения аномалии геологического строения. Высока вероятность корреляции сейсморазведочных параметров с зонами повышенного газовыделения, по причине изменения упругих характеристик пород на данных участках.

Список литературы

1. Андрейко С. С. Газодинамические явления в калийных рудниках: методы прогнозирования и способы предотвращения. – 2007.
2. Иванов О. В. Методика прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям, для условий рудников ОАО «Уралкалий» //Strategy and processes of mastering of georesource. – 2004. – С. 259.
3. Лукьянец Е. В. Прогнозирование зон, опасных по газодинамическим явлениям, на основе структурно-тектонического строения пласта АБ для шахтного поля рудника ПАО «Уралкалий» //Россия молодая. – 2015. – С. 19–19.
5. Хмелевской В. К. и др. Основы геофизических методов. – 2010.

Научный руководитель: Андрейко Сергей Семенович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. Заведующий лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Пермь, Россия.

Моделирование работы экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования и буровзрывных работ в карьере

Аннотация. Использование компьютерного моделирования основных производственных процессов добычи твердых полезных ископаемых открытым способом сегодня является неотъемлемой частью горнодобывающего производства и процесса подготовки специалистов по направлению «Горное дело». В связи с уходом из России зарубежных компаний, являющихся разработчиками специализированного программного обеспечения, на сегодняшний день актуальной является задача разработка отечественных программных продуктов в области горного дела. Целью работы является разработка комплекса программ для моделирования основных производственных процессов добычи твердых полезных ископаемых открытым способом, применимых как на горных предприятиях, для повышения эффективности работы, так и в учебном процессе для подготовки специалистов в области горного дела.

Ключевые слова: открытые горные работы, компьютерная программа, моделирование технологических процессов, буровзрывные работы, экскаваторно-автомобильный комплекс, производительность.

Maxim D. Pastikhin
NUST MISIS, Moscow, Russia, pastihin-m2004@yandex.ru

Modeling of the operation of the excavator-truck equipment complex and drilling and blasting operations in the quarry

Abstract. The use of computer modeling of the main production processes of open-pit mining of solid minerals is today an integral part of mining production and the process of training specialists in the field of "Mining". In connection with the departure of foreign companies from Russia, which were developers of specialized software, today the task of developing domestic software products in the field of mining is relevant. The purpose of this work is to develop a set of programs for modeling the main production processes of open-pit mining of solid minerals, applicable both at mining enterprises, to improve the efficiency of work, and in the educational process for training specialists in the field of mining.

Keywords: open-pit mining, computer program, modeling of technological processes, drilling and blasting operations, excavator-truck complex, productivity.

В условиях стремительного развития IT-технологий и усложнения горно-технических условий, которых ведутся открытые горные работы, использование компьютерных программ для моделирования и оптимизации технологических процессов становится неотъемлемой частью как горного производства, так и образовательного процесса направленного на подготовку высококвалифицированных специалистов – горняков.

В России имелись разработки в области моделирования процессов добычи полезных ископаемых, но в силу ряда причин они не дошли до стадии полноценных программных продуктов. А с приходом на территорию России зарубежных недропользователей в России стали использовать понятные для них зарубежные программы и разработка отечественных программ прекратилась.

В настоящее время ряд зарубежных IT-компаний ушел с российского рынка, вследствие чего возникла потребность в создании современного программного обеспечения, позволяющего моделировать, оптимизировать и анализировать технологические процессы добычи твердых полезных ископаемых открытым способом.

В 2023 году была начата разработка программного комплекса на платформе Windows Forms, способного моделировать основные процессы добычи полезного ископаемого открытым способом:

- Подготовка к выемке
- Выемка

- Транспортирование
- Отвалообразование

Планируется разработка программного комплекса, состоящего из четырех программ. В качестве методической основы были использованы наработки д.т.н. Медникова Н. Н. по моделированию основных технологических процессов добычи полезных ископаемых открытым способом [1]. На данный момент закончена работа над двумя программами.

Вследствие того, что компьютерные программы были написаны профессором Н.Н. Медниковым давно, их техническая часть устарела, интерфейс и функционал не соответствует сегодняшним требованиям, однако расчетная часть остается актуальной благодаря учету как большого количества технических, так и организационных факторов и использованию вероятностного подхода.

Первая созданная программа позволяет моделировать работу экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования и определять производительность комплекса для различных моделей экскаватора и автосамосвала с учетом характеристики экскавируемой породы, уклонов, длины и качества покрытия участков дорог. Окно ввода данных для моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования представлено на рисунке 1.

Расчет характеристик											
Меню	Инфо	Выбрать файл									
Сцепление в образце, МПа	Диаметр куска, м	Предел прочности на сжатие, МПа	Коэффициент трения	Плотность породы, Т/м³	Высота уступа, м	Ширина заходки, м					
0,3	0,78	100	0,18	2,2	20	22					
БелАЗ-7555	Грузоподъемность, тонн	Объем кузова, м³	Коэффициент тары	Мощность двигателя, кВт	КПД работы	Площадь лобовой поверхности, м²	Цена без НДС, тыс. руб.	Цена на ДТ, руб./литр (без НДС)	Месячная зарплата, тыс. руб.	Срок амортизации, лет	Цена комплекта шин (без НДС)
	55	35	0,737	537	0,73	20,7	45000	50	100	6	1800
ЭКГ-5А	Емкость ковша, м³	Высота разгрузки, м	Мощность двигателя, кВт	Максимальное усилие подъема ковша, кН	Время цикла, сек	Цена без НДС, тыс. руб.	Цена на электроэнергию, руб./кВт ч	Месячная зарплата, тыс. руб.	Срок амортизации, лет		
	5,2	6,7	200	490	23	60000	3,5	100	12		
Расчет											

Рис. 1. Окно ввода данных для моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования

На основе моделирования пользователь может определить рациональное количество автосамосвалов, необходимое для работы с экскаватором в заданных горно-геологических условиях, с учетом требуемой производительности. В ходе работы над данной программой были внесены существенные изменения в части оценки экономических показателей работы комплекса.

Для удобства пользования в программе создана база данных с необходимыми характеристиками некоторых экскаваторов и самосвалов с возможностью добавления новых моделей. Также есть возможность просмотра результатов работы программы в виде графиков зависимостей сменной и годовой производительности комплекса оборудования, производительности одного автосамосвала и стоимости добычи одного кубического метра породы от количества автосамосвалов, приходящихся на один экскаватор (рисунок 2).

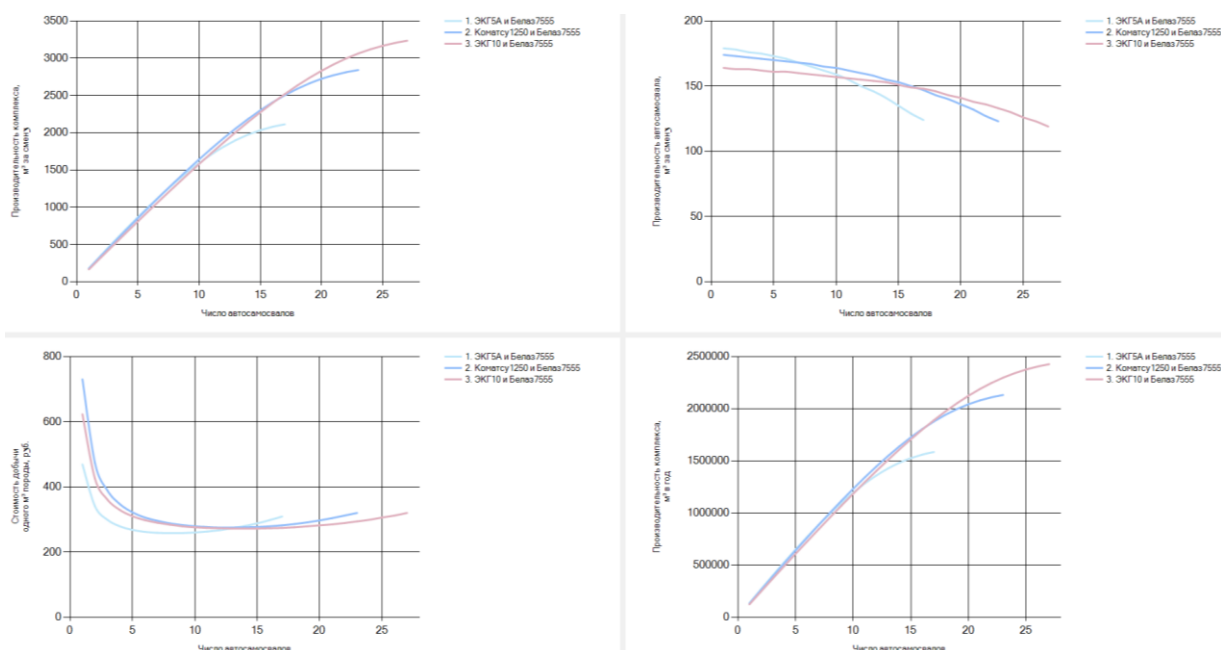


Рис. 2. Пример графического отображения результатов

Вторая программа предназначена для моделирования буровзрывных работ. Она позволяет рассчитать параметры сетки скважин для взрывания горных пород (количество рядов скважин, угол наклона скважин, расстояние между скважинами в ряду, длину заряда и т.д.) для получения развала с заданными характеристиками и при определенной геометрии откоса уступа. Также программа оценивает гранулометрический после проведения буровзрывных работ [2].

В программе также предусмотрена возможность пополнения базы данных буровых станков и всех необходимых для расчета технических и экономических показателей.

На рисунке 3 представлено окно ввода данных для расчета буровзрывных работ.

The BVR software interface for inputting data for blasting calculations includes the following sections:

- Menu:**
 - Предел прочности на сжатие, МПа: 100
 - Предел прочности на сдвиг, МПа: 30
 - Предел прочности на растяжение, МПа: 10
 - Плотность породы, Т/м³: 2,4
 - Средний размер блока, м: 3
 - Коэффициент Пуассона, МПа: 0,3
- Diagram:** A schematic diagram of a blast site showing dimensions b_1 , b , H_u , L_{ex} , $L_{ва}$, $L_{вп}$, $L_{об}$, B_m , and W , along with angles α and β .
- Input Fields:**
 - Скорость продольных волн, м/сек: 5000
 - Заданный диаметр куска, м: 0,3
 - Высота уступа, м: 10
 - Угол откоса уступа, градусов: 70
 - Ширина заходки экскаватора, м: 17
 - Число заходок экскаватора, шт: 3
 - Заработная плата буровой команды, руб/час: 350
 - Стоимость электроэнергии, руб/кВт*ч: 0,5
 - Стоимость долота, руб: 30000
 - Плотность заряжения ВВ, кг/дм³: 1
 - Осевое давление бурстанка, МПа: 300
 - Мощность двигателя бурстанка, кВт: 400
 - Угол наклона буровой штанги, градусов: 90
 - Длина буровой штанги долота, м: 8
 - Диаметр долота, м: 0,25
 - Установленная оплата трансформатора, руб/кВА*ч: 30
 - Стоимость ВВ, руб/кг: 20
 - Цена бурстанка, тыс. руб: 8000
- Buttons:** Меню, Расчет

Рис. 3. Окно ввода данных для расчета буровзрывных работ

В связи с ограниченным объемом тезисов доклада окна результатов расчета программ не представлены.

На данный момент ведутся работы над способами визуализации результатов расчетов для второй программы, а также начата работа над третьей программой, в которой происходит моделирование работы драглайнов для перевалки горных пород в выработанное пространство по простым и сложным схемам.

Программа для моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса оборудования уже была использована в учебном процессе при выполнении практических работ по дисциплине «Проектирование горнотехнических систем».

По окончании работ, связанных с написанием четырех программ, входящих в комплекс, планируется написание учебного пособия для применения этих программ в учебном процессе.

Список литературы

1. Медников Н. Н. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 1996.
2. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Часть 1. Производственные процессы. – М.: Стереотип, 512 с.

Научный руководитель: Черепецкая Елена Борисовна, д.т.н. профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, НИТУ МИСИС, Москва, Россия.

Решетников Кирилл Игоревич¹ *Глухов Михаил Сергеевич^{1, 2, 3}Ронкин Михаил Владимирович¹¹ УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина² Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

* ki.reshetnikov@urfu.ru

Исследование подходов компьютерного зрения в задаче фрагментации горных пород

Аннотация. Оценка качества фрагментации обломков горных пород является важной задачей для эффективного управления процессом добычи полезных ископаемых в открытых горных выработках (карьеры, разрезы). Современные подходы оценки фрагментации по цифровому изображению используют нейронные сети. В данной работе показано использование архитектуры YOLOv8 в различных режимах работы для решения задачи оценки фрагментации обломков горных пород. В работе показаны возможности использования YOLOv8 для задач фрагментации как модификации задач: обнаружения объектов, обнаружение ключевых точек, сегментация объектов и обнаружение ориентированных объектов. В результате работы показаны преимущества и недостатки использования различных подходов на базе YOLO по сравнению с популярной архитектурой Mask-RCNN.

Ключевые слова: фрагментация горных пород, компьютерное зрение, сверточные нейронные сети, экземплярная сегментация, обнаружение горных пород.

Kirill I. Reshetnikov¹ *Mihail S. Glukhov^{1, 2, 3}Mihail V. Ronkin¹¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin² The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the UB of the RAS³ Kazan (Volga region) Federal University

* ki.reshetnikov@urfu.ru

Investigation of computer vision approaches in rock fragmentation task

Abstract. Assessment of rock fragmentation quality is an important task for effective management of the mining process in open-pit mines (quarries, surface mines). Modern approaches for fragmentation assessment from digital images use neural networks. This paper shows the use of YOLOv8 architecture in different modes of operation to solve the problem of fragmentation estimation of rock fragments. The paper shows the possibilities of using YOLOv8 for fragmentation tasks as a modification of the following tasks: object detection, key point detection, object segmentation and oriented object detection. The work shows the advantages and disadvantages of using different YOLO-based approaches compared to the popular Mask-RCNN architecture.

Keywords: rock fragmentation, computer vision, convolutional neural networks, instance segmentation, object detection.

Фрагментация обломков горных пород является одним из основных показателей эффективности взрывных работ при добычи полезных ископаемых в открытых горных выработках – карьерах и разрезах. На большинстве горных предприятий фрагментация взорванной горной массы производится вручную, посредством отбора изображений развалов взорванной горной массы, с последующим анализом, сочетающим ручную и автоматическую обработку изображений. Однако этот метод измерения имеет свои ограничения, включающие высокую стоимость трудозатрат и непрактичность так, как не дает достоверной информации специалистам о распределении обломков разной величины в теле развала, об изменении фрагментации на различных участках блока. В этой связи возникает задача автоматизации контроля размера фрагментов горной породы [1].

На сегодня одним из наиболее популярных методов оценки размеров фрагментов горной породы является косвенный метод на основе систем компьютерного зрения [2]. Среди методов решения задачи фрагментации при помощи компьютерного зрения наиболее перспективными являются подходы на основе нейронных сетей глубокого обучения. Этот подход позволяет решать задачи "end-2-end", то есть без использования дополнительных операций, например, предобработки или постобработки изображений.

В рамках подхода использования нейронных сетей задачи фрагментации сводят к проблемам т.н. сегментации объектов (экземплярной сегментации, instance segmentation). Часто авторы применяют достаточно медленные архитектуры, зарекомендовавшие себя в индустрии, например, Mask-RCNN [2]. В последние годы распространен подход с заменой сегментации объектов на вычислительно более простую задачу обнаружения объектов. При этом используются архитектуры реального масштаба времени, как YOLO[3]. В настоящее время архитектуры YOLO позволяют решать задачу обнаружение объектов, а также обнаружение ключевых точек, сегментация объектов и обнаружение ориентированных объектов (с учетом угла наклона). Указанные режимы работы могут представлять интерес в целях повышения точности решения задач фрагментации.

Целью данной работы является исследование современных архитектур обнаружения объектов в реальном масштабе времени для оценки фрагментации обломков горных пород в карьерах. Для этого было произведено сравнение различных режимов работы на базе модели YOLOv8 для решения задачи оценки фрагментации.

В ходе исследования были проведены эксперименты с моделью семейства YOLO версий 8 режимах: обнаружение объектов, обнаружение ориентированных объектов, обнаружение ключевых точек, сегментация объектов. Все модели для разных режимов работы использовались в своих максимальных конфигурациях YOLOv8x. При проведении экспериментов использовался размер изображений 640 на 640 пикселей. Обучение моделей производилось на наборе изображений с асбестосодержащей породой. Для обучения и тестирования модели было произведено разбиение на тренировочную, валидационную и тестовую выборку. Обучающая выборка 170 изображений, валидационная 25 изображений и тестовая 65 изображений. Разбиение было произведено вручную. В тестовую выборку вошли наиболее репрезентативные изображения участков открытого карьера после проведения взрывных работ. Пример исходного изображения и целевой разметки для обучения задачи обнаружения ориентированных объектов показан на рисунке 1.

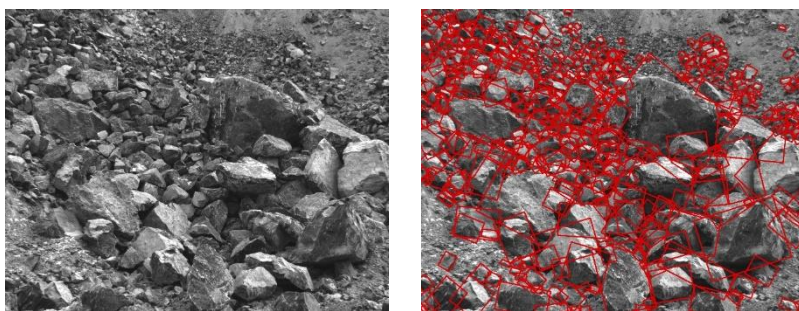


Рис. 1. Пример изображения открытого карьера после взрывных работ:
а) хризотил-асбестовые руды в серпентинитах, Свердловская область, г. Асбест;
б) Разметка с помощью ориентированных обрамляющих рамок

Для обучения моделей YOLOv8 использовался Фреймворк Ultralytics[3], позволяющий использовать разные режимы работы: экземплярная сегментация, обрамляющие рамки, ориентированные обрамляющие рамки и ключевые точки. Также в качестве базовой модели использовалась модель Mask-RCNN. Модели YOLOv8 и Mask-RCNN имели предобученные весовые параметры, полученные для набора данных COCO. Обучение

моделей семейства YOLO проводилось со стандартными параметрами рекомендуемыми разработчиками. Параметр случайного поворота изображения изменен на $\text{degrees}=45$. Для обучения установлена скорость обучения 0,01 для оптимизатора SGD, число эпох обучения 100, размер батча 4 изображения.

Для оценки качества восстановления распределения размера фрагментов с помощью обученных моделей использовалось расстояние Васерштейна [4]. Расстояние Васерштейна позволяет показать, насколько сильно, отличаются распределения для предсказанного размера и размера пород на основе разметки. Расстояние Васерштейна для распределений ν и μ определяется как [4]:

$$d_w(\mu, \nu) = (\int_0^1 |F^{-1}(x) - G^{-1}(x)|^2 dx)^{1/2}, \quad (1)$$

где F^{-1} и G^{-1} квантильные функции распределений ν и μ . Таким образом расстояние Васерштейна является мерой схожести распределений предсказанных максимальных размеров фрагментов горной породы с размеченными максимальными размерами фрагментов.

В таблице 1 показаны результаты метрик, полученных для тестового набора данных. В таблице показаны: N – количество обнаруженных фрагментов, интерполированная средняя точность (mean Average Precision) [5] для порогового значения intersection over union (IOU) 0,5 (mAP@0.5); значение IOU, расстояние Васерштейна ($d_{0,25}$) при заданном пороге уверенности сети в классификации 0,25; время обработки одного изображения в миллисекундах (t_{inf}). Оценка времени обработки одного изображения производилась на процессоре Intel Core(TM) i5-11400H 2.7 ГГц (CPU).

Из таблицы 1 видно, что наилучшее значение метрик по точности mAP для моделей с обрамляющими рамками демонстрирует YOLOv8x: BOX(0,67) и YOLOv8x OBB(0,68). Результаты моделей экзemplарной сегментации по метрике IoU выстроены в следующем порядке: YOLOv8x(0,73) и Mask-RCNN cascade 3x (0,71). Модель Mask-RCNN cascade 3x сегментирует меньшее число фрагментов пород по сравнению с другими моделями. Согласно расстоянию Васерштейна наиболее близкие результаты к распределению размеров разметки показывает Mask-RCNN. Для модели YOLOv8x в режимах сегментации, обнаружения объектов, обнаружения ориентированных объектов результаты сопоставимы от 0,0039 до 0,0042. Модель Mask-RCNN cascade 3x уступает по скорости обработки моделям YOLO в 6 – 7 раз, что ограничивает возможность практического использования Mask-RCNN в режимах реального времени.

Таблица 1

Метрики обученных моделей на тестовом наборе изображений.

Модель	N	mAP@0.5	IOU	$d_{0,25}$	t_{inf} мс
YOLOv8x BOX	4999	0,68	0,83	0,0042	406
YOLOv8x OBB	5406	0,67	0,81	0,0041	416
YOLOv8x KP	4478	0,61	0,83	0,6442	469
YOLOv8x Seg	4268	0,64	0,73	0,0039	569
Mask-RCNN cascade 3x	4181	0,58	0,71	0,0022	2427

Типичные визуализации результатов обнаружения фрагментов обломков горной породы для тестовых изображений показаны на рисунках 2 а)–д) для четырех исследуемых типов задач.

Результаты, представленные на рисунках 2 в таблице 1 позволяют заключить возможность использования моделей YOLO в решении задач фрагментации методами компьютерного зрения. Результаты показывают возможность достижения сопоставимого качества восстановления распределений размеров фрагментов горной породы на снимках.

Результаты для моделей YOLO дают сопоставимые значения для исследованных подходов на основе обнаружения объектов, обнаружения ориентированных объектов и сегментации объектов.

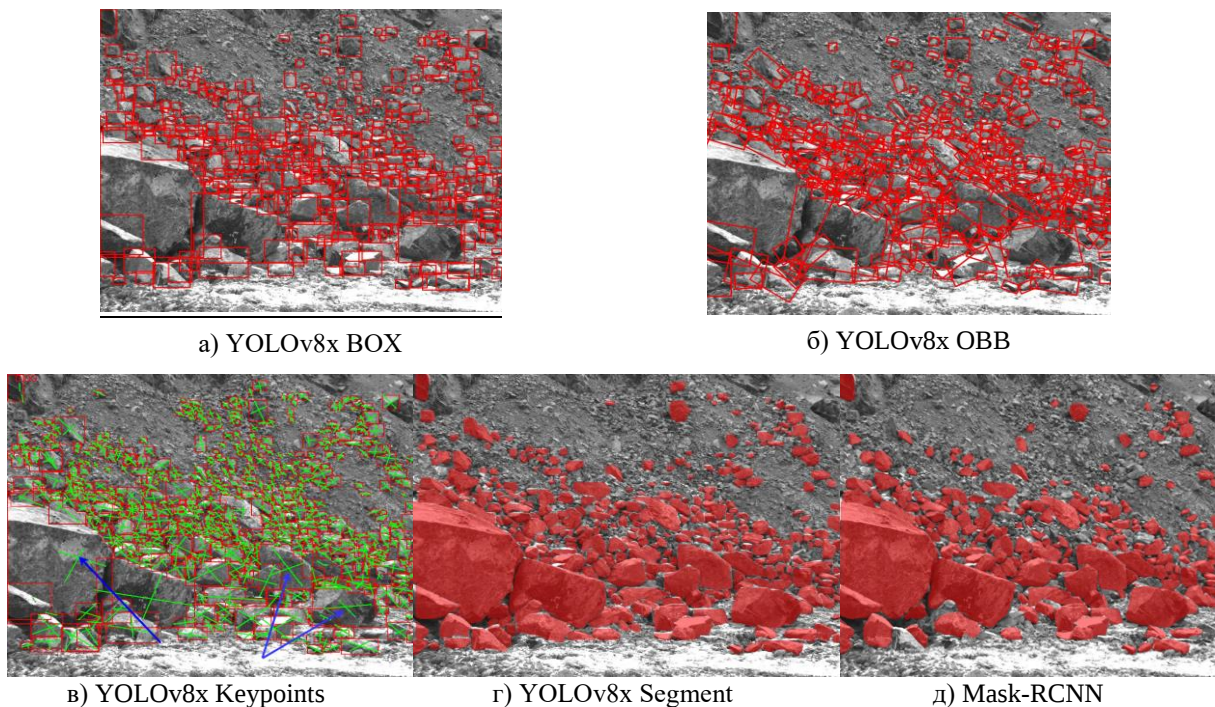


Рис. 2. Типичные визуализации результатов обнаружения обломков горной породы для тестовых изображений: а – обнаружение объектов; б – обнаружение ориентированных объектов; в – обнаружение ключевых точек; г – объектная сегментация; д – объектная сегментация Mask-RCNN

Заключение. Проведено исследование современных архитектур обнаружения объектов и решения связанных задач в реальном масштабе времени для оценки фрагментации обломков горных пород в открытых карьерах при помощи систем компьютерного зрения. Для архитектур на основе YOLOv8 показаны возможности решения задач фрагментации как модификации задач: обнаружения объектов, обнаружение ключевых точек, сегментация объектов и обнаружение ориентированных объектов. Результаты показывают качество восстановления распределений размеров фрагментов горной породы, сопоставимое с базовым – известным в литературе решением на основе архитектур Mask-RCNN. Однако, при этом архитектуры на базе YOLOv8 имеют скорость вычислений в 5 раз выше и позволяют проводить измерения на центральных процессорах за доли секунды.

Список литературы

1. Н. Н. Казаков, С. Д. Викторов, А. В. Шляпин, И. Н. Лапиков, Дробление горных пород взрывом в карьерах; РАН. – М.: РАН, 2020. – 519 с.: ил., табл. + Библиогр.: с. 509–518.– Прил.: с. 418–508. – ISBN 978-5-907036-96-3.
2. T. Vu, T. Bao, Q. V. Hoang, C. Drebenstedt, P. V. Hoa, и Н. Н. Thang, "Measuring blast fragmentation at Nui Phao open-pit mine, Vietnam using the Mask R-CNN deep learning model", Mining Technology, т. 130, вып. 4, сс. 232–243, окт. 2021, doi: 10.1080/25726668.2021.1944458.
3. «YOLOv8». Ultralytics Inc., 17 февраль 2024 г. [Онлайн]. Доступно на: <https://docs.ultralytics.com/>
4. Ramdas A, Garcia N, Cuturi M. On Wasserstein Two Sample Testing and Related Families of Non-parametric Tests. arXiv:1509.02237 (2015).
5. Hui J. mAP (mean Average Precision) for Object Detection. [Онлайн]. Доступно на: <<https://jonathan-hui.medium.com/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173>>.

Садыков Артур Алексович*

Матвеев Андрей Васильевич

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,

Новокузнецк, Россия

* artur.aleksovich@gmail.com

Экспериментальное определение зависимости величины эксплуатационной производительности мехлопат от кусковатости взорванных пород

Аннотация. В статье рассматривается экспериментальное определение зависимости величины эксплуатационной производительности мехлопат от кусковатости взорванных пород. Разработан и реализован методический подход, включающий сбор горно-технической информации, хронометражные наблюдения, определение параметров буровзрывных работ программой «BlastMaker». Определена формула для расчета среднего значения сменной эксплуатационной производительности мехлопат. Произведена статистическая оценка результатов расчетов. Приведены значения минимальных издержек и производительности мехлопат при разработке вскрышных пород в условиях разрезов Кузбасса.

Ключевые слова: экскаватор, буровзрывные работы, кусковатость взорванных пород, сменная эксплуатационная производительность, хронометражные наблюдения.

Artur A. Sadykov*

Andrey V. Matveev

FSBEI of HE «Siberian state industrial university»,

Novokuznetsk, Russia

* artur.aleksovich@gmail.com

Experimental determination of the dependence of the value of the operational productivity of the mechanical shovels on the lumpiness of the blasted rocks

Abstract. The article considers the experimental determination of the dependence of the value of the operational productivity of the mechanical shovels on the lumpiness of the blasted rocks. A methodological approach has been developed and implemented, including the collection of mining information, time-lapse observations, and the determination of drilling and blasting parameters by the BlastMaker program. A formula has been defined for calculating the average value of the replaceable operational productivity of mechanical shovels. A statistical evaluation of the calculation results has been performed. The values of the minimum costs and productivity of the mechanical shovels in the development of overburden rocks in the conditions of the Kuzbass sections are given.

Keywords: excavator, drilling and blasting, lumpiness of blasted rocks, replaceable operational performance, time-lapse observations.

Сравнение эффективности работы мехлопат и оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов для экскаваторов цикличного действия удавалось осуществить только в том случае, когда установлена зависимость изменения величины его производительности от кусковатости взорванной горной массы [1].

В работе [2] были проанализированы имеющиеся формулы для определения эксплуатационной производительности экскаваторов в зависимости от величины эксплуатационной производительности мехлопат от кусковатости взорванных пород и предложена новая зависимость для ее расчета

$$Q_{\text{э}} = \frac{3600ET_{\text{см}} \frac{0,22E^{0,234}}{0,234} K_3 K_{\text{из}}}{\frac{67d_{\text{ср}}^2}{E} + \frac{E}{0,11E+0,6} + \sqrt[3]{\frac{(35E+0,42E^2)^{\frac{5}{3}} \beta_{\text{п}}^2}{E}} + t_p}, \text{ м}^3/\text{см} \quad (1)$$

где K_3 – коэффициент влияния параметров забоя (для торцевого забоя $K_3 = 0,9$; для тупикового $K_3 = 0,8$); $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $K_{\text{из}}$ – коэффициент использования экскаватора в течение смены.

Для сравнения результатов расчета по новой формуле с достигнутыми значениями производительности экскаваторов на разрезах Кузбасса был разработан и реализован следующий методический подход к определению производительности мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков вскрыши, который исключал запрос информации, затрагивающей коммерческие интересы работы предприятия, проведение экспериментов непосредственно в забое и периодическую остановку работ горного участка для определения грансостава разрабатываемых пород. Для решения этого вопроса был разработан и реализован следующий методический подход, включающий:

1) Сбор горнотехнической информации, не затрагивающей коммерческие интересы работы предприятия: тип экскаватора, горнотехнические условия работы мехлопат, группа пород, коэффициент крепости пород, параметры БВР (сетка скважин, удельный расход ВВ, его тип), объем взрыва по блокам, календарный фонд времени на отработку блока.

2) Хронометражные наблюдения («Карты фотографий рабочего времени») для каждого блока и определение значения коэффициента использования календарного времени экскаватором при его отработке.

3) Расчет с использованием программы «BlastMaker» величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород $d_{\text{ср}}$, с учетом фактических параметров БВР и физико-механических свойств вскрыши для каждого блока. Эта программа позволяет учитывать влияние параметров БВР на степень фрагментации взорванных пород, включая расход взрывчатых веществ от их бризантности.

На основании хронометражных наблюдений рассчитывалось среднее значение коэффициента использования календарного времени при отработке блоков по формуле

$$K_{\text{и ср}} = \frac{[(V_1 K_{\text{и1}}) + (V_2 K_{\text{и2}}) + (V_3 K_{\text{и3}})]}{V_1 + V_2 + V_3}, \text{ дол. ед.} \quad (2)$$

где V_1, V_2, V_3 – объемы взрываемого блока, м^3 ; $K_{\text{и1}}, K_{\text{и2}}, K_{\text{и3}}$ – коэффициенты использования календарного времени при отработке блоков, дол. ед.

При этом сменная эксплуатационная производительности мехлопат для каждого блока учитывает величину коэффициента использования календарного времени

$$Q_{\text{э см1}} = \frac{V_1}{T_{\text{кал}}} T_{\text{см}} \cdot K_{\text{и ср}}, \text{ м}^3/\text{см} \quad (3)$$

где $T_{\text{кал}}$ – календарный фонд времени, ч.

Среднее значение сменной эксплуатационной производительности мехлопат учитывает объемы блоков

$$Q_{\text{э см}} = \frac{[(V_1 Q_{\text{э см1}}) + (V_2 Q_{\text{э см2}})]}{V_1 + V_2}, \text{ м}^3/\text{см} \quad (4)$$

где $Q_{\text{э см1}}, Q_{\text{э см2}}$ – сменная эксплуатационная производительности мехлопат, $\text{м}^3/\text{см}$.

Далее с использованием программы «BlastMaker» были рассчитаны параметры буровзрывных работ и величина средневзвешенного размера кусков взорванных пород $d_{\text{ср}}$, с учетом фактических условий проведения взрывных работ.

Таким образом удалось провести определение средневзвешенного размера кусков взорванной породы и соответствующей производительности для всех современных экскаваторов в производственных условиях на разрезах Кузбасса, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средневзвешенный размер кусков взорванной породы, параметры БВР и производительность экскаватора в производственных условиях

Тип экскаватора	Разрез	Объем взрыва по блокам, тыс. м ³	Время отработки, ч			Коэф. исп. календ. врем.		Q, см ³ /см при Г _{сн} = 12 ч		Группа пород, коэф. креп.	d _{ср} , м	Параметры БВР	
			Календ. фонд врем., ч	Время простоя	Время работы, ч	По блокам	Средний	По блокам	Средняя			Уд. расх. ВВ, кг/м ³	Сетка скв, м
ЭКГ-6,3	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Калтанский угольный разрез»	34	216	56	160	0,74	0,75	1888	1752	III – 50 %, IV – 50 %, 6–8	0,76	0,52	6x6
		26	198	48	150	0,76		1574					
ЭКГ-8	УК «Южный Кузбасс»	51	241	29	212	0,88	0,85	2540	2520	III – 20 %, IV – 80 %, 7–9	0,78	0,59	6x6
		64	307	55	252	0,82		2504					
ЭКГ-10	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез»	41	187	41	156	0,78	0,76	2631	2688	III – 40 %, IV – 60 %, 7–9	0,79	0,46	6x7
		45	197	49	148	0,75		2735					
ЭКГ-12	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Краснобродский угольный разрез»	57	254	61	193	0,76	0,80	2692	3348	IV – 100 %, 8–11	0,81	0,43	6x6
		85	310	75	235	0,76		3295					
ЭКГ-15	УК «Южный Кузбасс»	120	425	76	349	0,82	0,78	3386	4572	III – 50 %, IV – 50 %, 6–8	0,83	0,51	5x6
		110	285	51	234	0,82		4631					
ЭКГ-18	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Краснобродский угольный разрез»	80	215	53	162	0,75	0,92	4458	4716	III – 20 %, IV – 80 %, 7–9	0,85	0,58	6x7
		130	340	82	258	0,76		4592					
ЭКГ-25	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Бачатский угольный разрез»	140	351	14	337	0,96	0,94	4784	9960	III – 30 %, IV – 70 %, 6–8	0,87	0,64	7x7
		180	463	55	408	0,88		4663					
РН-2800ХРС (33 м ³)	УК «Южный Кузбасс»	250	306	12	294	0,96	0,86	9806	14004	III – 20 %, IV – 80 %, 7–9	0,89	0,62	6x7
		310	369	30	339	0,92		10084					
WK-45 (41,3 м ³)	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Бачатский угольный разрез»	240	207	29	178	0,86	0,95	13908	16512	III – 10 %, IV – 90 %, 7–11	0,90	0,60	6x6
		280	240	36	204	0,85		13997					
РН-4100ХРС (55,8 м ³)	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез»	310	264	32	232	0,88	0,95	14085	21888	III – 10 %, IV – 90 %, 7–11	0,92	0,60	6x6
		280	205	6	199	0,97		16423					
РН-4100ХРС (55,8 м ³)	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез»	350	253	13	240	0,95	0,95	16593	21910	III – 10 %, IV – 90 %, 7–11	0,92	0,60	6x6
		300	218	17	201	0,92		16501					
РН-4100ХРС (55,8 м ³)	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез»	350	192	6	186	0,97	0,95	21910	21841	III – 10 %, IV – 90 %, 7–11	0,92	0,60	6x6
		460	252	8	244	0,94		21910					
РН-4100ХРС (55,8 м ³)	АО «УК «Кубассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез»	380	209	10	199	0,95	0,95	21841	21841	III – 10 %, IV – 90 %, 7–11	0,92	0,60	6x6
		380	209	10	199	0,95		21841					

Полученные данные позволили произвести сравнение достоверности результатов расчета по имеющимся формулам с фактической производительностью всех приведенных в табл. 1 типов экскаваторов при величине значения $d_{\text{ср}}$, которая была установлена на разрезах Кузбасса. Статистическая оценка результатов расчетов производительности экскаваторов по принятым эмпирическим зависимостям с установленной в производственных условиях показала, что коэффициент вариации: по формуле Репина Н. Я. и др. составляет – 36,7 %; по формуле Сысоева А. А. и др. составит – 30,5 %; по предложенной в работе формуле составит – 17,7 % [2].

Предложенная новая зависимость для расчета производительности мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванной породы позволила определить графики зависимости изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат по основным процессам разработки пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат (ЭАКМЛ) при отработки вскрышных пород III и IV категории [3].

Их анализ показал, что в принятом диапазоне изменения кусковатости взорванных пород зона минимальных значений для всех принятых типов мехлопат характеризуется определенным значением величины средневзвешенного размера кусков $d_{\text{ср}}$ (табл. 2) [3].

Таблица 2

Значения минимальных издержек и производительности мехлопат при разработке вскрышных пород ЭАКМЛ в условиях разрезов Кузбасса

Гр. пород	Параметр	Экскаваторы-мехлопаты									
		ЭКГ-6,3	ЭКГ-8	ЭКГ-10	ЭКГ-12	ЭКГ-15	ЭКГ-18	ЭКГ-25	РН-2800 ХРС	WK-45	РН-4100 ХРС
III	$d_{\text{ср}}$, м	0,525	0,525	0,525	0,700	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$Q_{\text{э}}$, м ³ /см	2461	3177	4009	4463	5654	6173	8786	11683	14584	19402
	$Q_{\text{э год}}$ тыс. м ³ /год	1531	1976	2494	2776	3517	3839	5465	7267	9071	12068
	$\Sigma C_{\text{уд}}$ руб./м ³	132,99	131,62	104,51	90,77	78,42	75,67	73,14	69,33	55,00	46,60
IV	$d_{\text{ср}}$, м	0,525	0,525	0,700	0,700	0,700	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000
	$Q_{\text{э}}$, м ³ /см	2461	3177	3662	4463	5654	6829	8786	11683	14584	19402
	$Q_{\text{э год}}$ тыс. м ³ /год	1531	1976	2278	2776	3517	4248	5465	7267	9071	12068
	$\Sigma C_{\text{уд}}$ руб./м ³	139,93	138,55	110,25	95,96	83,61	81,95	80,00	76,19	61,86	53,46

Список литературы

1. Чаплыгин, В. В. К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород мехлопатами на разрезах Кузбасса / В. В. Чаплыгин, А. А. Садыков, А. В. Матвеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9. – С. 84–98.
2. Федотенко, В. С. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат / В. С. Федотенко, В. В. Чаплыгин, А. В. Матвеев // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 1(129). – С. 17–31.
3. Матвеев, А. В. Параметры технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами в условиях угольных разрезов Кузбасса / А. В. Матвеев // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 3(131). – С. 16–22.

Научный руководитель: Ермаков Анатолий Юрьевич, д. т. н., профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Россия.

Увеличение наработки насосных установок водопонижающих скважин посредством использования самоочищающихся фильтров

Аннотация. На предприятиях, ведущих открытые горные работы, в системах дренажа широко используются водопонижающие скважины, оборудованные погружными установками электроцентробежных насосов (УЭЦН). Значительное содержание частиц механических примесей в откачиваемой скважинной жидкости обуславливает интенсивное гидроабразивное изнашивание рабочих ступеней УЭЦН. Актуальной задачей является увеличение наработки погружных УЭЦН при сокращении времени и затрат на очистку или замену фильтров. Предложен способ повышения наработки УЭЦН в водопонижающих скважинах посредством применения самоочищающегося фильтра оригинальной конструкции. Для увеличения длины возвратно-поступательного перемещения УЭЦН относительно эксплуатационной колонны водопонижающей скважины предложено использование удлинителя колонны НКТ оригинальной конструкции. Приведены результаты расчета деформации колонны НКТ и удлинителя колонны НКТ.

Ключевые слова: водопонижающие скважины, погружные установки электроцентробежных насосов, механические примеси, гидроабразивный износ, самоочищающийся фильтр, удлинитель колонны НКТ.

Dmitry A. Sitnikov
Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russia, stdm2023@mail.ru

Increasing the operating time of pumping units of water-reducing wells through the use of self-cleaning filters

Abstract. At open-pit mining enterprises, dewatering wells equipped with submersible electric centrifugal pumps (ESP) are widely used in drainage systems. A significant content of mechanical impurity particles in the pumped well fluid causes intensive hydroabrasive wear of the ESP working stages. An urgent task is to increase the service life of submersible ESPs while reducing the time and costs of cleaning or replacing filters. A method is proposed for increasing the service life of ESPs in dewatering wells by using a self-cleaning filter of an original design. To increase the length of the reciprocating movement of the ESP relative to the production string of the dewatering well, it is proposed to use an extension of the tubing string of an original design. The results of calculating the deformation of the tubing string and the extension of the tubing string are presented.

Keywords: dewatering well, submersible installations of electric centrifugal pumps, mechanical impurities, hydro-abrasive wear, self-cleaning filter, tubing string extension.

Одним из основных факторов, осложняющих функционирование карьеров и разрезов, являются гидрогеологические условия, в частности, обводненность пород месторождения. Интенсивность водопритока оказывает непосредственное влияние на производительность выемочно-погрузочной техники, транспортных машин, устойчивость бортов и дна карьера. При изменении напряженного состояния, фильтрационных деформациях, выщелачивании, растворении и изменении механических свойств горных пород грунтовыми водами возможно возникновение оползней и плывунов [1].

Снижение обводненности пород месторождений осуществляется проведением дренажных работ, включающих каптаж, откачку и отвод подземных вод. Наибольшее распространение в системах дренажа получили водопонижающие скважины.

Откачка воды из водопонижающих скважин осуществляется установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) с погружными электродвигателями (ПЭД).

Периодический режим, эксплуатации водопонижающих скважин способствует повышенному выносу частиц механических примесей в откачиваемую скважинную

жидкость и обуславливает интенсивное гидроабразивное изнашивание рабочих ступеней УЭЦН [2]. Дальнейшее развитие гидроабразивного износа ЭЦН нередко приводит к перерезанию корпуса и падению части насоса в скважину.

Затраты на остановку, подъем, ремонт и повторный спуск УЭЦН зачастую превышают себестоимость самой установки обуславливают необходимость реализации мероприятий по предотвращению и минимизации последствий гидроабразивного изнашивания.

Среди существующих методов борьбы с гидроабразивным изнашиванием погружных насосов водопонижающих скважин наиболее простым, рентабельным и эффективным является использование фильтров различных конструкций [3].

Основным недостатком традиционных конструкций фильтров является их низкая грязеемкость.

Перспективным решением данной проблемы является применение различных конструкций самоочищающихся фильтров, позволяющих производить восстановление пропускной способности фильтроэлемента на месте без сложных и дорогих операций подъема и повторного спуска его в скважину.

На сегодняшний день все известные конструкции самоочищающихся фильтров объединяет одно общее свойство – наличие отдельного привода, который значительно увеличивает стоимость самоочищающегося фильтра и снижает надежность всей УЭЦН.

Предложена перспективная конструкция самоочищающегося фильтра (рис. 4) в качестве привода, которого, используется упругая деформация НКТ при работе в скважине [4].

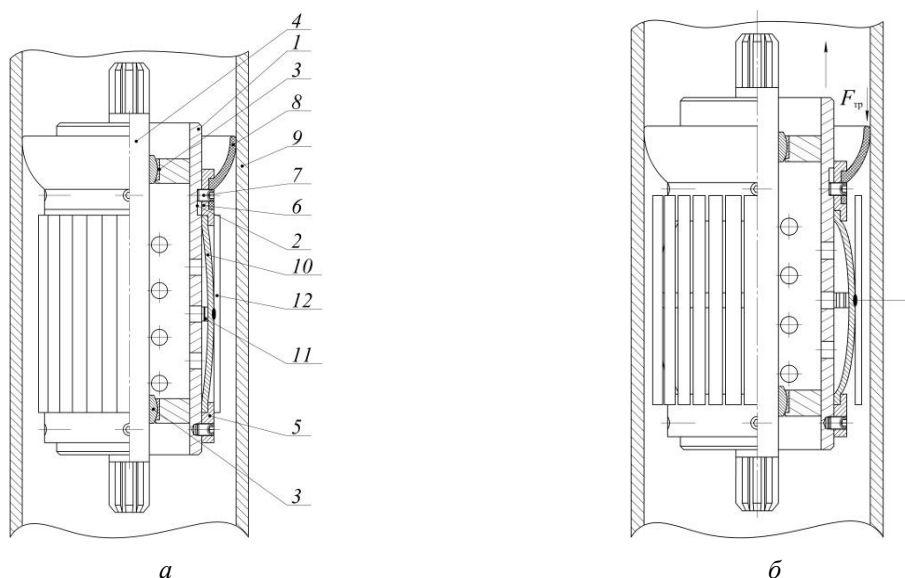


Рис. 2. Самоочищающийся щелевой фильтр: 1 – перфорированная труба; 2 – направляющие пазы; 3 – подшипниковые узлы; 4 – вал; 5 – неподвижный упор; 6 – подвижный упор; 7 – установочные винты; 8 – упругий элемент (манжета); 9 – эксплуатационная колонна; 10 – диаметрально расширяемый упругий элемент (центратор); 11 – поперечное крепление; 12 – фильтрующий элемент, выполненный в виде вертикальных стальных стержней

Характерные для водопонижающих скважин небольшие глубины установки оборудования обуславливают малые деформации колонны, недостаточные для самоочистки фильтра.

Увеличить деформацию колонны НКТ при небольших глубинах водопонижающих скважин с целью сообщения самоочищающемуся фильтру возвратно-поступательного движения возможно посредством использования удлинителя колонны НКТ оригинальной конструкции (рис.3) [5].

Компоновка УЭЦН в водопонижающей скважине с установленными самоочищающимся фильтром и удлинителем колонны НКТ приведена на рис. 4.

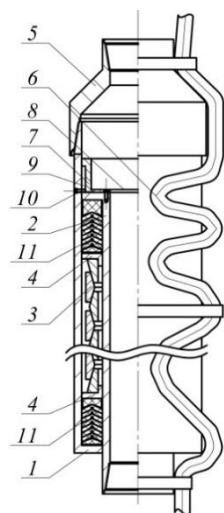


Рис. 3. Конструкция удлинителя НКТ:
1 – корпус; 2 – подвижный шток; 3 – пружина;
4 – разделительные элементы; 5 – переходник;
6 – электрическая линия; 7 – поршень;
8 – отверстие в поршне; 9 – направляющий паз;
10 – ограничительные винты; 11 – уплотнения

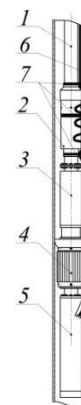


Рис. 4. Компоновка УЭЦН с установленными самоочищающимся фильтром и удлинителем колонны НКТ: 1 – колонна НКТ; 2 – удлинитель колонны НКТ; 3 – ЭЦН; 4 – самоочищающийся фильтр; 5 – ПЭД; 6 – электрическая линия; 7 – клемсы

С целью обоснования возможности применения предложенного самоочищающегося фильтра для защиты УЭЦН от гидроабразивного износа был произведен расчет деформации колонны НКТ и удлинителя колонны НКТ.

В качестве погружного насоса был принят малodeбитный ЭЦВ 8-25-400. Труба НКТ – 114x7,0 Е ГОСТ 633-80. Материал труб – 30ХМА. Модуль упругости материала труб – 2,08·10⁵ МПа. Коэффициент Пуассона – 0,3. Давление на устье скважины – 1 МПа.

При расчете деформации удлинителя колонны НКТ рассчитывалась деформация кольцевой пружины под действием осевого усилия, создаваемого давлением в колонне НКТ. Пружина высотой 1,5 м состоит из 101 кольца. Под действием осевого усилия наружные кольца испытывают деформацию растяжения, внутренние – сжатия.

Материал пружины – 65С2ВА. Модуль упругости материала пружины – 2,1·10⁵ МПа. Предел текучести – 1370 МПа. Коэффициент трения (сталь по стали) – 0,16.

В результате расчета деформации колонны НКТ и удлинителя колонны НКТ, согласно исходным данным таблицы 1, получен график (рис. 5).

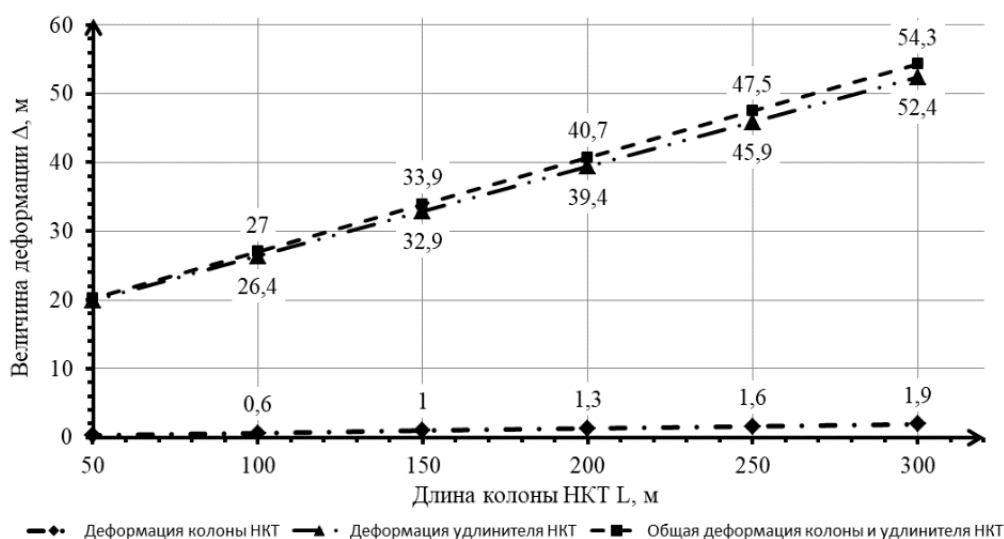


Рис. 5. График зависимости величины деформации колонны НКТ и удлинителя НКТ от глубины водопонижающей скважины

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что сообщение самоочищающегося фильтра возвратно-поступательного движения с целью очистки его фильтроэлемента при небольших глубинах водопонижающих скважин возможно с применением удлинителя колонны НКТ, который обеспечивает необходимое удлинение колонны насосно-компрессорных труб и управляемое возвратно-поступательное перемещение самоочищающегося фильтра внутри скважины относительно эксплуатационной колонны [6].

Таким образом, решение задачи по повышению наработки УЭЦН в водопонижающих скважинах, осложненных интенсивным выносом частиц механических примесей, возможно посредством применения самоочищающихся фильтров, использующих в качестве привода деформации колонны НКТ. Для обеспечения необходимого управляемого возвратно-поступательного перемещения самоочищающегося фильтра относительно эксплуатационной колонны скважины предложена конструкция удлинителя колонны НКТ.

Список литературы

1. Мироненко В. А., Фисенко Г. Л. Дренаж карьерных полей. – Москва, Недра, 1972. – 184 стр.
2. Шишлянников Д. И., Лавренко С. А., Зверев В. Ю., Муравский А. К., Микрюков А. Ю. Исследование гидроабразивного износа рабочих ступеней скважинных электроцентробежных насосов, перекачивающих жидкости с высоким содержанием механических примесей // орный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 5–20. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_5.
3. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры буровых скважин. – Москва : Недра, 1976. – 344 с.
4. Щелевой фильтр: пат. № 2807658, Российская федерация, С1; заявл. 11.07.2023, опубл. 21.11.2023, Бюл. № 33. – 11 с.
5. Удлинитель колонны насосно-компрессорных труб: пат. № 2811050, Российская федерация, С1; заявл. 27.03.2023, опубл. 10.01.2024, Бюл. № 1. – 12с.
6. Увеличение наработки насосных установок водопонижающих скважин посредством использования самоочищающихся фильтров / Д. И. Шишлянников, В. К. Картавцев, Д. А. Ситников [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 11. – С. 19–31. – DOI 10.18799/24131830/2024/11/4619. – EDN AYQXPS.

Научный руководитель: Шишлянников Дмитрий Игоревич, доктор технических наук, профессор, доцент кафедры «Горная электромеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

Технологическая схема производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа на месторождении низинного типа

Аннотация. В работе предложено применить гидрофобную модификацию торфомассы при производстве кускового торфа. Применение гидрофобизации позволяет снизить зависимость технологического цикла при добычи кускового торфа от неблагоприятных погодных условий. Приведена структурная схема добычи гидрофобно-модифицированного кускового торфа.

Ключевые слова: технология, добыча, гидрофобизация, кусковой торф, продолжительность сушки.

Anastasia A. Smirnova
Tver State Technical University, Tver, Russia

Technological scheme for the production of hydrophobically modified sod peat at a lowland type deposit

Abstract. The article proposes to use hydrophobic modification of peat mass in the production of sod peat. The use of hydrophobization reduces the dependence of the technological cycle in the extraction of sod peat on adverse weather conditions. It is presented the structural scheme of extraction of hydrophobically modified sod peat.

Keywords: technology, extraction, hydrophobization, sod peat, duration of drying.

В прошлом веке торф занимал большое значение в энергетическом комплексе страны, но с научно-техническим развитием техники и технологий, а также добычи углеводородного сырья (природный газ, нефть), он отошел на второй план. Однако для не газифицированных и труднодоступных регионов (Мурманская область, Заполярье и т.д.) он имеет первостепенное значение, так как является местным, дешевым и востребованным топливом. Вовлекает в его производство жителей населенных пунктов.

Торф и торфяная продукция активно использовалась в отраслях промышленности: металлургия, медицина, энергетика, садоводство и огородничество, строительство. Рыночный спрос на конкретный вид торфяной продукции и технологию производства зависит от конъюнктуры рынка в определенный период времени.

Торф – это кладезь недр, образовавшийся в результате частичного разложения в водной среде, обладает многокомпонентным, физическим и химическим составом, а также минеральными компонентами, предопределяющими его использование.

В труднодоступных регионах в основном преобладают месторождения низинного торфа, из которого получают коммунально-бытовое кусковое топливо пониженного качества. При хранении такое топливо разрушается и становится не удобным в использовании для топочных агрегатов, рассчитанных на кусковое топливо. Повысить качество и снизить крошимость кускового торфяного топлива возможно с применением физико-химических методов обогащения.

Основными проблемами реализации действующей технологии добычи кускового торфа является ее зависимость от погодных условий, сравнительно низкий сезонный сбор, сложность в обеспечении стабильных качественных характеристик сырья и невозможность предварительной модификации сырья [1, 2].

В настоящее время одним из физико-химических методов обогащения в производстве кускового торфа является принцип гидрофобизации. Так как его применение улучшает

качественные характеристики (снижение крошимости, увеличение прочности), что увеличивает срок хранения кусковой продукции без снижения ее качества, а также делает возможным транспортировку ее в удаленные населенные пункты. С другой стороны, торфяные куски с модифицированными добавками способны к снижению водопоглотительной способности, что благоприятно сказывается в процессе их полевой сушки и хранении на открытых площадках. Сушка кусков на поле сушки является лимитирующим фактором в технологии. Она занимает до 90–95 % от всего времени технологического цикла [3, 4].

Разработка технологии добычи кускового гидрофобно-модифицированного торфа в полевых условиях позволит снизить зависимость технологического процесса производства от метеорологических условий сушки и негативного влияния горно-геологических условий, позволит насытить торфяную матрицу дополнительными гидрофобными компонентами.

Производство кускового топлива с добавлением гидрофобной добавки оптимизирует и повышает эффективность его добычи и, кроме этого, появляется возможность использования в качестве обогащенного сырья для глубокой химической переработки материалов. В полевых условиях технологическую схему добычи с добавлением гидрофобизатора реализуется комплектом стилочно-формующего оборудования. Разработан способ, предполагающий использование физико-химического метода обогащения – гидрофобизации торфяного сырья, экскавируемого в бункер модернизированной стилочной машины.

В результате проведенных экспериментов был получен ряд положительных изменений, которые рекомендуется применять в технологии производства кускового гидрофобно-модифицированного торфа [5]. Гидрофобная добавка [6], влияя на физически связанную воду, снижает влажность формования на 12,5 %, приводя к уменьшению липкости и количества удаляемой влаги в процессе полевой сушки на полях добычи.

Обработка торфяной массы гидрофобными пленками [7] до формования существенно повышает его водоотталкивающие свойства. В результате время смачивания поверхности торфяных кусков увеличивалось вдвое. Это позволяет предположить уменьшение коэффициента поглощения атмосферных осадков и снижение зависимости добычи кускового торфа от метеорологических условий. Максимальная величина водопоглощения за 48 часов снизилась примерно на 30 %.

На основе экспериментальной базы для спроектированной технологической схемы добыча кускового торфяного модифицированного топлива возможно производственной площади, подготовленной для фрезерного способа. Поскольку эксплуатационная влажность такой залежи соответствует необходимым значениям 75...79 % [8, 9] торфяного сырья для технологии с модификацией.

Проведенные исследования показали, что на карте производственной площадки можно выполнять 7–10 технологических циклов. На протяжении сезона в соответствии с расчетными значениями длительности сушки и количества циклов экскавация торфяного сырья производится на первой карте, на второй – стилка с модификацией, с последующей сушкой и уборкой торфяного топлива. Далее в соответствии с этим порядком карты чередуются.

На технологической операции по экскавации торфяного сырья можно использовать выемочно-погрузочное оборудование (одноковшовый болотный экскаватор типа обратная лопата МТП-71 или аналоги, пригодные для работы на слабых грунтах) [10]. Экскавация торфяного сырья производится на фиксированную глубину с последующей погрузкой в бункер модернизированной стилочной машины. Ширина заходки экскаватора определяется его техническими параметрами от радиуса черпания на уровне стояния.

В зависимости от количества выполняемых технологических циклов и по мере сработки эксплуатационного слоя залежи происходит смена технологических карт через два сезона.

Таким образом, снижение влагосодержания формования позволяет использовать поля добычи фрезерного торфа для производства кускового гидрофобно-модифицированного торфа. Результаты использования предлагаемой технологии показали, что снижение начального влагосодержания приводит к увеличению циклового сбора за счет увеличения загрузки поля по сухому веществу и сокращает продолжительность времени сушки в постоянном и убывающем периодах и тем самым общую продолжительность технологического цикла. Сокращается также расчетная продолжительность сушки с учетом коэффициента поглощения осадков. В свою очередь снижение продолжительности цикла влечет за собой увеличения количества циклов и, как следствие, сезонного сбора.

Список литературы

1. Мисников О. С., Беляков В. А. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля. Учеб. пособие – 2-е изд. перераб. и дополненное – Тверь: ТвГТУ, 2016. 168 с.
2. Антонов В. Я., Малков Л. М., Гамаюнов Н. И. Технология полевой сушки торфа. Учеб. пособие – 2-е изд. перераб. и дополненное – М: Недра, 1981. 239 с.
3. Афанасьев, А. Е. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства / А. Е. Афанасьев, Н. В. Чураев. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
4. Афанасьев А. Е., Болтушкин А. Н. Процессы сушки дисперсных материалов. Тверь: ТвГТУ, 2011. – 152 с.
5. Купорова, А. В. Геотехнологическое обоснование производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа в полевых условиях: дис. ... канд. техн. наук. – ТвГТУ, Тверь, 2024. – 209 с.
6. Пашенко, А. А. Гидрофобизация / А. А. Пашенко, М. Г. Воронков, Л. А. Михайленко. – Киев: Наукова думка, 1986. – 238 с.
7. Суворов В. И., Соловьев Н. Л. Физико-химическое модифицирование кускового торфа // В кн. Физикохимия торфа и сапропеля / Материалы междунар. научно-техн. конф. Ч. 1. Тверь: ТвеПИ. 1994. С. 83–84.
8. Яблонев А. Л., Гусева А. М. Анализ параметров и режимов работы формующего агрегата машин для добычи кускового торфа с позиции обеспечения качества получаемого продукта // Горный журнал, 2022. № 5. С. 52–57.
9. Справочник по торфу / под ред. А. В. Лазарева и С. С. Корчунова, М.: Недра, 1982. 760 с.
10. Солопов С. Г., Горцакалян Л. О., Самсонов Л. Н. Торфяные машины и комплексы. Учеб. пособие – М: Недра, 1973. 392 с.

Научный руководитель: Купорова Александра Владимировна, к.т.н., доцент, Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия.

Смирнова Арина Дмитриевна^{1, 2 *}

Михайлова Татьяна Викторовна¹

Чэнь Шаоцзе²

Попов Алексей Васильевич³

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

² Шаньдунский университет науки и технологий, Циндао, КНР

³ ООО «Распадская угольная компания», Новокузнецк, Россия

* 211a19@kuzstu.ru

Особенности определения зон повышенной газоотдачи на основе анализа цифровых сеточных поверхностей физико-механических свойств горных пород

Аннотация. В рамках исследования по определению оптимальных мест заложения скважин заблаговременной дегазации в пределах угольных месторождений, характеризующихся слабой геолого-геофизической изученностью, требуется максимально эффективное использование имеющихся данных. В том числе, для прогноза зон повышенной газоотдачи необходимо учитывать геопространственное изменение значений физико-механических свойств горных пород. Поэтому выполнен анализ результатов лабораторных испытаний керна структурных скважин, пробуренных в пределах Тутуяской площади Кузбасса. Описаны процессы построения сеточных поверхностей значений объемной плотности и предела прочности для каждой литологической разности, а также оформления прогнозных карт. Выявлены закономерности геопространственного изменения свойств и определены критерии наиболее перспективных зон повышенной газоотдачи и первоочередных участков для бурения.

Ключевые слова: Кузбасс, метан угольных пластов, заблаговременная дегазация, керновый материал, физико-механические свойства, сеточные поверхности, геопространственный анализ.

Arina D. Smirnova^{1, 2 *}

Tatiana V. Mikhaylova¹

Chen Shaojie²

Aleksey V. Popov³

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

² Shandong University of Science and Technology, Qingdao, PRC

³ Raspadskaya PJSC, Novokuznetsk, Russia

* 211a19@kuzstu.ru

Features of identifying favorable areas of high-yield gas potential based on digital grid surfaces analysis of physical and mechanical rock properties

Abstract. The study focuses on optimizing well placement for pre-mining methane drainage within low-explored coal deposits. For high-yield gas zones prediction, it is essential to use the available information efficiently. Accordingly, the analysis on laboratory test results from core samples obtained from wells drilled in the Tutuyskaya area of Kuzbass was conducted. The process of grid surfaces building of properties values for each well and lithological variation, as well as the creation of predictive maps, were described. Geospatial variations of physical and mechanical rock properties were identified, and criteria of high-potential gas yield zones and priority drilling areas were established.

Keywords: Kuzbass, coalbed methane, pre-mining methane drainage, core samples, physical and mechanical properties, grid surfaces, geospatial analysis.

Подземная разработка угольных месторождений сопряжена с группой факторов риска, среди которых выбросы метана в горные выработки шахты представляют одну из наиболее серьезных угроз безопасности и устойчивости производственных процессов.

Одним из методов обеспечения взрывобезопасности является заблаговременная дегазация угольных пластов, предусматривающая извлечение угольного метана за несколько лет до начала очистных или подготовительных работ с применением технологий интенсификации газоотдачи. Данный метод осуществляется скважинами, пробуренными с поверхности, и, как правило, применяется для высокометаноносных и глубокозалегающих угольных пластов. Эффективность дегазации и газоотдающая способность углей при этом определяются не только газоносностью, но и проницаемостью угольного массива [1]. Пропускная способность угольных пластов, в свою очередь, зависит от интенсивности, геометрии и количества раскрытых трещин кливажа, которые формируют пути миграции флюидов в поровом пространстве [2].

Принимая во внимание современное состояние технологий ведения дегазационных работ, а также технических и технологических решений по сокращению продолжительности процесса дегазации, перспективным развитием служит разработка эффективных методов прогнозирования зон с потенциально высокой газоотдачей и определения оптимальных мест заложения скважин в пределах метаноугольных месторождений, характеризующихся слабой геолого-геофизической изученностью [3]. Для этого необходим комплексный учет и максимально эффективное использование имеющейся информации, в том числе проведение геопространственного анализа изменения физико-механических свойств (ФМС) углепородного массива.

В данном исследовании среди ФМС особенное внимание уделяется таким ключевым характеристикам, как объемная плотность и предел прочности пород при одноосном сжатии, которые служат косвенными индикаторами проницаемости и трещиноватости массива [4, 5]. При инженерно-геологическом изучении участков угольных месторождений, перспективных для заблаговременного извлечения метана, объем опробовательских работ зачастую ограничен, поэтому аналитические работы следует проводить с использованием современных цифровых технологий. Таким образом, целью исследования является выполнение геопространственного анализа прогнозных карт районирования, основанных на двухмерных сеточных поверхностях, для определения зон с потенциально высокой газоотдачей и первоочередных участков для бурения.

Исследование проводилось на данных, полученных при бурении и испытаниях структурных скважин в пределах Тутуянской площади Кузбасса, которую считают перспективной для комплексного освоения с попутным извлечением метана угольных пластов (МУП) [6]. В настоящее время территория является объектом предварительных исследований и в южной части тесно прилегает к действующим шахтам ООО «Распадская угольная компания». Согласно ежегодным планам развития горных работ, Тутуянская площадь потенциально рассматривается как место заложения новых угольных шахт в ближайшее десятилетие, что предопределяет постановку вопроса по оптимизации расположения скважин заблаговременной дегазации.

Первой задачей исследования служил статистический анализ результатов лабораторных испытаний керна трех последовательно чередующихся литотипов, а именно алевролитов, аргиллитов и угольных пластов, в результате которого была оформлена база данных, включающая литологическое описание и глубину отбора проб, а также фактические значения ФМС. Затем, для эффективной интерпретации геопространственных изменений ФМС угольных пластов и вмещающих пород были построены гриды (сеточные поверхности) для каждого литотипа с использованием методов математического моделирования в среде Surfer (Golden Software). Сгенерированный файл сеток служит двухмерным представлением трехмерных пространственных данных в виде линий одинаковых значений. Учитывая, что расположение скважин на исследуемой территории неравномерное, для корректной интерполяции данных требовалось создание структурированной таблицы вводных данных. При этом в поля таблицы координат X и Y указывалось реальное географическое расположение скважин, в то время как поле с координатой Z представляло собой

усредненные значения объемной плотности и предела прочности. В качестве геостатистического метода для интерполяции точечных значений лабораторных испытаний был выбран метод Кригинга, подходящий для данных с анизотропной пространственной структурой.

Поверхности сеток были созданы для следующего этапа геопропространственного анализа – построения прогнозных карт районирования. Для улучшения точности интерпретации сеточные поверхности были интегрированы с местоположениями скважин и топографическими данными исследуемой территории, что позволило визуализировать пространственные изменения свойств литотипов в пределах изучаемого интервала, экстраполировать данные и создать прогнозные карты распределения значений объемной плотности и предела прочности пород при одноосном сжатии. На основе данных четырех структурных скважин на рисунке 1 представлен пример прогнозной карты районирования по ФМС угольных пластов, необходимой для установления критериев и границ зон повышенного газовыделения при заблаговременной дегазации. Рядом с условными обозначениями устьев скважин приведены средние значения объемной плотности (в числителе) и предела прочности (в знаменателе) угольных пластов.

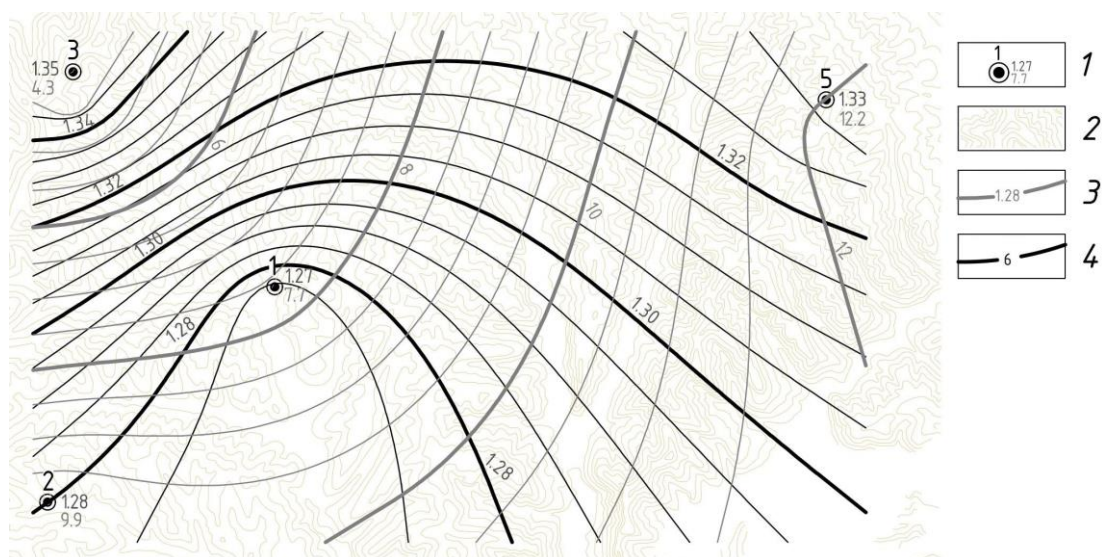


Рис. 1. Прогнозная карта пространственных изменений ФМС угольных пластов в пределах исследуемой местности: 1 – структурная скважина; 2 – изолинии земной поверхности; 3 – изолинии объемной плотности δ_o , г/см³; 4 – изолинии предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, МПа [составлено авторами]

Таким образом, результаты исследования показали, что геопропространственный анализ прогнозных карт районирования по объемной плотности и пределу прочности, построенных на основе сгенерированных сеточных поверхностей, обеспечивает методологическую основу для интерпретации распределения ключевых характеристик углепородного массива и определения зон с повышенным потенциалом газоотдачи при ограниченной исходных данных. Так, зоны с высокими значениями объемной плотности и предела прочности, как правило, характеризуются низкой проницаемостью и меньшим количеством трещин, что негативно сказывается на способности массива к эффективной дегазации. Напротив, низкие значения объемной плотности и предела прочности позволяют выделить газопроницаемые участки с развитой системой трещин, которые способствуют интенсивному газовыделению за счет большего количества пор и кливажных трещин, выступающих в качестве основных каналов миграции пластовых флюидов для нетрадиционных коллекторов метана. Направлением дальнейших исследований является

построение геомеханических моделей и контурных карт распределения главных напряжений в угленосном массиве в горно-геологической информационной системе tNavigator и последующая их интеграция с прогнозными картами. Такой подход позволит выявить оптимальные для бурения дегазационных скважин места, потенциально характеризующихся повышенной газоотдачей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Список литературы

1. Баймухаметов С. К. Проблемы отработки газоносных и опасных по внезапным выбросам угольных пластов с низкой проницаемостью в Карагандинском угольном бассейне / С. К. Баймухаметов, А. Ж. Имашев, Ф. А. Муллағалиев, Л. Ф. Муллағалиева, К. С. Коликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – Т. 1. – № 10. – С. 124–136. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_124.
2. Смирнова А. Д. Анализ распределения проницаемости угольных пластов Южной части Тузунской площади Кузбасса / А. Д. Смирнова, А. Г. Шевцов, Ш. Чэнь // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 657–665. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-657-665.
3. Логинов А. К. Заблаговременная дегазация угольных пластов и добыча метана угольных пластов. Проблемы и перспективы развития / А. К. Логинов, А. А. Мешков, Е. В. Мазаник, К. С. Коликов, Н. Д. Вержанская // Уголь. – 2024. – Т. 1185. – № 10. – С. 62–67. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-62-67.
4. Li L. An experimental and numerical study of abrupt changes in coal permeability with gas flowing through fracture-pore structure / L. Li, S. Zhang, Z. Li, X. Chen, L. Wang, S. Feng // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 21. – P. 7842. <https://doi.org/10.3390/en15217842>.
5. Kumar H. Effect of permeability and geomechanical properties on coal matrix during CBM production – an overview / H. Kumar, M. K. Mishra, M. Susmita // Journal of engineering science and technology review. – 2018. – Vol. 11. – № 2. – P. 160–173.
6. Копытов А. И. Современные методы добычи метана из угольных пластов / А. И. Копытов, М. Д. Войтов, С. М. О. Тагиев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – Т. 114. – № 2. – С. 35–41.

Научный руководитель: Михайлова Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой маркишейдерского дела и геологии, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия.

Пространственное моделирование открытых горных работ с целью обоснования вариантов разработки

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения пространственных компьютерных моделей для обоснования вариантов разработки месторождений. На примере карьера по добыче флюсовых известняков изложена методика построения пространственных моделей основных объектов и определения параметров варианта разработки месторождения. Приведены результаты автоматизированной экономико-финансовой оценки варианта разработки. Применение рассмотренных программных средств позволяет оперативно формировать проектные варианты разработки, производить их оценку и на этой основе обосновывать наиболее рациональные варианты отработки запасов.

Ключевые слова: компьютерная модель открытых горных работ, варианты разработки, моделирование месторождений полезных ископаемых, оценка вариантов разработки.

Maxim A. Tokhtamysh
FSBEI HE «DonNTU», Donetsk, Russia, tokhtamysh18@gmail.com

Spatial modeling of open pit mining operations to justify development options

Abstract. The article considers the issues of using spatial computer models to justify the development options of deposits. Using the example of a quarry for the extraction of flux limestones, the article presents a method for constructing spatial models of the main objects and determining the parameters of a deposit development option. The article presents the results of an automated economic and financial assessment of the development option. The use of the considered software allows for the prompt formation of project development options, their assessment and, on this basis, justification of the most rational options for the development of reserves.

Keywords: computer model of open pit mining, development options, modeling of mineral deposits, evaluation of development options.

Принятие обоснованных решений по развитию горных работ на горнодобывающем предприятии представляет собой сложную задачу в силу инерционности горнотехнической системы, низкой достоверности горно-геологической информации, изменчивости внутренних и внешних условий функционирования предприятия. Колебания спроса на добываемое сырье, цен на полезные ископаемые приводят к необходимости пересмотра ранее принятых проектных и плановых решений. Для обеспечения такой возможности необходимо построение пространственных компьютерных моделей месторождений и автоматизация процессов проектирования и планирования на основе моделей.

В связи с бурным развитием возможностей цифровых технологий в последние годы на горнодобывающих предприятиях широко используются известные зарубежные программные продукты, составляющие класс горно-геологических информационных систем. Ограничения в использовании зарубежного программного обеспечения, возникшие в последнее время, активизируют процессы разработки российского программного обеспечения, в частности, внедряются программные продукты Geomix, Mineframe [1]. Особенно важно динамическое моделирование всей цепочки создания стоимости добываемого полезного ископаемого [2]. Возможность модели связать решения по оконтуриванию запасов месторождения, проектные и плановые решения, а также способность оперативно оценить эти решения создает предпосылки для нахождения вариантов разработки, близких к оптимальным в сложившейся ситуации и оперативного пересмотра решений при изменении горно-геологических, горнотехнических и финансово-экономических условий.

Использование стандартных программных продуктов позволяет достаточно быстро построить модели месторождений. В то же время использование готовых решений связано с ограничениями в решении уникальных задач, возникающих на конкретных горнодобывающих предприятиях. Устранению противоречий между универсальностью и способностью

автоматизированных систем решать уникальные задачи может способствовать гибкое сочетание своих разработок и распространенных программных продуктов.

В данной статье рассматривается методика построения модели карьера и решения задач проектирования, планирования, экономико-финансовой оценки вариантов разработки месторождения на основе программного обеспечения, разработанного с участием сотрудников Донецкого национального технического университета [3].

Модель открытых горных работ включает земную поверхность, текущую поверхность карьера, проектный контур отработки карьера, результаты геологической разведки (скважины и пробы), рудные тела, дороги, отвалы, горные выработки (плотины, дамбы). Методика построения основных объектов модели представлена в таблице 1.

Таблица 1

Методика построения объектов модели

№ пп	Объекты модели	Методика построения
1	Земная поверхность, поверхность карьера	Векторизация топографической поверхности либо оцифровка бровок уступов карьера. Создание каркасной модели с использованием триангуляции Делоне
2	Скважины, данные опробования	Импорт данных инклинометрии из XLS-файлов
3	Рудные тела	Импорт векторизованных разрезов, триангуляция каркасов
4	Проектные горные выработки	Задание параметров сечений и трассы горной выработки, триангуляция каркаса выработки

Результаты моделирования карьера представлены на рисунке 1.

Использование пространственной модели позволяет определить запасы полезного ископаемого, объемы горных работ по периодам, объемы отвалов, объемы работ по строительству горнотехнических сооружений, расстояние транспортировки пустых пород и добытого полезного ископаемого. Для подготовки графической документации в программном обеспечении имеются средства построения разрезов любыми заданными плоскостями, а также вертикальных разрезов вдоль криволинейных трасс проектируемых объектов. Пространственные модели и разрезы могут быть экспортированы в формат dxf-файлов для обмена с САПР – системами и горно-геологическими информационными системами.

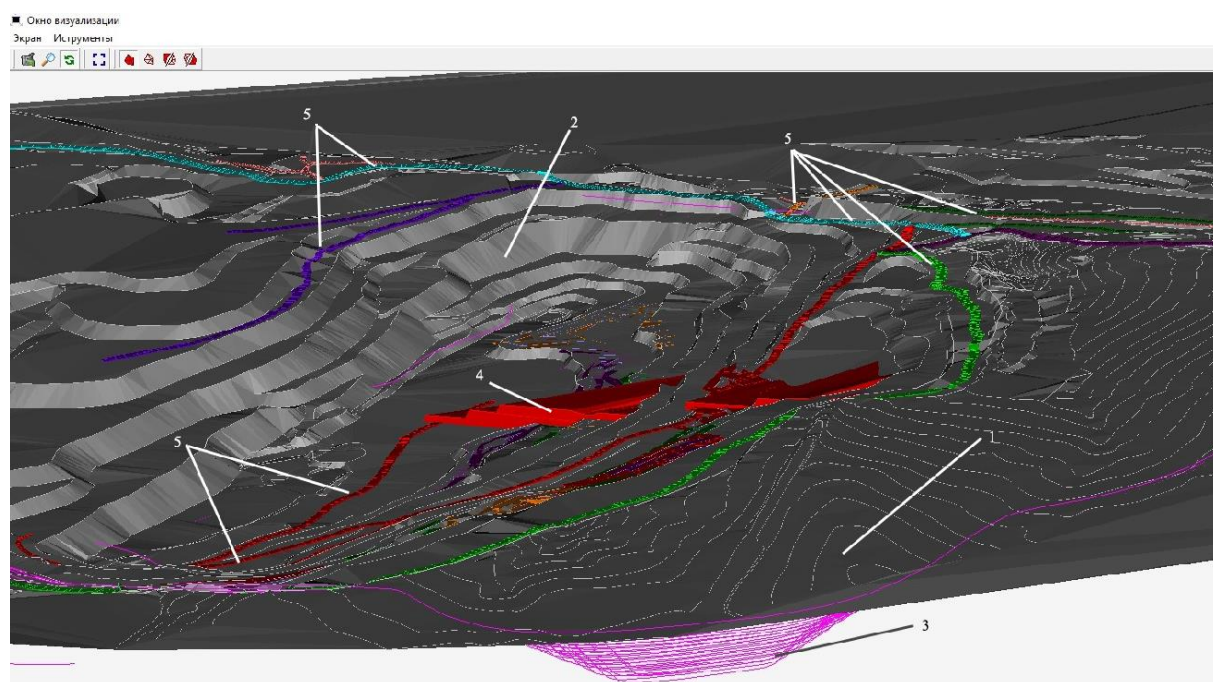


Рис. 1. Модель карьера: 1 – земная поверхность, 2 – поверхность карьера, 3 – проектный контур карьера, 4 – рудные тела, 5 – дороги

В результате использования перечисленных возможностей программного обеспечения формируются исходные данные для экономико-финансовой оценки вариантов, которая реализована в среде электронных таблиц. Исходя из производственного плана рассчитывается план капитальных вложений, амортизация основных средств, план инвестиций, план денежных потоков и итоговые показатели оценки варианта – чистая приведенная стоимость (NPV) и внутренняя норма доходности (IRR).

Применение компьютерных моделей для моделирования горнодобывающих предприятий и автоматизация финансово-экономических расчетов обеспечивают возможность формирования нескольких альтернативных вариантов разработки месторождения, их оценку и сравнение, что в конечном итоге повышает эффективность разработки месторождения.

Автоматизация расчетов и подготовки графической документации создает предпосылки для оперативного пересмотра проектных и плановых решений при изменении условий функционирования горнодобывающего предприятия.

Список литературы

1. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее. Горный журнал. 2020;(9):13–18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.01>.
2. Muniappen K., Genc B. Dynamic simulation of an opencast coal mine: a case study. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 7, p. 164–181. DOI: 10.1007/s40789-019-00287-y.
3. Скаженик В. Б. Система автоматизированного проектирования разработки россыпных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 3. – С. 150–152.

Научный руководитель: Скаженик Владимир Борисович, канд.техн.наук, доцент, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия.

Комплексный подсчет запасов угля и оценка ресурсов метана угольных пластов при помощи алгоритмического кодирования

Аннотация. В данной работе исследована необходимость цифровой трансформации угледобывающей промышленности в контексте растущего спроса на рациональное использование минеральных ресурсов и сокращения углеродного следа. Проанализирован перспективный подход к автоматизации процесса комплексного подсчета запасов, используемый в целях повышения эффективности и точности геологических расчетов. Рассмотрена возможность и особенности разработки алгоритма, обеспечивающего стандартизацию и автоматическое структурирование геологических данных, включая выделение однородных блоков и расчет среднеарифметических значений ключевых параметров. Выводы исследования подчеркивают значимость цифровых решений для устойчивого развития угледобывающей отрасли, а предложенный алгоритм представляет собой один из этапов создания единой цифровой платформы для комплексного геолого-экономического анализа.

Ключевые слова: Кузбасс, уголь, метан угольных пластов, комплексный подсчет запасов, алгоритмическое кодирование.

Maksim V. Trofimov^{1*}

Arina D. Smirnova^{1,2}

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

² Shandong University of Science and Technology, Qingdao, PRC

* trofimovmv@kuzstu.ru

Comprehensive coal reserve estimation and coalbed methane resource assessment applying algorithmic coding method

Abstract. This study addresses the critical need for digital transformation in the coal mining industry to promote sustainable resource utilization and reduce the carbon footprint. It explores an advanced algorithmic approach to automating comprehensive reserve estimation, focusing on improving the accuracy and efficiency of geological analyses. The proposed algorithm standardizes and structures geological data, enabling the delineation of homogeneous blocks and calculation of key parameters such as average thickness and density. The research underscores the significance of digital solutions for sustainable coal mining practices and presents the algorithm as a foundational step towards a unified digital platform for geo-economic analysis.

Keywords: Kuzbass, coal, coalbed methane, complex reserves calculation, algorithmic coding.

В последние годы глобальные тренды устойчивого развития горнотехнических систем предполагают повышение экономичности, ресурсосбережение, а также минимизацию выбросов парниковых газов в атмосферу. Одним из ключевых направлений рационального потребления минеральных ресурсов является извлечение и последующее эффективное использование попутных полезных ископаемых. Среди угледобывающих регионов России самым крупным производителем и поставщиком угля является Кузбасс, на долю которого приходится почти половина всей добычи угля в стране. Помимо значительных запасов угля, Кузбасс также характеризуется высоким ресурсным потенциалом метана угольных пластов (МУП), предварительные объемы которого оцениваются в 13,1 трлн м³. МУП представляет собой ценный природный ресурс с высоким энергетическим потенциалом, который также обладает экономическими преимуществами в условиях глобального перехода на низкоуглеродные источники энергии. Это предопределило

постановку вопроса по комплексному природопользованию и подсчету запасов как твердого полезного ископаемого – угля, так и попутного углеводорода – метана.

В соответствии с программой развития угольной промышленности Кемеровской области – Кузбасса на период до 2035 года, стратегической задачей является внедрение современных цифровых решений в производственные и технологические процессы отрасли. Наиболее важным этапом в разведке угольных месторождений является подсчет запасов, от точности которого зависит эффективность всего производственного цикла. В настоящее время в геологической практике подсчет запасов всех типов твердых полезных ископаемых осуществляется единственным методом, именуемым методом геологических блоков. Преимущество этого метода связано не с методологическим или алгоритмическим превосходством, а в опыте и уровне квалификации небольшого числа геологов, обладающих искусством выделения блоков. Для повышения точности расчетов геологи прилагают значительные усилия, размещая блоки так, чтобы структура модели в плоскости пласта была. Однако, полностью устранить методологическую погрешность невозможно [1].

Для обеспечения долгосрочного и устойчивого развития предприятий угольной промышленности необходим переход к цифровой трансформации процессов подсчета запасов и оценки попутных ресурсов, используя инновационные методы и подходы. Более того, актуальность автоматизации комплексного подсчета запасов с использованием скриптовых языков программирования также обусловлена дефицитом квалифицированных специалистов-геологов, способных корректно и оперативно осуществлять выделение блоков и выполнять сложные расчеты вручную. В этой связи возникает необходимость в разработке и внедрении автоматизированного способа комплексного подсчета запасов угля и оценке ресурсов МУП на основе методов алгоритмического кодирования, и целью данного исследования служит определение особенностей этого процесса.

Для повышения точности и оперативности в расчетах, снижения влияния человеческого фактора, а также создания единой базы данных для интеграции в информационные системы управления ресурсами, предлагаемый метод алгоритмического кодирования создаст основу для автоматизированного анализа больших объемов геологических данных и определения ресурсного потенциала [2]. Структурированный алгоритм ориентирован на последовательную обработку данных и требует логической разбивки принципа работы на этапы, представленные на Рисунке 1.

На начальном этапе для успешного применения алгоритмического кода необходимы исходные данные, полученные в результате геологоразведочных работ. Алгоритм структурирует и организует исходную информацию, включая результаты буровых работ, опробования и геофизических исследований скважин. Основными параметрами, которые используются при расчетах объема и запасов угля в каждом подсчете блоке продуктивной группы пластов или отдельных пластов с метаноносностью $9 \text{ м}^3/\text{т}$ и выше, являются мощность и угол падения пласта, а также объемная масса полезного ископаемого. Для оценки ресурсов МУП в качестве основных параметров выступают сухая беззольная масса угля или метаноносность, рассчитанная на органическую массу угля. Исходные данные на вводе проверяются на наличие дубликатов, аномальных значений и пропусков.

После этого система проводит автоматическое разделение исследуемой территории на подсчетные блоки, в пределах которых горно-геологические условия считаются относительно однородными, чтобы избежать ошибок при комплексном подсчете запасов, связанных с варьирующимися горно-геологическими характеристиками. Следующий этап осуществляет системную операцию традиционного метода подсчета запасов в пределах выделенных геологических блоках. Так, для каждого подсчетного блока автоматически рассчитываются среднеарифметические значения ключевых параметров, на основе которых алгоритм производит подсчет запасов угля на горизонтальную проекцию каждого подсчетного блока. Данный этап включает не только расчет объема и тоннажа угля, но и оценку ресурсного потенциала МУП.



Рис. 1. Принцип работы алгоритмического кода для комплексного подсчета запасов полезных ископаемых кодирования

Затем алгоритмом осуществляется преобразование текстовых и числовых значений параметров в числовые коды, что позволяет их стандартизировать для дальнейших вычислений. Этот процесс сопровождается автоматической проверкой на наличие системных ошибок, обеспечивая целостность и корректность данных на всех этапах анализа. Завершающими этапами алгоритмического кодирования являются автоматизированный комплексный подсчет запасов и генерация отчета с выводами информации об анализе собранных данных. В отчет включаются таблицы с результатами расчетов запасов угля и оценкой ресурсов метана, а также рекомендации по дальнейшей разработке угольных пластов, включая оценку перспективности каждого участка на основании геолого-экономических показателей [3].

Таким образом, проведенное исследование подчеркивает важность цифровой трансформации горнодобывающей отрасли и создает предпосылки для дальнейших исследований в области автоматизации геолого-экономического анализа угольных месторождений. Разработка и внедрение автоматизированного алгоритма для комплексного подсчета запасов угля и оценки ресурсов МУП позволит повысить точность, эффективность и оперативность геологических расчетов. Предлагаемый алгоритм, разработанный на основе методов алгоритмического кодирования, представляет собой эффективный инструмент для автоматизированного подсчета запасов угольных месторождений, который использует современные подходы в области обработки данных. Направлением дальнейших исследований служит разработка алгоритма и сравнение полученных результатов комплексного подсчета запасов традиционным и новым методами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Список литературы

1. Шек В. М. Оптимизация подсчета запасов с помощью ГИС Geo+ / Ю. С. Вознесенский, И. А. Кравченко, Р. М. Закиев, А. Г. Литвинов, Л. В. Панчукова. // Горный информационно-аналитический бюллетень/ – 2011. – С. 327–363.
2. Закиев Р. М. Дифференцированный подсчет запасов угольных месторождений с использованием ГИС-технологий / Р. М. Закиев, В. М. Шек // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2012. – № 11. – С. 25–30.
3. Кувашкина Т. А. Подсчет запасов полезных ископаемых на базе объектно-ориентированной методологии / Т. А. Кувашкина, П. С. Дранишников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – С. 185–196.

Научный руководитель: Михайлова Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой маркшейдерского дела и геологии, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия.

Секция 6. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

УДК 697.922

Ахметьянов Айнур Назифович

Округин Павел Евгеньевич

Кочнева Людмила Викторовна*

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

* lyu7660@yandex.ru

Проведение воздушно-депресссионных съемок специалистами службы депресссионных съемок ФГУП «ВГСЧ»

Аннотация. Цель исследования: улучшение эффективности проветривания горных выработок. Основные проблемы проветривания горной выработки: сложность организации вентиляции, изменение условий работы, загрязнение воздуха, потери воздуха из-за утечек, перепады давления, энергозатраты, опасность для здоровья рабочих при недостаточной вентиляции, влияние климатических условий. Актуальность этой проблемы обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и эффективности горных работ. Проведение воздушно-депресссионных съемок позволяет определить параметры вентиляционной системы, выявить проблемы с проветриванием и предложить решения для оптимизации работы.

Ключевые слова: проветривание подземных выработок, воздушно-депресссионная съемка, лазерное сканирование, система депрессионных съемок, военизированная горноспасательная часть.

Ainur N. Akhmetyanov

Pavel E. Okrugin

Lyudmila V. Kochneva*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

* lyu7660@yandex.ru

Conducting air-depression surveys by specialists of the Federal State Unitary Enterprise "Paramilitary Mine Rescue Unit" depression survey service

Abstract. The purpose of the study: to improve the efficiency of ventilation of mine workings. The main problems of ventilation of mining: the complexity of ventilation, changes in working conditions, air pollution, air loss due to leaks, pressure drops, energy consumption, danger to the health of workers with insufficient ventilation, the influence of climatic conditions. The urgency of this problem is due to the need to ensure the safety and efficiency of mining operations. Conducting air-depression surveys allows you to determine the parameters of the ventilation system, identify problems with ventilation and offer solutions to optimize operation.

Keywords: ventilation of underground workings, aerial depression survey, laser scanning, depression survey system, paramilitary mine rescue unit.

Для полноценной работы любого горного предприятия, которое разрабатывает месторождения полезных ископаемых подземным способом, необходимо проветривание.

Проветривание подземных горных выработок необходимо для выполнения следующих задач:

1. подачу к местам работ чистого свежего воздуха для дыхания;
2. разбавление и вымывание из горных выработок опасных газов и пыли (разбавление метана, газов после массовых взрывов, газов от работы дизельных двигателей и т.д.);
3. понижение или повышение температуры рудничной атмосферы.

Эффективность работы очистных и подготовительных участков зависит от того, насколько правильно подобран режим проветривания шахты. Поэтому опытные руководители предприятий всегда акцентируют внимание на организации проветривания.

Кроме того, проветривание выработок играет существенную роль при ликвидации последствий аварий. От выбора режима проветривания зависят:

- маршруты выхода людей в безопасные места или на поверхность;
- безопасность ведения горноспасательных работ;
- скорость развития аварии.

Движение воздуха по горным выработкам происходит за счет разности давлений, которая получается за счет естественной тяги или механической работы вентиляторных установок.

Из-за разницы температур и, соответственно, плотности воздуха в шахте и на поверхности создается естественная тяга. Так как направление этой тяги меняется в зависимости от времени года и ее невозможно контролировать, «Правила безопасности» запрещают проветривание шахт только за счет естественной тяги. Для вентиляции шахт необходимо использовать вентиляторные установки.

Вентиляторные установки предназначены для непрерывного проветривания горных выработок. По назначению они делятся на главные вентиляторные установки, вспомогательные и местного проветривания.

К главным вентиляторным установкам относятся вентиляторные установки, обслуживающие всю шахту или ее часть (крыло, блок, панель). Главные вентиляторные установки чаще располагаются на поверхности.

К вспомогательным вентиляторным установкам относятся вентиляторные установки, обслуживающие один очистной забой с примыкающими к нему подготовительными выработками, или вентиляторные установки для обособленного проветривания камер. Вспомогательные вентиляторные установки в большинстве своем поверхностные, подземными они бывают в исключительных случаях.

К вентиляторным установкам местного проветривания относятся установки, проветривающие отдельный забой или объект шахты. Эти вентиляторные установки подземные.

Для установления необходимого режима проветривания применяются положительные и отрицательные методы регулирования.

Положительные методы направлены на перераспределение воздуха в шахтной вентиляционной системе: либо путем снижения аэродинамического сопротивления выработок, либо за счет увеличения объема воздуха с помощью дополнительных источников тяги.

Отрицательные методы ведут к увеличению аэродинамического сопротивления отдельных участков и всей шахтной сети. Сюда относится установка перемычек, кроссингов, шлюзов и т. д. Очевидно, что применение негативного регулирования распределения воздуха приводит к росту затрат энергии на проветривание шахты.

Чтобы определить наиболее эффективные методы управления проветриванием, нужно понимать, какие параметры оказывают на него непосредственное влияние.

Чтобы определить какими способами эффективно управлять проветриванием необходимо знать параметры, оказывающие непосредственное влияние на него.

Одним из основных параметров горной выработки является аэродинамическое сопротивление.

Аэродинамическое сопротивление выработки – противодействие движению воздуха по горным выработкам. Аэродинамическое сопротивление складывается из сопротивления трения (вязкость самого воздуха и трение от стенки выработки), лобового (наличие объектов посреди потока) и местных сопротивлений (сужение, расширение, поворот, разделение, слияние).

Аэродинамическое сопротивление выработки зависит от длины выработки, площади поперечного сечения, периметра, режима движения воздуха (турбулентное, ламинарное).

Существует несколько способов расчета этой величины. Однако в реальных условиях расчетное сопротивление может очень сильно отличаться от фактического, так как сечение горных выработок не всегда выдержано в связи с различными условиями проходки, со временем в выработках могут образовываться прогибы, вывалы породы, излишний обогрев, завалы старого оборудования и т.д. Все это в значительной степени изменяет аэродинамическое сопротивление выработки. Кроме того, расчет не позволяет с достаточной точностью учитывать потерю депрессии на местных сопротивлениях типа поворотов, сужений, вентиляционных сооружений и т.д.

Для получения достоверных сведений об аэродинамических сопротивлениях выработок, раз в три года или при значительных изменениях вентиляционной сети, службой депрессионных съемок на каждом подземном горном предприятии проводится воздушно-депрессионная съемка.

Воздушно-депрессионная съемка – это комплекс работ по установлению распределения воздуха и перепадов давления в шахтной вентиляционной сети. С этой целью в вентиляционной сети намечают маршруты съемки. По этим маршрутам одновременно замеряются расход воздуха и перепад давления на участке выработки. Зная эти данные, по квадратичному закону сопротивления рассчитываются аэродинамические сопротивления выработок, необходимые для точного моделирования воздухораспределения шахты. Кроме того, уточняются данные по сечениям выработок, наличию лобовых и местных сопротивлений. Замеряются сопротивления вентиляционных сооружений, шлюзов, вентиляционных регуляторов, кроссингов и т.д.

В комплекс полевых работ воздушно-депрессионных съемок также входит определение параметров работы вентиляторных установок и определение естественной тяги.

Полученные данные используются для моделирования шахтных вентиляционных сетей в компьютерных программах и решения большого количества вентиляционных задач как в нормальном, так и аварийном режиме работы предприятия.

При проведении воздушно-депрессионных съемок применяется следующее оборудование: анемометр, барометр, термометр, дальномер, трубка Пито.

По результатам проведенной воздушно-депрессионной съемки создается или корректируется электронная модель шахтной вентиляционной сети, которая соответствует фактическому состоянию горных выработок на момент проведения воздушно-депрессионной съемки и пригодна для дальнейших вентиляционных расчетов. Полученная модель под роспись передается на шахту для дальнейшего поддержания по ходу развития горных работ.

На обслуживании филиалов ФГУП «ВГСЧ» находятся 237 опасных производственных объектов, на которых необходимо проводить воздушно-депрессионные съемки (79 угольных шахт, 158 неугольных шахт и рудников).

Для построения трехмерной топологии горных выработок используются маркшейдерские данные, планы горных выработок, погоризонтные планы, а также любые сведения, позволяющие получить трехмерные координаты горных выработок.

Иногда на обслуживание в ВГСЧ поступают предприятия, на которых отсутствуют как схемы вентиляции, так и планы горных выработок.

В настоящее время специалистами системы депрессионных съемок ФГУП «ВГСЧ» осваивается система лазерного 3D сканирования горных выработок.

Лазерное сканирование – это метод, позволяющий создавать цифровую модель окружающего пространства, представляя его как массив точек с пространственными координатами (X, Y, Z). Это самый быстрый, точный и объективный метод геодезической съемки. Он осуществляется с помощью сканирующих систем (эти приборы еще называют: лазерный сканер, лазерный 3D-сканер).

Полученный массив данных, называемый также облаком точек, обрабатывается с помощью компьютеров, в результате чего формируется цифровая 3D-модель поверхности или любого другого объекта.

Впоследствии, данный массив может быть представлен в трехмерном или двухмерном виде и использован для расчетов, анализа и моделирования.

Портативный лазерный сканер состоит из:

1. лидара (прибор для получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активной оптической системы);
2. контрольного устройства;
3. рюкзака;
4. защищенного планшета/смартфона;
5. кабеля для работы сенсора с руки 3-6 м (для сканирования с телескопической вехой (штангой));
6. сменной батареи 2 шт.;
7. зарядного устройства;
8. вехи (штанга) телескопическая для сканирования труднодоступных мест 2-6м;
9. программного обеспечения.

Облако точек, полученное в результате 3D сканирования, обрабатывается с помощью специализированных программ для очистки, сшивки и объединения. (Кредо, Майнфрейм, NanoCAD).

По облаку точек строится цифровая модель с возможностью вычисления геометрических параметров: объемов, длин и сечений.

После соответствующей обработки данных, в программе NanoCAD остаются осевые линии и сечения пройденного маршрута. Данный маршрут может быть экспортирован в программу «Вентиляция» для создания трехмерной топологии. Также по результатам съемки можно рассчитать среднее сечение горных выработок на каждом участке.

В результате проделанных работ получается электронная модель топологии горных выработок.

В настоящее время в РФ для моделирования проветривания используются программные комплексы «Вентиляция», разработанный ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы» и «Аэросеть», разработанный ГИ УрО РАН (Горный институт Уральского отделения РАН). Математическая модель вентиляционной сети используется при разработке рекомендаций в части плана ликвидации аварий (например, для моделирования распространения задымления по выработкам вентиляционной сети шахты).

Список литературы

1. <https://vgsch.organizations.mchs.gov.ru>
2. Вентиляция шахт: учеб. пособие [Электронный ресурс] / сост.: Владимир Николаевич Пузырев, Леонид Андреевич Шевченко. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2012
3. ГОСТ Р 57718-2017 Горное дело. Вентиляция рудничная. Термины и определения.

Научный руководитель: *Кочнева Людмила Викторовна, старший преподаватель кафедры безопасности горного производства, УФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.* **Scientific supervisor:** *Lyudmila V. Kochneva, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.*

Применение математического моделирования для оценки влияния параметров проветривания на эффективность разбавления дизельных газов

Аннотация. Вентиляция горных выработок является одним из самых главных аспектов при ведении горных работ. В современных условиях постоянно растущей производительности труда и увеличения глубины ведения горных работ возникает необходимость все в большей производительной мощности используемого оборудования, в том числе самоходной техники. В сфере горной промышленности на данный момент эксплуатируется значительное количество технологического оборудования с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Такие двигатели производят весьма существенный объем загрязняющих веществ, что особенно усугубляется ограниченным объемом окружающей атмосферы в подземных горных выработках и низким качеством дизельного топлива. Для понижения концентраций вредных веществ выхлопных газов в выработку должно подаваться необходимое количество свежего воздуха.

Ключевые слова: горное дело, дизельная техника, выхлопные газы, монооксид углерода, оксиды азота, проветривание горных выработок.

Pavel A. Belehov
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, belekhovpavel@mail.ru

Application of mathematical modeling to assess the influence of ventilation parameters on the efficiency of diesel gases dilution

Abstract. Ventilation of underground mining works is one of the key aspects in conducting mining operations. In the context of ever-increasing labor productivity and greater mining depths, there is a growing demand for higher performance from the equipment being used, including self-propelled machinery. Currently, a significant amount of technological equipment in the mining industry operates with internal combustion engines (ICEs). These engines emit a considerable volume of pollutants, a situation aggravated by the limited amount of surrounding atmosphere in underground mining excavations and the low quality of diesel fuel. To reduce the concentrations of harmful substances in exhaust gases, it is essential to supply a sufficient amount of fresh air to the workings.

Keywords: underground mining, diesel equipment, exhaust gases, carbon monoxide, nitrogen oxides, ventilation of mining workings.

Ежегодное увеличение глубины отработки твердых полезных ископаемых, а также необходимость в повышении производительности очистных выработок связано с необходимостью соблюдения правил безопасности. Это касается и осуществления надлежащего проветривания горных выработок, в которых эксплуатируется дизельная техника с двигателями внутреннего сгорания, которые выделяют в атмосферу вредные для здоровья человека выхлопные газы. Основными компонентами выхлопных газов дизельных транспортных средств являются монооксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), сажа (C) и др. Помимо представленного в состав ОГ двигателя внутреннего сгорания также входят различные оксиды серы (SO_x), углеводороды (CH_x), альдегиды (RCHO) и др.

Состав атмосферного воздуха в пределах горных выработок в условиях работ в ней автомобилей с ДВС в итоге зависит от методов проветривания и их эффективности. В обстоятельствах недостатка свежего атмосферного воздуха на большей части подземных горных работ, задача обеспечения требуемых и нормативных санитарных и гигиенических условий рабочего труда – это параметр, определяющий граничные условия для активной эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания[1].

Выхлопные газы оказывают негативное влияние на организм человека. Монооксид углерода при попадании в организм приводит к кислородному голоданию, а как следствие тошноте и головокружению.

Длительное воздействие способно привести к смерти. Из оксидов азота в дизельных двигателях наиболее преобладают именно монооксиды азота (NO), которые составляют более 90 % общего числа вредностей в выхлопе. В атмосфере горных выработок категорически не допускается содержание ядовитых газов и паров высоких концентраций. Для нормирования показателей концентрации ОГ используют такой утвержденный на законодательном уровне санитарно-гигиенический норматив, как предельно допустимая концентрация (ПДК) [2].

Методология моделируемых исследований для определения зависимостей величины разбавления таких компонентов выхлопных газов, как NOx и CO от расположения выхлопной трубы автомобиля следующая:

- Построение моделей выработок с различным расположением выхлопного отверстия, а именно: сбоку, с углом поворота выхлопа по направлению движения воздушной струи; сбоку, позади сверху по ходу движению воздуха и позади автомобиля снизу с направлением выхлопа по движению воздушной струи, поступающей в выработку.
- Построение зависимостей величины разбавления выхлопных газов по длине выработки от месторасположения выхлопной трубы и нагрузки на двигатель.
- Определение уравнения зависимости концентрации вредного компонента от ряда переменных параметров.

При построении сетки использовалась тетраэдрическая, структурированная сетка (Mesh) с размерами ячеек 0,1 м.

Дополнительное измельчение сетки проводилось в области выхлопной трубы и до 0,005 м [3]. Коэффициент роста составил 1,2. Для внешней сетки общее количество ячеек было увеличено за счет уменьшения максимального размера ячеек. Максимальный коэффициент асимметрии не превышает 3,4, а угол ортогональности ≤ 70 градусов. По предварительным результатам моделирования сделан вывод о влиянии параметров проветривания на качество разбавления выхлопных газов дизельной подземной техники.

Список литературы

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 8 декабря 2020 года № 506. «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт» // п. 181.
2. Мешков А. А., Коршунов Г. И., Кондрашева Н. К., Еремеева А. М., Серегин А. С. Способ снижения загрязненности воздуха рабочих зон угольных шахт вредными выбросами дизелевозов // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 68–72. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-68-72.
3. Bickert S., Kampker A., Greger D. Developments of CO₂-emissions and costs for small electric and combustion engine vehicles in Germany // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – Т. 36. – С. 138–151. doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.004.

Научный руководитель: Серегин Александр Сергеевич, доцент каф. Безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Белкин Илья Алексеевич
Грунсков Тарас Валерьевич*
ФГБОУ ВО Ухтинский государственный технический университет
(ФГБОУ ВО «УГТУ»), Ухта, Россия
** uxtacity@yandex.ru*

Оценка эффективности применения тампонирования в трещиноватых горных породах Ярегского месторождения

Аннотация. В условиях термошахтной добычи высоковязкой нефти происходит ослабление массива по причине высокой влажности воздуха в горных выработках нефтешахт, вызывающей размокание непосредственных приконтурных пород горных выработок. Согласно приложению № 9 ФНИП «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» [2], в обводненных горных выработках прочностные свойства песчаника для выполнения расчетов крепи горных выработок уменьшаются на 20 %. Переход нефти из твердого состояния в жидкое при реализации термошахтной системы разработки. Согласно [3], в стандартных условиях песчаник теряет 30 % прочности. В период активной эксплуатации выработок в условиях нефтешахт Ярегского месторождения, приконтурные породы и крепь подвержены воздействию на них повышенной влажности внутри горной выработки, паропроявлений и прочих негативно действующих факторов. Применение тампонирования в трещиноватых горных породах Ярегского месторождения позволит исключить непосредственный контакт микроклиматических параметров (температура и влажность) с приконтурными породами горной выработки и сохранить физико-механические свойства приконтурного массива близкими к изначальным значениям.

Ключевые слова: термошахтный способ, Ярегское месторождение, нефтешахта, горный массив, трещиноватость пласта, повышенная влажность и температура воздуха.

Ilya A. Belkin
Taras V. Grunskoy*
Ukhta State Technical University (USTU), Ukhta, Russia
** uxtacity@yandex.ru*

Assessment of the effectiveness of plugging in fractured rocks of the Yaregskoye field

Abstract: in the conditions of thermal shaft extraction of high-viscosity oil, the massif weakens due to high air humidity in the mine workings of oil mines, causing the immediate marginal rocks of the mine workings to become soaked. According to Appendix No. 9 of the Federal Scientific and Technical Regulations "Instructions for Calculating and Using Anchor Support in Coal Mines" [2], in flooded mine workings, the strength properties of sandstone for calculating mine working support are reduced by 20 %.

Transition of oil from a solid to a liquid state during the implementation of the thermal mine development system. According to [3], under standard conditions, sandstone loses 30 % of its strength.

During the period of active exploitation of workings in the conditions of the Yaregskoye oil mines, the marginal rocks and support are exposed to the effects of increased humidity inside the mine workings, steam emissions and other negatively affecting factors. The use of plugging in the fractured rocks of the Yaregskoye field will eliminate direct contact of microclimatic parameters (temperature and humidity) with the marginal rocks of the mine workings and maintain the physical and mechanical properties of the marginal massif close to the original values.

Keywords: thermal shaft method, Yaregskoye field, oil mine, rock massif, formation fracturing, high humidity and air temperature.

Свойства горных пород Ярегского нефтетитанового месторождения, в которых строятся горные выработки нефтешахт, имеют широкий диапазон значений характеристик. Все породы месторождения в различной степени трещиноваты и пересекаются дизъюнктивными нарушениями. Особое значение это имеет для продуктивных отложений, поскольку в значительной степени определяет их фильтрационно-емкостные свойства.

Центральная часть месторождения, на территории которой спроектированы и пройдены уклонные блоки Ярегских нефтешахт, покрыта густой сетью трещин, большинство которых субмеридиального характера.

По данным шахтной разработки в верхней части продуктивного пласта III трещины и дизъюнктивы встречаются в среднем через каждые 25 м, в нижней части вблизи фундамента – через 9 м. Амплитуды смещения обычно незначительны, редко до 10 м.

Таким образом, все горные выработки уклонного блока пройдены в трещиноватых и изрезанных тектоническими нарушениями породах. Поддержание выработок в рабочем состоянии в массиве с нарушениями подразумевает выполнение подбора крепи выработок с избыточными характеристиками.

Согласно п. 8.13 [1] при наличии в окружающем массиве трещиноватых и неустойчивых пород, к категориям устойчивости III и IV, и сооружении ответственных капитальных выработок следует применять упрочнение пород цементацией или смолами, что позволяет при проектировании увеличивать расчетную прочность на 30 %.

Поэтому рациональный выбор крепления горных выработок, пройденных в нарушенных породах, можно осуществить при выполнении работ по упрочнению массива и/или заполнению пустот и куполов. В результате заполнения трещин и пустот, вокруг выработки образуется дополнительная искусственная крепь, положительно влияющая на геомеханические процессы, протекающие вокруг выработки [4, 5].

Одним эффективным средством в условиях термошахтной добычи высококвязкой нефти, с точки зрения влияния на устойчивость породных обнажений может являться глубинная инъекция скрепляющих растворов в приконтурный массив горных пород, которая производится на глубину 1,5–3 м под давлением 3–3,5 МПа.

С помощью упрочнения пород произойдет значительное уменьшение деформации в породном массиве и как результат – снижение требуемой грузонесущей способности крепи, что в свою очередь позволит применить облегченные виды крепления горных выработок, обеспечивающие устойчивое состояние на весь технологический срок службы выработок.

Скрепленный массив будет образовывать монолитную грузонесущую оболочку и не пропускать пар к приконтурному массиву горной выработки.

Работая как несущая конструкция, эта оболочка будет способна воспринимать значительные нагрузки, величины которых будут зависеть от состава, вяжущего со стороны смеси и противостоять дальнейшему развитию зоны неупругих деформаций.

Реализация данного способа будет успешной для нефтяных шахт в том случае, если будет найден дешевый материал для заполнения пустот и скрепления горных пород (возможно разработанный из местного сырья).

Таким образом, возникает необходимость подбора оборудования и необходимых материалов, оптимальных для выполнения тампонирующего тектонических нарушений в массиве горных пород в условиях нефтешахт.

Для проведения глубинного инъецирования с целью упрочнения пород рассматривается применение следующих специальных инъекционных материалов: смола «Беведол Р ВФ – Беведан Р» (ЗАО «Карбо-ЦАКК»); смола «Беведол Р С – Беведан Р» (ЗАО «Карбо-ЦАКК»); смола «Беведол Р ВФА – Беведан Р» (ЗАО «Карбо-ЦАКК»); смола «Grand Rock 310» (ООО «ПАРАД-РУСЬ»); микроцементы «ULTRACEM» (ООО «ПАРАД-РУСЬ»); сухая цементная смесь «Барьер» (ООО «КПС-Технологии»); цементный порошок «Текбленд» (ЗАО «Карбо-ЦАКК»); цементная смесь «Текбар» (ЗАО «Карбо-ЦАКК»).

Рассматриваемые инъекционные материалы применяют для гидроизоляции горных выработок, упрочнения неустойчивых и нарушенных горных пород, а также упрочнения пород кровли в очистных и подготовительных забоях, тампонажа горного массива для уменьшения газопроницаемости.

В качестве двухкомпонентных полиуретановых смол подобраны инъекционные материалы для упрочнения: «Беведол Р ВФ – Беведан Р»; «Беведол Р С – Беведан Р»; «Беведол Р ВФА – Беведан Р»; «Grand Rock 310».

В отличие от смолы «Беведол Р С – Беведан Р», составы «Беведол Р ВФ – Беведан Р», «Беведол Р ВФА – Беведан Р» и «Grand Rock 310» начинают проявлять свои свойства при обводненных условиях (рисунок 1).

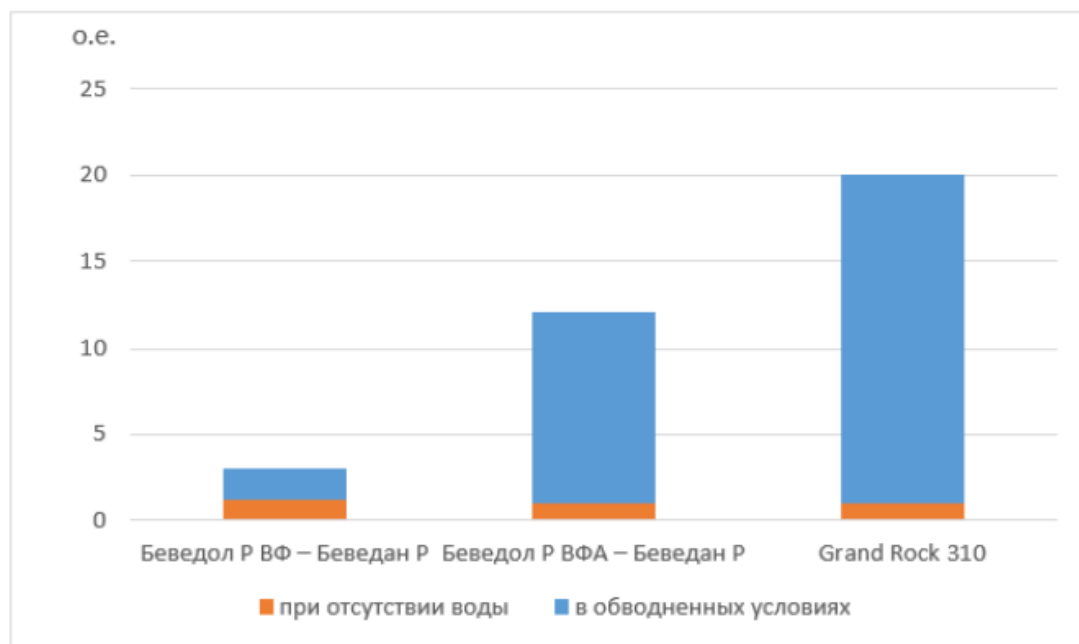


Рис. 1. Перспективные значения фактора вспенивания (о.е.) полиуретановых смол в зависимости от условий обводненности трещин

На представленном графике видно, что после смешивания с водой реакция вспенивания полиуретановой смеси протекает со значительным увеличением объема (значительно превосходящим реакцию смол в обычных условиях при отсутствии воды), что говорит о выигрышности применения данных смол в обводненном приконтурном массиве. Также, можно отметить показатель вспенивания смолы «Grand Rock 310», превосходящий значения иных двухкомпонентных смол в 2 и 4 раза.

Прочностные характеристики материалов Согласно представленным техническим характеристикам материалов, набор прочности на сжатие в течение первых суток составляет 30–93 % в зависимости от типа смеси (см. рисунок 2). Наблюдается несильный разброс в показателях набора прочности на сжатие за первые сутки. Также можно отметить, что в приобретении прочностных характеристик выделяются цементный порошок «Текбленд» и цементная смесь «Текбар», так как в первые сутки смеси приобретают до 93 % от заявленной прочности на сжатие. Составы на основе цементов обладают прочностью на сжатие в десятки раз превышающей прочность составов, состоящих из фенольных и силикатных смол. Микроцементы «ULTRACEM» на более чем 60 % превышают показатели предела прочности через 28 суток, в сравнении с аналогами.

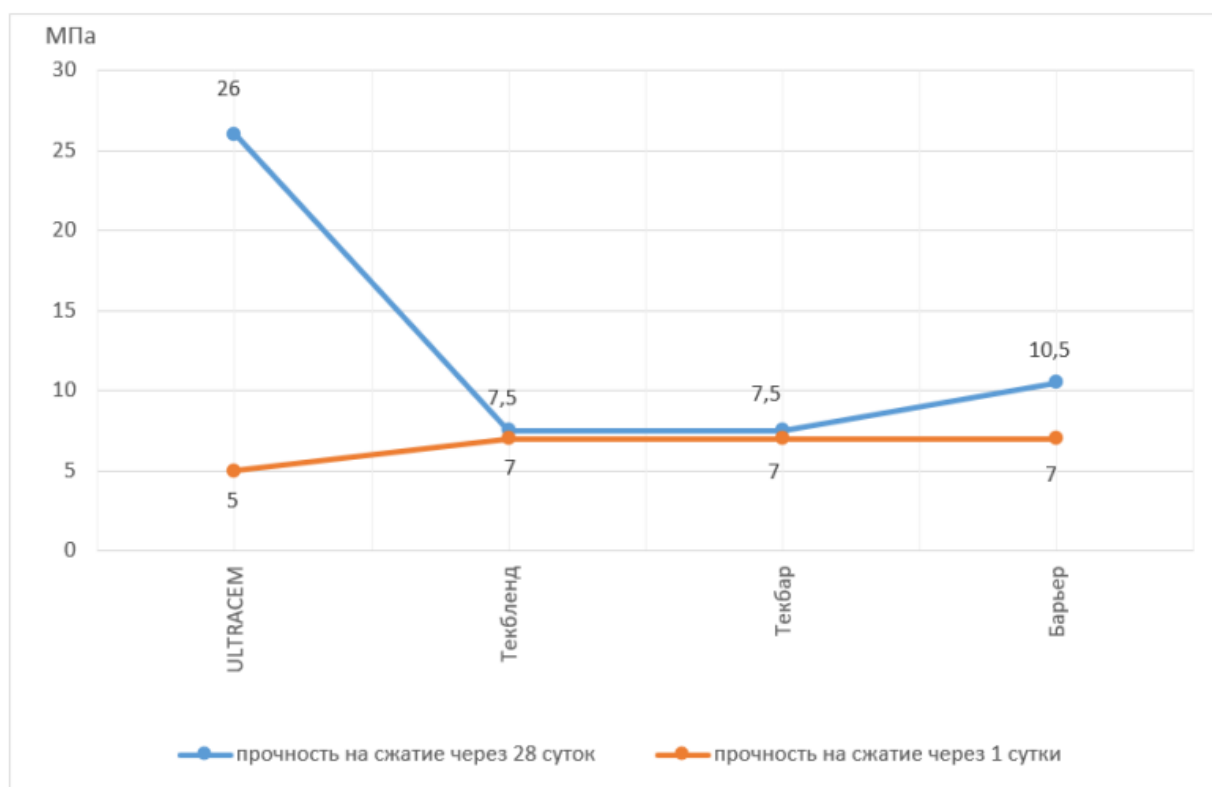


Рис. 2. Зависимость набора прочности на сжатие (МПа) цементных составов через 1 сутки и 28 суток

Тип подбираемых инъекционных материалов зависит от величины зоны трещиноватости вокруг горной выработки, размеров трещин и физикомеханических свойств горных пород.

Таким образом, для проведения глубинного инъецирования приконтурного массива горных пород в качестве скрепляющих составов возможно применение двухкомпонентных полиуретановых смол и сухих расширяющихся смесей. При этом, нагнетание смол «Grand Rock 310», «Беведол Р ВФ – Беведан Р» и «Беведол Р ВФА – Беведан Р» рекомендуется в обводненный массив горных пород, так как при реакции с водой отмечается максимальные значения вспенивания составов.

Одновременно с упрочнением массива составы подходят для гидроизоляции горных выработок. Состав «Беведол Р С – Беведан Р» подойдет для применения в сухих и слабо влажных породах, так как вспенивание/расширение происходит при взаимодействии основных компонентов состава.

Рациональное применение смесей «Текбленд», «Текбар», «Барьер» и «ULTRACEM» определяется при заполнении пустот и куполов, проявившихся в горных выработках со сложными горно-геологическими условиями (присутствие значительной трещиноватости, обводненности, резкого повышения горного давления, пустот в кровле и боках, сыпучих пород), ввиду их более высокой несущей способности и прочности на сжатие (до 26 МПа у смеси «ULTRACEM»).

Прочностные характеристики достигаются за счет значительного расхода сухих смесей – до 1000 кг на 1 м³, при соотношении смешивания воды и цементных смесей от 0,45:1 до 1,5:1. Для подачи готовых растворов также применяются насосные агрегаты типа ПБН-15 КПС, MONO WT 820. Среди данных цементных смесей скоростью схватывания раствора выделяются смеси «ULTRACEM» и «Барьер» – не более 3 минут, что определяет скорость заполнения пустот. У смесей «Текбленд» и «ULTRACEM» отмечается возможность работы в обводненных условиях, что значительно расширяет область применения

раствора на нефтешахтах. Для предотвращения чрезмерных утечек цементных растворов, их укладку также рекомендуется выполнять с применением герметичной опалубки.

Смесь «ULTRACEM» индивидуального изготовления, после проведения ОПИ поставщик может изменить технические характеристики под конкретные задачи Заказчика и горно-геологические условия.

Список литературы:

1. СП 69.13330.2016 «Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП 3.02.03-84».
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах». Утв. приказом Ростехнадзора от 19 ноября 2020 года № 448.
3. Груцкий, Л. Г. Обоснование способов повышения устойчивости выработок нефтешахт / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПбГИ им. Г. В. Плеханова / Санкт-Петербург, С. 131, 2000 г.
4. Фомин А. И., Грунсковой Т. В. Поиск эффективных решений разработки месторождений высоковязкой нефти и битумов // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 7. С. 20–25.
5. Фомин А. И., Грунсковой Т. В. Исследование составов для изоляции горных выработок нефтешахт от прорывов пара в полевые штреки // Современные проблемы развития Европейского Севера – 2024. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ухта, 2024. С. 92–95.

Научный руководитель: Грунсковой Тарас Валерьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры ХХТЭиТБ ФГБОУ ВО Ухтинский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «УГТУ»), Ухта, Россия.

Исследование сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив при разработке месторождения открытым способом

Аннотация: В связи с увеличением потребности в минеральных ресурсах и возрастанием мощностей горнодобывающих предприятий, вопросы экономической эффективности добычи и минимизации потерь полезного ископаемого, приобретает особую актуальность. При ведении буровзрывных работ при разработке месторождения открытым способом, оценка сейсмовзрывного воздействия, является ключевым фактором прогнозирования устойчивости приконтурного массива при разработке месторождения открытым способом. В научно-исследовательской работе рассмотрены и проанализированы результаты измерений скоростей колебаний горной породы от взрывных работ, а также их воздействие на приконтурный массив при разработке месторождения открытым способом.

Ключевые слова: сейсмовзрывное воздействие, взрывные работы, открытые горные работы, критическая скорость колебания массива, методы оценки.

Andrey A. Belov
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, belova101samara@gmail.com

Substantiation of the complex methodology for assessment of seismic-explosive impact on the near-contour massif during open-cut field development.

Abstract. In connection with the increasing demand for mineral resources and increasing capacity of mining enterprises, the issues of economic efficiency of extraction and minimization of losses of minerals, is of particular relevance. When conducting drilling and blasting operations in open pit mining, seismic blasting evaluation is a key factor in predicting the stability of the contour massif in open pit mining. The research work considers and analyzes the results of measurements of rock vibration velocities from blasting operations, as well as their impact on the contour massif in open pit mining.

Keywords: Seismic blasting, blasting, open-pit mining, critical velocity of massif oscillation, estimation methods.

В последние десятилетия в связи с возрастанием потребления минеральных ресурсов во всех видах промышленности увеличиваются масштабы горнодобывающих предприятий. С каждым годом горно-геологические и горнотехнические условия при добыче открытым способом усложняются, из-за роста глубины разработки месторождений и снижением кондиционного качества полезного ископаемого. Увеличение глубины разработки, ведение взрывных работ и гидрогеологические условия на карьерах влияют на устойчивости горного массива [1]. Одним из важнейших факторов, влияющих на устойчивость элементов карьера, является ведение взрывных работ.

Нерегулируемое проведение взрывных работ приводит к:

- • образованию техногенной трещиноватости и дезинтеграции массива в приоткосной зоне;
- • снижению прочности в массиве горных пород;
- • вывалам (камнепадам) и осыпанию горных пород;
- • повреждению конструкций и сооружений.

Данное сейсмовзрывное воздействие распространяется от эпицентра взрыва на значительные расстояния, вызывая колебания горного массива и впоследствии рост трещин, снижая его устойчивость.

Метод исследования заключается в анализе и обработке полученных данных от сейсмического мониторинга взрывных работ (Рисунок 1). Данный метод позволил измерить и проанализировать сейсмовзрывные волны, возникшие в результате взрывных работ, а также оценить сейсмовзрывное воздействие на приконтурный массив в карьере.

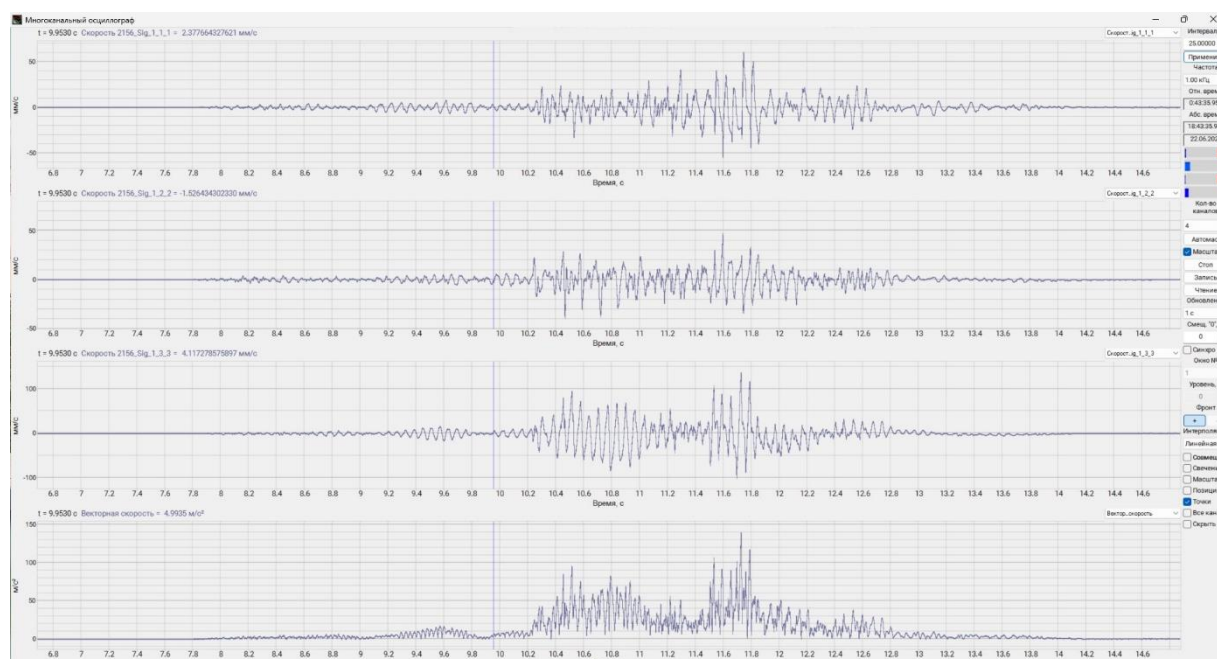


Рис. 1. Сейсмограмма, полученная после взрыва блока 162 [составлено автором]

В ходе проведенных полевых испытаний в период с 2021 по 2023 год были получены экспериментальные данные о сейсмовзрывных волнах на 17 взрывных блоках, из которых 6 относятся к ближней сейсмической зоне. С помощью предоставленных данных были получены зависимости ак. М.А. Садовского, позволяющие прогнозировать скорости колебаний массива как для ближней так для дальних зон взрыва, что позволило определить коэффициенты сейсмичности и показатель затухания [3].

Дальнейший анализ полевых испытаний показал наличие частотного резонанса. Когда сейсмическая волна проходит через горный массив, происходит воздействие с частотой, равной или близкой к одной из его собственных частот, что приводит к значительному усилению амплитуды колебаний (резонансу). В случае с бортом карьера резонанс может привести к значительному усилению колебаний, увеличивая вероятность снижения прочности горной породы, образованию микротрещин и произрастанию имеющихся трещин, в зависимости от предела прочности и текущего напряженного состояния массива [4]. При этом было выявлено, что применение различных систем замедления может влиять на частоту резонанса, что открывает пути для оптимизации процессов взрывных работ с точки зрения увеличения устойчивости борта карьера.

Из-за неоднородности геологического состава, горные породы по-разному реагируют на сейсмовзрывное воздействие, возникает так называемое дезинтеграция сплошной среды, основанные на модели дезинтеграции медленно деформируемых твердых тел, предложенной ак. М. А. Садовским, В. Н. Родионовым, И. А. Сизовым. В результате было выявлено, что взрыв приводит к снижению напряжений на граничных поверхностях тел, которые в свою очередь являются поверхностями скольжения, и чем выше добротность, тем ниже становится данное напряжение.

Обработка данных показала, что применение детонирующего шнура с интервалом замедления 67 мс (что соответствует частоте 15 Гц) приводит к возникновению частотного

резонанса. Данный фактор важен для выбора средств инициирования и планирования схемы взрыва, чтобы минимизировать сейсмозрывное воздействие на горный массив, а также предотвратить возможные обвалы и обрушения [5]. При анализе полученных данных был обнаружен частотный резонанс в области частот от 15 до 16 Гц. Данный аспект подчеркивает необходимость дальнейшего детального рассмотрения этого явления при планировании взрывных работ. Оптимизация буровзрывных работ поможет значительно снизить риск возникновения частотного резонанса и его негативного влияния на устойчивость бортов карьера. Это, в свою очередь, повышает безопасность и эффективность ведения горных работ на месторождениях с сложными горно-геологическими условиями.

Список литературы:

1. Павлович, А. А. Особенности геомеханического обоснования устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов с учетом ФНП № 439 // Маркшейдерский вестник. – 2022. – № 2(147). – С. 7–14.
2. Сафонов Л. В., Шкреба О. П. Вероятностный метод оценки сейсмического эффекта промышленных взрывов. М.: Наука, 1970, 64 с.
3. Богацкий В. Ф., Пергамент В. Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. М., «Недра», 1978, 128 с.
4. Коршунов, Г. И. Сравнительный анализ методик по сейсмической безопасности охраняемых объектов (опоры ЛЭП) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S5-2. – С. 80–88.
5. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М., «Недра», 1981, 192 с.

Научный руководитель: *Афанасьев Павел Игоревич, доцент каф. Безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Afanasev_PI@pers.spmi.ru.*

Васяева Дарья Денисовна*

Вишнёвая Елена Витальевна**

Зуева Анна Андреевна

Кочнева Людмила Викторовна***

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия
* dariaekb@mail.ru, ** Vishnevaya.Elena.2002@mail.ru, *** lyu7660@yandex.ru

Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела

Аннотация. В статье рассматривается необходимость применения промышленных экзоскелетов для уменьшения числа профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела. Использование экзоскелетов помогает увеличить силу мышц работников и уменьшить физическую нагрузку, оптимально распределяя ее на разные части опорно-двигательного аппарата.

Ключевые слова: профессиональные заболевания; опорно-двигательный аппарат; физический труд; промышленные экзоскелеты, пассивные экзоскелеты, активные экзоскелеты

Darya D. Vasyaeva *

Elena V. Vishnevaya **

Anna A. Zueva

Lyudmila V. Kochneva ***

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

* dariaekb@mail.ru, ** Vishnevaya.Elena.2002@mail.ru, *** lyu7660@yandex.ru

The relevance of using industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body

Abstract. The article discusses the need to use industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body. The use of exoskeletons helps to increase the muscle strength of workers and reduce physical activity, optimally distributing it to different parts of the musculoskeletal system.

Keywords: occupational diseases; musculoskeletal system; physical labor; industrial exoskeletons, passive exoskeletons, active exoskeletons.

Экзоскелеты – это устройства, созданные для улучшения движений человеческого тела. Они представляют собой механические конструкции, которые надеваются на тело и помогают увеличить силу, обеспечить поддержку или восстановить двигательные функции.

В промышленности экзоскелеты значительно повышают производительность и безопасность работников. Они снижают нагрузку на ноги и позвоночник при физических работах, уменьшают риск травм и повышают эффективность выполнения задач. Благодаря экзоскелетам работники могут продолжать работать в тяжелых условиях, улучшая общий опыт работы и создавая более комфортные условия для выполнения своих обязанностей.

Скелетно-мышечные нарушения, вызванные тяжестью трудового процесса, являются наиболее распространенной причиной профессиональной нетрудоспособности. Основные показатели этого фактора включают подъем и перемещение тяжелых грузов, статические и динамические нагрузки, а также неудобные рабочие позы и частые наклоны корпуса. В настоящее время доля тяжелого физического труда в промышленности постепенно снижается. Однако все еще существует ряд профессий, где физический труд превышает допустимые гигиенические нормы. Физические нагрузки, которым подвергаются рабочие различных профессий, таких как проходчики, крепильщики, сварщики и многие другие приводят к многочисленным травмам и профессиональным заболеваниям опорно-двигательного аппарата.

По данным Европейского фонда улучшения условий жизни и труда, в странах ЕС наиболее распространенными факторами риска для здоровья работников являются различные физические нагрузки, включая стереотипные движения рук, перенос тяжелых грузов и неудобные рабочие позы. Эти факторы воздействуют на около 61 % работников.

Наибольшему риску подвержены работники физического труда в таких отраслях, как горная промышленность, строительство и другие. Стереотипные рабочие движения выполняют около 30 % как мужчин, так и женщин в течение четверти или более рабочего времени. Более 30 % и мужчин, и женщин подвергаются нагрузкам вследствие неудобной рабочей позы. В результате воздействия неблагоприятных факторов физического труда развиваются различные заболевания скелетно-мышечной системы. В частности, 43 % работающих страдают от болей в спине, 42 % – от мышечных болей в шее и плечевом поясе, а 29 % – от мышечных болей в ногах.

В России наибольшие показатели профессиональных заболеваний зафиксированы на предприятиях по добыче полезных ископаемых (56,13 %), в обрабатывающей промышленности (14,84 %), в сельском и лесном хозяйстве, охоте, рыболовстве и рыбоводстве (10,14 %), а также в сфере транспортировки и хранения (8,42 %), строительства. Фактические расходы на компенсации работникам, работающим во вредных и (или) опасных условиях труда на крупных, средних и выборочно малых предприятиях, в 2023 году, по данным Росстата, достигли 168,8 млрд рублей. Эти расходы включают затраты на медицинские осмотры и приобретение средств индивидуальной защиты, и их величина продолжает увеличиваться.

Применение автоматических устройств для выполнения производственных операций – это современный способ минимизации риска профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата и потерь от несчастных случаев, вызванных человеческим фактором. Однако полная автоматизация производства является дорогостоящим и не всегда возможным решением, а также не применима в технологических процессах, где требуется гибкость рабочих операций и принятия решений.

Классификация экзоскелетов может быть проведена по нескольким основным принципам:

1. По источнику энергии и принципу работы привода:
 - Пассивные экзоскелеты: используют механическую энергию тела пользователя для выполнения движений.
 - Полуактивные экзоскелеты: частично используют внешние источники энергии для усиления движений.
 - Активные экзоскелеты: полностью зависят от внешних источников энергии для выполнения движений.
2. По точке приложения (локализации):
 - Экзоскелеты верхних конечностей: Предназначены для улучшения функций рук и плеч.
 - Экзоскелеты нижних конечностей: Предназначены для улучшения функций ног и бедер.
 - Экзоскелеты-костюмы: охватывают все тело, обеспечивая поддержку и усиление движений.
3. По области применения:
 - Военные экзоскелеты: используются для повышения мобильности и силы солдат.
 - Медицинские экзоскелеты: применяются для реабилитации пациентов после травм или операций.
 - Промышленные экзоскелеты: снижают нагрузку на работников при выполнении тяжелых физических работ.

- Сервисные экзоскелеты: используются в различных сферах обслуживания.
 - Космические экзоскелеты: разрабатываются для использования в условиях невесомости.
4. По весу конструкции:
- Легкие экзоскелеты: до 5 кг.
 - Средней весовой категории экзоскелеты: от 5 до 30 кг.
 - Тяжелые экзоскелеты: более 30 кг.

За последние несколько лет на мировом рынке возникло множество компаний, предлагающих разнообразные экзоскелеты. Эти устройства были тщательно изучены на предмет их эффективности в различных отраслях промышленности, где работники сталкиваются с высокими динамическими или статическими нагрузками.

Самыми эффективными для снижения нагрузки на мышцы верхней части тела работников являются промышленные экзоскелеты, разработанные для поддержания тяжелого инструмента и обеспечения корректной рабочей позы. Основные особенности современных моделей активных и пассивных экзоскелетов верхних конечностей для их промышленного применения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика активных и пассивных экзоскелетов

Тип экзоскелета	Достоинства	Недостатки
Активный	повышенная сила ассистирования; высокая скорость перемещения; значительное увеличение силы и амплитуды движений; регулируемость и возможность программирования позволяют выполнять большой объем работы	тяжелый источник питания; отсутствие мобильности из-за проводов; зависимость от источников внешнего питания; массивность конструкции; зависимость от климатических условий; необходимость ремонта и обслуживания и привязанность к комплектующим; высокая стоимость
Пассивный	легкая разработка; повышенная мобильность; не зависит от источников внешнего питания; небольшая масса конструкции; высокая надежность; низкая стоимость	низкая способность уменьшения усилия для работы с тяжелыми предметами; невозможность использования при отсутствии остаточной силы мышц; невозможность программирования; относительно низкая скорость перемещения; движения с ограниченной амплитудой

Пассивные экзоскелеты широко используются в промышленности благодаря своей простой конструкции. Современные модели, такие как FLX Ergo-Skeleton (StrongArm Technologies, США), ShoulderX (suitX, Великобритания), Skelex (Skelex, Нидерланды), Steadicam Fawcett Exovest (Tiffen, США) и Levitate Airframe (Levitate Technologies, США), направлены на ограничение движений, которые могут привести к травмам, компенсацию веса тяжелых предметов и снижение усилий, необходимых для удержания инструментов перед собой или над головой.

Активные промышленные экзоскелеты, такие как Muscle suit (Innophys, Япония) и Stuttgart Exo-Jacket (Future Work Lab, Германия), обладают значительным потенциалом благодаря большому количеству рабочих, регулярно поднимающих и переносящих тяжелые предметы. Однако основным препятствием для их широкого внедрения является необходимость обеспечения автономности конструкции, что позволяет человеку свободно перемещаться по предприятию. Это значительно усложняет проектирование экзоскелета и увеличивает его массу.

Большинство промышленных экзоскелетов, ранее протестированных на предприятиях, являются пассивными. В настоящее время разрабатываются легкие и мобильные

активные экзоскелеты, которые оптимально подойдут для рабочего пространства. На данный момент не существуют удобные для использования мобильные активные экзоскелеты для верхних конечностей с аккумуляторами, обладающими достаточной емкостью для обеспечения автономности пользователя.

В настоящее время существует значительный прогресс в развитии технологии экзоскелетов, что привело к созданию новых и инновационных решений. ПАО «ГМК «Норникель» активно работает над созданием промышленных экзоскелетов совместно с учеными Юго-Западного госуниверситета и специалистами подразделения «Цифровая лаборатория». Компания тестирует эту технологию не только на собственных промплощадках Заполярья, но и на предприятии «Воркутауголь». Эти устройства предназначены для снижения физической нагрузки и повышения безопасности и эффективности производства.

Конструкция экзоскелета надевается поверх спецодежды и закрепляется специальными ремнями. Она выполнена из авиационного алюминия, что позволяет человеку практически не ощущать ее на себе при правильной фиксации. Устройство повторяет биомеханику человека и принимает на себя до 90 % веса поднимаемого предмета массой до 60 кг, значительно снижая нагрузку на ноги и позвоночник сотрудника [3].

По словам главного технолога ООО «Норильскникельремонта», сотрудник, оснащенный экзоскелетом, может заменить сразу троих человек, особенно при выполнении операций по укладке труб, погрузке/разгрузке металлических конструкций и работе с тяжелыми ручными инструментами.

Список литературы

1. Модели и алгоритмы управления экзоскелетами промышленного назначения: монография / Яцун С. Ф., Яцун А. С., Мальчиков А. В., Карлов А. Е.; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2021 – 143 с.
2. Карлов А. Е., Постольный А. А., Савельева Е. В. Промышленный экзоскелет для улучшения условий труда // Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт. – 2019 – С. 47–51.
3. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела / И.А. Орлов, А.П. Алисейчик, А.Г. Меркулова [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59. – №7. – С. 412–416.

Научный руководитель: Кочнева Людмила Викторовна, старший преподаватель кафедры безопасности горного производства, УФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Вишнёвая Елена Витальевна*

Васяева Дарья Денисовна

Зуева Анна Андреевна

Кочнева Людмила Викторовна**

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

* Vishnevaya.Elena.2002@mail.ru, ** lyu7660@yandex.ru

Влияние цифровых решений на обеспечение безопасности в горной промышленности

Аннотация. В статье рассматривается влияние цифровых решений на безопасность производственных процессов в горной промышленности. Приведены несколько ярких примеров внедрения цифровых решений в производство крупнейших предприятий промышленности с оценкой эффективности и результатами. Рассматривается вопрос необходимости применения новейших цифровых разработок отечественных производителей, а также их влияние на основные показатели деятельности горнопромышленных предприятий.

Ключевые слова: цифровая трансформация, промышленная безопасность, цифровые решения, технологии, охрана труда, промышленные предприятия.

Elena V. Vishnevaya*

Darya D. Vasyaeva

Anna A. Zueva

Lyudmila V. Kochneva**

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

* Vishnevaya.Elena.2002@mail.ru, ** lyu7660@yandex.ru

The impact of digital solutions on safety in the mining industry

Abstract. The article examines the impact of digital solutions on the safety of production processes in the mining industry. Several striking examples of the introduction of digital solutions into the production of the largest industrial enterprises with an assessment of efficiency and results are given. The issue of the need to apply the latest digital developments of domestic manufacturers, as well as their impact on the main performance indicators of mining enterprises, is considered.

Keywords: digital transformation, industrial safety, digital solutions, technologies, labor protection, industrial enterprises.

В настоящее время одним из наиболее приоритетных аспектов промышленной безопасности является развитие цифровизации, направленной на улучшение эффективности и производительности технологических процессов и производств в горнодобывающей промышленности, увеличение экономических, социальных и экологических показателей и рост конкурентного преимущества предприятия, что в совокупности прямым образом влияет на ее репутацию и инвестиционную привлекательность.

По опубликованным данным Роструда в 2023 году было зарегистрировано 5892 несчастных случая на производстве, из них 1609 с летальным исходом. В общем соотношении причин несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями, произошедших в Российской Федерации в 2023 году на нарушение технологического процесса приходится 48 %, а на нарушение работниками трудового распорядка и дисциплины труда — 7,8 % [1]. По статистическим данным за последние пять лет нарушение работниками трудового распорядка, дисциплины труда и технологического процесса заметно увеличивается, что несомненно указывает на необходимость совершенствования системы промышленной безопасности путем внедрения новейших цифровых решений.

Цифровизация представляет собой стратегически важное направление современности, которое включает в себя комплекс решений для автоматизации и оптимизации производственных процессов. Приоритетными областями для внедрения цифровых решений российских промышленных предприятий на ближайшие три года являются: производство; геология; охрана труда и промышленная безопасность. В настоящее время в целях обеспечения безопасности в горной промышленности предлагается большое множество отечественных цифровых решений: от автономного оборудования до умных носимых устройств – средств индивидуальной защиты. Новейшие цифровые решения направлены в первую очередь на исключение влияния человека на показатели производства – возможности принятия человеком ошибочных решений в конкретных ситуациях, вследствие чего происходит около 70 % аварий и несчастных случаев в шахтах, карьерах и месторождениях. Концепция цифровой трансформации в области промышленной безопасности содержит пять важнейших трендов развития: инвестирование в промышленную безопасность; цифровизацию и внедрение инновационных технологий; интеграция принципов ESG – международных принципов, основанных на следующих взаимосвязанных элементах – экологии «Environmental», социальной политике «Social» и корпоративном управлении «Governance»; переосмысление роли специалиста по охране труда и промышленной безопасности; фокус на благополучие сотрудников [2].

Интеграция цифровых решений в производство является национальной целью развития Российской Федерации на период до 2030 года [3]. За последние несколько лет отмечается тенденция роста новых российских компаний, создающих современные решения по автоматизации горного производства и оперативного управления технологическими процессами и промышленной безопасностью. Вместе с тем растет число крупных горнопромышленных предприятий, отдающих предпочтение внедрению новейших цифровых разработок отечественного производителя – предприятия стали более заинтересовано смотреть на весь спектр современных цифровых решений.

Внедрение современных информационных комплексов и предиктивных систем диагностики производства и промышленной безопасности становятся все более частой практикой российских компаний. Так, к 2023 году на предприятии «РУСАЛ Каменск-Уральский» на участке восьмого цеха выщелачивания была внедрена система по предупреждению влияния техногенного фактора на производство от компании «Linx», получившая название «Lockout/Tagout», что переводится на русский язык как «Блокировка/Маркировка», используется сокращение «ЛОТО». Следует отметить, что «РУСАЛ Каменск-Уральский» относится к химической отрасли промышленности, где безопасность многих технологических процессов зависит от соблюдения правил дозирования реагентов, постоянного контроля за состоянием и поддержания необходимого температурного режима. Отклонения этих параметров могут привести к возникновению аварий вследствие пожара или взрыва. Основная цель внедрения системы – снизить риски возникновения несчастных случаев. Преимуществом такой разработки является централизация системы различных блокираторов, предназначенных для надежной фиксации источника энергии в определенном положении, замков, блокирующих тросов, табличек. Принцип действия данной технологии заключается в немедленном блокировании используемых в процессе производства установок и оборудования, и уведомление работников о возникновении опасностей с помощью предупреждающих бирок «Не включать», «Не открывать» с информацией о виде работ и времени начала и окончания работ. Система предусматривает оценку механических и электрических рисков, что значительно упростило управление задачами в процессе эксплуатации различного оборудования. В результате внедрения на предприятии сократилось число несчастных случаев, расходы на выплаты за причиненный вред здоровью рабочих, сократились также простои оборудования и установок, повысилась производительность.

Примером успешного отечественного разработчика цифровых решений является ГК «Цифра», которая стремится обеспечить эффективность и безопасность горнодобывающих предприятий, нефтегазовой, химической и машиностроительных отраслей промышленности. С 2017 года ГК «Цифра» реализует проект по внедрению системы контроля и автономного регулирования параметров горнотранспортного комплекса «Карьер», направленного на совершенствование системы управления карьером в Качканарском горнообогатительном комбинате. Данная система имеет несколько важных особенностей: непрерывная оценка производительности и выполнения плана, контроль и управление загрузкой спецтехники и нарушениями технологического процесса. В режиме реального времени система отслеживает и отображает информацию о местонахождении и параметрах работы техники. В результате внедрения прослеживается рост эффективности деятельности горнотранспортного комплекса за счет планирования, оптимизации и автоматической диспетчеризации работы оборудования, непрерывный контроль за ходом выполнения работ и повышение безопасности труда за счет автоматизированного контроля скорости передвижения и допустимой загрузки спецтехники, расчета оптимальных расстояний при проведении буровзрывных работ для обеспечения безопасности работников.

В 2020 году Правительство Российской Федерации издало постановление, в рамках которого был инициирован эксперимент по внедрению системы дистанционного контроля в области промышленной безопасности. С 2021 года Ростехнадзор начал реализацию цифровой платформы с элементами удаленного контроля. Основная цель данной разработки – снизить производственную нагрузку на обработку, анализ и составление необходимой внутренней документации, одновременно уменьшая риски аварий на предприятиях и минимизируя влияние человека на показатели производства. Удаленные аудиты стали особенно важными в период пандемии, когда визиты аудиторов, особенно из других стран, были затруднены из-за ограничений локального характера ввиду пандемии. Эта практика продолжает развиваться и настоящее время, так как она оказалась менее затратной как в отношении трудовых, так и финансовых ресурсов.

В 2022 году компания «Газпром нефть» провела пилотный проект дистанционного контроля за строительными объектами в сотрудничестве с Ростехнадзором. В ходе реализации проекта использовались технологии дополненной реальности (AR) и беспилотные летательные аппараты. Объектом обследования стала дожимная насосная станция на Арчинском месторождении «Газпромнефть-Востока», расположенная в 600 км от основной инфраструктуры. По результатам проекта аналитики Ростехнадзора ожидают сокращения сроков проверок в восемь раз, а также отмечают значительное преимущество данного метода контроля перед традиционным – повышение уровня управления и непрерывного мониторинга.

Промышленная безопасность неизбежно подвергается воздействию процессов, происходящих в обществе. Она гибко реагирует на изменения и служит объективным показателем уровня осознания и ответственности. Последние вызовы, включая пандемию и экономические ограничения, побудили многих пересмотреть важность человеческого ресурса. Организация безопасности на основе новейших цифровых решений и технологий является ключевым условием для успешного функционирования горнодобывающих предприятий. Внедрение цифровых технологий подразумевает преодоление не только цифровых препятствий, но и культурных барьеров.

На сегодняшний день система производственной безопасности в горнодобывающей промышленности проходит через существенную трансформацию, спровоцированную комплексом геополитических и технологических изменений. Без должного внимания к глобальным современным трендам и внедрению цифровых решений, предприятия могут оказаться неконкурентоспособными уже на горизонте от трех до пяти лет. Именно поэтому так важно уделять большое внимание развитию цифровизации в области промышленной

безопасности. Несомненно, в ближайшем будущем система промышленной безопасности станет технологичней и эффективней, благодаря внедрению новейших цифровых решений, что в свою очередь позволит на более высоком уровне обеспечивать безопасность и благополучие работников. Но наряду с этим, выступают возможные риски, связанные с использованием этих решений: дополнительная нагрузка на сотрудников, отсутствие компетенций, стрессовые факторы.

Список литературы

1. Единый портал Федеральной службы по труду и занятости.
2. Журнал «Всероссийской недели охраны труда – 2023».
3. Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».

Научный руководитель: Кочнева Людмила Викторовна, старший преподаватель кафедры безопасности горного производства, УФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Обзор современных методов снижения повышенного уровня шума и содержания пыли на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса

Аннотация. В работе представлен обзор современных методов снижения повышенного уровня шума и содержания пыли на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса с применением инновационных технологий. Актуальность исследования подтверждается тем, что ежегодно горнодобывающая промышленность занимает первое место по количеству выявленных профессиональных заболеваний у работников. Более половины рабочих сталкиваются с воздействием повышенного уровня шума и концентраций пыли, а существующие методы по улучшению условий труда становятся менее эффективными из-за стремительного развития технологий и оборудования. Из указанной проблемы формируется цель исследования – разработка комплекса мероприятий по улучшению условий труда у работников МСК. Решением данной проблемы может быть применение биополимерных добавок при гидрообеспыливании, инновационных звукопоглощающих материалов, а также средств индивидуальной защиты с системой контроля.

Ключевые слова: профессиональные заболевания, условия труда, вредные факторы, шум, методы сокращения содержания пыли, горнодобывающая промышленность.

Актуальность исследования обусловлена сохранением высокого уровня профессиональных заболеваний у работников минерально-сырьевого комплекса

На сегодняшний день рабочие в горнодобывающей промышленности сталкиваются с рядом вредных условий, которые оказывают негативное влияние на их здоровье, вызывая профессиональные заболевания, и, как следствие, снижение производительности труда. Современные условия работы характеризуются значительным пылевыделением и интенсивным шумом.

Более 80 % работников трудятся во вредных условиях труда, что сказывается на их здоровье. В условиях повышенной запыленности трудится – 35,7 % работников, а воздействию шума подвергаются – 27,8 % [1].

По ежегодным отчетным данным Роспотребнадзора предприятия по добыче полезных ископаемых занимают первое место среди показателей профессиональной заболеваемости – 16,44 на 10000 работников, в то время как средней показатель по России – 1,00 на 10000 работающих. Половина всех зарегистрированных случаев ПЗ такие, как силикоз, пневмокониоз, нейросенсорная тугоухость, связаны с воздействием повышенного уровня шума и концентраций пыли [2, 3].

Из-за развития профзаболеваний снижается продолжительность жизни у работников МСК. В среднем мужчины живут 66,1 лет. Так работники, у которых развился: силикоз в среднем живут почти на 2 года меньше, пневмокониоз на 1,4 года меньше, тугоухость на 0,9 лет меньше.

Данные профзаболевания могут иметь серьезные последствия для здоровья работников и могут привести к инвалидности, например, нейросенсорная тугоухость к полной потере слуха, или более ранней смерти. В целом профессиональные заболевания представляют серьезную проблему, которая требует немедленного внимания.

Развитие технологий в МСК приводит к увеличению объемов добычи, что, в свою очередь, влечет более интенсивную работу техники и увеличение номенклатуры оборудования. Это приводит к повышению уровня шума и концентраций пыли на рабочих местах, что делает существующие методы по снижению воздействия перечисленных вредных

производственных факторов не эффективными. Поэтому важно учитывать и контролировать эти аспекты при развитии и модернизации предприятий МСК, непрерывно совершенствуя методы снижения негативного воздействия.

Чтобы снизить концентрацию пыли на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса используют: меры предупреждения пылеобразования, методы подавления пыли и системы ее улавливания.

На американских шахтах используют метод предварительного увлажнения и орошения пласта. Кроме того, применяют пассивные барьеры с форсунками, направленными по направлению воздушного потока, и дополнительные форсунки, установленные в верхней и нижней частях барьера, для снижения образования пыли.

На угольных шахтах Китая применяют ультразвуковое пылеподавление и пылеподавление с добавкой смачивателей.

В Российской Федерации широко распространен метод гидрообеспыливания с применением поверхностно-активных веществ. Но ПАВ не всегда эффективны, потому что не способствуют длительному удержанию мелкодисперсной пыли. Поэтому особый интерес вызывают биополимерные добавки, которые помогают не только снизить уровень пыли в воздухе шахт, но и уменьшить возможность повторного поднятия в воздух мелкодисперсных частиц, осевших на оборудование и почву горных выработок [4].

Для снижения уровня шума на горнодобывающих предприятиях как в РФ, так и за рубежом разработано множество подходов к снижению зашумленности, такие как использование средств индивидуальной защиты, уменьшение шума в источнике его возникновения, правильное размещение оборудования, применение звукопоглощающих и звукоизоляционных материалов.

В Казахстане разработан метод снижения шума в источнике его возникновения. Снижение промышленного шума происходит за счет применения демпфирующих сплавов при изготовлении деталей горного оборудования. Разработанная сталь ФК-2П после термообработки приобретает ферритно-перлитную структуру. Данная структура характеризуется повышенной плотностью дислокаций, что позволяет повысить демпфирующие свойства разработанного стального образца, снижает уровень шума буровой штанги и корпуса перфоратора на 10–12 дБА, способствует продлению срока службы оборудования и улучшению условий труда работников [5].

Для защиты органов слуха в России широко распространено применение средств индивидуальной защиты. В свою очередь этот способ имеет ряд недостатков.

Амбушюры, сделанные из классических абсорбируемых материалов не всегда достаточно эффективны, потому что снижают воздействие шума на 10–15 дБА, а на предприятии уровень шума варьируется от 80 до 105 дБА. Чтобы повысить эффективность средств индивидуальной защиты органов слуха российские ученые предлагают при производстве амбушюр использовать акустический пенополиуретан SPG 2540, который позволяет снизить воздействие шума на 65–75 дБА [6].

Также при ношении работниками СИЗ может быть не всегда удобными для использования. Например, наушники могут стать причиной дискомфорта, неприятных ощущений или ограничений движения. Кроме того, они могут создавать изоляцию от окружающей атмосферы, что может быть неприемлемо в некоторых ситуациях, где требуется коммуникация или восприятие звукового окружения.

На некоторых угольных шахтах в России используют СИЗОС с функцией мониторинга и сигнализации. Организация контроля способствует повышению ответственности сотрудника в процессе выполнения производственных задач, снижает вероятность применения средств индивидуальной защиты, обеспечивает наблюдение за рабочими процессами и устанавливает наиболее вероятные причины возникновения аварий или несчастных случаев с работниками [7].

Выводы: ежегодно предприятия по добыче полезных ископаемых занимают первое место среди показателей профессиональной заболеваемости. С развитием технологий и увеличением объемов добычи в МСК возникает необходимость более эффективного контроля уровня шума и концентрации пыли на рабочих местах. Применяемые методы снижения воздействия вредных производственных факторов зачастую оказываются недостаточно эффективными, поэтому важно совершенствовать современные подходы к минимизации негативного воздействия на рабочий персонал. Использование комплексных мероприятий, а именно – биополимерных добавок при гидрообеспыливании, применение инновационных звукопоглощающих материалов, а также сизос с системой контроля позволит существенно снизить количество профессиональных заболеваний в горнодобывающей промышленности.

Список литературы

1. Бухтияров И. В., Чеботарев А. Г. Гигиенические проблемы улучшения условия труда на горнодобывающих предприятиях // Горная промышленность. – 2018. – № 5 (141). – С. 33–35.
2. Чеботарев А. Г. Состояние условий труда работников горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. – 2018. – № 1 (137). – С. 92–95.
3. Черкай З. Н. Охрана труда и профессиональное здоровье // Записки Горного института. 2014. Том 207. С. 159
4. Харитонов И. Л., Терешкин А. И., Корнев А. В., Коршунов Г. И., Корнева М. В. Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 12. – С. 53–59.
5. Batessova F. et al. Reducing industrial noise by the use of damping alloys when manufacturing mining equipment parts // Heliyon. 2023. Vol. 9, № 6. e17152.
6. Рудаков М. Л., Дука Н. Е. Изучение свойств звукопоглощающих материалов при конструировании средств индивидуальной защиты органа слуха // Горный информативно-аналитическая бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 165–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_165.
7. Никулин А. Н., Красноухова Д. Ю., Степанова Л. В., Бурлов В. Г., Гомазов Ф. А. Организационно-технические решения по снижению воздействия шумового фактора на подземный персонал угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–1. – С. 157–173. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_157.

Анализ методов снижения запыленности воздуха на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса

Аннотация. В работе представлен анализ методов снижения запыленности воздуха на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса. Актуальность исследования подтверждается тем, что ежегодно горнодобывающая промышленность занимает первое место по количеству выявленных профессиональных заболеваний у работников. 30% сотрудников работает в условиях повышенной запыленности, а существующие методы по улучшению условий труда становятся менее эффективными из-за стремительного развития технологий и оборудования. Из указанной проблемы формируется цель исследования – разработка комплекса мероприятий по снижению концентрации пыли на рабочих местах работников МСК. Решением данной проблемы может быть применение комбинированных систем пылеподавления и пылеулавливания.

Ключевые слова: профессиональные заболевания, условия труда, пыль, методы пылеподавления, горнодобывающая промышленность.

Актуальность исследования обусловлена сохранением высокого уровня профессиональных заболеваний органов дыхания у работников минерально-сырьевого комплекса.

На горнодобывающих предприятиях сотрудники ежедневно сталкиваются с рядом вредных условий, которые оказывают негативное влияние на их здоровье, вызывая профессиональные заболевания, и, как следствие, снижение производительности труда. Современные условия работы характеризуются значительным пылевыделением. Это обусловлено спецификой технологических процессов, связанных с добычей, транспортировкой и обогащением различных видов минерального сырья [1].

Анализ результатов специальной оценки условий труда на предприятиях минерально-сырьевого комплекса свидетельствует о том, что более 75 % сотрудников работают во вредных условиях труда, из которых 35,7 % в условиях повышенной запыленности [2].

Согласно ежегодным отчетным данным Роспотребнадзора предприятия по добыче полезных ископаемых более 10 лет занимают первое место по показателю профессиональной заболеваемости – 16,44 на 10000 работников, в то время как средний показатель по России – 1,00 на 10000 работающих. Профессиональные заболевания органов дыхания такие, как силикоз, антракоз, бронхит зарегистрированы у 60 % сотрудников, работающих в условиях повышенной запыленности [3].

Данные профзаболевания могут иметь серьезные последствия для здоровья работников, которые в последствии могут привести к инвалидности или к преждевременной смерти. В целом профессиональные заболевания органов дыхания представляют серьезную проблему, которая требует немедленного внимания.

Развитие технологий в МСК приводит к увеличению объемов добычи, что, в свою очередь, влечет более интенсивную работу техники и увеличение номенклатуры оборудования. Это приводит к повышению концентрации пыли на рабочих местах, что делает существующие методы по снижению запыленности в рабочей зоне не эффективными. Поэтому важно учитывать и контролировать эти аспекты при развитии и модернизации предприятий МСК, непрерывно совершенствуя методы снижения негативного воздействия запыленности [4].

На предприятиях минерально-сырьевого комплекса широко распространены технические мероприятия по снижению запыленности воздуха рабочей зоны сотрудников.

К ним относят меры предупреждения пылеобразования и методы пыли подавления в источнике образования пыли. Если же данные мероприятия не помогают снизить запыленность в воздухе, то применяют методы пылеулавливания.

В Китае на угольных шахтах применяют 2 метода в комплексно, сочетается ультразвуковое пылеподавление с «мокрым» пылеподавлением. В результате реализации двух методов удалось снизить концентрацию угольной пыли с 65 мг/м^3 до 7 мг/м^3 .

На угольных шахтах в США удалось снизить концентрацию пыли в воздухе рабочей зоны с 57 мг/м^3 до 8 мг/м^3 . Такой результат был достигнут, благодаря предварительному увлажнению пласта, а также установки барьеров с устройством для распыления жидкости по направлению воздушного потока в шахте [5].

В Российской Федерации на шахтах и карьерах широко распространен метод гидрообеспыливания с применением поверхностно-активных веществ, а для предотвращения повторного взметывания добавляют полимерные добавки.

На горно-обогачительных фабриках сырье предварительно увлажняют, а также устанавливают скрубберы и циклоны.

Применение комбинированных систем, сочетающих методы пылеподавления и пылеулавливания, имеет ряд преимуществ:

- высокая эффективность: комбинированные системы в условиях интенсивной добычи обеспечивают более высокую степень очистки воздуха, чем отдельные системы, что способствует улучшению пылевой обстановки на рабочих местах;
- вариативность: комбинированные системы могут быть адаптированы для различных условий, учитывая особенности производственной среды.
- улучшение условий труда: из-за снижения уровня запыленности на рабочем месте уменьшается риск временной потери трудоспособности у работников, а также снижается риск развития профессиональных заболеваний органов дыхания;

При этом комбинированные системы имеют ряд недостатков, которые требуют дальнейшего решения:

- установка комбинированных систем требует высокие первоначальные капитальные затраты;
- регулярное техническое обслуживание и более квалифицированный персонал для обслуживания таких систем;
- большие габариты: в некоторых случаях комбинированные системы могут занимать значительно место, чем отдельные устройства для улавливания или подавления пыли, что может быть проблемой в условиях ограниченного рабочего места.

Разработка более эффективных и компактных комбинированных систем, совершенствование биополимерных добавок являются наиболее перспективными направлениями в вопросе снижения концентрации пыли на рабочих местах предприятий минерально-сырьевого комплекса.

Таким образом, ежегодно предприятия по добыче полезных ископаемых занимают первое место среди показателей профессиональной заболеваемости. С развитием технологий и увеличением объемов добычи в МСК возникает необходимость более эффективного контроля концентрации пыли на рабочих местах. Применяемые методы снижения запыленности воздуха в рабочей зоне зачастую оказываются недостаточно эффективными в условиях интенсивной добычи, поэтому важно совершенствовать современные подходы к минимизации негативного воздействия данного фактора на рабочий персонал. Использование комбинированных методов, а именно – пылеподавление и пылеулавливание позволит существенно снизить количество профессиональных заболеваний пылевой этиологии в горнодобывающей промышленности.

Список литературы

1. Бухтияров И. В., Чеботарев А. Г. Гигиенические проблемы улучшения условия труда на горнодобывающих предприятиях // Горная промышленность. – 2018. – № 5 (141). – С. 33–35. – DOI 10.30686/1609-9192-2018-5-141-33-35.
2. Чеботарев А. Г. Состояние условий труда работников горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. – 2018. – № 1 (137). – С. 92–95. – DOI 10.30686/1609-9192-2018-1-137-92-95.
3. Коршунов Г. И., Сафина А. М., Каримов А. М. Исследование и анализ источников выделения респираторной фракции пыли на угольных разрезах // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 10. – С. 65–70. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-10-65-70.
4. Егорова А. М., Луценко Л. А., Сухова А. В., Коложа В. В., Федорович Г. В. К вопросу оценки профессионального риска заболеваний пылевой этиологии // Здравоохранение Российской Федерации. – 2021. – № 65-4. – С. 354–358. – DOI 10.47470/0044-197X-2021-65-4-354-358.
5. Харитонов И. Л., Терешкин А. И., Корнев А. В., Коршунов Г. И., Корнева М. В. Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 12. – С. 53–59. – DOI 10.24000/0409-2961-2019-12-53-59.

Научный руководитель: Магомет Ростислав Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Зуева Анна Александровна*

Булавка Юлия Анатольевна

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь*

* zuyeva_1992@bk.ru

Оценка профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов на территории НПЗ

Аннотация. Выполнена оценка как априорной, так и апостериорной составляющих профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов на территории НПЗ. Результаты исследований показали стабильно высокие уровни профессионального риска для исследуемой профессии, что обуславливает необходимость разработки современных действенных мер, по минимизации воздействия мелкодисперсной пыли минеральной ваты на здоровье работников, чтобы снизить риск развития производственно обусловленных и профессиональных заболеваний.

Ключевые слова: профессиональный риск, изолировщик на термоизоляции, минеральная вата.

Hanna A. Zuyeva*

Yuliya A. Bulauka

*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
Novopolotsk, Republic of Belarus*

* zuyeva_1992@bk.ru

Occupational risk assessment for thermal insulation of technological pipelines on the territory of the refinery

Abstract. Assessment of both a priori and a posteriori components of occupational risk for insulators on thermal insulation of technological pipelines on the territory of the refinery was carried out. The results of the studies showed consistently high levels of occupational risk for the studied profession, which necessitates the development of modern effective measures to minimize the impact of finely dispersed mineral wool dust on the health of workers in order to reduce the risk of developing industrial and occupational diseases.

Keywords: professional risk, thermal insulation insulator, mineral wool.

Обеспечение безопасных и безвредных условий труда является в настоящее время актуальной и социально значимой проблемой современного общества [1–2]. По статистическим данным Международной организации труда ежегодно в мире регистрируется более 160 случаев профессиональных заболеваний, при этом от заболеваний, связанных с производством погибает в 6,5 раз больше работников, чем от производственных травм [3]. Анализ причин летальных случаев, связанных с работой показал, что наибольшую долю составляют заболевания системы кровообращения (более 30 % всех случаев) и новообразования (более 26 %), а заболевания органов дыхания занимают третье ранговое место (более 17 %). Значительная часть профессиональных заболеваний органов дыхания обусловлена воздействием производственной пыли раздражающее действие которой провоцирует развитие хронической обструктивной болезни легких, хронического ринофарингита и хронического пылевого бронхита; фиброгенное действие – пневмокониоза; аллергическое действие – профессиональной бронхиальной астмы и экзогенного аллергического альвеолита; а канцерогенное действие приводит к развитию мезотелиомы плевры и профессиональных опухолей легких.

В связи ограничением в большинстве стран мира использования асбеста существенно возросла роль неорганических теплоизоляционных материалов таких, как минеральная и стеклянная вата и изделий на их основе. В частности, в Республики Беларусь

объем производства подобных теплоизоляционных материалов за последние десять лет вырос практически на 300 % [4]. Вместе с тем, влияние пыли минеральной и стеклянной ваты на работников при выполнении теплоизоляционных работ изучено недостаточно, что и определило цель настоящего исследования.

Инструментальный замер при помощи аспиратора ПУ-4Э запыленности воздуха рабочей зоны изолировщиков на термоизоляции пакетами прошивными теплоизоляционными технологических трубопроводов на территории белорусского нефтеперерабатывающего предприятия показал, что усредненная концентрация пыли минеральной ваты варьируется в пределах от 7,20 до 16,55 мг/м³ при значении ПДК_{р.з.} в 4 мг/м³ (т.е. регистрируется регулярное превышение ПДК_{р.з.} в 1,8–4,1 раза). Таким образом, априорный уровень профессионального риска в соответствии с гигиенической классификацией условий труда изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов по пылевому фактору варьируется от среднего (существенного) до высокого (труднопереносимого) риска.

Типовой химический состав пыли минеральной ваты следующий: 43–50 % масс. SiO₂; 10–25 % масс. CaO; 6–15 % масс. Al₂O₃; 6–16 % масс. MgO; 3–8 % масс. FeO; 1–3,5 % масс. Na₂O; 0,5–3,5 % масс. TiO₂; 0,5–2 % масс. K₂O; менее 1 % масс. B₂O₃ и P₂O₅ [5]. Пыль минеральной ваты относится к мелкодисперсному типу с размером частиц не более 10 мкм и скоростью осаждения в воздухе не более 1 см/с, характеризуется плохой всасываемостью в организме и возможностью длительно витать в воздухе рабочей зоны. Характерное для пыли минеральной ваты высокое содержание свободного диоксида кремния определяет повышенный уровень профессионального риска по фиброгенному эффекту для изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов при длительном воздействии пылевого фактора. Пыль минеральной ваты может оказывать токсичное действие на клетки кровеносного русла организма, сердечно-сосудистой, органов дыхания, пищеварения, легочной систем, а также вызвать механическое раздражающее действие на верхние дыхательные пути, слизистую оболочку глаз и кожу [6, 7].

Выполнена апостериорная оценка уровня профессионального риска для изолировщика на термоизоляции технологических трубопроводов на НПЗ (экспонированная группа) и группы контроля (работники вспомогательных производств: жестянщики, сборщики изделий и конструкций) по показателям заболеваемости с временной утратой трудоспособности (ЗВУТ) филиала «Новополоцкое управление ОАО «Белтеплоизоляция» (Республика Беларусь) за период с 2021-2023гг.

Определено, что наиболее уязвимой возрастной группой наблюдения являются – от 30 до 49 лет, при этом роста ЗВУТ в зависимости от стажа работы не установлено.

В таблице 1 приведены основные показатели ЗВУТ в экспонированной группе и в группе контроля. Таким образом, в экспонированной группе по сравнению с группой контроля достоверно выше число случаев ЗВУТ на 100 работающих, показатель дней временной нетрудоспособности и показатель болевших лиц, а индекс здоровья напротив выше в группе контроля.

Таблица 1

Основные показатели ЗВУТ в экспонированной группе и в группе контроля

Показатель	Значение показателя ЗВУТ	
	экспонированная группа	группа контроля
Случаи ЗВУТ на 100 работающих	222,41±1,69	136,66±1,32
Болевшие лица	89,65±1,11	83,33±1,72
Средняя длительность одного случая	11,05	12,90
Дни временной нетрудоспособности	2458,62±5,6	1763±4,77
Показатель неболевших лиц (индекс здоровья)	10,34	16,66

Проценты распределения по числу случаев ЗВУТ и по дням временной нетрудоспособности по отдельным нозологическим формам в исследуемых группах представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

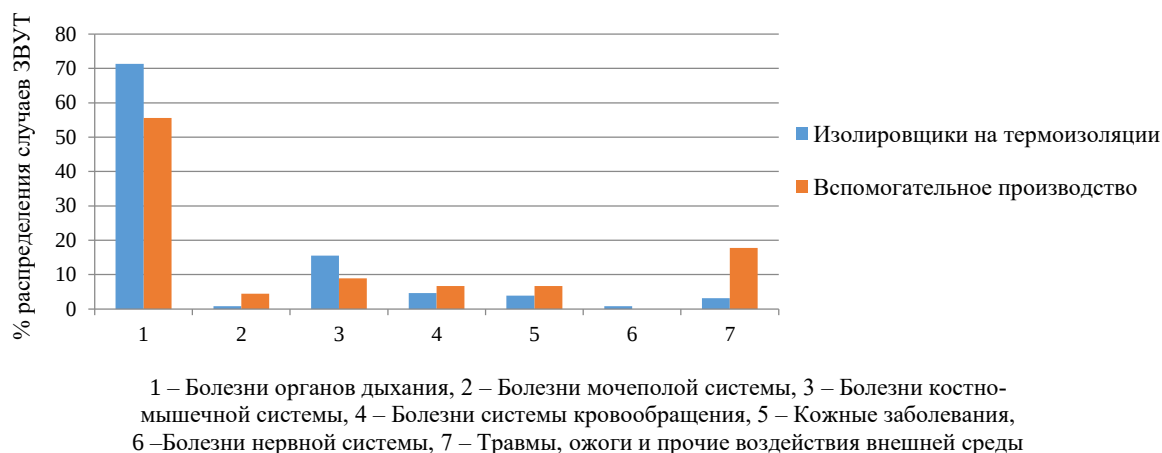


Рис. 1. Процент распределения случаев ЗВУТ по отдельным нозологическим формам

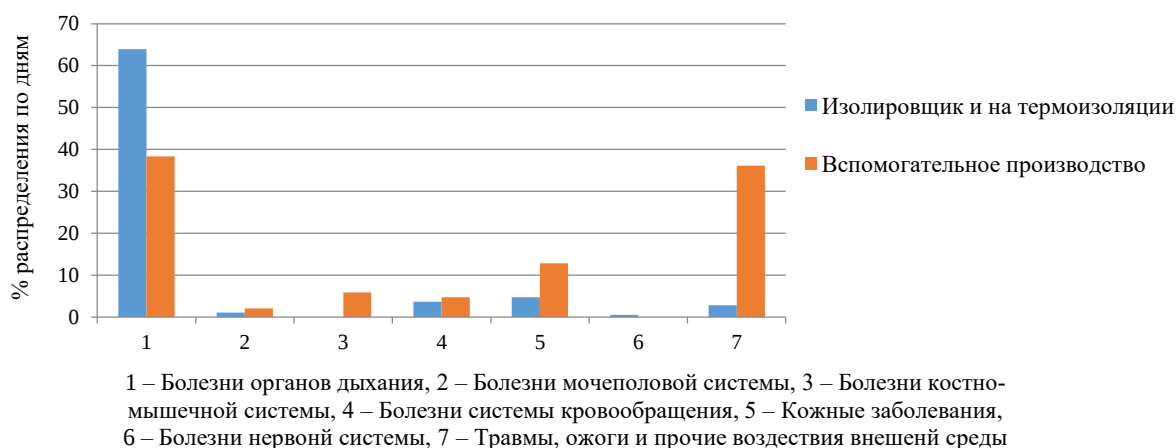


Рис. 2. Процент распределения по дням временной нетрудоспособности по отдельным нозологическим формам

Определено, что среди изолировщиков на термоизоляции наиболее высока вероятность развития заболеваний органов дыхания, а также больше продолжительность восстановления после болезни, чем в группе контроля (среди работников вспомогательных производств). В целом, уровень всех показателей ЗВУТ для изолировщиков на термоизоляции по шкале Е.Л. Ноткина оценивается как «очень высокий».

Показатель этиологической доли, устанавливающий степень причинно-следственной связи условий труда и заболеваемости, у изолировщиков на термоизоляции составляет 32,43 %, что подтверждает высокую степень производственной обусловленности и может спровоцировать возникновение стойких нарушений и развитие производственно обусловленных заболеваний.

Таким образом, результаты оценки как априорной, так и апостериорной составляющих профессионального риска для изолировщиков на термоизоляции технологических трубопроводов на территории НПЗ показали стабильно высокие его уровни, что обуславливает необходимость разработки современных действенных мер, по минимизации воздействия мелкодисперсной пыли минеральной ваты на здоровье работников, чтобы снизить риск развития производственно обусловленных и профессиональных заболеваний [8].

Список литературы

1. Зуева, А. А. Гигиеническая оценка условий труда изолировщика на термоизоляции с учетом пылевого фактора / Зуева А. А., Булавка Ю. А. // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 18 апреля 2024 г. – Минск: УГЗ, 2024. – С. 71–73.
2. Булавка, Ю. А. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда / Ю. А. Булавка, В. Н. Самусевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 72–81.
3. Зуева, А. А. Идентификация опасностей на рабочем месте изолировщика на термоизоляции с применением контрольного листа для наблюдений и собеседований / Зуева А. А., Булавка Ю. А. // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве сб. материалов международной заочной научно-практической конференции: Минск: УГЗ, 2024. –С. 107–112.
4. Гутич, Е. А. Особенности заболеваемости и оценка профессионального риска здоровью работников, имеющих контакт с аэрозолями искусственных минеральных волокон / Е. А. Гутич, Г. Е. Косяченко, С. И. Сычик // Анализ риска здоровью. – № 4. – 2019. – С. 113–118.
5. Brown, R. C. Alkaline earth silicate wools – A new generation of high temperature insulation / R. C. Brown, P. T. C. Harrison // Regulatory Toxicology and Pharmacology. V. 64, Issue 2, 2012, P. 296–304 doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.08.020.
6. Копытенкова, О. И. Гигиеническая оценка условий труда в отдельных профессиях строительных организаций / Копытнкова О. И., Турсунов З. Ш., Леванчук А. В., Мироненко О. В., Фролова Н. М., Сазонова А. М. // Гигиена и санитария. – 2018.- В. 97(12) – С. 1203–1209.
7. Копытенкова, О. И. Оценка риска ущерба для здоровья при воздействии мелкодисперсной пыли минеральной ваты / О. И. Копытенкова, А. В. Леванчук, З. Ш. Турсунов // Казанский медицинский журнал. – Т. 95(4) – Гигиена труда. – 2014. – С. 570–574.
8. Зуева, А. А. Анализ влияния загрязнения окружающей среды аэрозолями искусственных минеральных волокон на состояние здоровья работающих при выполнении теплоизоляционных работ / А. А. Зуева, Ю. А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 4(39). – С. 88–91. – DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-88-91. – EDN YXDQXE.

Кузьменок Инесса Николаевна¹

Булавка Юлия Анатольевна^{2*}

¹ РУП «Белоруснефть-Минскавтозаправка», Минск, Республика Беларусь

² Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь

* u.bylavka@psu.by

Предупреждение аварий при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях

Аннотация. Представлены результаты анализа происшествий, вследствие которых возникла опасность либо происходили случаи травмирования персонала и посетителей заправок станций, а также повреждения автотранспорта и установленного на АЗС оборудования, зданий, сооружений на АЗС Беларуси и за ее пределами. Определено, что существующие методы обеспечения безопасности автозаправочных комплексов, определяющие порядок действия работников АЗС при возникновении аварии для ее локализации и ликвидации, а также способы предупреждения чрезвычайных ситуаций требуют дальнейшего совершенствования. Предложены направления развития нормативно правового обеспечения для осуществления безопасной эксплуатации АЗС.

Ключевые слова: автозаправочная станция, аварийная ситуация, нефтяной сорбент.

Inessa N. Kuzmenok¹

Yuliya A. Bulauka^{2*}

¹ UP «Belorusneft-Minskavtozapravka», Minsk, Republic of Belarus

² Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus

* u.bylavka@psu.by

Prevention of accidents when handling oil products at fuel stations

Abstract. The article presents the results of the analysis of incidents that resulted in danger or injuries to personnel and visitors of filling stations, as well as damage to vehicles and equipment installed at filling stations, buildings, structures at filling stations in Belarus and beyond. It is determined that the existing methods of ensuring the safety of filling complexes, determining the procedure for the actions of filling station employees in the event of an accident for its localization and elimination, as well as methods for preventing emergency situations, require further improvement. Directions for the development of regulatory framework for the implementation of safe operation of filling stations are proposed.

Keywords: petrol station, emergency, oil sorbent.

Рост автомобильного парка динамично развивает сектор экономики, связанный с эксплуатацией всех типов автомобильных заправочных станций (АЗС). На территории Беларуси размещено около 850 автозаправочных станций, из которых доля АЗС Государственного производственного объединения «Белоруснефть» составляет 68 %, а 32 % объектов являются коммерческими организациями нефтепродуктообеспечения, а именно: Юнайтед Компани, Астротрейдинг, Лукойл-Белоруссия, Легавтотранс, НефтеХимТрейдинг (Рос-ВТС), РН-Запад, Газпромнефть-Белнефтепродукт.

АЗС представляет собой сложный комплекс зданий, сооружений и оборудования, с ограниченным участком по площади, осуществляющий технологические операции приема, хранения и выдачи нефтепродуктов, являющихся легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, что обуславливает высокий риск возникновения взрыво- и пожароопасных чрезвычайных ситуаций, способных привести к травмированию и гибели людей, и значительному материальному ущербу как на самой АЗС, так и на объектах прилегающих к ней территорий. Однако, наибольшую опасность представляют аварии, связанные

с возникновением очага возгорания непосредственно на АЗС ввиду концентрации на малой площади большого количества легковоспламеняющихся и горючих жидкостей [1].

Ежегодно в мире регистрируются сотни аварийных ситуаций на АЗС, приведших к травмированию и гибели людей. К крупнейшей катастрофе в 2015 году в столице Республики Ганы Аккре привел взрыв емкостей с топливом на АЗС, погибли 96 человек, а утечка и распространение горящего топлива по поверхности воды привело к возгоранию близлежащих домов, всего жертвами происшествия стали 200 человек. В 2018 году в Италии взрыв бензовоза с горящим нефтепродуктом на АЗС унес жизнь двух человек, всего пострадало 17. В апреле 2019 года водитель в Китае забыл топливораздаточный кран в бензобаке после заправки, произошло воспламенение топлива и мощный взрыв, в результате чего АЗС сгорела дотла. В январе 2022 года в Германии в результате взрыва топливораздаточной колонки (ТРК) в Хаммерсбахе погибли два человека, в июне 2022 года в Гессене жертвой ДТП и масштабного пожара на АЗС стал один человек. В российском городе Кизляр в марте 2016 г. при перекачке СУГ с автоцистерны в подземное хранилище АЗС произошел взрыв, 17 человек получили травмы различной степени тяжести. В августе 2020 г. в российском городе Волгоград, от взрыва автоцистерны с пропаном на территории автомобильной газозаправочной погиб один человек, 13 – пострадало [2–4]. В октябре 2024 в российском городе Грозный от взрыва на автозаправочной станции погибли четыре человека, в том числе двое детей. Таким образом, аварийные ситуации, вызванные неконтролируемыми проливами нефтепродуктов с дальнейшим образованием взрывоопасных концентраций газовоздушных и топливовоздушных смесей (ГВС и ТВС) в воздушной среде, влекут за собой взрывы и пожары на наружных установках и территории АЗС, следствием чего является прямая угроза жизни людей и материального ущерба в особо крупных размерах.

Выполненный анализ происшествий, вследствие которых возникала опасность либо происходили случаи травмирования персонала и посетителей заправочных станций, а также повреждения автотранспорта и установленного на АЗС оборудования, зданий, сооружений на АЗС Беларуси и за ее пределами, показал, что возникновение взрывов и пожаров связано с воспламенением нефтепродуктов либо взрывоопасных газовоздушных и топливовоздушных смесей (ГВС и ТВС), образованных при сливе топлива из автоцистерны, отпуске топлива потребителям, проливе и утечке легковоспламеняющихся (ЛВЖ), горючих жидкостей (ГЖ), горючих газов (ГГ), от источников зажигания: разряда статического или атмосферного электричества, теплового проявления механической энергии (искры) при трении и ударах искрообразующих материалов, открытого огня при нарушениях правил проведения работ с повышенной опасностью, несоблюдении противопожарного режима, нарушений требований охраны труда и прочих. Из общего количества проанализированных чрезвычайных ситуаций в 58 % случаев наблюдалось возгорание разлитых ЛВЖ с последующим образованием пожара пролива, в 26 % происходит взрыв ТВС либо ГВС, образующихся вследствие пролива или утечки нефтепродукта. «Огненный шар» образуется в 7 % случаев. На долю прочих аварий, таких как хлопок, пожар-вспышка, пролив без воспламенения приходится 9 % происшествий. Максимальное число санитарных потерь фиксируется при пожарах пролива ЛВЖ, наибольшее количество смертельных случаев приходится на аварии, связанные со взрывом ТВС и ГВС. В результате аварии на АЗС чаще всего повреждаются топливораздаточные колонки и резервуары хранения нефтепродуктов.

В целом, выполненный анализ аварийных ситуаций на АЗС позволил установить, что пролив нефтепродуктов является наиболее частой причиной чрезвычайной ситуации, а высокая вероятность возникновения пожаров на АЗС определяется частыми утечками топлива в местах, где не исключено образование источников зажигания. Специфическими особенностями взрыво-, пожароопасности АЗС является наличие значительного объема хранящегося топлива на ограниченном по площади участке; размещение технологического

оборудования (ТРК, наземных резервуаров и прочего) на открытых площадках; возможность расположения АЗС в черте плотной застройки населенного пункта; специфика ведения технологических операций, связанных с приемом, хранением и выдачей нефтепродуктов, а также возможность проявления субъективных факторов, вызванных нестандартным поведением водителей автотранспортных средств или других лиц.

Безопасность производственного процесса на АЗС обеспечивается выбором режима работы технологического оборудования, выбором конструкции оборудования и его размещения, профессиональным отбором и обучением работающих. Современные АЗС оснащены чувствительными автоматическими системами обнаружения, оповещения и тушения пожара, эффективными средствами профилактики и ликвидации первичного возгорания, а также системами противоаварийной автоматической защиты технологического оборудования. Для хранения топлива используют подземные двустенные резервуары, в которых предусмотрен контроль уровня нефтепродуктов с выводом информации в общую систему контроля и управления (при достижении 95 % объема заполнения резервуаров на трубопроводах слива нефтепродуктов срабатывает отсечной клапан переполнения с автоматическим оповещением персонала АЗС), а также контроль целостности резервуаров с применением светозвуковой сигнализации при разгерметизации резервуара и утечке жидкости в межстенном пространстве резервуаров. ТРК оснащены раздаточными кранами с автоматической защитой от переполнения бензобака автомобиля и аварийными разрывными муфтами, которые перекрывают поток топлива при срыве крана, в состав резервуарного парка входит подземный резервуар для сбора проливов нефтепродуктов в случае аварийной ситуации. Однако, существующие методы обеспечения безопасности автозаправочных комплексов, определяющие порядок действия работников АЗС при возникновении аварии для ее локализации и ликвидации, а также способы предупреждения чрезвычайных ситуаций требуют дальнейшего совершенствования. В частности, конструктивные меры полностью не исключают возможность возникновения инцидентов, связанных с проливом и утечкой топлива и не гарантируют обеспечение абсолютной безопасности. В связи с этим, при проливе либо утечке нефтепродукта в целях немедленного прекращения выхода топлива и недопущения развития чрезвычайной ситуации, на АЗС должен быть отработан алгоритм действий для ликвидации пролива нефтепродукта силами сотрудников объекта до прибытия специализированных служб, каждый объект должен быть укомплектован соответствующим материалом и оборудованием. В частности, запасом нефтяного сорбента для сбора пролива нефтепродукта.

В настоящее время для борьбы с нефтяными разливами применяется более двухсот видов сорбентов различного происхождения (по исходному сырью): синтетических, неорганических, органических, органоминеральных со специфическими характеристиками (сорбционной емкостью по нефтепродукту, плотностью, водопоглощением, требованиями к хранению, способу утилизации и прочим), и его правильный выбор является ключевой задачей для эффективного устранения аварийных проливов и утечек нефтепродукта на АЗС. Наиболее широко на рынке продавлены промышленные сорбенты на основе торфа («Белнефлесорб – экстра», «Экограннефторф», «ЭридГроу СоНеТ-М», «СОНЕТ-СОРБ», «Ливсор-С» и др.) [5]. Разнообразие предлагаемых на рынке сорбентов, при отсутствии регламентирующих требований, устанавливающих правила и порядок работы по применению сорбентов на автозаправочных станциях и их утилизации после использования, обуславливает ряд проблем, связанных с обеспечением комплексной безопасности опасного объекта. Нами изучено в лабораторных условиях более двадцати образцов природных сорбционных материалов из отходов деревообработки и сельского хозяйства для ликвидации проливов нефтепродуктов на АЗС. Установлено, что наиболее перспективно использование обработанной термическим способом соломы и смеси шелухи сельскохозяйственных культур, шелухи ячменя и подсолнечника, околоплодников боба и фасоли.

Таким образом, анализ существующих методов обеспечения безопасности автозаправочных комплексов, определяющих порядок действия работников АЗС при возникновении аварии для ее локализации и ликвидации, а также способов предупреждения чрезвычайных ситуаций показал, необходимость разработки нормативно-правового акта по применению сорбционных материалов для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на АЗС, в котором будут учтены: тип сорбента; его свойства и качественные характеристики (сорбционная емкость по топливам, содержание влаги, плотность, водопоглощение, возможность регенерации сорбента, утилизируемость, требования к хранению); порядок расчета нормативного запаса сорбента в зависимости от площади АЗС и количества ТРК; а также порядок ликвидации разлитого топлива с применением сорбента.

Список литературы

1. Кузьменок, И. Н. Проблемы обеспечения безопасности при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях / И. Н. Кузьменок, Ю. А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 86–91.
2. Ивахнюк, Г. К. Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях) / Г.К. Ивахнюк, Ю.Ю. Осмонов Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. –2022. – Т. 31/ № 6. – С. 91–98.
3. Усанович, С. А. Анализ аварийных ситуаций на автозаправочных станциях / С. А. Усанович, С. В. Букин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2012. – № 1(11). – С. 186–190.
4. Тимофеева, С. С. Анализ пожарной опасности на автозаправочных станциях России и Иркутской области / С. С. Тимофеева, С. С. Фурманова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 8(67). – С. 55–61.
5. Якубовский С. Ф. Анализ сорбционной способности по отношению к нефти и нефтепродуктам природных растительных материалов /С. Ф. Якубовский, Ю. А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – № 10. – С. 115–120.

Красноухова Дарья Юрьевна
*аспирант кафедры безопасности производств,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, Darya.krasnouhova@yandex.ru*

Исследование влияний психофизиологического состояния работников на реализацию травмоопасных ситуаций

Аннотация. Согласно статистике Росстата около 80 % работников угольной промышленности подвергаются воздействию вредных и опасных факторов. В результате чего, риск возникновения опасных ситуаций увеличивается в зависимости от уровня воздействия шума, освещенности, запыленности, микроклимата и других факторов на рабочих местах. Современные исследования отечественных и зарубежных ученых позволяют оценить влияние вредных производственных факторов на человека, в результате чего сам работник может рассматривать в качестве фактора риска как источник ошибочных действий и принятия неверных решений. Таким образом предложено рассмотрение рисков реализации опасных событий в системе «опасное явление – вредные факторы – ошибочное действие – опасная ситуация», что позволит разрабатывать комплекс адресных мероприятия, направленных на три основных источника реализации опасных событий, а именно: опасное воздействие, воздействие вредных и человеческого факторов.

Ключевые слова: вредные факторы, оценка воздействия вредных факторов, безопасное поведение, риск ошибочных действий, травматизм, психофизиологическое состояние работников.

Darya Yu. Krasnoukhova
*Post-graduate student of Industrial Safety Department,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, Darya.krasnouhova@yandex.ru*

Investigation of the influence of the psychophysiological state of employees on the implementation of traumatic situations

Abstract. According to Rosstat data, approximately 80 percent of coal industry employees are exposed to hazardous and harmful elements. This exposure increases the likelihood of hazardous incidents, depending on factors such as noise, light, dust, and the overall work environment. Recent research conducted by domestic and international scholars provides insights into the impact of these harmful workplace conditions on human health. This research suggests that the worker themselves can be viewed as a potential source of error, leading to misguided actions and decisions. Therefore, it is essential to consider the potential for hazardous events within the framework of the "hazardous phenomenon – harmful factors – erroneous action – hazardous situation" system. This approach allows for the development of targeted measures addressing the three primary sources of hazardous events: hazardous effects, harmful factors, and human error.

Keywords: harmful factors, assessment of the impact of harmful factors, safe behavior, risk of erroneous actions, injuries, psychophysiological condition of employees.

Горнодобывающая отрасль России является одним из самых опасных видов экономической деятельности, среди которых наибольшее число работников, занятых во вредных условиях труда, относятся к угольной промышленности, где 78,9 % работников подвергаются воздействию вредных производственных факторов, 58,6 % из которых работают в тяжелых условиях. В нефтегазовой отрасли по статистике Росстата на конец 2023 года [1] наиболее распространенными вредными факторами являются шум (19,6 %), химический фактор (6,8 %), а также тяжесть труда (18,9 %). При добыче металлических руд и прочих полезных ископаемых наиболее характерными вредными факторами являются шум, аэрозоли преимущественно фиброгенного действия, вибрация и химический

фактор, а удельный вес численности работников, занятых при воздействии фактора тяжести труда, составляет 44,8 % для предприятий по добыче металлических руд и 33,2 % для прочих.

Таким образом, наиболее опасной остается угольная промышленность, где наиболее распространено самое большое число вредных производственных факторов, таких как шум (46,4 %), аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (36 %), вибрация (23,3 %), химический фактор (7,1 %), микроклимат (15,4 %), освещенность (17,7 %) [1].

Анализ статистических данных, приведенных в отчетах Ростехнадзора [2] позволяют рассмотреть основные официальные причины произошедших несчастных случаев. Также в описываемых ситуациях указываются обстоятельства происшествия. К основным причинам несчастных случаев чаще всего относят [2]:

- низкий уровень производственного контроля;
- нарушения технологии производства работ;
- грубое нарушение трудового распорядка и дисциплины труда;
- неудовлетворительная организация производства работ;
- низкий уровень знания требований норм и правил безопасности [3, 4].

Таким образом, в целях предупреждения реализации опасных ситуаций воздействие опасных и вредных факторов рассматривается в системе «опасное явление – вредные факторы – ошибочное действие – опасная ситуация». В целях предупреждения аварий и несчастных случаев на производстве необходимо предупреждать травмоопасные ситуации, что может быть достигнуто за счет анализа исходных ситуаций, приведших к реализации опасного события.

Предлагается проводить оценку риска травмирования работников в системе «опасное явление – вредные факторы – ошибочное действие – опасная ситуация», что позволит учитывать источники опасности и разрабатывать адресные мероприятия для наиболее эффективного предупреждения воздействия вредных факторов, которые ухудшают безопасность на рабочих местах, а также психофизиологические параметры человека и их динамику в течение смены.

Так опасные воздействия позволяют охарактеризовать все опасности среды, в которой находится работник, к примеру движущиеся машины и оборудование, острые и выступающие части механизмов, Опасные воздействия являются непосредственными источниками травмы.

Вредные факторы оказывают влияние и на самого работника, и на процесс взаимодействия с окружающей средой. Исследователи из Китая утверждают, что шум оказывает влияние на физиологию и психологию, в результате чего установлено снижение скорости не только слуховой реакции, но и зрительной реакции. В результате снижается внимание и быстрее накапливается усталость, что может привести к травме [5–7]. Аналогичную взаимосвязь можно проследить при взаимодействии с машинами и установками, которые могут стать источником опасности. Уровень освещенности и запыленности или загазованности на рабочем месте будут снижать восприятие технологического процесса, в котором задействован работник, в результате риск получения травмы увеличивается [8].

Учет психофизиологических параметров работника в условиях воздействия факторов производственной среды позволит предупреждать нахождение работников, состояние которых не соответствует индивидуальным параметрам, на рабочих местах в условиях вредного и опасного воздействия.

Оценка рисков с учетом трех основных категорий исходных данных: опасного воздействия, вредных и человеческого факторов, позволит определить перечень работников, которым необходимы дополнительные мероприятия для поддержания должного уровня работоспособности.

Модернизации технологического процесса позволяет уменьшить количество вредных рабочих мест, однако усложнение технологического процесса требует рассматривать

взаимодействие работника с механизмами и окружающей средой как многофакторный сложный процесс в целях поддержания должного уровня надежности. Одним из способов оценки рассматриваемого взаимодействия служит оценка рисков, которая позволит рассматривать комплекс возможных вредных и опасных факторов, а также определять направления разработки мероприятий для предупреждения развития травмоопасных ситуаций.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions.
2. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/.
3. Гендлер С. Г., Прохорова Е. А. Оценка совокупного влияния производственного травматизма и профессиональных заболеваний на состояние охраны труда в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 10(2). С. 105–116. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105.
4. Смирняков В. В., Каргополова А. П., Смирнякова В. В., Кабанов Е. И., Алмосова Я. В. Риско-ориентированный подход как инструмент повышения качества подготовки и развития персонала АО «СУЭК-Кузбасс» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6–1. С. 214–229. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_214.
5. Wang J G, Fu W, Wang Y Q. Study on the effects of different levels of noise on miners' physiological indexes and behavioral abilities // Min Saf Environ Prot. 2019. 46(01). P. 99–103. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2019.01.022.
6. Li, J., Qin, Y., Yang, L. et al. A simulation experiment study to examine the effects of noise on miners' safety behavior in underground coal mines // BMC Public Health. 2021. V. 21(1), 324 (2021). DOI: 10.1186/s12889-021-10354-2.
7. Jing G X, Lu P F, Zhao P F, Wang Y S. Experimental study on the influence of coal mine noise on people's attention. J Saf Sci Technol. 2017. 13(10):164–8. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.10.027.
8. Берлов Д. Н. Возможные пути влияния режимов освещения на когнитивные функции человека // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2016. Т. 11, № 2. С. 468–469. EDN: YIKFMF.
9. Кречманн Ю., Плиен М., Тхи Хоан Нга Нгуен, Рудаков М. Л. Эффективное наращивание потенциала в горном деле за счет обучения, расширяющего возможности в области управления охраной труда // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 248–256. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.248/.

Научный руководитель: *Коршунов Геннадий Иванович*, д.т.н., профессор кафедры безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия. **Scientific advisor:** *Gennady I. Korshunov*, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Industrial Safety Department, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Наряд-допуск как конечный детерминированный автомат

Аннотация. В работе представлен анализ распределения и причин несчастных случаев со смертельным исходом при выполнении работ в действующих электроустановках за период 2011–2020 гг. Также предлагается рассмотреть процесс выдачи наряд-допуска и выполнения работ по наряд-допуску с позиции теории конечных автоматов, как абстрактной модели, описывающей поведение системы с фиксированным количеством состояний и правилами перехода между этими состояниями.

Ключевые слова: наряд-допуск, анализ несчастных случаев, работы повышенной опасности, конечный автомат.

Evgeny E. Meleshchenko
Omsk State Technical University,
Omsk, Russia, meleshenko_evgen@mail.ru

Document admission as a finite deterministic automaton

Abstract. The paper presents an analysis of the distribution and causes of fatal accidents during work in existing electrical installations for the period 2011–2020. It is also proposed to consider the process of issuing work permits and performing work permits from the perspective of finite automata theory, as an abstract model describing the behavior of a system with a fixed number of states and the rules of transition between these states.

Keywords: security clearance, accident analysis, high-risk jobs, and a finite state machine.

За период с 2011 по 2023 г. в организациях Российской Федерации, поднадзорных Энергонадзору Ростехнадзора произошло 697 несчастных случаев (далее – НС) со смертельным исходом, причем за период с 2011 по 2020 гг. 44,6 % НС со смертельным исходом произошли при выполнении работ по наряд-допуску (далее – Н-Д).

При написании статьи применялись методы научного обобщения при анализе статистических данных по производственному травматизму и совокупности причин происшествий, системного и структурно-функционального анализа при построении Н-Д, как систему конечных автоматов.

В электроэнергетической отрасли основным нормативно-правовым актом в области безопасного выполнения работ повышенной опасности (далее ПО) являются Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (далее – Правила по ОТ). В соответствии с положениями Правил по ОТ работы в действующих электроустановках (далее – ДЭ) в зависимости от сложности и потенциальной опасности работы должны выполняться по одному из допускающих документов: Н-Д, распоряжению или по перечню работ в порядке текущей эксплуатации.

Анализ распределения количества НС со смертельным исходом при выполнении работ в ДЭ [1] показывает, что за период 2011–2020 гг. практически половина работ повышенной опасности (44,6 %) выполнялись по Н-Д.

Кроме того, анализируя причины произошедших НС со смертельным исходом при выполнении работ в ДЭ можно выделить несколько основных: невыполнение мероприятий, обеспечивающих безопасность работ в электроустановках; ошибочные действия пострадавшего, в основном выражающиеся в расширении рабочей зоны или расширении выданного задания, что в итоге приводит к прикосновению к токоведущим частям электроустановки, оставшейся под напряжением.

Причины такого поведения работника могут быть различны. Исследования в области изучения взаимного влияния человеческого фактора (далее – ЧФ) на техническую систему в условиях внешней среды являются крайне актуальными и перспективными

и позволят приблизить исследователей к пониманию принципа управления ЧФ с целью обеспечения безопасности работника в системе «Человек-машина-среда» [2].

Н-Д представляет собой документ, определяющий содержание, место, время, исполнителей и ответственных лиц, условия безопасного выполнения работ. Исходя из определения и рекомендуемой формы Н-Д представим данный допускающий документ, как строгую линейную структуру, строгий алгоритм действий, в котором работы можно разделить на этапы и к каждому последующему этапу приступают после выполнения предыдущего, ассоциируя его с теорией конечных автоматов [3].

При выполнении работ по Н-Д выделяют следующих участников процесса, изображенных на диаграмме (рис. 1).

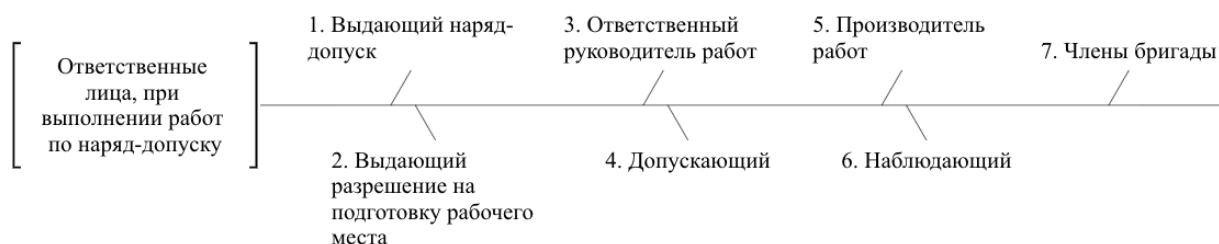


Рис. 1. Лица, ответственные за безопасное выполнение работ повышенной опасности

В качестве примера рассмотрим трех основных участников процесса выполнения работ ПО по Н-Д (без совмещенных работ ПО): выдающий Н-Д, производитель работ, члены бригады (или работники-исполнители).

Взаимодействие трех субъектов процесса выполнения работ по Н-Д ограничено следующими событиями:

1.1. Исполнитель (член бригады) выполняет задание, с последующим информированием производителя работ о выполнении задания.

1.2. Исполнитель (член бригады) не выполняет задание, с последующим информированием производителя работ о невозможности выполнить задание безопасно.

2.1. Производитель работ выдает задание исполнителю (члены бригады).

2.2. Производитель работ сообщает выдающему Н-Д о невозможности выполнить работу безопасно.

3.1. Выдающий Н-Д может создать новый, надлежащим образом оформленный Н-Д и передать его производителю работ.

Рассмотрим автомат «Исполнителя работ» (члена бригады), изображенный на рисунке 2. У этого автомата есть только одно состояние, отражающее его возможность выполнить работу безопасно («Выполнение») или отказаться от выполнения работы в связи с наличием опасных условий («Отказ»), сколько угодно раз и в любом порядке [3].

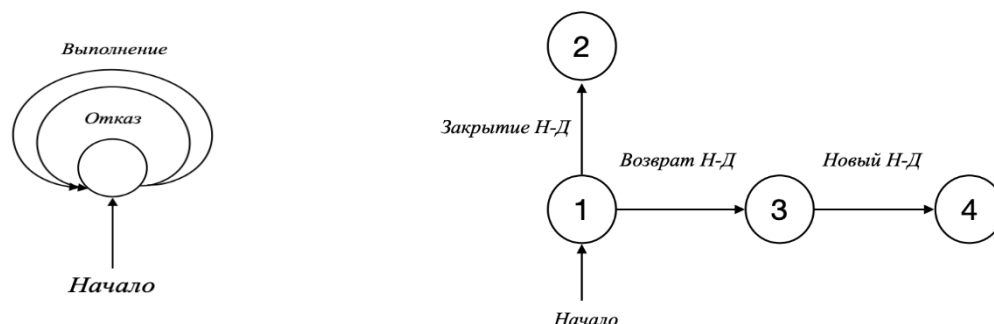


Рис. 2 Конечные автоматы, представляющие «Исполнителя работ» и «Выдающего» Н-Д

Начальное состояние выдающего Н-Д соответствует, когда наряд-допуск выдан (1). Если работник выполняет работу по наряд-допуску, то происходит последующее «Закрытие» Н-Д и выдающий Н-Д переходит в состояние 2, которое он уже не покидает. В случае

«Возврата» Н-Д от производителя работ «Выдающий Н-Д» переходит в состояние 3 и выписывает «Новый» Н-Д. Выдав его «Выдающий Н-Д» переходит в состояние 4 (рис. 2).

Рассмотрим автомат, представленный на рисунке 3, представляющий действия «Производителя работ». В системе работы «Производителя работ» существует неоднозначность: он, как и «Исполнитель работ», может столкнуться с неучтенными в Н-Д «Опасными условиями», как перед, так и во время проведения работ. «Производитель работ» начинает в состоянии 1, когда получает Н-Д и переходит в состояние 2. В этом состоянии начинается два процесса: «Выполнение» работы и идентификация «Опасных условий», неучтенных в Н-Д. Если не идентифицированы «Опасные условия», то «Производитель работ» переходит в состояние 3, обусловленное «Выполнением» работ. В процессе нахождения в состоянии 3 «Производитель работ» может столкнуться с «Опасными условиями», неучтенными в Н-Д. Тогда он из состояния 2 и 3 может перейти в состояние 4, в котором осуществляется возврат Н-Д «Выдающему» (состояние 5). После учета «Опасных условий» происходит получение «Нового» Н-Д (состояние 6) и переход в состояние 2. В случае полного соответствия условий, указанных в Н-Д «Производитель работ» переходит в состояние 7, характеризующееся Закрытием» Н-Д.

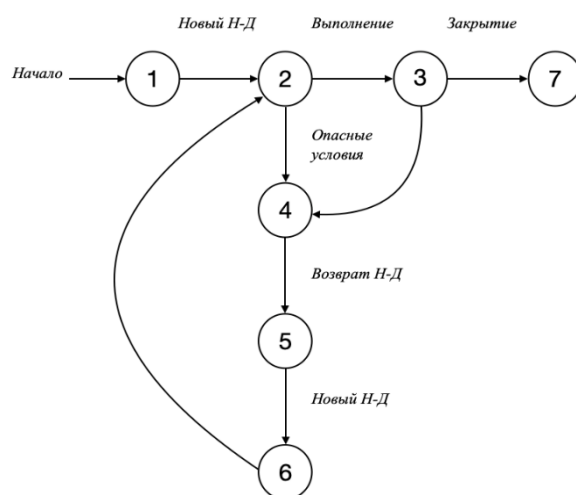


Рис. 3. Конечный автомат, представляющий «Производителя работ»

Следует ожидать, что «Производитель работ» в конце концов выполнит работы по Н-Д, то есть перейдет в состояние 7.

Таким образом, продемонстрирована возможность применения теории конечных автоматов к описанию процесса выполнения работ ПО по Н-Д.

Список литературы:

1. Мелешенко, Е. Э. Разработка и применение древовидного графа классификатора несчастных случаев на производстве с учетом влияния человеческого фактора / Е. Э. Мелешенко // Техносферная безопасность : материалы XI Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 14 мая 2024 г. / ОмГТУ. – Омск, 2024. – С. 53–59.
2. Бакико Е., Сердюк В., Мелешенко Е., Баширов З. Роль специалистов в области охраны труда в определении структуры многокомпонентной модели управления влиянием человеческого фактора на профессиональные риски. / Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2021. № 3. С. 39–51.
3. Хопкрофт, Джон, Э., Мотвани, Раджив, Ульман, Джеффри, Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений, 2-е изд.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2008. – 528 с. : ил. – Парал. тит. англ.

Научный руководитель: Алешков Денис Сергеевич, д.т.н., доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.

Устойчивое управление безопасностью труда в электроэнергетике: стратегия предупреждения несчастных случаев

Аннотация. Травматизм на производстве является серьезной проблемой, затрагивающей здоровье работников и экономику предприятий. Увеличение производительности, ухудшение условий труда, а также халатное отношение к безопасности со стороны работников часто приводят к росту числа несчастных случаев. Разработка стратегии раннего предупреждения несчастных случаев может способствовать значительному снижению рисков и улучшить общую безопасность на рабочих местах.

Ключевые слова: травматизм, профессиональные риски, опасности, концепция, электроэнергетика, ВОПФ.

Artur R. Niyazov
Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia,
niyazov_1988@mail.ru

Sustainable occupational safety management in the electric power industry: an accident prevention strategy

Abstract. Occupational injuries are a serious problem affecting the health of workers and the economy of enterprises. Increased productivity, deteriorating working conditions, as well as negligent attitude to safety on the part of employees often lead to an increase in the number of accidents. Developing an early accident prevention strategy can significantly reduce risks and improve overall workplace safety.

Keywords: injuries, occupational risks, hazards, concept, electric power industry.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Разработка моделей вейвлет анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей», код темы: FENG-2023-0005).

Актуальность темы обусловлена рядом ключевых факторов. Во-первых, высокий уровень опасности. Работа в электроэнергетике сопряжена с высокими рисками, связанными с воздействием электрического тока, электромагнитных полей и других физических факторов характерных для отрасли. Во-вторых, инновационное и технологическое развитие отрасли. Внедрение новых технологий, автоматизация и роботизация, предоставляют возможности для улучшения условий труда, но при этом также могут создавать новые риски. Исследование устойчивого управления безопасностью позволит интегрировать инновации в технологический процесс с учетом этих рисков. В-третьих, соблюдение требований законодательства. Законодательство в современных условиях требует от работодателей соблюдения высоких стандартов охраны труда. Исследование по данному направлению поможет разработать эффективную стратегию, соответствующую этим требованиям.

Основной целью исследования является концепция разработки стратегии предупреждения несчастных случаев, которая основывается на анализе статистических данных несчастных случаев, факторов производственных и персональных рисков, а также существующих методов профилактики травматизма.

Проведем анализ производственного травматизма за период 2013-2023 гг. (рис. 1). Для этого была изучена официальная статистика Федеральной службы государственной

статистики (Росстат) [1], а также были приняты к сведению данные Фонда пенсионного и социального страхования (СФР), Федеральной службы по труду и занятости (Роструд). При анализе статистических данных следует учитывать, что информация о страховых случаях и данные Росстата о числе пострадавших могут не совпадать. Это связано с тем, что среди несчастных случаев на производстве также фиксируются групповые происшествия. Кроме того, важно отметить, что статистика по несчастным случаям с летальными исходами, размещаемая на официальных сайтах Росстата, СФР, Роструда и Ростехнадзора, часто не согласуется. Причиной этому служат различные методы расчета и представления статистики, используемые каждым из ведомств.

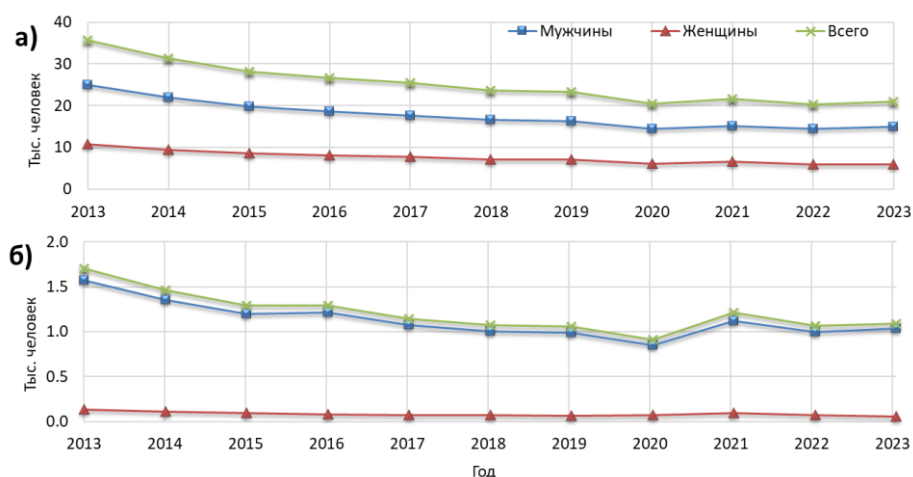


Рис. 1. а) Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве;
б) из них со смертельным исходом. По оси ординат численность пострадавших – тыс. человек, по оси абсцисс период с 2013 по 2023 гг.

На протяжении последнего десятилетия наблюдается устойчивое снижение числа пострадавших на производстве. За этот период количество несчастных случаев с летальным исходом уменьшилось в 1,2 раза, случаев с тяжелыми травмами – в 1,3 раза, а с легкими травмами в 1,6 раза. Тем не менее, даже при этом сокращении общее количество несчастных случаев остается внушительным.

Проанализируем случаи несчастных случаев со смертельным исходом в сфере электроэнергетики, которые произошли в процессе эксплуатации энергетических установок организаций, находящихся под контролем Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) (рис. 2) [2].

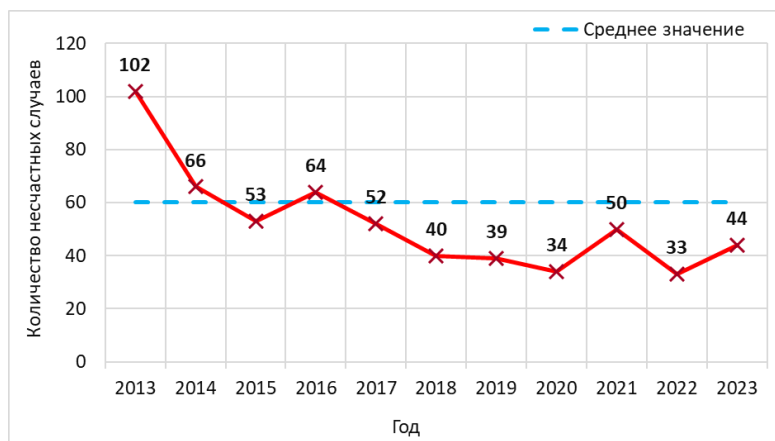


Рис. 2. Динамика травматизма со смертельным исходом, произошедших в ходе эксплуатации энергоустановок организаций, подконтрольных органам Ростехнадзора, за отчетный период 2013–2023 гг.

Из рисунка можно сделать вывод, что в динамике травматизма со смертельным исходом в электроэнергетике наблюдается положительная тенденция по снижению количества случаев в период с 2013 по 2015 годы. В 2016 году виден рост случаев и снижение количество случаев вплоть до 2021 года и далее снова падение и рост. Основными причинами традиционно являются недостаточная подготовленность персонала к работам в электроустановках, неэффективность мероприятий по подготовке и обучению персонала, неэффективность мероприятий, обеспечивающих безопасность работ, отсутствие контроля во время проведения работ.

Аналогичная ситуация наблюдается также и в иных отраслях, работники которых заняты во вредных и опасных условиях труда, например, добыча полезных ископаемых [3]. Коллектив авторов СПГУ отмечают, что в ходе расследования несчастных случаев установлено первостепенное влияние человеческого фактора. Причины несчастных случаев с тяжелыми последствиями в 53 % занимают обстоятельства организационного характера [3].

Анализ существующих методов профилактики травматизма показывает, что на сегодняшний день на производстве основные мероприятия профилактики травматизма можно разделить на технические, организационные и личностные. Технические мероприятия заключаются в совершенствовании технологических процессов, модернизацией оборудования, инструментов, механизмов и т.д. Организационные мероприятия характеризуются введением корпоративной системы управления охраной труда. Под личностными подразумеваются мероприятия, стимулирующие безопасное поведение работников, включающие их постоянное обучение, инструктирование, стажировку и воспитание в работниках культуры безопасности. Важно уделять внимание нормализации условий труда – создавать и поддерживать оптимальные параметры производственной среды.

Одной из наиболее значимых процедур в охране труда является оценка профессиональных рисков. В соответствии со ст. 214 ТК РФ, процедура оценки рисков является обязательной для всех работодателей. Не проведение данной процедуры несет за собой множество рисков – от финансовых, в случае выявления нарушения инспекцией труда будут выписаны предписания и наложение штрафов, до репутационных, не выявленные риски увеличивают вероятность получения работниками травм различных степеней тяжести, вплоть до случаев со смертельным исходом. В связи с этим исследования по тематике сокращения производственного травматизма включают в себя в том числе анализ данных по результатам оценки профессиональных рисков. Например, коллектив авторов СПГУ анализируя уровень травматизма в угольной промышленности приходят к выводу, что раннее выявление и устранение факторов риска позволят контролировать уровень травматизма [4].

В рамках исследования предполагается разработка концепции системы раннего предупреждения травматизма на производстве. Данная концепция позволит предоставить следующие преимущества, но не ограничится ими:

1. Снижение количества инцидентов, приводящие к травмам, за счет раннего выявления потенциальных опасностей.
2. Повышение осведомленности за счет повышения качества знаний и ответственности сотрудников в вопросах безопасности.

Эти преимущества способствуют не только защите здоровья сотрудников, но и общему повышению эффективности и устойчивости предприятия.

На основе входных данных концепции системы раннего предупреждения травматизма на производстве (Рис. 3) будет возможно построить модель, которая позволит учитывать разные факторы влияния и делать прогнозы по снижению уровня производственного травматизма.



Рис. 3. Входные данные концепции системы раннего предупреждения травматизма на производстве

Благодаря системе раннего предупреждения травматизма на производстве представится возможность анализировать данные по связанным высоким показателям уровня вредных и опасных факторов условий труда, производственных и персональных рисков, а также статистике данных в условиях реального времени. При этом эффективная реализация системы потребует комплексного подхода, который включает в себя технические, организационные, кадровые мероприятия. Это позволит создать более безопасные условия труда, что в свою очередь будет способствовать снижению уровня производственного травматизма.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 12.11.2024).
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Информация по аварийности и травматизму. URL: http://cntr.gosnadzor.ru/stats/inf_avarii/index.php (дата обращения: 12.11.2024).
3. Туманов М. В., Гендлер С. Г., Кабанов Е. И., Родионов В. А., Прохорова Е. А. Индекс персонального риска, как перспективный инструмент управления человеческим фактором в охране труда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. № 6-1. – С. 230–247. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_230.
4. Гридина Е. Б., Боровиков Д. О. Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-1. – С. 114–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.

Научный руководитель: Осипов Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск, Россия.

Эмоциональный интеллект и soft skills, их роль для работников экстремальных профессий

Аннотация. Сотрудники экстремальных профессий ежедневно сталкиваются со стрессовыми ситуациями, в которых нужно незамедлительно принимать решения, в некоторых случаях – налаживать контакт с пострадавшими, поддерживать связь со своими коллегами и подчиненными для скорейшей ликвидации возникшей проблемы. Справляться со всеми обязанностями и стрессом непросто, однако высокий эмоциональный интеллект и soft skills помогают справиться с утомлением, возникающим в процессе выполнения задач. Статья нацелена на изучение роли эмоционального интеллекта и soft skills в работе экстремальных профессий, а также на изучение психологической подготовки студентов, будущих сотрудников МЧС.

Ключевые слова: эмоциональный интеллект, сотрудник, стресс, мягкие навыки, пожарный.

Ekaterina V. Popovich
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russia, popovich.ekaterina03@mail.ru

Emotional intelligence and soft skills, their role for workers in extreme professions

Abstract. Employees of extreme professions face stressful situations on a daily basis, in which decisions must be made immediately, in some cases – to establish contact with the victims, to keep in touch with their colleagues and subordinates for the speedy elimination of the problem that has arisen. It is not easy to cope with all the responsibilities and stress, but high emotional intelligence and soft skills help to cope with fatigue that occurs in the process of completing tasks. The article aims to study the role of emotional intelligence and soft skills in the work of extreme professions, as well as to study the psychological training of students, future employees of the Ministry of Emergency Situations.

Keywords: emotional intelligence, employee, stress, soft skills, firefighter.

Сотрудники экстремальных профессий ежедневно сталкиваются со стрессовыми ситуациями, в которых нужно незамедлительно принимать решения, в некоторых случаях – налаживать контакт с пострадавшими, поддерживать связь со своими коллегами и подчиненными для скорейшей ликвидации возникшей проблемы. Справляться со всеми обязанностями и стрессом непросто, однако высокий эмоциональный интеллект и soft skills помогают справиться с утомлением, возникающим в процессе выполнения задач.

Тесты, оценивающие интеллектуальные способности, не могут предугадать успешность человека в карьерном росте и в повседневной рутине, потому что не учитывают способности к эффективному контролю своими и чужими эмоциями. Однако одним из важнейших факторов успешности является, как раз, способность взаимодействия с коллегами, подчиненными, спонсорами и близкими людьми. Так возникло понятие эмоционального интеллекта, подразумевающее навыки, которые необходимы для понимания своих и чужих эмоций и намерений.

Высокий уровень развития эмоционального интеллекта является необходимым качеством для людей, относящихся к экстремальным профессиями: для сотрудников служб спасения, летчиков, космонавтов, военнослужащих, потому что люди, имеющие стратегии совладающего поведения, лучше адаптируются к воздействию факторов экстремальной ситуации. Эмоциональный интеллект является показателем стрессоустойчивости и помогает

выбрать наиболее эффективные копинг-стратегии. Сотрудники экстремальных ситуаций каждый день сталкиваются с разными трудными и нестандартными ситуациями, и им необходимо быстро принять решение для ликвидации возникшей проблемы.

Рассматривая именно профессиональную специфику сотрудников МЧС, во время ликвидации пожаров и их последствий пожарные сталкиваются с рядом проблем:

- личный состав в процессе своей деятельности используют средства защиты органов дыхания (СИЗОД), масса которых составляет около 15 килограмм, личный состав в процессе своей работы использует средства защиты органов. Дополнительно к весу СИЗОД добавляется и вес экипировки, которая составляет около двадцати двух килограмм;
- в некоторых случаях ухудшается нервно-психологическое состояние пожарного в связи с частотой возникновения внештатных ситуаций, усложняющих выполнение боевых задач и ставящих под угрозу здоровье и жизни коллег, подчиненных и пострадавших;
- сотрудники ГПС МЧС в процессе ликвидации пожара могут потерять до 2 литров воды, а температура тела повыситься до 40 градусов, есть вероятность возникновения термического удара, симптоматика которых проявляется в судорогах, галлюцинациях и потерей сознания;
- нервное напряжение, которое связано с транспортировкой пострадавших из опасной зоны.

На эффективность выполнения поставленных задач влияет боевая готовность сотрудников – проявляются умственные и волевые способности организма, которые положительно влияют на адаптационную способность и продуктивность работы.

Для продуктивной работы сотрудники Государственной противопожарной службы из-за специфики своей деятельности должны иметь такие качества, как храбрость, эмоциональная стойкости и решительность.

Люди, имеющие низкую восприимчивость к стрессу, более активные и бессознательно преодолевающие стрессовые ситуации, но каждому пожарному важно иметь критическое мышление, объективная и адекватная оценка обстановки позволяет поддерживать трудоспособность на высоком уровне даже во время чрезвычайной ситуации.

Эмоциональный интеллект помогает проще воспринимать стрессовые ситуации. Также важную роль в работе пожарного играет самооценка. Завышенная или заниженная самооценка негативно влияет на продуктивность работы. Если у человека заниженная самооценка, он может подумать, что не справится с определенной ситуацией, когда на самом деле ситуация не представляет особой опасности для здоровья и жизни пожарного.

К мягким навыкам или *soft skills* относятся умение налаживать контакт и вести переговоры, тайм-менеджмент, креативность и чувство сострадания. В последнее время их часто оценивают при трудоустройстве. В компаниях, в том числе и в пожарно-спасательных частях, ГПС, есть перечень требований, предъявляемых кандидату при переходе на другую должность.

Навыки, которые оценивает руководство при поступлении на работу: жесткие навыки (*hard skills*), мягкие навыки (*soft skills*) и общие корпоративные идеи и цели. Человека, ищущего работу, оценивают по всем трем показателям. Каждые навыки одинаково важны. Знаний и опыта будет недостаточно для эффективной работы в любой сфере деятельности. При рассмотрении кандидата на определенную должность, будет находиться в приоритете тот кандидат, который сочетает в себе *hard* и *soft skills*. Он сможет как умело воспользоваться теоретическими знаниями, так и эффективно провести переговоры с заказчиками или быстрее пройти адаптационный период в новом коллективе.

В некоторых сферах деятельности изначально работодатель может оценивать исключительно по *hard skills*. Однако, если в компанию придут два кандидата на одну должность с одинаковыми показателями жестких навыков, то будут проводить тестирование дальше уже по мягким навыкам. Человек, у которого *soft skills* более развиты, будет более эффективным в работе.

В своевременном мире есть два гибких навыка, которые больше всего востребованы при зачислении в штат сотрудников экстремальных профессий:

- 1) Лидерство является широким понятием, подразумевающим умение брать на себя ответственность, строить доверительные отношения с командой
- 2) Нетворкинг – способность создать полезные знакомства и вовремя ими воспользоваться для решения неординарных ситуаций.
- 3) Гибкость – способность организма воспринимать стресс. Многие руководители смотрят именно на гибкость характера человека при трудоустройстве.
- 4) Будущие сотрудники, которые намерены со временем перейти на руководящие должности, должны расположить позитивно команду к себе, передавать им уверенность, а также уметь концентрироваться на задачах.

Soft skills играют важную роль для организации работы личного состава ГПС. От слаженности, скорости выполнения задач зависят здоровье и жизни людей. Начальник караула и его помощник должны иметь лидерские компетенции для качественной организации работы пожарных. Soft skills являются навыками необходимыми каждому, но в зависимости от сферы деятельности и от занимаемой должности соотношение жестких и мягких навыков может быть различным. Например, hard skills важнее, чем soft skills, в исполнительных должностях. Соотношение жестких и мягких навыков варьируется от 90 на 10 до 70 на 30.

Для изучения эмоционального интеллекта студентов, обучающихся на специалистов по пожарной безопасности, была использована методика Николаса Холла. Тест на эмоциональный интеллект нацелен на изучение использования эмоций студентами в своей жизни, и учитывает разные стороны эмоционального интеллекта. Опрос прошло 30 человек. Результаты опроса приведены на рисунке 1.

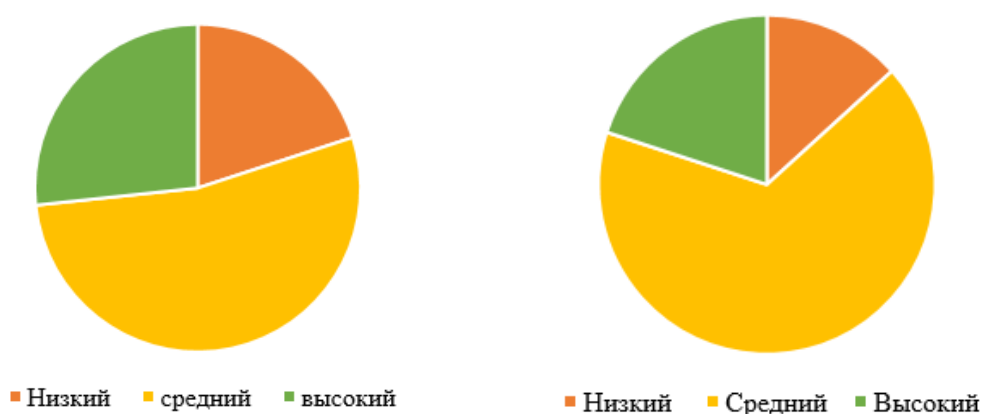


Рис. 1: А – Статистика эмоционального интеллекта студентов;
В – Статистика способности управлять эмоциями других людей студентов

Согласно диаграмме, у большинства студентов, прошедших опрос, средний показатель эмоционального интеллекта. Большая часть студентов понимают свои эмоции и имеют навыки для понимания как своих, так и чужих эмоций, однако, по сравнению с людьми, имеющими высокий эмоциональный интеллект, в некоторых конкретных ситуациях не могут определить, что чувствуют сами.

Большинство студентов имеет навыки управления эмоциями других людей, что позволит им не растеряться в экстренной ситуации и оказать первую психологическую помощь, однако также следует учесть разницу между высоким и средним показателем. Вероятно, в чрезвычайной ситуации человек со средним показателем способности управления эмоциями людей может усугубить эмоциональное состояние человека своим поведением, хотя ему покажется, что он сделал все верно.

Таким образом, у большинства студентов средний эмоциональный интеллект, что наиболее вероятно объясняется их возрастом. С приобретением жизненного опыта эмоциональный интеллект может измениться в любую сторону. На данный момент большинство студентов только частично умеет помочь человеку в нестабильном эмоциональном состоянии.

Список литературы

1. Никулина, Ирина Вячеславовна Н651 Эмоциональный интеллект: инструменты развития: учебное пособие / И. В. Никулина. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022 – 82 с. ISBN 978-5-7883-1778-6
2. Эмоциональный интеллект: как научиться понимать свои и чужие эмоции. [Электронный ресурс] URL : <https://trends.rbc.ru/trends/education/5ed67acf9a79470d60d8af28?ysclid=m2vvi3gjpc893974444&from=copy>.
3. Soft skills: что это и как развивать в 2024 году.
4. [Электронный ресурс] URL: https://kontur.ru/talk/spravka/50703-soft_skills_chto_eto_i_kak_razvivat?ysclid=m2vvo7m7ac418181050.
5. Сергиенко Е. А., Хлевная Е. А., Киселева Т. С., Никитина А. А., Осипенко Е. И. Роль эмоционального интеллекта в совладании со сложными жизненными ситуациями // Вестник Костромского государственного университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. 2020. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-emotsionalnogo-intellekta-v-sovladanii-so-slozhnymi-zhiznennymi-situatsiyami> (дата обращения: 10.11.2024).

Научный руководитель: Елизарьева Елена Николаевна, кан. тех. наук, доцент, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия. **Scientific supervisor:** Elena N. Elizarieva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.

**Несовершенство действующего федерального законодательства
по охране труда по отношению
к областным субъектам пожарной охраны**

Yulia B. Cheshagorova
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Imperfection of the current federal legislation
on labor protection in relation to regional fire protection entities**

В данной статье рассмотрена проблема несовершенства действующего законодательства по охране труда по отношению к областным субъектам пожарной охраны. Субъектовые службы пожарной охраны ежедневно сталкиваются с необходимостью адаптации федеральных норм к местным условиям, однако отсутствие рекомендаций и методических указаний затрудняет этот процесс, на примере обеспечения работников средствами индивидуальной защиты в бюджетном учреждении Омской области «Пожарно-спасательная служба Омской области». Федеральные приказы МЧС направлены на установление общих норм и стандартов для всей страны. Однако каждое субъекты Российской Федерации имеют свои экономические особенности. Субъектовая пожарная охрана должна учитывать эти факторы при организации своей деятельности. Универсальные требования федеральных приказов не соответствуют реальным условиям и потребностям субъекта. Недостаток финансирования приводит к тому, что областная служба не может обеспечить необходимые условия труда или выполнить требования по оснащению.

Охрана труда является одной из главных составляющих системы обеспечения безопасности на рабочих местах. В России действуют федеральные законы и нормативные акты, регулирующие вопросы охраны труда, но на практике возникают ситуации, когда эти нормы не учитывают специфические условия и потребности отдельных сфер деятельности, как пожарная охрана. Важную роль в сфере охраны труда пожарных и спасателей играют федеральные органы, такие как Министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС) России, которые разрабатывают и внедряют нормативно-правовые акты, регулирующие деятельность пожарной охраны, но в то же время применение федеральных приказов МЧС к субъектовой пожарной охране может сталкиваться с определенными трудностями и ограничениями.

Исходя из анализа статистических данных выездов бюджетного учреждения Омской области «Пожарно-спасательная служба Омской области» (табл. 1) [<https://mrb.omskportal.ru/oiv/mrb/glavnaya/ter-org/buUPS>] можно с уверенностью утверждать о существующей проблеме нерационального потребления средств индивидуальной защиты по отношению Таврического отделения к Тевризскому отделению пожарной охраны.

В утвержденных федеральных нормативных актах прописаны нормы соответствие которым для некоторых отделений идет в разрез с рациональным использованием средств индивидуальной защиты исходя из количества выданной боевой одежды пожарного, находящейся в носке и выездов за отчетный период.

Таблица 1

№ п/п	Отделение пожарной охраны	Количество боевой одежды пожарного на работников в отделении пожарной охраны, находящейся в носке	Количество выездов за период с 1 января по 1 ноября 2024 год
1	Таврическое	107	152
2	Саргатское	97	110
3	Калачинское	100	91
4	Исилькульское	76	75
5	Называевское	79	38
6	Седельниковское	83	32
7	Тарское	86	26
8	Тевризское	70	7

В действующем законодательстве не предусмотрены нормы, при которых можно продлить срок службы боевой одежды пожарного даже, если она не использовалась. Это приводит к тому, что даже при сохранении функциональных и защитных свойств одежды, она подлежит списанию только после истечения установленного срока.

Согласно действующему законодательству, федеральные органы власти, включая МЧС России, обладают определенными полномочиями, которые не всегда распространяются на органы власти субъектов Федерации. Субъектовая пожарная охрана подчиняется местным органам управления и должна действовать в рамках своих полномочий. Это означает, что в отдельных случаях федеральные приказы могут выходить за рамки компетенции субъектовой пожарной охраны, что делает их невозможным для применения.

Субъектовая пожарная охрана имеет право разрабатывать собственные локальные нормы, учитывающие специфику региона. В этих актах могут отображаться требования, которые более актуальны для местных условий, чем те, которые указаны в федеральных законах, но локальные акты не могут противоречить федеральным. Например, пост субъектовой пожарной охраны, прикрывающий социально-значимый объект и не выезжавший на тушение пожара за два года ни одного раза обязан сменить дорогостоящую боевую одежду пожарного в связи с истечением срока носки даже при отсутствии эксплуатации. Региональные органы имеют ограниченный бюджет для реализации всех требований федерального законодательства, что приводит к несоответствию стандартов безопасности.

Нерациональное списание боевой одежды влечет за собой значительные финансовые потери для государственных организаций. Закупка новых комплектов требует увеличения выделяемых бюджетных средств, что может негативно сказаться на финансировании других важных направлений работы пожарной охраны. В законодательстве не представлены сведения, подтверждающие необходимость автоматического списания СИЗ по истечении определенного срока. Это создает пробелы в понимании реального состояния боевой одежды и ее способности защищать работников.

Несмотря на важность федеральных приказов МЧС для обеспечения пожарной безопасности в стране, в субъектах федерации это не всегда возможно для эффективного функционирования системы управления охраной труда необходимо учитывать эти факторы и разработать индивидуальные законы для субъектов пожарной охраны. их применение к субъектовой пожарной охране может быть затруднено или вовсе невозможно из-за различий в уровнях управления, компетенции органов власти, наличия локальных нормативных актов, финансовых ограничений и практических аспектов реализации. Для

эффективного функционирования системы управления охраны труда необходимо учитывать эти факторы.

Логичным решением данной проблемы считаю обеспечение выполнения следующих возможных действий:

1. Разработка более гибкой системы норм и стандартов, учитывающей специфику работы пожарных служб, в том числе разработка адаптированных подходов к регулированию деятельности субъектов пожарной охраны.
2. Введение норм о продлении срока службы СИЗ до износа.
3. Разработка порядка визуального осмотра СИЗ для продлении срока службы.

Список литературы:

1. Озякова, Е. Н. Рабочая программа дисциплины Б1.В.15 оценка и анализ профессиональных рисков направление подготовки 20.03.01 техносферная безопасность направленность (профиль) – безопасность жизнедеятельности в техносфере / Е. Н. Озякова // Каталог методических разработок ФГБОУ ВО Омский ГАУ: серия «Безопасность жизнедеятельности» : Каталог методических работ: серия «Безопасность жизнедеятельности» разработан на кафедре экологии, природопользования и биологии факультета агрохимии, почвоведения, экологии, природообустройства и водопользования. – Омск : ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2023. – С. 26–27. – EDN TSRWTW.
2. Долгова, Д. А. Оценка системы охраны атмосферного воздуха на предприятии машиностроения / Д. А. Долгова, Ю. Б. Чешагорова // Каталог выпускных квалификационных работ факультета агрохимии, почвоведения, экологии, природообустройства и водопользования. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 302–304. – EDN PNKJTG.
3. Чешагорова, Ю. Б. Оценка влияния бюджетного учреждения Омской области «Пожарно-спасательная служба Омской области» на атмосферный воздух / Ю. Б. Чешагорова, Е. Н. Озякова // Экологические чтения – 2023 : Материалы XIV Национальной научно-практической конференции (с международным участием), Омск, 03–05 июня 2023 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2023. – С. 653–656. – EDN FDRXKH.

Научный руководитель: Алешков Денис Сергеевич, д.т.н., доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.

Секция 7.
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ,
ПРИРОДООХРАННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ
И ПРИНЦИПЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 504.06

Казakov Егор Сергеевич
студент кафедры геоэкологии,
Санкт-Петербургский горный университет имени Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Анализ последствий аварии на сети водоотведения вблизи
Коркинской промагломерации

Аннотация. В публикации предоставлен анализ данных пробоотбора на территории техногенного загрязнения стоками канализационной системы городских поселений вблизи Коркинского разреза. Также определены ориентировочные границы пострадавших в результате разлива территорий и представлены их площади. Выявлено несоответствие санитарно-гигиеническим нормативам для данных проб.

Ключевые слова: канализация, авария, Коркинский разрез, водные объекты, концентрация.

Egor S. Kazakov
Student, Department of Geoecology,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia

Analysis of the consequences of an accident on the wastewater
disposal network near the Korkino promagglomeration

Abstract. The publication analyzes sampling data on the territory of technogenic pollution by sewage effluents from the sewerage system of urban settlements near the Korkinsky open pit. The approximate boundaries of the territories affected by the spill and their areas are also determined. Non-compliance with sanitary and hygienic standards for these samples is revealed.

Keywords: sewage, accident, Korkinsky mine, water bodies, concentration.

Начавший свою эксплуатацию 1 августа 1934 года, Коркинский разрез считается одной из самых глубоких угледобывающих выработок в мире, разрабатываемых открытым способом. Эксплуатация Коркинского разреза была прекращена АО «Челябинская угольная компания» в 2017 году в связи с нерентабельностью дальнейшей разработки. В этом же году предприятие ООО «Промрекультивация», созданное при взаимодействии АО «Челябинская угольная компания» и АО «Русская медная компания», объявило о начале рекультивации, в рамках которой реализуется инновационный подход, основанный на заполнении выработанного пространства отходами обогащения медно-порфировой руды, полученными с Томинского горно-обогатительного комбината (Томинский ГОК), принадлежащего «Русской медной компании». Данный метод позволяет эффективно использовать отходы обогащения для рекультивации нарушенных земель. Излишки, отстаивающейся из

отходов обогащения, воды откачиваются через плавучую насосную станцию и поступают обратно на обогатительную фабрику, осуществляя замкнутый водооборот.

По территории, прилегающей к разрезу, протекает река Чумляк, являющаяся правым притоком реки Миасс. Она берет начало вблизи деревни Шумаки и течет по Курганской области, а затем впадает в Миасс в районе деревни Чумляк. На западной стороне промагломерации протекает река Каменка, которая впадает в реку Чумляк. К юго-востоку от промышленной агломерации расположено озеро Бектыш, которое используется для местного фермерского хозяйства и прибрежного рыболовства.

Коркинский разрез являлся градообразующим предприятием для города Коркино и поселка Роза, формируя Коркинскую промагломерацию. Все канализационные стоки с жилых участков поступают на очистные сооружения, находящиеся в поселке Роза. На территории города централизованная система водоотведения отсутствует, а хозяйственно-бытовые стоки отводятся в накопительные колодцы и выгребные ямы. Основным источником водоснабжения для хозяйственно-питьевых нужд жилых поселений является Шершневское водохранилище – искусственно созданный в середине XX века водоем на реке Миасс [1].

С 2021 года начали появляться первые сообщения об авариях на канализационном коллекторе. Официальной причиной прорыва стал полный износ накопительного оборудования на некоторых участках в связи с его физическим устареванием. Основной проблемой является неконтролируемое поступление стоков на прилегающие к канализационной сети территории, что приводит к их заболачиванию. Также воды без очистки и организованного сброса поступают в реку Миасс и подземные воды, что приводит к их загрязнению веществами биологического происхождения [2]. Поверхностный перелив сточных вод также несет риск попадания загрязнителей в озеро Бектыш.

Целью данного исследования является оценка экологического состояния реки Чумляк, а также затопленных сточными водами территорий. Также особое значение имеет тот факт, что река Чумляк является притоком реки Миасс, используемой в качестве источника хозяйственно-питьевого водоснабжения. Загрязнение данного водного объекта может привести к поступлению загрязняющих веществ на Шершневское водохранилище. Кроме того, в связи с нехваткой оборотных вод для осуществления технологических нужд, Томинский ГОК осуществляет дополнительный водозабор из реки Миасс. Несоответствие качества воды нормативам может привести к негативным последствиям, таким как ухудшение здоровья населения, загрязнение сельскохозяйственных земель и снижение качества продукции, производимой местными предприятиями. Загрязнение озера Бектыш может вызвать его эвтрофикацию и негативно сказаться на здоровье местных жителей, которые используют ресурсы данного водного объекта.

Отбор проб осуществлялся студентами Санкт-Петербургского университета имени Екатерины II в рамках производственной практики согласно ГОСТ Р 59024-2020 [3]. Для оценки степени загрязнения было выбрано 7 точек пробоотбора, расположенных на территориях с повышенным уровнем загрязнения, а также на исследуемых водных объектах. Выбор данных точек обусловлен их расположением в зонах техногенных озер сточных вод. Ориентировочные зоны техногенных водоемов были определены с помощью объезда на автотранспорте, а также с помощью космоснимков (рис. 2). Одна точка расположена на входе в поселок для учета фоновых концентраций. Две пробы были отобраны из воды реки Каменка, так как на территории города она впадает в реку Чумляк, где происходит смешение вод. Указанное место прорыва представляет собой не единственное повреждение канализационной системы, а лишь то, которое было предметом исследования. Для подготовки проб к хранению применялись фильтрация, а также охлаждение до температуры 4 °С. Анализ анионного состава осуществлялся спектрофотометрическим методом с применением спектрофотометра HACH LANGE DR 1900. С помощью портативного турбидиметра HANNA HI 93703 измерялась мутность воды.

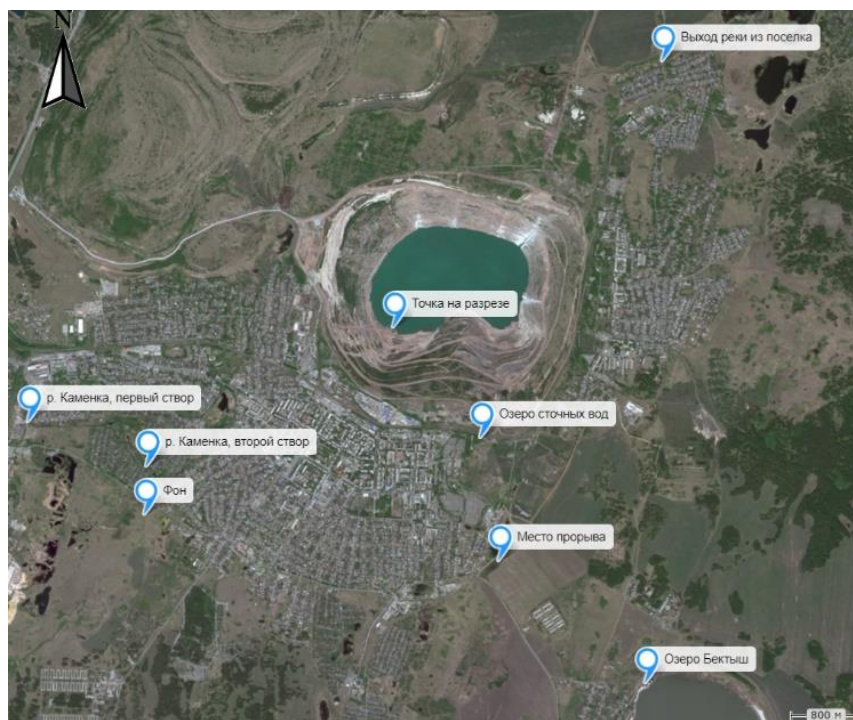


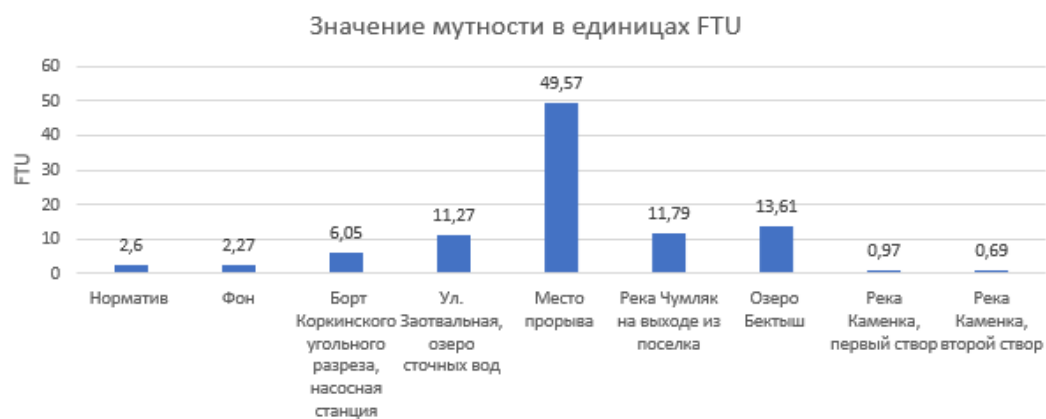
Рис.1. Карта пробоотбора



Условные обозначения

- | | | | |
|---|------------------------|---|------------------------------------|
|  | - Полигон ТКО |  | - Линейные зоны загрязнения |
|  | - Озера из сточных вод |  | - Очистные сооружения поселка Роза |

Рис. 2. Карта исследуемой территории с указанием зон техногенных водоемов



* Нормативные значения водородного показателя находятся в диапазоне 6-9 единиц pH



Рис. 3. Содержание исследуемых компонентов по точкам пробоотбора

Ориентировочная площадь загрязненных территорий по визуальным оценкам составляет 916 562 м², не включая полигон ТКО – вторичный источник загрязнения сточными водами. С учетом полигона площадь загрязнения увеличивается до 1 070 067 м². Разлив сточных вод затронул значительное количество участков жилых и дачных домов. Кроме того, это происшествие также повлияло на федеральную трассу, соединяющую поселок Роза и город Коркино, а также на грунтовую дорогу, расположенную в восточной части города.

Для оценки качества воды применялись нормативы из СанПиН 1.2.3685-21 [4]. В результате анализа было выявлено значительное превышение допустимых уровней мутности и концентрации катионов аммония в зонах загрязнения сточными водами по сравнению с фоновыми значениями и нормативными показателями. Для реки Чумляк отмечена низкая концентрация нитратов в воде, что может быть обусловлено замедленными процессами окисления органических компонентов. Однако в реке Каменка содержание нитратов значительно превышает фон. Вероятно, это связано с поступлением нитратов в результате буровзрывных работ, проводимых на меднорудном карьере, расположенном в верховьях реки Каменка, а также сбросом сточных вод городскими предприятиями. Зафиксированные повышенные значения pH практически на всех точках пробоотбора по сравнению с фоновыми значениями, вероятно, свидетельствуют о протекании интенсивных процессов разложения органических веществ, поступивших со сточными водами. По каждому исследуемому компоненту концентрация на входе в поселок ниже, чем на выходе из него, что свидетельствует о переносе поллютантов рекой Чумляк. Высокое содержание катионов аммония и увеличенный водородный показатель в озере Бектыш свидетельствуют о процессах переноса органического поллютанта сточными водами и малоэффективных процессах нитрификации.

Результаты анализа свидетельствуют о крайней необходимости в ликвидации прорыва канализационных коллекторов и реконструкции существующей системы водоотведения для предотвращения дальнейшего поступления бытовых стоков на территории городского поселения. Нынешняя экологическая обстановка указывает на распространение продуктов разложения в объекты водоснабжения и водопользования, а также их перенос рекой Чумляк. Поступление большого количества органических компонентов в реку Миасс в ходе водозабора Томинским ГОКом может привести к износу оборудования и ухудшению качества продукции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Список литературы

1. П Постановление администрации Коркинского муниципального округа "Об утверждении схемы водоснабжения и водоотведения Коркинского муниципального округа" от 13.10.2023 № 1022 // Российская газета. – 2023
2. В Коркино канализация полгода стекает в реку Чумляк // Правда УрФО URL: <https://pravdaurfo.ru/novost/420446-v-korkino-kanalizaciya-polgoda-stekaet-v-reku-chumlyak/> (дата обращения: 08.10.2024).
3. ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб»
4. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

Научный руководитель: *Пашкевич Мария Анатольевна, профессор, заведующий кафедры геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет имени Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.*

Кузнецова Ярослава Артемовна*

Антонинова Наталья Юрьевна**

ФГБУН ИГД УрО РАН, Екатеринбург, Россия

* Yaroslava.brusnitsyna@mail.ru

** зав. лаборатории горного производства, natal78@list.ru

Разработка комплекса мероприятий по биоремедиации почв и техногенных грунтов, загрязненных тяжелыми металлами

Аннотация: проявлением заботливого отношения к окружающей среде в районах функционирования промышленных предприятий является экологическая реабилитация экосистем, нарушенных в результате хозяйственной деятельности. В данной работе разработаны мероприятия по восстановлению земель, загрязненных ионами тяжелых металлов цинка (Zn) и меди (Cu) с концентрацией от 2,5 до 10 ПДК, в связи с широкой распространенностью медноколчеданных месторождений на территории Среднего Урала.

В задачи входило:

- экспериментально аналитического исследования аккумулятивных способностей биологических растительных ресурсов в системе «почва/техногенный грунт-растение»;
- изучение механизма фитотоксичности почв и фиторемедиационного потенциала ряда растений, как обоснование разработки алгоритма проведения мероприятий по экологической реабилитации.

Для оценки поведения поллютанта в системе «почва/техногенный грунт -растение» использовался коэффициент биологического поглощения. Для интерпретации полученных результатов и выявления тенденции изменения концентраций валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почве/техногенном грунте сформированы линии тренда.

Результаты проведенных исследований показали, что растения семейства бобовых (клевер, люцерна) и амарант в составе с торфо-диатомитовым мелиорантом способны интенсифицировать процесс выноса тяжелых металлов Zn и Cu в системе «почва/техногенный грунт – растение».

Наибольший интерес представляют результаты, показывающие рост как подвижных форм тяжелых металлов в почве, так и концентрацию меди и цинка в самих растениях.

Ключевые слова: биоремедиация, тяжелые металлы, аккумуляция, земельные ресурсы, коэффициент биологического поглощения.

Yaroslava A. Kuznetsova*

Natalia Y. Antoninova**

Mining Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

* Yaroslava.brusnitsyna@mail.ru, ** natal78@list.ru

Development of a set of measures for bioremediation of soils and man-made soils, contaminated with heavy metals

Abstract. The manifestation of caring attitude to the environment in the areas of operation of industrial enterprises is the ecological rehabilitation of ecosystems disrupted as a result of economic activity. In this work, measures have been developed to restore lands contaminated with heavy metal ions of zinc (Zn) and copper (Cu) with concentrations from 2.5 to 10 MPC, due to the widespread occurrence of copper deposits in the Middle Urals.

The tasks included:

- experimental and analytical study of the accumulative abilities of biological plant resources in the "soil/technogenic soil-plant" system;
- study of the mechanism of phytotoxicity of soils and the phytoremediation potential of a number of plants, as a justification for the development of an algorithm for carrying out environmental rehabilitation measures.

The biological absorption coefficient was used to assess the behavior of the pollutant in the soil/technogenic soil-plant system. Trend lines have been formed to interpret the results obtained and identify trends in the concentrations of gross and mobile forms of heavy metals in soil/man-made soil. The results of the conducted studies have shown that plants of the legume family (clover, alfalfa) and amaranth in combination with peat-diatomite meliorant are able to intensify the process of removal of heavy metals Zn and Cu in the "soil/technogenic soil – plant" system.

The results showing the growth of both mobile forms of heavy metals in the soil and the concentration of copper and zinc in the plants themselves are of the greatest interest.

Keywords: bioremediation, heavy metals, accumulation, land resources, biological absorption coefficient.

Одними из задач для промышленности являются: заботливое отношение к окружающей среде, реальная социальная ответственность и добросовестное корпоративное управление.

Эти задачи сформулированы как принципы устойчивого развития, а также согласно требованиям законодательства Российской Федерации.

В целях решения указанных выше задач в данной работе разработаны мероприятия по восстановлению земель, загрязненных ионами тяжелых металлов, являющихся одними из доминирующих загрязнителей в Свердловской области. При этом учитывался баланс между:

- Экономическими – простота и экономическая целесообразность;
- Производственными – приведения нарушенных земель в соответствие их целевому назначению в рамках законодательно установленных сроков;
- Научными интересами – изучение механизма фитотоксичности почв, как основа в разработке алгоритма проведения мероприятий.

В условиях повышенного содержания тяжелых металлов в среде произрастания растения выработали различные стратегии устойчивости, в основу которых заложены два противоположных принципа – аккумуляирование с последующей изоляцией токсикантов от метаболически активных компартментов клетки и, так называемая толерантность – избегание, когда растение с помощью различных механизмов снижает доступность металлов в корневой зоне, либо их перемещение внутри растения за пределы корневой системы [1].

Кроме того, у растительных организмов выделяют два вида устойчивости: основная устойчивость, присущая большинству растений, и гиперустойчивость к определенным металлам. Гиперустойчивость может быть опосредована, как за счет механизмов исключения тяжелых металлов, так и за счет гипераккумуляции металлов в наземной части растения [2]. Толерантность растений к повышенному содержанию элементов и их способность накапливать высокое количество токсикантов опасны с точки зрения поступления их в пищевые цепи, но они могут быть использованы в целях фиторемедиации [3].

К растениям, используемым для фиторемедиации нарушенных почв, предъявляют следующие требования:

- толерантность к высоким концентрациям поллютантов;
- способность поглощать и аккумуляировать их в высоких концентрациях;
- способность к транспорту их из корневой системы в надземную утилизируемую биомассу;
- высокая скорость роста, достаточно крупные размеры;
- иметь большую биомассу и глубоко разрастающуюся корневую систему;
- иметь высокую сопротивляемость к болезням и вредителям;
- быть удобными для уборки и непривлекательными для животных [4].

Также, в рамках данной работы, при выборе вида растений учитывались характеристики климата Свердловской области.

Данным требованиям соответствуют следующие виды растений:

- амарант (лат. *Amaranthus candatus*);
- клевер белый (лат. *Trifolium repens*);
- люцерна посевная (лат. *Medicago*).

Для экспериментального изучения фиторемедиационного потенциала растений были выбраны суглинистые условно чистые почвы, далее в качестве загрязнителей использовали растворы цинка и меди методом распыления.

В загрязненную почву были высажены 16 групп растений.

Кислотность почв составила не менее 5,5 pH. Уровень загрязненности почвы медью (Cu) составил от 5 до 10 ПДК, уровень загрязненности почвы цинком (Zn) составил от 2,5 до 10 ПДК.

В количестве 8 образцов в почву был добавлен торфо-диатомитовый мелиорант.

Торфо-диатомитовый мелиорант состоит из:

1. Верховой торф, фракционированный (фракция 0–10). Влажность торфа от 50 до 75 %, водородный показатель водной вытяжки (рН) 5,5–7,5. Степень разложения верхового торфа не превышает 25 %, зольность – менее 5 %. Основные неорганические соединения торфа: азот до 1,5 %, фосфор, калий, кальций (в сумме) до 0,6 % (N:P:K). Содержание гуминовых веществ в торфе составляет 7,4–7,9 %.

2. Диатомит по ГОСТ Р 51641-2000 или ТУ 10-05031531-378-94, или ТУ 5761-001-59266087-2005. Диатомит увеличивает степень сорбции углеводов за счет высокой пористости и представляет собой окаменелые остатки диатомовых водорослей, более чем на 90 % состоит из кремнезема. [5, 6].

Период роста составил 31 сутки. Проростки появились на 2 сутки.

Почвенные образцы на определение валовых и подвижных форм металлов были подвергнуты пробоподготовке с дальнейшим определением их на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-240 FS (Varian Optical Spectr. Instrum, Australia) с дейтериевой лампой.

Перечень применяемых методик:

- подготовка образцов к элементному анализу согласно методике NPDES (Waste Water);
- озоление отобранных образцов согласно методике EPA 3052.

Для оценки поведения поллютанта в системе «почва-растение» использовался коэффициент биологического поглощения, который рассчитывают по формуле:

$$K_b = P/\Pi$$

где: P – содержание химического элемента в золе растения; Π – содержание химического элемента в валовой форме в почве, на которой произрастает данное растение.

Результаты химического анализа и расчета коэффициента биологического поглощения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты химического анализа и расчета коэффициента биологического поглощения

Наименование/шифр пробы	Содержание тяжелого металла в растении		Содержание тяжелых металлов в почве		К _б
	Сu, мг/кг	Zn, мг/кг	Сu, мг/кг	Zn, мг/кг	
Люцерна 5 ПДК Cu	291	0	661	10	0,4
Люцерна 10 ПДК Cu	370	0	1302	10	0,3
Люцерна 2,5 ПДК Zn	0	264	11	315	0,8
Люцерна 5 ПДК Zn	0	420	9	773	0,5
Клевер 5 ПДК Cu	320	0	661	10	0,5
Клевер 10 ПДК Cu	750	0	1302	10	0,6
Клевер 2,5 ПДК Zn	0	40	11	315	0,1
Клевер 5 ПДК Zn	0	70	9	667	0,1
Амарант + ТДМ 5 ПДК Zn	0	328	12	775	0,4
Амарант + ТДМ 10 ПДК Zn	0	580	12,5	1387,5	0,4
Амарант + ТДМ 5 ПДК Cu	279	0	1138	17,5	0,2
Амарант + ТДМ 10 ПДК Cu	826	0	734,5	12,5	1,1
Люцерна + ТДМ 5 ПДК Zn	0	238	8,75	700	0,3
Люцерна + ТДМ 10 ПДК Zn	0	571	8,75	687,5	0,8
Люцерна + ТДМ 5 ПДК Cu	435	0	309,75	37,5	1,4
Люцерна + ТДМ 10 ПДК Cu	845	0	738,25	32,5	1,1

Согласно полученным результатам, растения семейства бобовых (клевер, люцерна) и амарант в составе с торфо-диатомитовым мелиорантом способны интенсифицировать процесс выноса тяжелых металлов в системе «почва/техногенный грунт – растение», вследствие чего предлагается следующая разработанная и апробированная схема мероприятий по биоремедиации представленная на Рисунке 1.

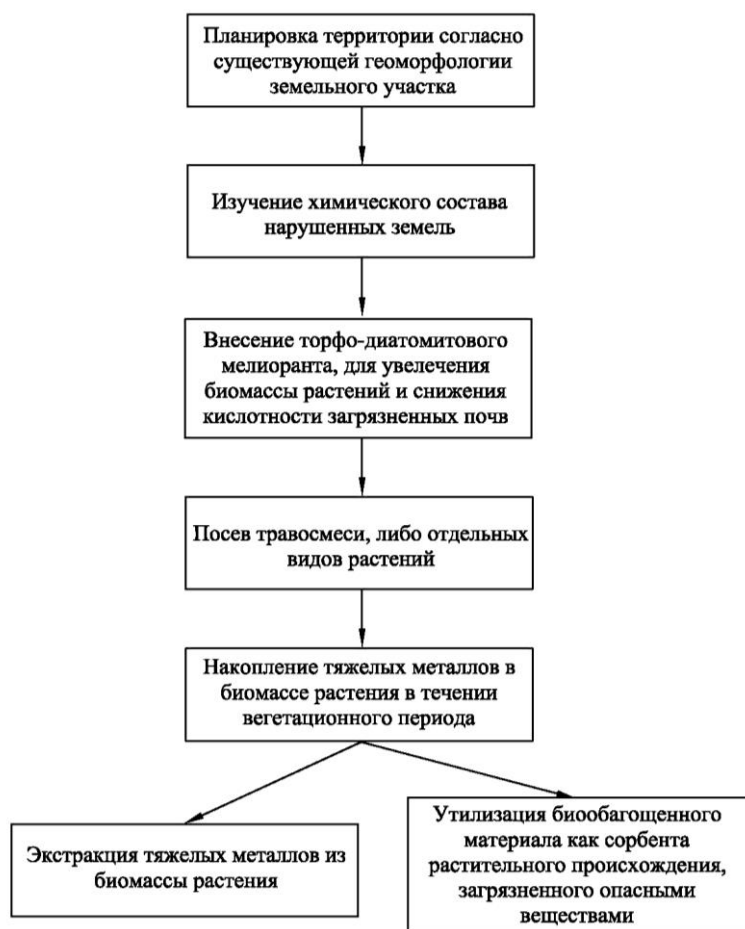


Рис. 1. Этапы проведения мероприятий по биоремедиации нарушенных земель, загрязненных тяжелыми металлами

Основой предлагаемых мероприятий является использование биоремедиантов, таких как клевер, люцерна и амарант при реализации мероприятий по ремедиации нарушенных земель, загрязненных ионами меди (Cu) и цинка (Zn) в условиях климата Свердловской области.

Работа выполнена в рамках Госзадания Тема 2(2025-2027). «Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр» (FUWE-2025–0002), рег. №1022040300092-1-1.5.1.

Список литературы

1. И. В. Андреева / Фиторемедиационная способность дикорастущих и культурных растений / И. В. Андреева, М. В. Злобин, Р. Ф. Байбеков, Н. Ф. Ганжара // Известия ТСХА, выпуск 1 – 2010 – С. 8–17.
2. О. А. Кулаева, В. Е. Цыганов / Молекулярно-генетические основы устойчивости высших растений к кадмию и его аккумуляции // Генетическая токсикология и генетически активные факторы среды – ТОМ VIII №3 – 2010 – С. 3–15.
3. Т. Н. Сосницкая / Экологическое состояние почв г.Свирска Иркутской области: особенности накопления и детоксикации тяжелых металлов / Иркутск – 2014 г.
4. Н. А. Киреева / Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязненных тяжелыми металлами / Н. А. Киреева А. С. Григориади, Ф. Я. Багаутдинов // Теоретическая и прикладная экология № 3 – 2011 – С. 4–10.
5. Антонинова Н. Ю. К вопросу об использовании мелиоративных приемов в целях формирования биогеохимических барьеров / Антонинова Н. Ю., Усманов А. И., Собенин А. В., Кузнецова Я. А., Горбунов А. А. // Горная промышленность. 2024. № 1. С. 120–125.
6. Торфо-диатомитовый мелиорант для рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами / Усманов А. И., Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Семин А. Н., Дедков О. В., Нелогова Е. А. // Патент на изобретение RU 2766361 C1, 15.03.2022. Заявка № 2021106690 от 15.03.2021.

Экологически устойчивый сорбент для ликвидации нефтяных загрязнений в горной промышленности

Anna S. Melnikova
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Environmentally sustainable sorbent for oil pollution remediation in the mining industry

Обеспечение устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса является одной из приоритетных задач горнодобывающей промышленности, поскольку оно напрямую влияет на социально-экономическое положение страны. Важным аспектом этой задачи становится внедрение экологически безопасных технологий для ликвидации последствий промышленного загрязнения. В работе исследован метод переработки свекловичного жома с целью получения эффективного нефтесорбента для ликвидации разливов нефтепродуктов при использовании СВЧ-излучения.

Интенсивное развитие горнодобывающей промышленности сопровождается значительными экологическими вызовами, включая загрязнение водоемов и почв нефтепродуктами. В процессе добычи и переработки полезных ископаемых часто происходят аварийные выбросы, утечки топлива и масел, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду и требует применения эффективных мер для предотвращения загрязнений. Нефть и нефтепродукты, попадая в водоемы, образуют на их поверхности масляную пленку, препятствующую поступлению кислорода и солнечного света в воду. Это приводит к угнетению и гибели водных организмов, что может иметь долгосрочные последствия для экосистемы. Кроме того, многие компоненты нефти токсичны и могут накапливаться в организмах, оказывая негативное воздействие на пищевые цепи. С каждым годом на фоне роста промышленного производства и транспортировки углеводородов увеличивается вероятность аварийных ситуаций, что требует поиска эффективных решений для ликвидации последствий разливов. Одним из универсальных и эффективных методов очистки окружающей среды является использование сорбентов для адсорбции нефти и нефтепродуктов. Однако многие современные сорбенты являются дорогостоящими и не всегда экологически безопасными, что вызывает необходимость в разработке альтернативных материалов.

На сегодняшний день исследователи уделяют особое внимание биосорбентам, которые считаются наиболее перспективными среди других типов сорбентов [1]. Биосорбенты изготавливаются из природных материалов, включая сельскохозяйственные отходы, эти материалы не только экологичны и биоразлагаемы, но и обладают естественной пористостью, что обеспечивает высокую эффективность сорбции нефтепродуктов при минимальном негативном воздействии на окружающую среду после использования. Благодаря доступности и низкой стоимости биосорбенты становятся перспективным решением для экологически устойчивой ликвидации разливов нефти.

Жом сахарной свеклы является крупнотоннажным побочным продуктом сахарной промышленности, ежегодно образующимся в огромных объемах по всему миру. Самые большие объемы производства сахарной свеклы сосредоточены на территории Российской Федерации, согласно данным [2] в 2022 году объем производства составил 48,91 млн тонн. В традиционной практике значительная часть жома используется в животноводстве как кормовая добавка. Однако такие способы использования не решают всех экологических проблем, связанных с накоплением жома, поскольку значительная его доля остается невостребованной или просто захоранивается. Огромные объемы этого побочного продукта представляют серьезную экологическую угрозу, особенно в регионах с ограниченными возможностями для его переработки. Кроме того, неправильная утилизация жома может привести к загрязнению почв и водоемов, создавая дополнительные риски для окружающей среды.

В этой связи тема переработки жома сахарной свеклы для получения нефтесорбентов имеет особую актуальность в контексте концепции устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Включение жома в цепь создания продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как сорбенты для ликвидации разливов нефтепродуктов, способствует развитию экономики замкнутого цикла, где отходы становятся ресурсом для новых производственных процессов. Это позволяет не только снизить экологическую нагрузку, но и создать новые экономические возможности для промышленности, что делает данный подход особенно привлекательным с точки зрения экологии и экономики.

Таким образом, целью данного исследования является переработка жома сахарной свеклы с целью получения нефтесорбента для ликвидации разливов нефтепродуктов.

В качестве объекта исследования в работе использован свекловичный жом, который был собран на Чишминском сахарном заводе в сентябре 2023 года. Было рассмотрено два вида свекловичного жома: сухой и влажный. Сухой свекловичный жом (ССЖ) был собран после жомосушильного барабана. Влажный свекловичный (ВСЖ) жом был собран после шнековой установки на производстве. Согласно методике [3] была измерена массовая доля влаги исходного сырья методом высушивания до постоянной массы, влажность материала составила 2,77 % и 77 % для сухого и влажного свекловичного жома соответственно.

Наиболее важным критерием, предъявляемым к нефтесорбентам, является нефтеемкость. Это показатель свидетельствует о том, сколько грамм нефтепродукта может впитать 1 грамм нефтесорбента. Оценка нефтеемкости исследуемых материалов производилась, согласно методике [4]. Формула для определения нефтеемкости (НЕ):

$$НЕ = \frac{m1(m2+m3)}{m3}$$

где $m1$ – масса сетки с сорбционным материалом и поглощенным нефтепродуктом, г; $m2$ – масса сетки с учетом удерживаемого нефтепродукта, г; $m3$ – масса навески сорбционного материала, г.

В качестве нефтепродукта для проведения испытаний была нефть с плотностью 845 кг/м^3 , доставленная с нефтедобывающего комплекса, расположенного на территории Республики Башкортостан.

В данном исследовании рассматривается модификация с использованием СВЧ-излучения при разном времени обработки. Данный способ модификации подробно описан в работе [5]. Для обработки СВЧ-излучением образцы СЖС подвергались предварительной стадии замачивания в дистиллированной воде. Образец ВСЖ не подвергался стадии замачивания, так как он имеет высокий процент влажности. Обработка СВЧ-излучением приводит к карбонизации внутренних стенок структуры материала. Обработка СВЧ-излучением проводилась в лаборатории при частоте 50 Гц и максимальной мощности 700 Вт на протяжении 20 минут.

Результаты определения нефтеемкости представлены на рисунке 1.

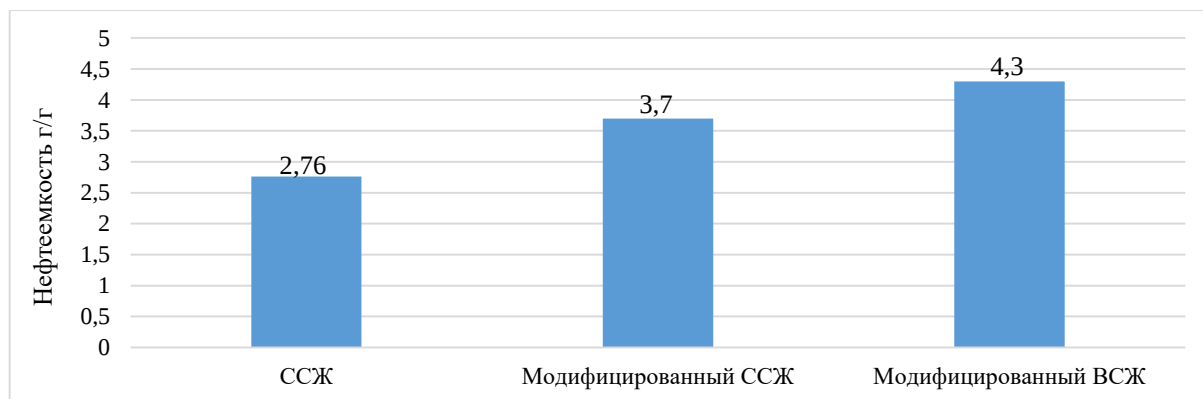


Рис. 1. Результаты определения нефтеемкости свекловичного жома до и после модификации

По результатам сравнения можно сделать вывод о том, что модификация является эффективной, так как нефтеемкость модифицированного ССЖ увеличилась на 25 %. Наибольшую нефтеемкость продемонстрировала модифицированный ВСЖ.

Таким образом свекловичный жом является перспективным сырьем для производства эффективного нефтесорбента, который позволяет не только минимизировать негативное влияние аварийных разливов нефтепродуктов на окружающую среду, но и решить проблему накопления сельскохозяйственного отхода, открывая новые перспективы для реализации принципов устойчивого развития и перехода к экономике замкнутого цикла.

Список литературы:

1. FAO. FAOSTAT. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL> (дата обращения: 25.10.2024).
2. Emenike E. C., Adeleke J., Iwuozor K. O., Ogunniyi S., Adeyanju C. A., Amusa V. T., Okoro H. K., Adeniyi A.G. Adsorption of crude oil from aqueous solution: A review // Journal of Water Process Engineering. – 2022. – Vol. 50. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103330>.
3. Каменщиков Ф.А. Нефтяные сорбенты. Ижевск: Аспект-пресс, 2005. – 268 с.
4. ГОСТ 33627 – 2015. Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов. Официальное издание. М.: Стандартиформ, 2019.
5. Кострюкова Н. В., Мельникова А. С., Платонова А. М. Анализ сорбирующих характеристик модифицированного отхода сахарного производства // Вестник НЦБЖД. 2022. – № 3(53). – С. 108–116.

Научный руководитель: Кострюкова Наталья Викторовна, к.х.н., доцент, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.

Пашкевич Мария Анатольевна*

Гейдарова Виктория Романовна**

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия*

** mpash@spmi.ru, ** geydarova.tory@gmail.com*

Необходимость восстановления территорий экологических катастроф, сформировавшихся при разработке месторождений сульфидных руд

Аннотация. Не одно столетие по всему миру в местах разработки и обогащения сульфидных месторождений наблюдается формирование зон экологического бедствия, которые образовались в связи с отсутствием своевременных средозащитных мероприятий. Такие зоны необходимо реанимировать для обеспечения должного качества жизни населения и восстановления компонентов природной среды. Целью работы является анализ экологических последствий разработки сульфидных месторождений. Результатом проведенного исследования будет являться составление плана и проведение мониторинговых исследований для разработки средозащитных мероприятий на одном из предприятий по добыче и переработки сульфидных руд.

Ключевые слова: месторождения сульфидных руд, хвостохранилища, металлы, загрязнение вод, ликвидация негативных последствий, компоненты среды.

Mariya A. Pashkevich*

Victoriya R. Geydarova**

*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia*

** mpash@spmi.ru, ** geydarova.tory@gmail.com*

The need to restore the territories of environmental disasters formed during the development of sulfide ore deposits

Abstract. For more than a century all over the world in the places of development and enrichment of sulphide deposits the formation of ecological disaster zones is observed, which were formed due to the lack of timely environmental protection measures. Such zones need to be reanimated to ensure proper quality of life for the population and to restore the components of the natural environment. The purpose of the work is to analyse the environmental consequences of the development of sulphide deposits. The result of the conducted research will be to make a plan and conduct monitoring studies for the development of environmental protection measures at one of the enterprises for mining and processing of sulphide ores.

Keywords: sulphide ore deposits, tailings, metals, water pollution, elimination of negative consequences, environmental components.

Разработка месторождений сульфидных руд сопровождается, с попаданием их на земную поверхность, окислением и гидролизом, что приводит к формированию кислых дренажных вод с высокими содержаниями сульфатов и ионов металлов, вследствие чего происходит деградация среды [1].

Проблема загрязнения компонентов природной среды в ходе горных работ и при последующем складировании отходов обогащения сульфидных руд актуальна не только для Российской Федерации, но и для ряда зарубежных стран.

Известны такие случаи, как излив шахтных кислых вод в Сычуаньской впадине (Китай), загрязнение в Испании притока реки Гвадалквивир шламовыми отходами, что привело к понижению pH воды в нем до 4,5 вместо исходного 8,5, прорыв плотины, сдерживающей отходы обогащения, на шахте Маунт-Полли в августе 2014 года (Канада) и другие [2, 3].

Примером отечественной зоны экологического бедствия может послужить негативная обстановка г. Карабаш и его окрестностей, которая сформировалась благодаря продолжительной техногенной нагрузке предприятия АО «Карабашмедь» (до 2004 г. – Карабашский медеплавильный комбинат). Производственный объект оказывает влияние как на атмосферу, так и на земельные и водные ресурсы местности. Причем выбрасываемые в воздух загрязняющие вещества воздействуют практически на все компоненты окружающей среды – поверхностные воды, почвы и донные отложения, вследствие их аккумуляции в перечисленных средах. В представителях флоры накапливаются металлы (свинец, медь, цинк) в связи с выпадением кислотных осадков, содержащих тяжелые металлы, что приводит к их массовому угнетению. Ярким примером является «Лысая гора», которая отличается полным отсутствием какой-либо растительности на ее склонах.

В результате модернизации производственного объекта были решены некоторые экологические проблемы, в частности, резко сократились выбросы металлургического производства в атмосферу. Тем не менее, проблема техногенного воздействия нерекультивируемых хвостохранилищ, имеющих общую площадь в более чем 50 гектар и прекративших свою эксплуатацию в 1991 году до настоящего времени, сохраняет свою остроту. Их основное пагубное воздействие заключается в разгрузке в водные объекты кислых дренажных вод, формирующихся вследствие инфильтрации через тело хранилища атмосферных осадков, обогащающихся токсичными элементами, и в пылении хвостов, вследствие процессов ветровой эрозии, что приводит к значительному увеличению ореола загрязнения почвенных и гидрологических ресурсов [3].

Таких примеров развития зон экологического бедствия множество как по всей стране, так и миру, которые требуют восстановления природной среды. Для этого необходимо разрабатывать целый комплекс средозащитных мероприятий, которые должны обеспечивать не только высокую экологическую эффективность в рамках особенностей природных условий конкретного региона, но и быть экономически целесообразными.

Актуальным способом ликвидации экологического ущерба является комбинированный метод, который включает в себя синтез горнотехнических и биологических этапов рекультивации.

Часто для очистки дренажных вод хвостохранилищ от содержащихся в них потенциально токсичных элементов используют реагентные методы. Но они имеют свои минусы, что уменьшает их привлекательность для производителя: требуется предварительная очистка вод; повышенные затраты электроэнергии; для повышения гидрофобности элементов необходимо использовать дополнительные реагенты и т.д. Именно поэтому важно рассматривать возможность использования в рамках конкретных месторождений природных сорбентов, которые обладают рядом преимуществ: дешевизна, широкое распространение и другие.

В большинстве случаев природные сорбенты являются композитными, то есть представляют из себя смесь из различных компонентов, обладающих различными физико-химическими свойствами. Примером такого вида смеси может служить полученный в ходе опытов Ульрихом Д.В. композитный сорбент из глауконита, вспученного вермикулита и вспученного перлита находящиеся в соотношении 50:25:25 соответственно. Он, благодаря подбору оптимального состава, а вследствие этого и оптимальной удельной поверхности системы, обладает эффектом эмерджентности, в связи с чем первыми осаждаются наиболее опасные для природной среды компоненты. Сам сорбент также характеризуется низкой стоимостью, доступностью, высокой поглощающей способностью даже при низких значениях pH, минимальной зависимостью процесса сорбции от скорости фильтрации, малым значением кажущейся плотности ($0,184 \text{ г/см}^3$).

Для очистки поверхностных вод и почв также применяются фиторемедиационные технологии. Основной задачей является подбор таких представителей растительности, которые в данных условиях смогут обеспечить максимальное извлечение загрязняющих

веществ. Важным фактором, от которого будет напрямую зависеть эффективность очистки компонентов окружающей среды, служит значение pH – оптимальный диапазон от 4,2-7,2. Поэтому при проектировании фиторемедиационных сооружений в местах кислых и сильнокислых стоков необходимо проводить предварительную очистку и нейтрализацию вод. Представителями растительности, используемых в биологическом этапе очистки, могут являться рдест пронзеннолистный и гребенчатый, кубышка желтая, рогоз узколистный и уруть колосистая. К примеру, именно они по анализам являются одними из приоритетных для использования на предприятиях Южного Урала. После аккумуляции металлов в тканях или на поверхности листьев рекомендовано скашивать растительность и отправлять ее на последующую утилизацию [4].

Отдельным вариантом уменьшения воздействия хранилищ сульфидсодержащих отходов, которые в ряде случаев, могут рассматриваться как техногенные месторождения, стоит выделить консервацию. Она заключается в формировании экранирующего слоя с последующим использованием технологий биологической рекультивации, что будет способствовать прекращению загрязнения практически всех компонентов природной среды. Такой метод интересен тем, что позволяет сохранить ресурсы хвостохранилища для последующего извлечения полезных ископаемых, когда новые технологии позволят обеспечить экономическую целесообразность добычных работ [3,4].

Таким образом, вследствие всестороннего и длительного воздействия хранилищ сульфидсодержащих отходов на компоненты природной среды, необходима разработка комплексных мероприятий, компенсирующих их негативное воздействие. Причем в каждом конкретном случае комплекс мероприятий должен выбираться исходя из ряда факторов, обусловленных технологическими особенностями добычи и переработки руд на определенном предприятии, химическим и минеральным составом заскладированных отходов, их объемом, климатическими факторами месторасположения хранилища, его удаленности от населенных пунктов и др.

«Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов). \ The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russia (FSRW-2023-0002). »

Список литературы

1. Kharko P. A., Matveeva V. A. Bottom Sediments in a River under Acid and Alkaline Wastewater Discharge // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2021. Vol. 22. Iss. 3. P. 35–41. DOI: 10.12912/27197050/134870.
2. Science Desk: How Sulfide-Ore Copper Mines Pollute: сайт. – URL: <https://www.savetheboundarywaters.org/updates/science-desk-how-sulfide-ore-copper-mines-pollute>.
3. Пашкевич М. А., Алексеенко А. В., Нуреев Р. Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
4. Ульрих Д. В. Научное обоснование и разработка технологий комплексного восстановления техногенно-нарушенных территорий в районах добычи и переработки медных руд: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2020. 44 с.

Направление утилизации и переработки отходов нефтеперерабатывающей промышленности

Аннотация. В работе приведены примеры отходов, которые образовались на нефтеперерабатывающем заводе, а также приведена классификация нефтесодержащих отходов. Рассмотрен метод использования золы от сжигания нефтешламов при производстве бетона. Приведены данные проведенных экспериментов по приготовлению бетона с золой и результаты анализа прочностных характеристик изготовленных образцов. Предлагаемый способ утилизации золы на данный момент не является целесообразным, поскольку значительно уменьшает прочность бетона на сжатие. Предложены направления повышения прочностных характеристик для эффективной реализации данного метода.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, нефтешламы, сжигание нефтешламов, зола нефтешламов, бетон.

Maria A. Pashkevich*

Nikita E. Panin

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,

St. Petersburg, Russia

* mpash@spmi.ru

Direction of utilization and processing of waste from oil refining industry

Abstract. The paper provides examples of waste generated at oil refineries and a classification of oil-containing waste. A method for using ash from burning oil sludge in concrete production is considered. The data of experiments conducted on the preparation of concrete with ash and the results of the analysis of the strength characteristics of the manufactured samples are presented. The proposed method of ash utilization is currently not advisable, since it significantly reduces the compressive strength of concrete. Directions for increasing the strength characteristics for the effective implementation of this method are proposed.

Keywords: oily waste, oil sludge, oil sludge burning, oil sludge ash, concrete.

В России с каждым годом все больше и больше увеличивается объем добычи и переработки нефти. Так, по данным ассоциации нефтепереработчиков и нефтехимиков, за 2022 год было добыто 535 млн. тонн нефти, а первичная переработка нефти составила 271,74 млн. тонн. Добытая нефть транспортируется по трубопроводам на нефтеперерабатывающие заводы, где из нее получают различные виды нефтепродуктов.

Непрерывная переработка больших объемов нефти влечет за собой появление значительных объемов отходов производства. На нефтеперерабатывающих заводах образуются различные виды отходов: бытовые отходы, а также отходы, определяемые спецификой производства, отходы, образующиеся на локальных очистных сооружениях и нефтесодержащие отходы (нефтешламы).

Нефтешламы можно разделить на 3 группы: возобновляемые, невозобновляемые и нефтешламы очистных сооружений.

Возобновляемые нефтешламы образуются в результате эксплуатации и зачистки трубопроводов, резервуаров, технологического оборудования [1]. Помимо этого, возобновляемые нефтешламы образуются в результате специфических технологических операций и работ по ликвидации аварийных разливов нефти.

Невозобновляемые нефтешламы – многолетние накопления отходов с момента начала работы предприятия. Многие нефтеперерабатывающие предприятия России

функционируют с 50–60х годов 20 века, что может свидетельствовать о значительных объемах, накопленных нефтешламов. Нефтешламы очистных сооружений образуются в результате очистки сточных вод предприятия от нефтепродуктов.

Ежегодно в России образуется около 3 миллионов тонн нефтешламов. На территории Западной Сибири их скопилось около 3 млн. т, в Республике Татарстан – около 2,5 млн. т, в Республике Башкортостан – более 2 млн. т. На сегодняшний день на предприятиях АНК «Башнефть» складировано около 180 тыс. м³ нефтешламов, и каждый год образуется порядка 6,5 тыс. м³ с тенденцией увеличения на 10 % в год. Количество нефтесодержащих отходов постоянно растет: на 1 тыс. т сырой нефти приходится 1–5 т нефтешламов [2].

Существует ряд направлений по утилизации и переработке нефтесодержащих отходов. Самый распространенный метод утилизации нефтесодержащих отходов – это термический метод утилизации. Суть метода заключается в том, что нефтесодержащие отходы подвергаются сжиганию или высокотемпературному нагреванию в недостатке кислорода (пиролиз). Преимуществами данного метода является то, что в ходе процесса уменьшается объем нефтесодержащих отходов. Однако данный метод утилизации имеет и ряд недостатков: во избежание негативного ущерба окружающей среде, особенно атмосферному воздуху, требуется дорогостоящая система очистки газов, которые образуются в результате сжигания. Сжигание приводит к потерям сырья, которое можно было бы рационально использовать. В ходе сжигания образуется зола, которая является новым отходом и также требует утилизации.

На данный момент золу от сжигания нефтешламов утилизируют преимущественно захоронением на полигоне, однако существуют другие пути утилизации. Прежде всего, золу от сжигания нефтешламов, аналогично золе от сжигания углей, можно использовать в производстве строительных материалов, таких как обожженный кирпич, керамзит, газобетон, в качестве добавок в бетон для улучшения физико-механических свойств бетона, а также в качестве удобрений для повышения плодородия земель сельскохозяйственного назначения.

Направление утилизации золы преимущественно зависит от ее состава. Применимость золы в качестве добавки в бетон или при производстве строительных материалов, прежде всего зависит от наличия в составе золы кальция в свободной или вяжущей форме, содержание которого должно быть 10 % в вяжущей форму или 5 % в свободной форме. Помимо оксида кальция, также необходимо учитывать содержание других соединений, таких как оксида магния, содержание которого должно быть не более 5 %, а содержание оксидов натрия и калия – от 1,5 до 3 %.

Помимо содержания основных оксидов, которые определяют применимость золы в качестве добавки при производстве бетона, также необходимо провести исследования на наличие других химических соединений и элементов в составе золы, таких как сера, оксиды тяжелых металлов, оксид кремния, оксид фосфора и др. Определение химического состава золы позволит определить класс опасности золы. Так, у исследуемой золы, полученной от сжигания нефтешламов (отходы очистки емкостей, обтирочный материал, загрязненный нефтью, шлаковата и спецодежда) показатель степени опасности, определенного согласно методики, утвержденной приказом Минприроды России от 04.12.2014 г. №536, составил 57,38, что позволяет отнести золу к IV классу опасности.

Помимо расчетного метода определения класса опасности золы, также необходимо провести биотестирование на тест культуре (водоросль хлорелла). Проведенные исследования показали, что по результатам биотестирования зола аналогично расчетному методу относиться к IV классу опасности, что свидетельствует о том, что зола от сжигания нефтесодержащих отходов может быть применима в качестве компонента бетонной смеси.

В качестве метода утилизация золы был выбран способ использования золы в составе бетонной смеси. Бетонная смесь приготавливалась из портландцемента, песка, щебня, воды и золы. Целесообразность использования золы в качестве добавки проверялась при помощи создания образцов бетона кубической форму со стороной 10 см и последующей проверке этих образцов на прочность при сжатии.

Соотношение основных компонентов для приготовления бетона марки М200 является следующим: Цемент : Песок : Щебень : Вода 1:2,8:4,8:0,63. Исходя из соотношений основных компонентов, а также ориентировочной плотности бетона, были рассчитаны массы основных компонентов для приготовления образца. Так, на один образец использовалось 0,27 кг цемента, 0,76 кг песка, 1,3 кг щебня и 0,17 кг воды. Для проведения испытаний всего было отобрано 1,2 кг золы.

В ходе эксперимента были сделаны 3 контрольных образца, не содержащих золу, а также 4 серии образцов, в которых часть цемента и песка заменяется золой.

Таблица 1

Массовое содержание компонентов бетонной смеси

№ серии образца	Масса цемента, кг	Масса песка, кг	Масса щебня, кг	Масса воды, кг	Масса золы, кг
Контр.	0,27	0,76	1,3	0,17	0
I	0,27	0,68	1,3	0,17	0,08
II	0,23	0,72	1,3	0,17	0,08
III	0,27	0,76	1,3	0,17	0,08
IV	0,27	0,76	1,3	0,17	0,16

В первой серии образцов золой была заменена часть песка в сравнении с контрольными образцами. В серии II была произведена замена равных частей песка и цемента. В III и IV серии образцов было произведено простое добавление золы. В каждой серии было создано по 3 образца. В таблице 1 указаны общие массы компонентов, использовавшихся за серию.

После приготовления растворов и заливки растворов в форму образцы были помещены в темное помещение с нормальными условиями для застывания. Определение прочности на сжатие производилось спустя 28 дней после их заливки.

Определение прочности на сжатие производилось на гидравлическом прессе с максимальной нагрузкой 300 кН. Перед испытаниями все образцы взвешивались и измерялись. В таблице 2 приведены данные испытаний.

Таблица 2

Результаты испытаний

№ пробы	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, кН	Площадь поверхности, м ²	Удельная прочность, кН/м ²	Прочность образцов на сжатие, кгс/см ²
K ₁	0,1	0,095	0,1	2,175	2289,5	186,3	0,0095	19613	201
K ₂	0,096	0,1	0,1	2,180	2270,8	186,4	0,0096	19418	198
K ₃	0,097	0,1	0,1	2,188	2255,7	195,5	0,0097	20158	206
I ₁	0,097	0,1	0,1	2,111	2176,3	119,3	0,0097	12304	125
I ₂	0,097	0,1	0,1	2,100	2164,9	111,1	0,0097	11459	117
I ₃	0,097	0,1	0,1	2,093	2157,7	114,7	0,0097	11823	121
II ₁	0,098	0,1	0,1	2,121	2164,3	80,6	0,0098	8226	84
II ₂	0,095	0,1	0,1	2,096	2206,3	71,0	0,0095	7473	76
II ₃	0,096	0,1	0,1	2,102	2189,6	78,8	0,0096	8207	84
III ₁	0,098	0,1	0,1	2,120	2163,3	88,9	0,0098	9071	92
III ₂	0,1	0,1	0,1	2,106	2106,0	109,9	0,001	10992	112
III ₃	0,099	0,1	0,1	2,095	2116,2	91,3	0,0099	9221	94
IV ₁	0,099	0,1	0,1	1,990	2010,1	56,1	0,0099	5671	58
IV ₂	0,1	0,1	0,1	2,003	2003,0	71,5	0,001	7147	73
IV ₃	0,098	0,1	0,1	1,937	1976,5	61,3	0,0098	6252	54

Полученные данные испытаний свидетельствуют о том, что зола, добавленная в образцы, ухудшает прочностные характеристики бетона. Согласно установленной классификации марок бетона, можно отнести образцы первой и частично 3 серии к марке бетона М100, что позволяет использовать данный бетон для проведения подготовительных процедур перед заливкой монолитных лент фундамента и плит.

Таким образом, согласно полученным результатам, зола от сжигания нефтесодержащих отходов не может эффективно использоваться в качестве добавки в бетонные смеси. Неэффективность использования золы может быть связана с недостаточной изученностью химического и гранулометрического состава золы.

Также снижение прочности на сжатие при добавлении золы может быть из-за неправильно подобранных соотношений компонентов. Так, водоцементное соотношение во всех исследуемых образцах составило 0,63, что входит в оптимальный диапазон приготовления бетона, однако следует учитывать, что помимо свободной воды, также в компонентах бетонной смеси уже могла быть вода, содержащаяся в песке, которая могла привести к отрицательным результатам эксперимента. Плотность бетона может быть повышена путем уменьшения водоцементного отношения [3].

Согласно анализу, литературных данных, повышение прочностных свойств бетона может быть достигнуто применением пропаривания бетона, которое вызывает термоактивацию схватывающих свойств золы.

Подводя итог вышесказанному можно сделать вывод о том, что зола от сжигания нефтешламов имеет перспективы использования в качестве добавки в бетонные смеси, однако требует дополнительной обработки для повышения прочности, а также подбора рецептуры приготовления бетона.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Список литературы

1. Кузора, И. Е. Классификация нефтесодержащих отходов и подбор методов их переработки / И. Е. Кузора, Е. В. Симонова // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2023. – № 17. – С. 70–76. – EDN MFOYCS.
2. Коршунова, Т. Ю. Нефтешламы: состояние проблемы в российской федерации и методы снижения их отрицательного воздействия на окружающую среду // Экобиотех. – 2019. – № 1. – С. 75–85.
3. Методическое пособие по приготовлению бетонных смесей // Завод МОНОЛИТ. URL: <http://vibropress-monolit.ru/poleznoe/poleznaya-literatura/prigotovlenie-betonnyh-smesey/> (дата обращения: 07.10.2024).

Применение модифицированного бентонита для усовершенствования технических средств очистки сточных вод урбанизированных центров

Аннотация. Актуальность исследований связана с необходимостью постоянного совершенствования методов и систем водоочистки городских поселений. Соответственно, целью работы является исследование сорбционных свойств модифицированного бентонита для усовершенствования технических средств очистки сточных вод урбанизированных центров. Исследования адсорбции хлорид- и сульфат-ионов бентонитом, модифицированным глицерином, показали довольно высокую эффективность результата адсорбции на этом материале.

Ключевые слова: адсорбция, бентонит, адсорбционная очистка сточных вод, изотермы сорбции, фильтрующая система.

Nikolai D. Prokazov
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russia, prokazov.n.d@mail.ru*

The use of modified bentonite to improve the technical means of wastewater treatment in urban centers

Abstract. The relevance of the research is related to the need for constant improvement of methods and systems for water purification in urban settlements. Accordingly, the aim of the work is to study the sorption properties of modified bentonite to enhance the technical means of wastewater treatment in urbanized centers. Studies on the adsorption of chloride and sulfate ions by bentonite modified with glycerin showed quite high efficiency in the adsorption results on this material.

Keywords: adsorption, bentonite, adsorption treatment of wastewater, sorption isotherms, filtering system.

В настоящее время учеными, работающими в области промышленной экологии, постоянно ведутся исследования и работы по совершенствованию и улучшению того или иного метода очистки сточных вод с целью обеспечения качественной водоочистки и возвращения отработанной воды в природные водоемы или технологический процесс.

Сточные воды урбанизированных центров традиционно содержат значительное количество загрязняющих веществ, поступающих в городские канализационные стоки от промышленных предприятий, жилищного сектора, селитебных территорий и др. [1]. Установлено [2], что сточные воды урбанизированных центров подвержены загрязнению хлоридами и сульфатами. Очистка сточных вод населенных пунктов от ионов Cl^- и SO_4^{2-} представляет актуальную задачу в работе очистных сооружений каждого водоканала.

Сложность очистки и чрезвычайное разнообразие примесей в стоках, количество и состав которых постоянно изменяется вследствие появления новых производств и изменение технологии существующих, заставляет проводить постоянный исследования в поисках наиболее эффективных методов и средств очистки сточных вод. Весьма эффективным и перспективным методом, которому уделяется большое внимание является сорбционная очистка.

Объектами исследования являлись модельные водные растворы хлорида кальция (CaCl_2), содержащие ионы Cl^- , водные растворы сульфата натрия (Na_2SO_4), содержащие ионы SO_4^{2-} , а также сорбционный материал (далее – СМ), представляющий собой бентонит, модифицированный глицерином, подверженный высокотемпературной (550°C) обработке.

Основными методами исследований модельных растворов и СМ были статическое фильтрование в термостатическом шейкере, метод титрования, фотометрический метод, метод гравиметрии с последующей статистической обработкой результатов.

Определение механизма адсорбции поллютантов на сорбционном материале осуществлялись в соответствии с моделями сорбции Ленгмюра и Фрейндлиха. Для ионов Cl^- и SO_4^{2-} использовались эти же модели. Картина модели Ленгмюра, описывает протекание адсорбции, взаимодействия адсорбата с адсорбентом, в виде формирования мономолекулярных слоев. В свою очередь модель сорбции по Фрейндлиху показывает диффузный характер формирования слоев, которые состоят из мономолекулярных и полимолекулярных комплексов.

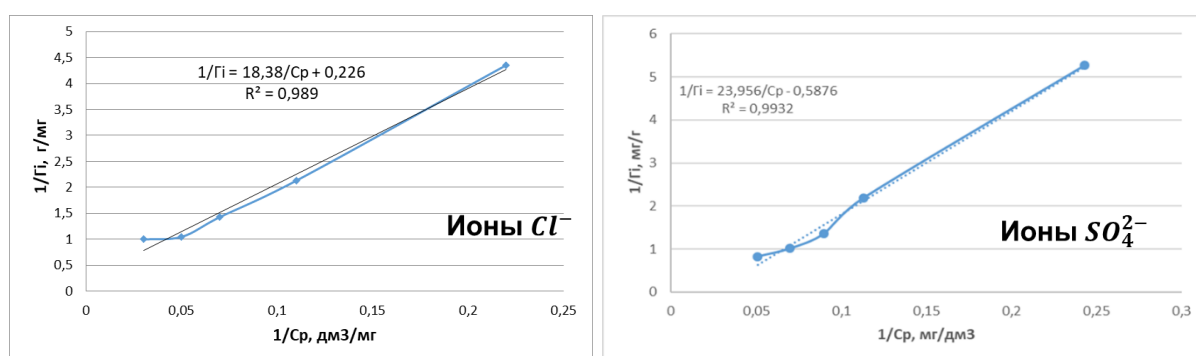


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов Cl^- и SO_4^{2-} в линейризованной форме по Ленгмюру:
 Γ_i – величина сорбции, C_p – равновесная концентрация вещества

В процессе расчета результатов опытов было установлено, что протекание адсорбции ионов Cl^- и SO_4^{2-} на модифицированном бентоните лучше всего описывается в рамках модели Ленгмюра, поскольку величина аппроксимации изотерм составила $R^2=0,989$ и $R^2=0,993$ соответственно. Это говорит о формировании на поверхности адсорбента мономолекулярных слоев адсорбата. Энергия равномерно распределяется вдоль поверхности взаимодействия «адсорбент-адсорбат».

Экспериментально установлен вид адсорбции ионов Cl^- и SO_4^{2-} на исследуемом СМ на основании анализа значений энергии адсорбции. Величины средних свободных энергий адсорбции ионов Cl^- , равной $2,748 \text{ кДж/моль}$, а ионов SO_4^{2-} , равной $13,86 \text{ кДж/моль}$, указывают на то, что в первом случае имеет место физическая сорбция, в то время как во втором – преобладание химической адсорбции [3]. Для определения вида адсорбции применялся подход Дубинина-Радushkevича.

Практическое применение результатов исследований может быть направлено на проектирование технологических моделей систем очистки сточных вод, в частности для совершенствования системы водоочистки в рамках комплексных реконструкций городских станции очистки стоков, а также на предприятиях разных индустрий.

В рамках совершенствования технических средств очистки сточных вод урбанизированных центров предлагается дополнительная установка многоступенчатой установки статической адсорбции на выходе из вторичных отстойников. На рисунке 2 изображена сама многоступенчатая адсорбционная фильтрующая система (далее – МАФС).

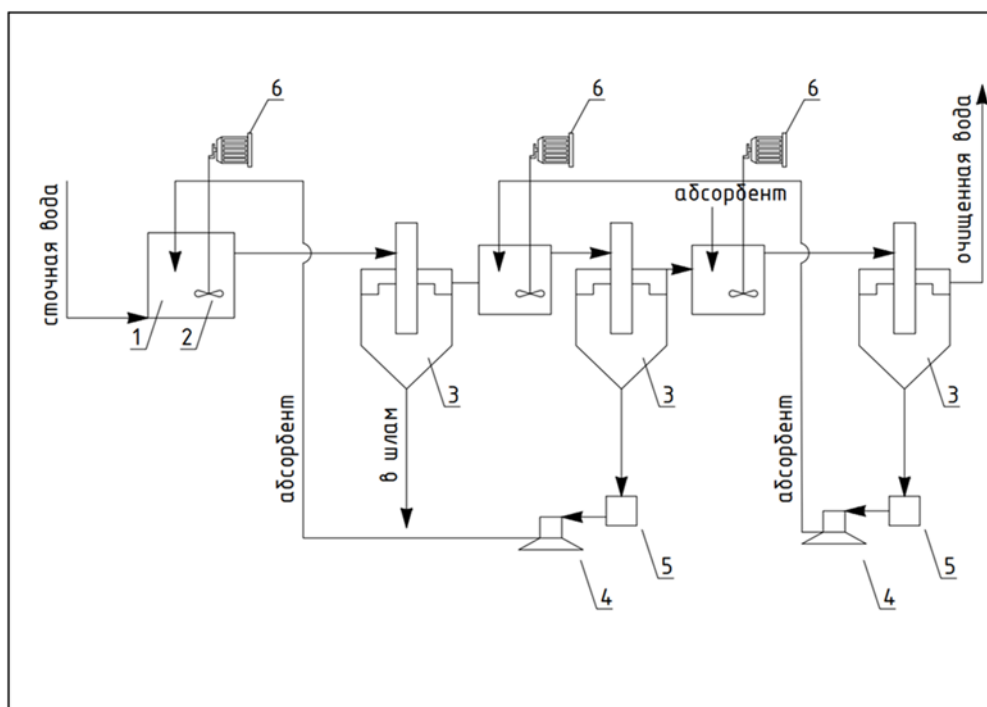


Рис. 2. Схема противоточной многоступенчатой адсорбционной фильтрующей системы:
1 – баки-смесители; 2 – мешалки; 3 – отстойники для выделения отработанного СМ;
4 – механизмы для перекачки сорбента; 5 – приемники сорбента, 6 – редукторы

МАФС, представляет собой систему из последовательно расположенных баков-смесителей №1, №2 и №3 (1) и отстойников №1, №2 и №3 (3). Система трубопроводов обеспечивает подачу исходной воды и выход для отвода очищенной воды, подачу чистого и отвод отработанного СМ. Механизмы перекачки (4) и приемники адсорбента (5) обеспечивают движение СМ по системе. В противоточной схеме адсорбент вводят однократно в последнюю ступень, и он движется навстречу сточной воде. Противоточные сорбционные установки применяются значительно шире благодаря более экономичному расходованию адсорбента [4].

Основным компонентом загрузки МАФС является бентонит, модифицированный глицерином. Размер фракции гранул бентонита составляет 0,5 – 1,5 мм. Дополнительным компонентом загрузки является анионит марки АН-31, с размером гранул 0,4 – 2,0 мм.

МАФС работает следующим образом: сточная вода последовательно движется через бак-смеситель №1, отстойник №1, бак-смеситель №2, отстойник №2, бак-смеситель №3, отстойник №3. Замоченная и отмытая от мелкой фракции чистая загрузка сорбционных материалов, которыми является бентонит, модифицированного глицерином и анионит марки АН-31, поступают в бак-смеситель №3. Баки-смесители оборудуются устройствами (мешалками), обеспечивающим равномерность перемещения толщ загрузки СМ по поперечному сечению емкости совершающими 40-60 об/мин. Для перемешивания сточных вод с сорбционным материалом рекомендуется использовать лопастные, турбинные или пропеллерные мешалки [5]. Мешалки работают с помощью электропривода через редукторы. Сточная вода и СМ движутся в отстойник №3, где происходит осаждение сорбента в приемную камеру (5). При помощи насоса (4) сорбент по трубопроводу попадает в бак-смеситель №2, где снова осуществляется равномерное перемешивание его со сточной водой. После этого цикл повторяется в отстойнике №2, а также в баке-смесителе №1 и отстойнике №1. Таким образом реализуется противоточное движение сорбента относительно сточной воды. В отстойнике №1 происходит осаждение уже «мертвого», отработанного слоя сорбента и удаление его из системы. Вывод отработанной загрузки

производится одновременно с подачей свежей порции загрузки, что обеспечивает непрерывность работы системы. Для подачи свежего адсорбента имеются специальные дозаторы. Очищенную воду отводят через желоба в верхней части отстойников. При этом можно не опасаться частичного переноса сорбента, т.к. его удаление неизбежно произойдет в последующих отстойниках. После многоступенчатой установки статической адсорбции обязательно устанавливается фильтр для осветления воды.

Утилизация отработанного СМ может иметь несколько вариантов:

- применение в качестве наполнителя при строительстве промышленных площадок, фундаментов зданий, нежилых производственных помещений, транспортных магистралей и т.д.;
- применение для приготовления буровых растворов;
- захоронение на полигонах.

Выводы:

1. По результатам исследований определены показатели эффективности адсорбции ионов Cl^- и SO_4^{2-} бентонитом, модифицированным глицерином, в статических условиях. Экспериментально с использованием методов количественного анализа установлена хорошая эффективность адсорбции ионов (Cl^- – 80 %; SO_4^{2-} – 82 %) на этом адсорбенте.

2. Предложенный сорбционный материал, представляющий собой бентонит, модифицированный глицерином, рекомендуется к использованию в системах адсорбционной очистки сточных вод урбанизированных центров.

Список литературы

1. Tikhomirova E. I., Alekshashin A. V., Koshelev A. V., Atamanova O. V. Development of technological solutions and methods for obtaining humic-mineral compositions for the tasks of recultivation of oil-contaminated areas // Theoretical and Applied Ecology. 2020(4), pp. 203–209. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-203-209.
2. Проказов, Н. Д. Применение гидрофобизированного бентонита для адсорбционной очистки сточных вод от ионов Cl^- и SO_4^{2-} в статических условиях / Н. Д. Проказов // Химия и инженерная экология – XXIV : Сборник трудов международной научной конференции (школа молодых ученых), посвященной Году научно-технологического развития в Республике Татарстан, Казань, 27–28 сентября 2024 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2024. – С. 91–94. – EDN EFTANE.
3. Зеленцов В. И., Дацко Т. Я. Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия-фтор // Электронная обработка материалов. 2012. № 48(6). С. 65–73.
4. Саипов А. А. Новая конструкция адсорбера с движущимся слоем для очистки сточных вод // тр. 5 междунар. конф. МКЭМК-2004. СПб. 2004. С. 357–359.
5. Доскина, Э. П. Разработка ресурсосберегающей технологической схемы очистки сточных вод предприятий машиностроения: современная наука и инновации / Э.П. Доскина. – 2014. – № 4. – 78–83 с.

Научный руководитель: Атаманова Ольга Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия.

Выявление геохимической аномалии в донных отложениях Карабашского пруда

Аннотация. В статье рассмотрены процессы накопления тяжелых металлов в донных отложениях Карабашского пруда. Описываются последствия антропогенной и техногенной нагрузки от медеплавильного производства в районе города Карабаш. Приведены результаты анализа проб воды и донных отложений Карабашского пруда рентгенофлуоресцентным методом и методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Дана оценка загрязненности водного объекта.

Ключевые слова: геохимическая аномалия, тяжелые металлы, донные отложения.

Yulia Yu. Strelkova

*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, strel_2002@mail.ru*

Identification of a geochemical anomaly in the bottom sediments of the Karabash pond

Abstract. The article considers the processes of accumulation of heavy metals in bottom sediments of the Karabash pond. The consequences of anthropogenic and technogenic load from copper smelting production in the area of the city of Karabash are described. The results of the analysis of water samples and bottom sediments of the Karabash pond by the X-ray fluorescence method and the method of atomic emission spectrometry are presented. The pollution level of the water body is assessed.

Keywords: geochemical anomaly, heavy metals, bottom sediments.

Экологическая ситуация на Южном Урале характеризуется высоким уровнем сложности. Развитие в регионе горнодобывающей промышленности и пирометаллургии является причиной образования масштабных ореолов техногенного распространения тяжелых металлов [1].

Освоение недр на территории нынешнего города Карабаш началось в XIX веке, когда в Соймановской долине были обнаружены россыпи золота и залежи медных руд. В 1910 году был открыт Карабашский медеплавильный комбинат (КМК). Тяжелые металлы и их соединения, входящие в состав выбросов и сбросов КМК, накапливались в депонирующих средах, что привело к образованию техногенных геохимических аномалий [2, 3].

Для нужд КМК был создан Карабашский пруд. Во время существования комбината пруд являлся приемником сточных вод. Тяжелые металлы, содержащиеся в стоках, осаждались на дне водоема.

В настоящее время на производстве внедрена система замкнутого водооборота, поэтому пруд не используется для нужд предприятия [3]. В 2022 году была проведена комплексная очистка Карабашского пруда с полной выемкой донного грунта – благодаря этому загрязненные донные отложения были полностью извлечены [4].

Ввиду гидрогеографических особенностей Карабашский пруд все еще остается приемником дождевых и талых вод, поступающих с западных возвышенностей города и со склонов горы Золотой – эти зоны характеризуются эрозией почв, отсутствием растительности и высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами [3].

Карабашский пруд сооружен в русле реки Серебрянки, впадающей в Богородский пруд, который на сегодняшний день является источником водоснабжения АО «Карабаш-медь». Повторное загрязнение Карабашского пруда может привести к ухудшению качества воды Богородского пруда и увеличению затрат предприятия на водоподготовку. В этой связи актуальным является определение содержания тяжелых металлов в водных объектах, связанных единой гидрологической сетью с Карабашским прудом, и в донных отложениях – как в депонирующей среде, способной накапливать широкий круг химических элементов и тем самым влиять на химический состав воды [5].

В июле 2024 года был проведен отбор проб донных отложений Карабашского пруда. Для оценки распределения тяжелых металлов по дну водоема построена сетка отбора проб, представленная на рисунке 1.

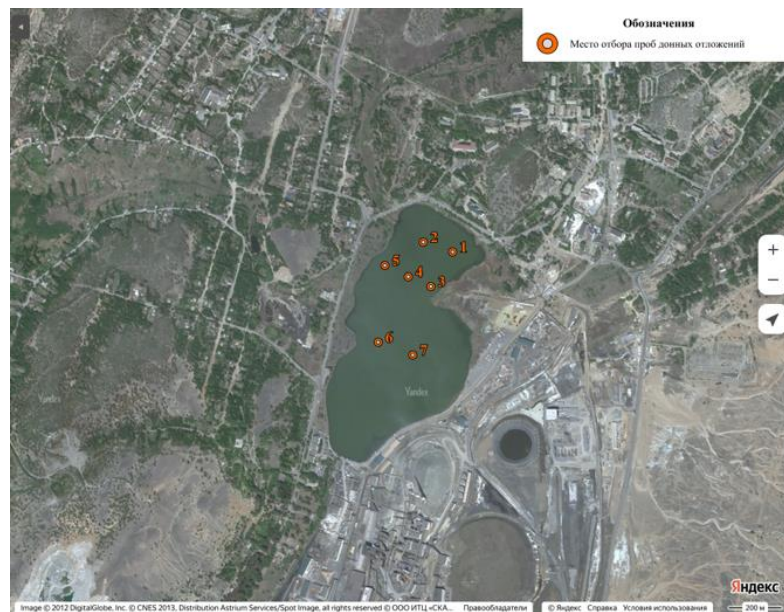


Рис. 1. Точки отбора проб донных отложений

Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 на квадратной площади со стороной 1 м и глубиной донных отложений 5 см с использованием дночерпателя Van Veen. Пробы были помещены в пластиковые контейнеры для транспортировки и проанализированы в лаборатории с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра NITON XLt.

Анализ проб показал превышения содержания свинца в 60 раз, цинка в 105 раз, меди в 422 раза, никеля в 36 раз, железа в 5 раз и хрома в 12 раз по сравнению с кларком, установленным для городов с населением менее 100 тыс. человек. Также отмечены превышения содержания свинца в 36 раз, меди в 180 раз и никеля в 16 раз по сравнению с ориентировочно допустимой концентрацией.

Высокие содержания тяжелых металлов в донных отложениях после полной очистки пруда свидетельствуют о том, что Карабашский пруд остается объектом, испытывающим существенное техногенное воздействие. Наиболее высокие значения в точках 5, 6 и 7 обусловлены направлением течения воды и, как следствие, выносом частиц тяжелых металлов к южному берегу водоема.

Пробы воды были отобраны в реке Серебрянке до впадения в Карабашский пруд и после его прохождения, а также в русле водотоков, стекающих с горы Золотой и западных возвышенностей города. Фоновая проба отобрана в озере Серебры, которое находится на северо-западе за пределами города Карабаш и не подвержено техногенному влиянию. Точки отбора представлены на рисунке 2.



Рис. 2. Точки отбора проб воды

Отбор и хранение проб были проведены в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020. Пробы были отобраны батометром и доведены добавлением 1 мл азотной кислоты до $pH=2$ для транспортировки в законсервированном состоянии. Анализ проводился методом атомной эмиссии.

В точках отбора 2, 3, 5, 6 значения концентраций тяжелых металлов превышают фоновые. Следовательно, все водотоки, впадающие в Карабашский пруд, влияют на повышение концентраций тяжелых металлов в его донных отложениях. Концентрации в точке 4 меньше, чем в точке 1 – это указывает на осаждение частиц тяжелых металлов в толще донных отложений.

Несмотря на проведение работ по очищению Карабашского пруда от загрязнения тяжелыми металлами, накопленными за многолетнюю деятельность КМК, он все еще подвержен влиянию техногенных геохимических аномалий. Основными источниками загрязнения Карабашского пруда являются поверхностные стоки с горы Золотой и западных возвышенностей города. Повышенные содержания тяжелых металлов в почвах горы Золотой и в поверхностных стоках подтверждают наличие техногенной аномалии на территории бывшего КМК.

Данная работа может послужить основой для дальнейшего прогнозирования состояния Карабашского пруда и связанных с ним водных объектов, однако для формирования полного представления о протекающих в водоеме процессах необходимо комплексное изучение условий выхода соединений металлов из донных отложений и закономерностей образования и миграции растворенных форм металлов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (шифр № FSRW-2023-0002).

Список литературы

1. Жолнин, А. В. Биогеохимические особенности биосферы Южного Урала / А. В. Жолнин, И. А. Мякишев, П. Н. Попков // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 19. – С. 126–128.
2. Дзугаев, М. Д. Карабаш – город «Экологического бедствия» / М. Д. Дзугаев // Вестник Челябинского государственного университета. Серия Право. – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 92–97.
3. Таций, Ю. Г. Эколого-геохимическая оценка загрязнения окружающей среды в зоне действия Карабашского медеплавильного комбината / Ю. Г. Таций // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – № 12. – С. 90–96.
4. Кожевникова Т. Очистка акватории Карабашского пруда шла всю зиму / Т. Кожевникова. – Текст: электронный // Карабашский рабочий: интернет-портал. – URL: <https://kr74-online.ru/23675-ochistka-akvatorii-karabashskogo-pruda-shla-vsyu-zimu> (дата обращения 10.10.2024).
5. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

Научный руководитель: Нагорнов Дмитрий Олегович, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Оценка нарушенности экосистем Авачинского перевала с использованием натуралистических наблюдений и ГИС-технологий

Аннотация. Состояние природных комплексов и объектов на территории Авачинского перевала, входящей в состав природного парка «Налычево» – объекта всемирного наследия ЮНЕСКО, было охарактеризовано как кризисное еще в 2020-м году. Транспортная доступность, рост туристического потока и условия свободного посещения приводят к дезорганизации естественного функционирования представленных экосистем, что свидетельствует о необходимости реализации мониторинговых мероприятий для проведения актуальной оценки их нарушенности.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, естественные экосистемы, антропогенное воздействие, туризм, средообразующие виды, нормализованный вегетационный индекс, деградация растительного покрова.

Elizaveta S. Shcherbakova
State University of land use planning,
Moscow, Russia, nirvana_never_die@mail.ru

Assessment of the disturbance of ecosystems of the Avacha Pass using naturalistic observations and GIS technologies

Abstract. The state of natural complexes and objects on the territory of Avacha Pass, which is part of the Nalychevo Nature Park – a UNESCO World Heritage Site, was described as critical back in 2020. Transport accessibility, growth of tourist flow and conditions of free visiting lead to disorganization of the natural functioning of the presented ecosystems, which indicates the need to implement monitoring measures to conduct an up-to-date assessment of their disturbance.

Keywords: specially protected natural areas, natural ecosystems, anthropogenic impact, tourism, environment-forming species, normalized vegetation index, vegetation degradation.

В настоящий момент конфликтная ситуация, сложившаяся в контексте основ и целей туризма и природоохраной деятельности, достигла своего пика. В то время как развитие туристического сектора сфокусировано в первую очередь на привлечении инвестиций, создание особо охраняемых природных территорий главным образом представляет собой реализацию мер, направленных на охрану и защиту уникальных природных комплексов и объектов. Многие виды туризма, включающие в себя экологический, познавательный, этнографический и прочие, все чаще реализуются на природоохранных территориях, что приводит к неизбежному росту антропогенного воздействия на участках разной степени уязвимости [1]. В первую очередь в зоне риска находятся ООПТ, обладающие транспортной доступностью и развитой туристической инфраструктурой.

Авачинский перевал располагается между Корякским и Авачинским вулканами, на южной границе природного парка «Налычево», внесенного в список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО 6 декабря 1996, и включает в себя памятник природы регионального значения «Экструзия «Верблюды» в Авачинской группе вулканов». Данная территория является местом произрастания порядка 350 видов растений и местом обитания около 50 видов животных, часть из которых представлена эндемичными, редкими и краснокнижными видами (*Taraxacum albescens* Dahlst, *Cypripedium yatabeanum* Makino, *Saussurea pseudo-tilesii* Lipsch и др.) [2], что делает ее уникальной в соответствии как с природоохранной, так и с туристической составляющей. Свободное посещение, возможность проезда на автотранспорте и доступное местоположение (45 километров по трассе от города Петропавловск-Камчатский и 29 километров от города Елизово) способствуют переходу территории

Авачинского перевала из класса естественных к зонам повышенного антропогенного воздействия. Данная модульная площадка была охарактеризована как находящаяся в состоянии экологического кризиса еще в 2020-м году [3], что свидетельствует об актуальности проведения мониторинговых мероприятий с целью отслеживания уровня нарушенности экосистем Авачинского перевала путем оценки качества растительного покрова и численности фоновых видов для дальнейшего отслеживания положительной или отрицательной динамики их роста.

В качестве эдификаторов для реализации цели исследования были выбраны следующие виды: черношапочный сурок, американский суслик, анадырская лисица, камчатский бурый медведь и фоновые виды альпийских растений, учет и наблюдения за которыми проводились в ходе летнего полевого сезона 2024-го года. Помимо полевых методов, для оценки качества растительного покрова в работе также используются методы дистанционного зондирования (ДЗЗ), позволяющие получить пространственные данные по распределению нормализованного вегетационного индекса (NDVI) путем обработки тематических снимков, полученных со спутника Landsat-8.

Основываясь на данных прошлых лет [3; 4], в процессе полевых исследований текущего года было отмечено сокращение количества семейств черношапочного сурка на северной экспозиции подножия Корякского вулкана, что в данном случае объясняется отлительно суровыми малоснежными условиями зимнего периода, которые привели к глубокому промерзанию грунта и гибели части особей. В то же время впервые за последние четыре года на Экструзии Верблюд было отмечено появление семейства, представленного как минимум тремя взрослыми особями. Численность американского суслика практически не изменилась, основным местом обитания остаются береговые участки сухих рек и ручьев-притоков. Также были отмечены следы проходящих особей камчатского бурого медведя (две взрослые особи и одна двухгодовалая) и обнаружена нора анадырской лисицы, к которой относится как минимум одна взрослая особь и два щенка.

Растительное сообщество Авачинского перевала на момент полевых исследований в основном было представлено такими видами, как пурпурный локовид, кедровый стланник, ива сетчатая, мытник мутовчатый и единичными участками произрастания мака альпийского, рододендрона крупнолистного и ахорифрагмы аянской. Основываясь на натуралистических наблюдениях, наиболее густой растительный покров отмечается на подножии Корякского вулкана, восточном участке экструзии Верблюд и в местах схождения талых вод.

Таблица 1

Значение нормализованного вегетационного индекса (NDVI)
в зависимости от типа определяемого объекта [5]

Тип объекта	Значение NDVI
Густая растительность	0.5 – 0.7
Разряженная растительность	0.2 – 0.5
Открытая почва	0 – 0.2
Снег/лед	-0.25 – 0
Вода	-1 – -0.25

Данные дистанционного зондирования (рисунок 1) подтверждают данные, полученные на основе натуралистических наблюдений. Наиболее устойчивый растительный покров наблюдается на склонах экструзии Верблюд, северной экспозиции подножия Корякского вулкана и в долине реки Сухая. NDVI находится в диапазоне значений от 0.4 до 0.8, что характеризует растительность как разряженную и густую соответственно (таблица 2). Однако в июне 2024-го года отмечается резкое снижение значений индекса на участке, прилегающем к кордону, вплоть до показателей, характерных для непокрытой растительностью территории (открытая почва).

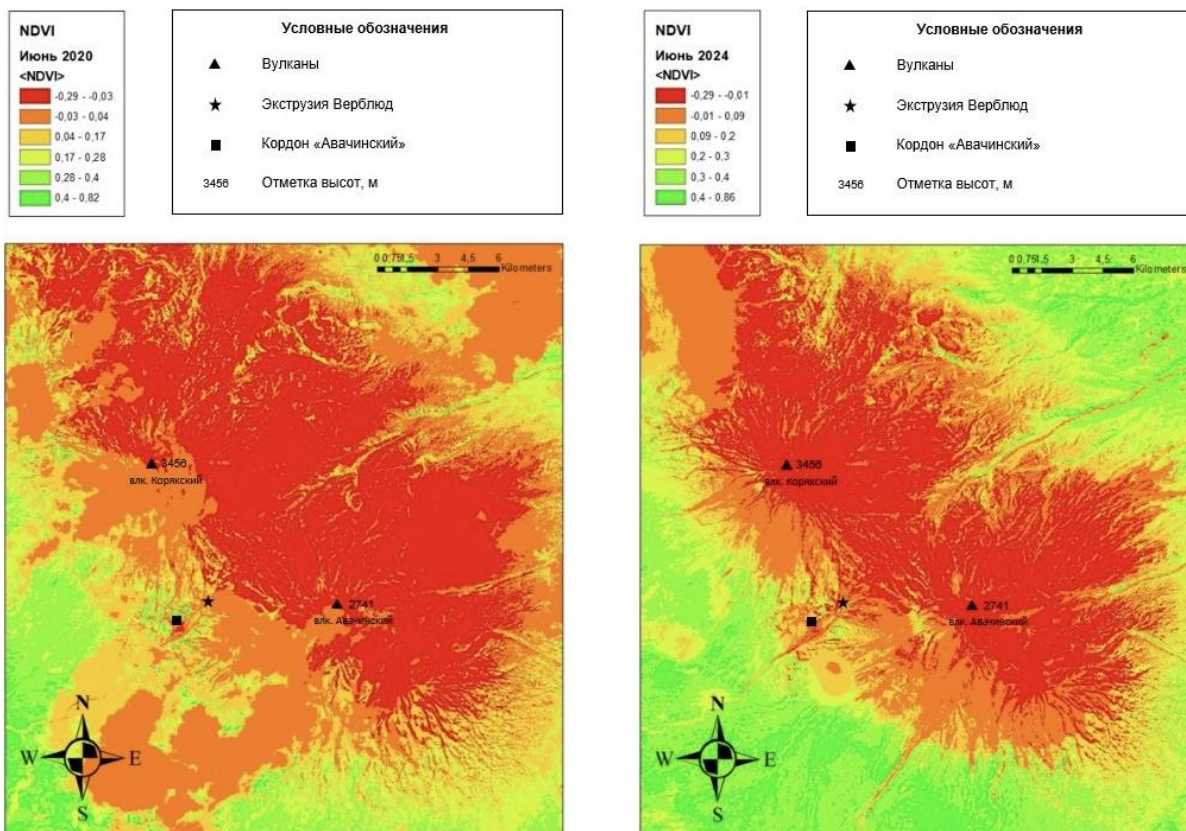


Рис. 1. Карта-схема распределения нормализованного вегетационного индекса в июне 2020-го и 2024-го года

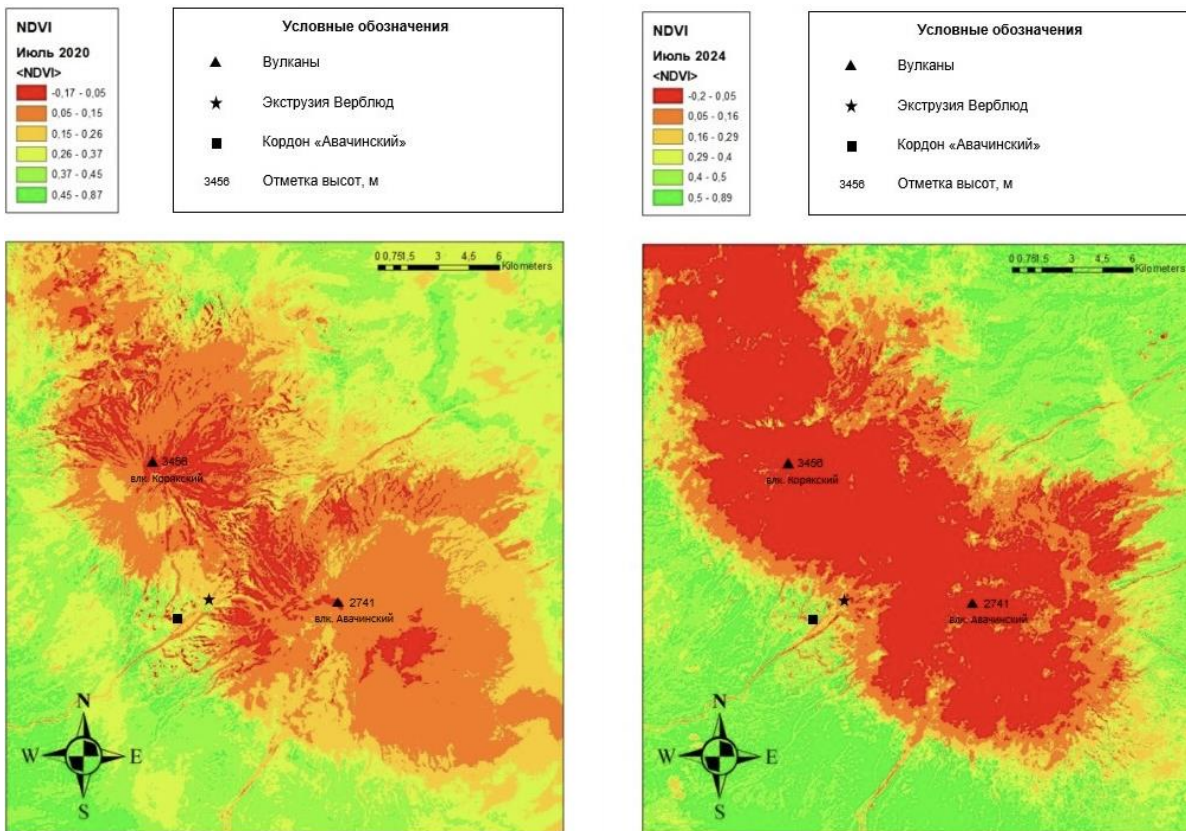


Рис. 2. Карта-схема распределения нормализованного вегетационного индекса в июле 2020-го и 2024-го года

Исходя из снимков, сделанных за июль 2020-го и 2024-го года (рисунок 2), наиболее густая растительность наблюдается исключительно на берегах реки Сухая, что не соответствует данным, полученным путем анализа снимков за июнь. Отличительным результатом является наибольшая контрастность, наблюдаемая между распределением NDVI в июле 2020-го и 2024-го года. На картосхеме наглядно продемонстрирована значительная деградация растительных покровов на склонах экструзии Верблюд и северной экспозиции подножия Корякского вулкана, нормализованный вегетационный индекс которых равен на данных участках 0.05–0.16 и характерен для открытой почвы.

Наблюдаемая стремительная деградация растительного покрова и сокращение численности такого средообразующего вида, как черношапочный сурок, в первую очередь связаны с увеличением туристического потока на данной территории и, как следствие, с усиленным строительством отраслевой инфраструктуры. Постоянное антропогенное воздействие, усиливающееся в пик туристического сезона (июнь–сентябрь), приводит к стремительному преобразованию и нарушению естественного функционирования экосистем Авачинского перевала, образовавшихся в результате первичных и вторичных сукцессий.

У большинства представителей фауны, характерных для данной местности, наблюдается стойкое нарушение поведения, выраженное в отсутствии избегания контакта с человеком. Слабо контролируемое антропогенное воздействие приводит к дезорганизации пищевых цепочек, во многом благодаря привлечению животных туристами посредством неестественной для них пищи. Данные экосистемы изначально характеризовались повышенной уязвимостью исходя из сложившихся естественных средоопределяющих факторов, таких как, суровые климатические и географические условия, повсеместно наблюдаемые на всей территории Камчатского полуострова. Свободный доступ и стремительно возрастающий туристический поток усиливает статус неустойчивости представленных природных комплексов и объектов.

По плану функционального зонирования природного парка «Налычево», территория Авачинского перевала относится к зоне рекреационного использования. Исходя из результатов исследования, для сохранения экосистем, обладающих повышенной уязвимостью, данный участок необходимо перевести в статус зоны особой охраны, либо вывести из состава природного парка Налычево, обладающего статусом объекта всемирного наследия Юнеско.

Список литературы

1. Галеева, Р. А. Влияние туризма на особо охраняемые природные территории / Р. А. Галеева, А. А. Ахметханова // Трансграничные регионы в условиях глобальных изменений: современные вызовы и перспективы развития: материалы II Международной научно-практической конференции, Горно-Алтайск, 26 ноября 2021 года / ответственные редакторы А. В. Шитов, О. И. Банникова, Е. В. Мердешева. – Горно-Алтайск: Библиотечно-издательский центр Горно-Алтайского государственного университета, 2021. – С. 260–262.
2. Красная книга Камчатского края: в 2 т. – [2-е изд.]. – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2018. – Т.2: Растения / отв. ред. О. А. Черныгина. – 388 с.
3. Ненашева, Е. М. Авачинский перевал как часть особо охраняемой природной территории в состоянии экологического кризиса / Е. М. Ненашева, Е. А. Карпов, С. К. Данилов // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Материалы XXI международной научной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения одного из организаторов современной гидробиологической науки на Камчатке, д.б.н. В.В. Ошуркова, Петропавловск-Камчатский, 18–19 ноября 2020 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2020. – С. 180–184.
4. Братков, В. В. Вегетационные индексы и их использование для картографирования горных ландшафтов Российского Кавказа / В. В. Братков, З. В. Атаев // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. – 2017. – № 1. – С. 3.
5. Карпов Е. А., Ненашева Е. М., Зыков В. В. Суслики *Spermophilus parvulus stejnegeri* (J. Allen, 1903) горных территорий природного парка «Налычево»: естественные и синантропные популяционные группировки // Особо охраняемые природные территории Камчатского края: опыт работы, проблемы управления и перспективы развития: доклады II региональной научно-практической конференции – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2017. – С. 129–132.

Научный руководитель: Широков Рой Сергеевич, к.г.н., доцент, Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия.

Оценка применимости озерного сапропеля для улучшения экологической обстановки в горнодобывающем районе

Аннотация. В связи с увеличением объемов добычи и переработки сульфидных медно-цинковых руд актуальность приобрела проблема загрязнения тяжелыми металлами водных объектов и почв вблизи горнопромышленных предприятий. Целью работы является выявление наиболее уязвимого компонента окружающей среды в зоне воздействия горнопромышленного предприятия, расположенного в республике Башкортостан, и поиск природных материалов, способных с наибольшей экономической эффективностью нивелировать загрязнение. В ходе анализа проб установлено, что наибольшему ущербу подвержены водные объекты, и наилучшим способом очистки сточных вод является использование озерного сапропеля в качестве сорбента тяжелых металлов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение, очистка сточных вод, сапропель, сорбент.

Nikolay M. Yakovlev *

Yuriy D. Smirnov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,

St. Petersburg, Russia

* NYakovlev1@yandex.ru

Evaluation of the applicability of lake sapropel for improving the environmental situation in a mining area

Abstract. Due to the increase in the volume of mining and processing of sulphide copper-zinc ores, the problem of heavy metal pollution of water bodies and soils near mining enterprises has become relevant. The aim of the work is to identify the most vulnerable component of the environment in the impact zone of a mining enterprise located in the Republic of Bashkortostan and to search for natural materials that can neutralize pollution with the greatest economic efficiency. During the analysis of samples, it was found that water bodies are subject to the greatest damage, and the best way to purify wastewater is to use lake sapropel as a sorbent of heavy metals.

Keywords: heavy metals, pollution, wastewater treatment, sapropel, sorbent.

Основу сырьевой базы цветных металлов республики Башкортостан составляют медно-колчеданные месторождения, характеризующиеся высоким содержанием меди и цинка. Кроме основных полезных компонентов, в них содержатся свинец, золото, селен, кадмий, селен и другие металлы [1]. В период с 2021 по 2022 г добыча меди в Республике Башкортостан выросла с 56,7 до 63,7 тыс. т (на 12,3 %), а добыча цинка – с 53,4 до 61,6 тыс. т (на 15,4 %) [2]. Побочным негативным эффектом возрастающих темпов разработки медно-колчеданных месторождений является загрязнение водных объектов и почв тяжелыми металлами, что приводит к утрате их хозяйственной ценности. В то же время, некоторые природные материалы способны эффективно сорбировать тяжелые металлы, что позволяет использовать их для устранения или предотвращения загрязнения компонентов окружающей среды. Известно, что озерный сапропель обладает сорбционными свойствами по отношению к тяжелым металлам, а также содержит питательные вещества для растений. На его основе разрабатывались эффективные сорбенты для очистки сточных вод [3, 4] и рекультиванты [5, 6]. На территории республики Башкортостан имеется

2720 озер [7], многие из которых богаты сапропелем. Это делает данный природный материал наиболее перспективным для устранения загрязнения тяжелыми металлами в связи с относительной дешевизной и минимальными транспортными издержками.

В качестве объекта исследования было выбрано одно из горнопромышленных предприятий республики Башкортостан, специализирующееся на добыче и переработке сульфидных медно-цинковых руд. На расстоянии 1,5 км от промышленной площадки расположены два крупных озера. В непосредственной близости от промышленной площадки находятся населенные пункты. Предприятие имеет замкнутую систему водоснабжения, однако излишние объемы воды из технологического водохранилища сбрасываются в реку рыбохозяйственного назначения I категории. Основными источниками негативного воздействия на почвенный покров являются отвалы, пляжная зона хвостохранилища и карьерная выемка, где ранее проводились буровзрывные работы. Загрязнение почвенного покрова происходит в результате осаждения пыли. Основными источниками негативного воздействия на поверхностные воды являются технологическое водохранилище и хвостохранилище предприятия.

Для оценки состояния почвенного покрова вокруг промышленной площадки были отобраны по две пробы из четырех точек, а также две фоновые пробы из точки, расположенной в 3 км от границы промышленной площадки с наветренной стороны. Отбор проб проводился в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02–84. Всего было отобрано 10 проб почв. Количественный анализ проб на содержание тяжелых металлов был осуществлен на базе НЦ «Экосистема» методом рентгенофлуоресцентной спектromетрии в соответствии с ГОСТ 33850–2016 с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра «Niton XLt 592». Результаты анализа показали значительные превышения содержания *Pb*, *As*, *Zn* и *Cu* относительно фоновых значений. Наибольшие превышения концентраций тяжелых металлов фиксировались в почвенном горизонте 0–5 см.

Для оценки состояния водных ресурсов был осуществлен отбор проб воды из ближайшего к промышленной площадке озера, городского пруда, водоотводного канала хвостохранилища и технологического водохранилища предприятия. Всего было отобрано 12 проб воды. Отбор и консервация проб воды проводились в соответствии с ГОСТ Р 59024–2020. Количественный анализ проб воды на содержание тяжелых металлов проводился на базе НЦ «Экосистема» методом атомно-эмиссионной спектromетрии с индуктивно связанной плазмой в соответствии с методикой М–02–1109–08 при помощи атомно-эмиссионного спектрометра «Shimadzu ICPE-9000». Результаты анализа показали значительные превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения в воде технологического водохранилища по пяти элементам: *Cd*, *Cu*, *Mn*, *Sr* и *Zn*.

Из ближайшего к предприятию озера была взята проба сапропеля. Далее, она была высушена до воздушно-сухого состояния, доставлена в НЦ «Экосистема» и проанализирована аналогично пробам почвы. Анализ элементного состава сапропеля показал значительные содержания в нем *Sr*, *Pb*, *As*, *Zn*, *Cu* и *Ni*. Вероятнее всего, данные металлы осаждались на дно озера с пылью за многолетний период открытой разработки месторождения.

Согласно результатам анализа, наиболее существенное негативное воздействие предприятие оказывает на водные ресурсы. Основным источником их загрязнения является технологическое водохранилище. Также, известно, что предприятие прекратило эксплуатацию хвостохранилища. В данный момент оно использует хвосты и отвальные породы для производства закладочных материалов. Следовательно, основные источники негативного воздействия на почвенный покров со временем будут устранены. В этой связи было решено проводить дальнейшие исследования на тему использования сапропеля в качестве сорбента тяжелых металлов для очистки сточных вод. До конца 2024 года планируется провести ряд экспериментов, нацеленных на поиск оптимального состава сорбента тяжелых металлов на основе сапропеля, а также поиск наиболее оптимального

способа регенерации сорбента. По результатам работы планируется подготовка патента на рецептуру сорбента тяжелых металлов на основе сапропеля.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Список литературы

1. Республика Башкортостан. Минерально-сырьевые ресурсы // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [сайт]. – URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/regions/respublika_bashkortostan/ (дата обращения 08.10.2024).
2. Характеристика минерально-сырьевой базы Республики Башкортостан // ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Приволжскому федеральному округу» : [сайт]. – URL: <https://tfipfo.ru/index.php/online/inf-resur/min-syr-baza/min-syr-baza-bash> (дата обращения 08.10.2024).
3. Хлынина Н. Г. Использование сапропеля в качестве сорбента для очистки сточных вод : автореф. дис. к.т.н. : 06.01.02 / Хлынина Наталья Геннадьевна ; ФГОУ ВПО «Дальневосточный государственный аграрный университет». – Волгоград, 2008. – 24 с.
4. Коваленко Т. А. Исследование физико-химических закономерностей сорбции органических веществ и ионов металлов на углеродминеральных сорбентах, полученных из сапропелей : автореф. дис. к.х.н. : 02.00.04 / Коваленко Татьяна Александровна ; ФГОУ ВПО «Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского». – Тюмень, 2010. – 23 с.
5. Патент № 2717653 Российская Федерация, МПК В09С 1/00 (2006.01), А01С 14/00 (2006.01), Е01С 7/36 (2006.01), Е02Д 17/20 (2006.01). Способ рекультивации на склонах в условиях Крайнего Севера : № 2019124680 : заявл. 02.08.2019 : опубл. 24.03.2020 / Пыстина Н.Б. и др. ; заявитель ПАО «Газпром» // Яндекс Патенты : [сайт]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2717653C1_20200324 (дата обращения: 08.10.2024).
6. Патент № 2695881 Российская Федерация, МПК В09С 1/10 (2006.01), С05F 7/00 (2006.01), А01В 79/00 (2006.01). Рекультивант для очистки почв и грунтов от загрязнений нефтью, нефтепродуктами, полициклическими ароматическими углеводородами, способ его получения и применения : № 2018141560 : заявл. 11.25.2018 : опубл. 29.07.2019 / Хадеева В.В., Янкевич М.И. ; заявитель Хадеева В. В. // Яндекс Патенты : [сайт]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2695881C1_20190729 (дата обращения: 08.10.2024).
7. Республика Башкортостан. Водные ресурсы // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [сайт]. – URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/regions/respublika_bashkortostan/ (дата обращения 08.10.2024).

Секция 8.
ПРИКЛАДНАЯ ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА, ГЕОЛОГИЯ,
ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

УДК 553.98

Востриков Никита Николаевич*

Яшмолкин Арслан Маратович

Логиннов Арсений Владимирович

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

Санкт-Петербург, Россия

** nikitavostrickoff@yandex.ru*

**Уточнение геологического строения и перспектив нефтегазоносности
продуктивных нижне-среднемиоценовых отложений северо-западной части
листа М-55 Охотоморской нефтегазоносной провинции
с использованием алгоритмов машинного обучения**

Аннотация. Первые нефтяные месторождения на шельфе Сахалина были открыты в 70-х годах прошлого века. Сегодня наблюдается повышенный интерес к Дальнему Востоку, обусловленный стратегической политикой развития Российской Федерации и важностью Сахалинских проектов. Увеличение общей геологической информированности о строении Сахалинского шельфа путем использования современных технологий комплексного анализа геолого-геофизических данных способствует повышению достоверности оценок перспектив нефтегазоносности в регионе. Исследование проведено с целью уточнения геологического строения и перспектив нефтегазоносности нижне-среднемиоценовых продуктивных отложений северо-западной части листа М-55. Проведена интерпретация и дообработка геолого-геофизических данных с применением алгоритмов машинного обучения и современных программных комплексов, предназначенных для моделирования месторождений нефти и газа: сейсмический модуль Geoplat Pro-S, Petrel и др.

Ключевые слова: Geoplat, Petrel, Охотоморская нефтегазоносная провинция, Сахалин, шельф, нефть и газ, геология, машинное обучение.

Nikita N. Vostrikov *

Arslan M. Yashmolkin

Arseniy V. Loginov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

** nikitavostrickoff@yandex.ru*

**Refinement of the geological structure and prospects
for oil and gas potential of the productive Lower and Middle Miocene deposits
in the northwestern part of sheet M-55 of the Okhotsk oil and gas province
using machine learning algorithms**

Abstract. The first oil fields on the Sakhalin shelf were discovered in the 1970s. Today, there is increased interest in the Far East, driven by the strategic development policy of the Russian Federation and the importance of the Sakhalin projects. Enhancing overall geological knowledge of the structure of the Sakhalin shelf through the use of modern technologies for comprehensive analysis of geological and geophysical data contributes to increasing the reliability of assessments regarding the oil and gas potential in the region. The study was conducted with the aim of refining the geological structure and oil and gas prospects of the Lower and Middle Miocene productive deposits in the northwestern part of sheet M-55. An interpretation and reprocessing of geological and geophysical data was carried out using machine learning algorithms and modern software packages designed for modeling oil and gas fields, such as the seismic module Geoplat Pro-S, Petrel, and others.

Keywords: Geoplat, Petrel, Okhotsk oil and gas province, Sakhalin, offshore, oil and gas, geology, machine learning.

Первые нефтяные месторождения на шельфе Сахалина были открыты в 70-х годах прошлого века. Сегодня наблюдается повышенный интерес к Дальнему Востоку, обусловленный стратегической политикой развития Российской Федерации и важностью Сахалинских проектов. Увеличение общей геологической информированности о строении Сахалинского шельфа путем использования современных технологий комплексного анализа геолого-геофизических данных способствует повышению достоверности оценок перспектив нефтегазоносности в регионе [5]. Характерными особенностями региона являются неоднородность геологического строения и тектонически проявленная в виде различных по морфологии и кинематике структура разрывных нарушений [3]. Исследование проведено с целью уточнения геологического строения и перспектив нефтегазоносности ниже-среднемиоценовых продуктивных отложений участка исследования путем улучшения качества сейсмических данных и проведения структурной интерпретации на основе машинного обучения с дообучением.

Исходными материалами в работе служат сейсмических данные 2D профилей и площадных съемок, увязанные со скважинными данными в результате 1D моделирования в пределах Киринского лицензионного участка [1, 2, 4].

Ввиду неоднородности качества сейсмических данных вследствие различных причин (различные оборудования, годы проведения, методы обработки и прочее) проведение структурной интерпретации в ряде случаев существенно затруднено. Для повышения степени однозначности проведена дообработка исходных данных с использованием нейронных сетей в Geoplat Pro-S в модуле ИИ интерпретации. В результате в работе удалось восстановить зоны потери корреляции, повысить вертикальную разрешенность, увеличить соотношение сигнал/помеха, увеличить частотный спектр и обозначить наличие разрывных нарушений.

Ввиду того, что участок исследования находится в области широкого распространения региональных сдвиговых дислокаций, здесь широко проявлены типичные сдвиговые структуры разрывных нарушений типа «цветка», ручная интерпретация которых существенно затруднена ввиду их многочисленности, различия по протяженности и, в ряде случаев, присутствия малоамплитудных смещений.

Для автоматического выделения нарушений такого типа была использована нейронная сеть, обученная на синтетических данных. Был синтезирован куб вероятности разрывных нарушений, анализируя который проведен подбор параметров куба траекторий и его последующий синтез

Результат использования нейронной сети можно назвать удовлетворительным. Однако наблюдаются ложно выделяемые разломы, особенно в верхней части разреза и фундаменте. Построение поверхностей разломов в данном случае потребовало бы существенной «ручной» корректировки, что не является оптимальным решением с учетом сложной тектонической картины исследуемого участка

Для повышения качества автоматического выделения нарушений такого типа было проведено дообучение нейронной сети. Исходными данными являлись качественно и предварительно выделенные стики разломов в пределах Киринского блока. Размеченные стики необходимы для обучения и валидации нейронной сети.

Для последующих построений были выбраны несколько значений весов из области оптимальных значений. Далее проводилось сравнение получаемых результатов, на основании которого синтезированы кубы вероятностей разломов и траекторий

В результате удалось сократить количество ложных нарушений в верхней и нижней частях разреза и оставить «полезную» часть сведений о разломах (рис. 1).

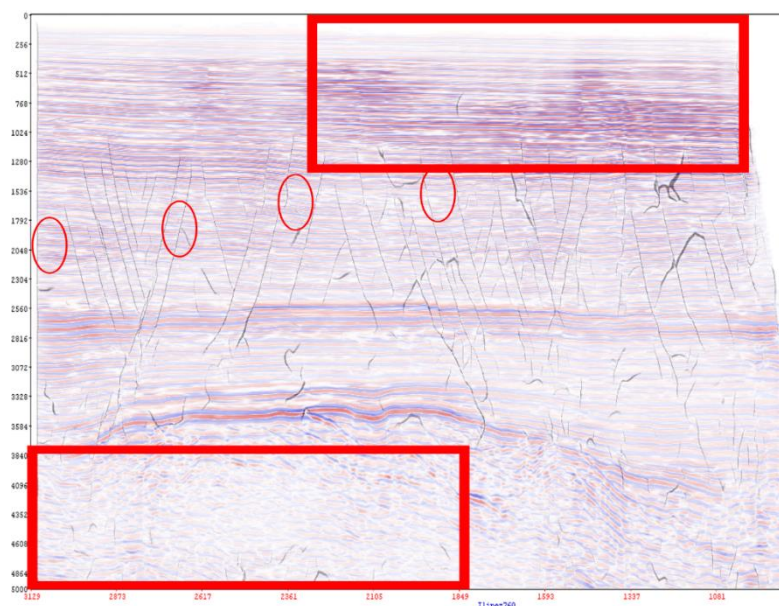


Рис.1. Результат построения куба вероятности (траекторий) после дообучения [Востриков Н. Н.]

Проведенная дообработка исходных данных 2D профилей и 3D кубов, с использованием нейронных сетей, заранее обученных на синтетических данных, существенно улучшила качество материалов и позволила создать более точную структурную основу. Существенным достоинством применяемых алгоритмов является сохранение динамических характеристик, что позволяет использовать дообработанные материалы при динамическом анализе.

Результаты интерпретации разрывных нарушений с использованием алгоритмов машинного обучения в дальнейшем использованы как дополнительные при проведении структурной интерпретации сейсмических данных на участке исследования. Это позволило существенно упростить процесс ручной пикировки, сделать результаты более независимыми от, во многом, субъективного взгляда интерпретатора, что положительно сказывается на достоверности результатов структурной интерпретации и, как следствие, способствует уточнению геологического строения и перспектив нефтегазоносности.

Список литературы

1. Rudnitskaya E. Geological Structure Features of the South-Kirinsky Anticline Uplift (Northeast Sakhalin Shelf). *Geology of Oil and Gas*. 2013;6:29-37.
2. Rybalko V., Gogonenkov G., Parasyna V. Formation Conditions of the South Kirinskoye Field on the Shelf of Sakhalin Island. *Geology of Oil and Gas*. 2014;(4):42-52
3. Shegay V, Tolstikov A. North-eastern Sakhalin Shelf: features of structural and tectonic evolution in view of new seismic data. *Oil and gas geology = Geologiya nefti i gaza*. 2022;(4):39-51. 10.31087/0016-7894-2022-4-39-51.
4. Shegay V, Tolstikov A. Structural features of Lower and Middle Miocene pay interval (Daginsky Horizon) in the area of the Kirinsky Block, the Sakhalin Shelf. *Oil and gas geology = Geologiya nefti i gaza*. 2022;(3):67-83. 10.31087/0016-7894-2022-3-67-83
5. Zakrevskiy K., Popov V. The history of development of 3d geology modeling as a method for studying oil and gas reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2021;332(5):89–100.

Научный руководитель: Нефедов Юрий Викторович, к.г.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Дашко Регина Эдуардовна
Колосова Дарья Леонидовна*

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия
* daryakolmot@yandex.ru

Применение ядерно-магнитного резонанса при совершенствовании гипотезы фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов и анализе длительной устойчивости сооружений

Аннотация. Проведен анализ возможности использования теории фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов, служащих основанием, для оценки устойчивости наземных сооружений различного назначения. Результаты экспериментальных исследований структуры поровой воды в глинистых грунтах, проводимые на релаксометрах ЭХО-4 и ЭХО-12 в различные годы, свидетельствуют о том, что поровая вода даже в грунтах текучей консистенции имеет структуру, которая инертна по отношению к действию внешнего давления. Следовательно, такие грунты должны рассматриваться как квазиоднофазная среда с использованием реологических принципов ее деформационного поведения.

Ключевые слова: глинистые грунты, структура поровой воды, ядерно-магнитный резонанс, длительная устойчивость сооружений.

Regina E. Dashko
Darya L. Kolosova*

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia
* daryakolmot@yandex.ru

Application of nuclear magnetic resonance in improving the hypothesis of filtration consolidation of water-saturated clayey soils and analysis of long-term stability of structures

Abstract. The possibility of using the theory of filtration consolidation of water-saturated clayey soils serving as a foundation for assessing the stability of structures for various purposes has been analyzed. The results of experimental studies of the structure of pore water in clay soils, conducted on relaxometers ECHO-4 and ECHO-12 in different years, indicate that pore water even in soils of liquid consistency has a structure that is inert with respect to the action of external pressure. Consequently, such soils should be considered as a quasi-one-phase using the rheological principles of its deformation behavior.

Keywords: Clay soils, structure of pore water, nuclear magnetic resonance, long-term stability of structures.

Введение. Прогнозирование длительной устойчивости сооружений на водонасыщенных глинистых грунтах в настоящее время проводится на основе гипотезы фильтрационной консолидации, предложенной еще в 1925 г. К. Терцаги [6]. В ее математические основы положены следующие положения:

- 1) одномерная задача уплотнения водонасыщенных глинистых при отсутствии в них структурных связей;
- 2) действие закона Дарси при наличии гидравлически-непрерывной поровой воды в условиях ее двустороннего оттока;
- 4) в момент времени $t = 0$ приложения нагрузки все давление ($p = p_2 - p_1$) передается на поровую воду: $H_0 = \frac{p_2 - p_1}{\gamma_w}$, при $t \neq 0$ происходит перераспределение давления между поровой водой p_p (поровое давление) и скелетом грунта $p_{ск}$ (эффективное давление).

За прошедшие практически сто лет с момента публикации работы К. Терцаги произошёл коренной пересмотр позиций в отношении природы прочности и деформационной способности глинистых грунтов. Также были получены принципиально новые знания о структуре воды и ее изменении под действием различных физических полей.

В настоящее время природа прочности связывается с формированием структурных связей в процессе литификации глинистых грунтов и действия техногенных процессов. Известно, что структурные связи существуют в глинистых грунтах даже малой степени литификации, которые обеспечивают возможность возникновения и развития поровых давлений только после их разрушения [1].

Однако достижения в области физики и физико-химии в отношении особого состояния и свойств поровой воды в тонкодисперсных грунтах до настоящего времени не учитываются при использовании основных положений теории фильтрационной консолидации, широкое применение которой предопределяет уровень безопасности строительства и эксплуатации наземных сооружений на водонасыщенных глинистых грунтах.

Встает вопрос, насколько изменяется инертность поровой воды с измененной структурой к восприятию ею внешнего давления и, соответственно, насколько правомочно применение теории фильтрационной консолидации при выполнении расчетов длительной устойчивости сооружений различного назначения. В практике проектирования сооружений, возведенных на водонасыщенных глинистых грунтах обязательным является определение допускаемого давления (p_1), которое носит название расчетное сопротивление (R) грунтов несущего горизонта. Вывод R берет свое начало из формулы проф. Н. П. Пузыревского:

$$p_1 = \frac{\pi \left(\gamma' h_\phi + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi} \right)}{c \operatorname{tg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma' h_\phi, \quad (1)$$

где h_ϕ – глубина заложения фундамента, γ' – удельный вес грунта выше отметки дна котлована, φ , c – параметры сопротивления сдвигу грунта.

Стоит отметить, что основными показателями, влияющими на величину p_1 являются параметры сопротивления сдвигу грунта – φ – угол внутреннего трения, c – сцепление. В настоящее время в практике проведения экспериментальных лабораторных исследований c и φ определяются по схемам, соответствующим протеканию фильтрационной консолидации – консолидировано-дренированным (КД) схемам испытаний при двустороннем оттоке воды из образца без возможности бокового расширения.

История и современное состояние изучения трансформации структуры воды. Первые исследования структуры воды при ее взаимодействии с твердой поверхностью кварцевых подложек начались с 1960х г., которые были проведены специалистами в области физики [2]. Однако следует отметить, что активность поверхности кварца несравнимо мала по сравнению с поверхностью глинистых частиц. Исследования на пластинках слюды, выполненные научной школой Мецика М.С. (1970-е г.) дали возможность установить глубокие преобразования структуры воды, свойства которой приближаются к свойствам твердого тела [4].

Согласно Г.И. Дистлеру все активные центры на поверхности металлических и неметаллических сред можно разделить на 2 группы: 1) эпитаксиальные – изменяющие плотность воды в сторону ее увеличения; 2) поляризующие – дальнodelствующиe, оста-навливающие трансляционное движение молекул воды на расстоянии до 10 мкм, тем самым превращая воду в твердообразное состояние [3].

Дальнейшие исследования структуры поровой воды в глинистых грунтах проводились Р.Э. Дашко на релаксметре ЭХО-4 (метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), используемый для определения строения жидких и твердых веществ путем регистрации переходов между магнитными энергетическими уровнями атомных ядер, вызываемых

радиочастотным (РЧ) излучением [5]), с помощью которого были установлены закономерности изменения структуры поровой воды в зависимости от:

- 1) содержания глинистой фракции (M_c) при неизменности ее минерального состава (группа гидрослюды);
- 2) изменения влажности грунтов (W) как показателя их состояния с использованием параметров W_L W_R , которые применяются в практике оценки глинистых грунтов;
- 3) влияния активности минерального состава глинистой фракции – группы монтмориллонита (бентонит) и гидрослюды;
- 4) варьирования минерализации поровых вод различного химического состава.

Все определения изменения структуры воды в глинистых грунтах характеризовались показателем время спин-решетчатой релаксации (T_1), который представляет время релаксации молекул воды в постоянном магнитном поле, при котором достигается энергетическое равновесие в системе спин-решетка.

Известно, что время спин-решетчатой релаксации T_1 полностью дегазированной воды составляет примерно 3,5 с, а величина T_1 дистиллята несколько ниже и равна 2,5 с. Проведенными исследованиями было установлено, что свободная вода в глинистых грунтах полностью отсутствует даже при значениях W , превышающих W_L , так как усредненный параметр T_1 составляет $n \cdot 10^{-3}$ сек по сравнению с объемной водой ($T_1 = 2,5$ сек). При этом наибольшее снижение T_1 наблюдается при наименьших влажностях (при постоянстве минерального состава) и при наличии более активных глинистых минералов группы монтмориллонита (бентонита) даже при весьма высоких влажностях $W > 70$ %.

Исследования структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах были продолжены в 2023–24 гг. на современных установках ЯМР (релаксометр ЭХО-12, ^1H частота составляет 20 МГц, сконструирован на кафедре радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета). Времена спин-решетчатой релаксации измерялись, используя стандартную последовательность импульсов инверсии-восстановления. Результаты выполненных экспериментальных исследований позволили оценить изменение структуры поровой воды в водонасыщенных глинистых грунтах послойно по мере удаления от активных центров твердых частиц.

Серия исследований была выполнена для изучения влияния различного содержания глинистой фракции в грунтах (от 16 до 40 %), имеющих постоянное физическое состояние, которое отвечает условно текучему, согласно нормативным положениям в механике грунтов и инженерной геологии. Стоит отметить, что все исследованные грунты имели один и тот же минеральный состав (группа гидрослюды).

Общая тенденция изменения T_1 по мере роста глинистой фракции, определяющей наибольшее число активных центров в образце грунта, прослеживается в снижении максимальных величин T_1 , что безусловно связано с сокращением размера пор и, соответственно, наибольшего влияния активных центров тонкодисперсных частиц на структурированность поровой воды. Основной вывод, согласно результатам проведенных исследований – отсутствие объемной воды в порах водонасыщенных глинистых грунтов в их наиболее неустойчивом текучем состоянии. Стоит отметить, что даже максимальное полученное значение времени спин-решетчатой релаксации в *центральной* части поры $T_{1C} = 17,62$ мс более чем на 2 порядка ниже значения T_1 объемной воды (2,5 с).

Сопоставление результатов современных исследований структуры поровой воды на установке ЭХО-12 с ранее полученными закономерностями (ЭХО-4) дает возможность убедиться в их численной идентичности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что поровая вода инертна по отношению к действию давлений и водонасыщенные глинистые грунты в основании сооружений должны рассматриваться как квазиоднофазная среда с использованием реологических позиций. Параметры сопротивления сдвигу φ и c , необходимые для определения

расчетного сопротивления, должны быть получены в условиях возможности бокового расширения грунтов при неизменности их физического состояния.

Список литературы

1. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений / Р. Э. Дашко. – С-Пб: Институт «Геореконструкция», 2015. – 386 с.
2. Дерягин, Б. В., Чураев, Н. В. Новые свойства жидкостей / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М.: Наука, 1971.
3. Дистлер, Г. И., Кобзарева, С. А. Дальнодействие активных центров кристаллических поверхностей / Г. И. Дистлер, С. А. Кобзарева // Дальнодействие активных центров кристаллических поверхностей. Доклады Академии наук. – 1967. – Т. 172. – № 5. – С. 1069–1071.
4. Мецик, М. С. Свойства тонких пленок между пластинками слюды / М. С. Мецик // Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах: Сборник докл. IV конференции по поверхностным силам. – М., Наука, 1979. – С. 189.
5. Jacobsen N. E. NMR Data Interpretation Explained: Understanding 1D and 2D NMR Spectra of Organic Compounds and Natural Products / N.E. Jacobsen. – Hoboken, New Jersey: Wiley. 2016.
6. Terzaghi, K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage / K. Terzaghi. – Wien: Franz Deuticke, 1926.

Научный руководитель: Дашко Регина Эдуардовна, д.г.-м.н., профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Оценка результатов определения пористости пород-коллекторов лабораторным методом ядерного-магнитного резонанса и ядерного-магнитного каротажа скважин

Аннотация. В настоящей работе проведены лабораторные исследования по определению пористости образцов терригенного и карбонатного коллекторов с месторождений Западно-Сибирской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций методами ядерного-магнитного резонанса, гидростатического взвешивания и лазерно-ультразвуковой структуроскопии (ЛУС). На релаксметре GeoSpec+ 2/75 был определен коэффициент полной пористости, методом ЛУС верифицированы результаты, найденные значения при этом отличаются не более чем на 0,5 %. Проведен сравнительный анализ результатов лабораторных и геофизических исследований скважин, R^2 составил от 0,674 до 0,713, что демонстрирует высокую сходимость.

Ключевые слова: ядерно-магнитный резонанс, пористость, коллектор, поперечное время релаксации, каротаж.

Iaroslav O. Zalevskii

NUST MISIS, Russia, Moscow

yzalevskii@gmail.com

Evaluation of results of determination the porosity of reservoir rocks by nuclear magnetic resonance and nuclear magnetic resonance well logging

Abstract. The paper describes a laboratory study of determining the porosity of carbonate and terrigenous rock samples from an oil and gas field of the Timan-Pechora and West Siberia basin provinces. The total porosity of the samples was estimated by nuclear-magnetic resonance, hydrostatic weighting, and laser-ultrasound spectroscopy (LUS). A GeoSpec+ 2/75 analyzer was used to measure the total porosity, and then by LUS method results were verified, the difference between the two methods is no more than 0,5 %. The comparative analysis of results by laboratory study and well logging was provided, R^2 is from 0,674 to 0,713, demonstrating a good convergence.

Keywords: Nuclear-magnetic resonance, porosity, reservoir rock, transverse relaxation time, well logging.

Актуальность исследования. Значительная часть остаточных запасов месторождений углеводородов приурочена к породам, имеющим сложное строение порового пространства. Это могут быть коллекторы трещинно-каверново-порового типа, обладающие двойной пористостью или низкопроницаемые породы. Возможность учета особенностей строения, параметров динамической пористости, процессов вторичных преобразований с целью обеспечения максимальной эффективности разработки таких объектов делает детальное изучение коллектора, его характеристик и свойств, приоритетным направлением.

Одним из методов, который позволяет определять фильтрационно-емкостные свойства как при геофизических исследованиях скважин (ГИС), так и в лабораторных условиях, в том числе для калибровки, является метод ядерного-магнитного резонанса.

Методы исследования. В настоящей работе проведены лабораторные исследования по определению пористости образцов терригенного и карбонатного коллекторов с месторождений Западно-Сибирской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций методами ядерного-магнитного резонанса, гидростатического взвешивания и лазерно-ультразвуковой структуроскопии. При этом предварительно проводилась экстракция нефти с последующей сушкой для удаления остатков флюида.

Оценка структуры и размеров пор, выходящих на поверхность, перед проведением дальнейших экспериментов была выполнена на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) ThermoScientific Quattro S (рисунок 1).

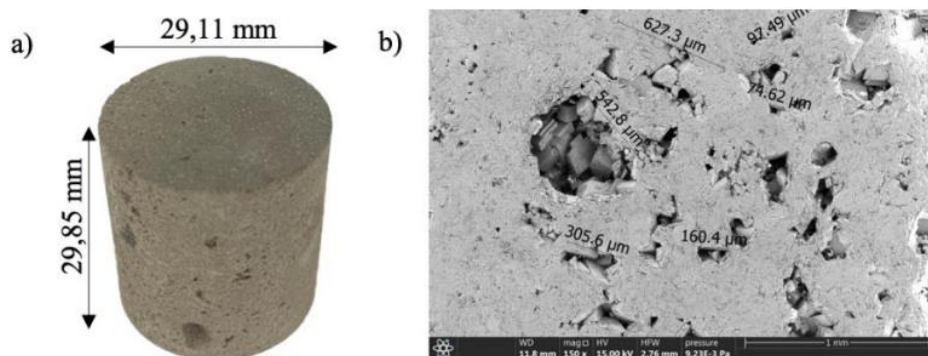


Рис. 1. Рассматриваемый образец: (а) Фото образца, (б) оптическое изображение, полученное на СЭМ, поверхности образца.

Для определения коэффициента пористости методом ядерного-магнитного резонанса (ЯМР) использовался релаксметр GeoSpec⁺ 2/75, для чего применялась методика [1], базирующаяся на том факте, что после выключения магнитных полей происходит релаксация макроскопической намагниченности жидкости, насыщающей поры образца.

Снятие релаксационной кривой и ее аппроксимация позволяют рассчитать время релаксации, определяющее характерные размеры пор и их долю по амплитуде сигнала.

По рассматриваемым скважинам также были получены данные результатов ГИС методом ядерного-магнитного каротажа (ЯМК), после чего на каротажные кривые были нанесены результаты лабораторных исследований и проведено сопоставление (рисунок 2).

Результаты исследования. При определении полной пористости методом ЯМР исследовалась зависимость значений долевой пористости (сплошная кривая на рисунке 2) и суммарной (штриховая линия на рисунке 2) от времени поперечной релаксации T_2 . Поскольку характерный размер пор прямо пропорционален T_2 , то по мере возрастания времени релаксации в регистрируемый сигнал дают вклад поры с большими характерными размерами r [2]. Так, микропорам с размерами 1–10 мкм соответствуют времена менее 1 мс, для 10–100 мкм время лежит в интервале 1–10 мс, для 0,1–1 мм составляет 10–100 мс.

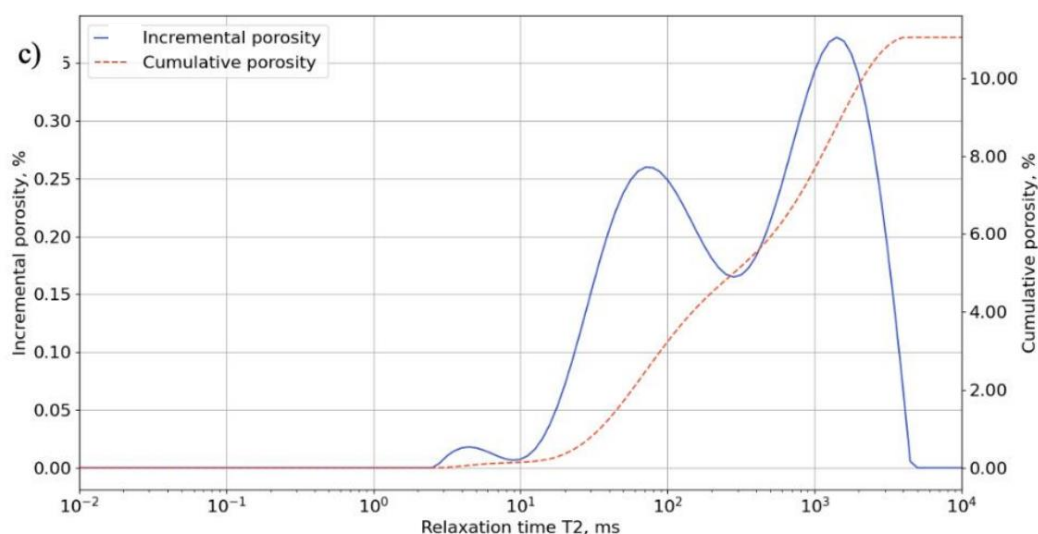


Рис. 2. Зависимость пористости образца от времени поперечной релаксации ЯМР

Для верификации, найденной методом ЯМР полной пористости на части образцов, было проведено лазерно-ультразвуковое сканирование. На образцах в нескольких точках измерялась скорость продольных волн и по формуле (1) рассчитывалось значение полной пористости. [3]

$$P = \left(1 - \left(\frac{V_l}{V_{l0}}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где V_l – измеренная скорость распространения продольной ультразвуковой волны в образце, м/с; V_{l0} – скорость в идеальном материале без пор, рассчитанная по известным минеральному составу и коэффициентам матрицы жесткости для каждого минерала, м/с. Значения пористости, найденные лазерно-ультразвуковой структуроскопией, отличаются от результатов ЯМР не более чем на 0,5 %.

После чего по всем скважинам, где проводился отбор образцов, была выполнена обработка результатов ядерно-магнитного каротажа и получены зависимости долевой и суммарной пористости от времени поперечной релаксации и проведено сопоставление для одного из месторождений, которое представлено на рисунке 3 [4].

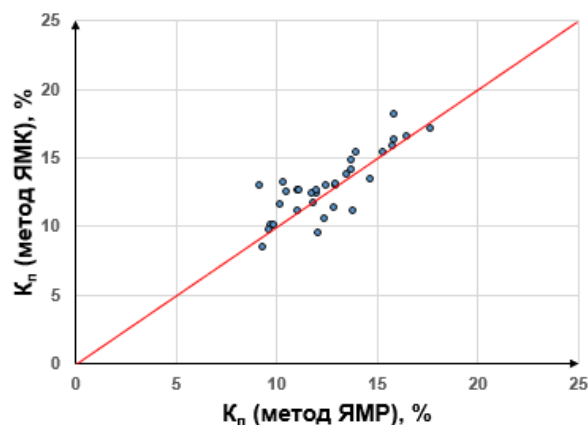


Рис. 3. График зависимости коэффициента пористости (ЯМК) от коэффициента пористости (метод ЯМР)

Выводы. В работе использовались три лабораторных метода: гидростатическое взвешивание; ЯМР; лазерно-ультразвуковая структуроскопия, а также геофизический метод исследования скважин ЯМК. Методом ЛУС верифицированы результаты определения пористости, найденные значения отличаются не более чем на 0,5 %. Проведен сравнительный анализ результатов лабораторных и геофизических исследований скважин, R^2 составил от 0,674 до 0,713, что демонстрирует высокую сходимость, при этом ранее аналогичные работы не проводились.

Список литературы

1. Coates G. R., Xiao L., Prammer M. G. NMR logging: principles and applications // Houston: Haliburton Energy Services, 1999, 234 p.
2. Mondal I., Singh K. H. Petrophysical insights into pore structure in complex carbonate reservoirs using NMR data // Petroleum Research, 2024.
3. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P. Experimental study of elastic properties of coals of various degrees of tectonic disturbance by laser-ultrasonic spectroscopy // Mining Inf. Anal. Bull, 2021. Vol. 4-1, pp. 26–40.
4. Anovitz L. M., Cole D. R. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures // Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2015, Vol. 80, pp. 61–164.

Научный руководитель: *Черепецкая Елена Борисовна*, д.т.н. профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, НИТУ МИСИС, Москва, Россия, ORCID: 0000-0002-9642-2149, eb.cherepetskaya@isis.ru.

Фреатомагматические брекчии месторождения Au-Ag Тунанца-Эквадор, изменения физических свойств

Аннотация. Приведены результаты исследования физических свойств: плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления фреатомагматических брекчий эпитермального Au-Ag месторождения Тунанца в Эквадоре. Полученные данные обработаны и интерполированы методом Кригинга, установлена пространственная связь между изменениями физических свойств брекчий и расположением богатых сульфидных золото-серебряных руд месторождения.

Ключевые слова: фреатомагматические брекчии, физические свойства, кригинг, магнитная восприимчивость.

Medina Jimenez Juan Pablo*

Petr A. Ignatov

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

**juanmedinageologia@gmail.com*

Phreatomagmatic breccias from the Au-Ag deposit Tunanza-Ecuador, changes in the physical properties

Abstract. This paper shows the results of the physical properties: density, magnetic susceptibility and specific electrical resistance of the phreatomagmatic breccias from the epithermal Au-Ag Tunanza deposit located in Ecuador. The data obtained were processed and interpolated by the Kriging method, the results show spatial correlation between the physical properties and the location of the enriched zone of the deposit.

Keywords: Phreatomagmatic breccias, physical properties, kriging, magnetic susceptibility.

Месторождение Тунанца расположено в Юрском металлогеническом поясе Анд в Эквадоре. Оно представляет собой эпитермальный Au-Ag объект, локализованный в эндогенной брекчии площадью 1,5 x 2 км. Для таких месторождений описаны рудоносные гидротермальные брекчии [2]. Данные о магнитной восприимчивости брекчий могут отражать рудосопровождающие метасоматические изменения пород [3, 4], что следует использовать при разведке месторождения.

Рудоносная брекчия месторождения Тунанца сложена остроугольными и угловато-округлыми обломками от нескольких миллиметров до 1,5 м в диаметре. В состав обломков входят базальт, кварцевый порфир, гранодиорит, диорит в различных пропорциях, также встречаются обломки гранито-гнейсов, (рис. 1). Округлые обломки часто имеют каймы силикатного состава, что позволяет предварительно отнести породы к фреатоматическим брекчиям.

Рудная залежь представлена сульфидизированными телами минерализованных брекчий, в меньшей мере маломощными сульфидными жилами с почти вертикальным падением. Руды представлены ассоциацией галенита, пирита, сфалерита, халькопирита и арсенопирита. Золото, как и серебро, присутствует в виде мелких вкрапленных частиц микронного размера, тесно связанных с полиметаллическими сульфидами.

Всего из минерализованной зоны Тунанца было отобрано 350 образцов пород, включая 74 из брекчий. Определены параметры плотности и магнитной восприимчивости с использованием прибора Kappameter Model KT-5 серии 7088 и удельного электрического сопротивления с применением прибора Терраомметр Е6-3.

Анализируемая территория соответствует полигону размером 992 x 615 м, с площадью 610 080 м². Полученные результаты проанализированы в среде ArcMap 10.8 методом интерполяции Крингга, поскольку его характеристики [1, 5], подходят к условиям настоящего исследования.

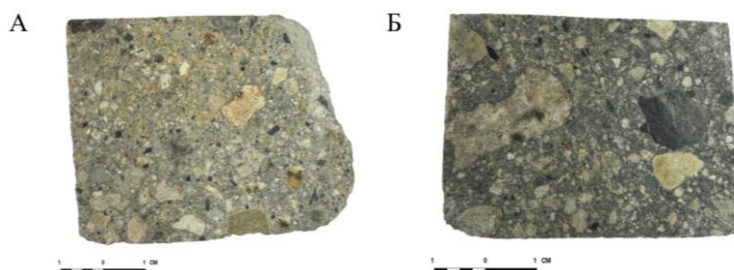


Рис. 1. Образцы из двух разных зон минерализации месторождения Тунанца, А – брекчия с рассеянной сульфидизацией, В – брекчия с интенсивной сульфидизацией.

Плотность брекчий колеблется в пределах от 2,43 до 2,70 г/см³ (рис. 2 – 1), магнитная восприимчивость – от 0,159 до 5,3 x 10⁻³ единиц СИ (рис. 2 – 2), удельное электрическое сопротивление – от 37 500 до 2 200 000 Ом-м (рис. 2 – 3).

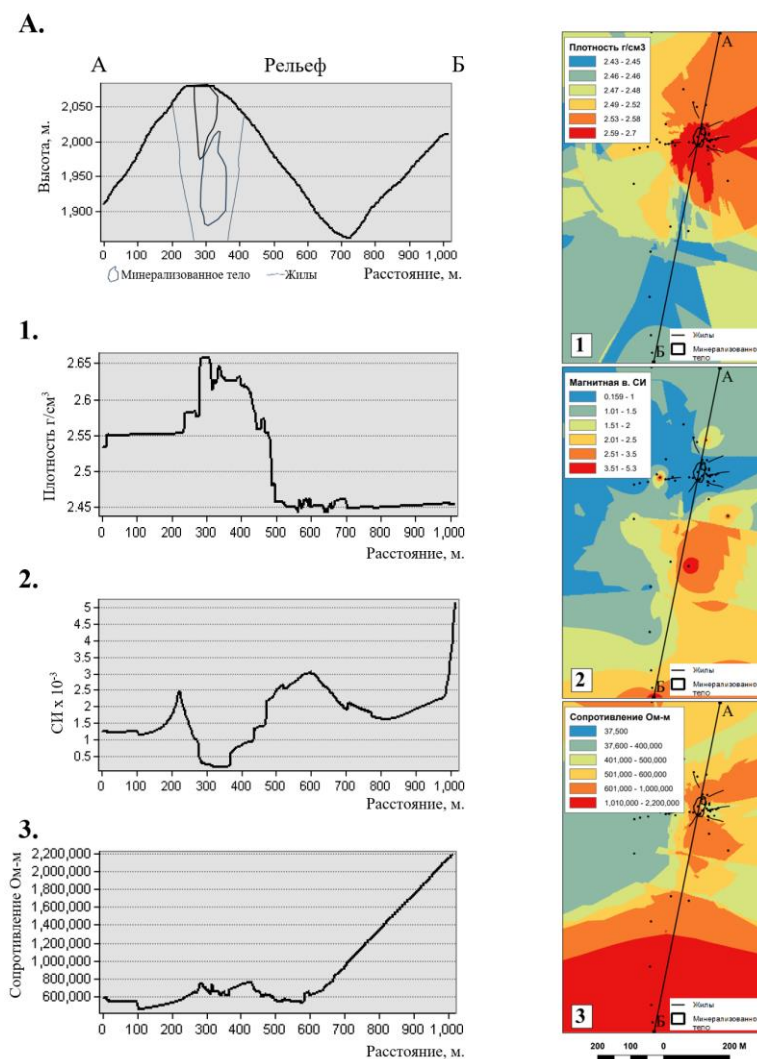


Рис. 2. Результаты анализа данных и интерполяции (карты справа, черная линия – профиль А Б), слева сверху А-Б – рельеф местности. Ниже значения: 1 – плотности горных пород; 2 – магнитная восприимчивость; 3 – удельное электрическое сопротивление

Рудная зона расположена в центре фреатомагматического брекчиевого тела, между 290 и 350 м по профилю А-В на рисунке 2, максимальная концентрация руды находится на 320 м.

Установлено пространственное совмещение минерализованной зоны, обогащенной сульфидами с золотом и серебром, с аномальными значениями физических свойств пород. Она локализована между 200 и 500 метрами поперечного разреза, показанного на рисунке 2. Соответственно, в обогащенной зоне месторождения значения плотности самые высокие и превышают $2,6 \text{ гр/см}^3$, магнитная восприимчивость отражает самые низкие значения, составляющие менее $0,5 \times 10^{-3}$ единиц СИ, то же самое происходит с удельным электрическим сопротивлением, где значения не превышают 800 000 Ом-м. Эти изменения в основном связаны с увеличением количества сульфидов в цементе брекчий и гидротермально-метасоматическими изменениями пород в процессе рудообразования.

Список литературы

1. Cárdenas A. Fundamentos teóricos y su aplicación en los métodos de potencial geomagnético y gravimétrico. 2014. Ed. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá Colombia.
2. Corbett G. Epithermal gold-silver and porphyry copper-gold exploration. Short course manual: unpublished, Sept 2017 edition.
3. Garces J. Análisis de las anomalías magnéticas y geoquímicas de la zona de Piaxtla dentro del Complejo Acatlán: Implicaciones tectónico-mineras. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 2019. San Luis Potosí.
4. Raya R. Pérez L. Venegas R. García E. Escobar J. Velazco M. Urrutia J. Caracterización de las brechas de impacto del Cráter Chicxulub a partir de la litología y susceptibilidad magnética. 2022. Vol. 12. N. 1.
5. Villatoro M. Henríquez C. Sancho F. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. 2008. Costa Rica. 32(1): 95-105.

Научный руководитель: Игнатов Петр Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.

Диagenетическая доломитизация как ключевой фактор изменения фильтрационно-емкостных свойств карбонатных отложений Северо-Останинского месторождения (Томская область)

Аннотация. Актуальность работы заключается в установлении факторов, контролирующих формирование коллекторов в палеозойских карбонатных отложениях в свете применения прецизионных методов исследования вещества (микрокриотермометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии) и творческой компиляции ранее полученных данных по палеозойским карбонатным породам Северо-Останинского месторождения.

Ключевые слова: биогерм, протолит, диагенез, вторичная доломитизация, газовой-жидкие включения, КР-спектры, микрокриотермометрия.

Alena A. Nazarova
TPU, Tomsk, Russia, aan54@tpu.ru

Diagenetic dolomitization as a key factor in changing the filtration and capacity properties of carbonate deposits of the Severo-Ostaninskoye field (Tomsk region)

Abstract. The relevance of the work lies in establishing the factors that control the formation of reservoirs in Paleozoic carbonate deposits in the light of the use of precision methods for studying the substance (microcryothermometry, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy) and creative compilation of previously obtained data on Paleozoic carbonate rocks of the Severo-Ostaninskoye field.

Keywords: bioherm, protolith, diagenesis, secondary dolomitization, gas-liquid inclusions, Raman spectra, microcryothermometry.

Западно-Сибирский нефтегазоносный мегабассейн является одним из основным геолого-экономических регионов страны, где активно разрабатываются месторождения нефти, газа и конденсата. Всестороннее изучение Западной Сибири, в том числе и ее фундамента, интенсивно ведется с середины прошлого века и в наши дни. В Томской области накоплен огромный опыт по поиску, разведке и разработке залежей углеводородов, не только в отложениях платформенного чехла, но и в образованиях фундамента.

Объектом исследования являются карбонатные отложения кровельной части палеозойского фундамента (верхний девон) Северо-Останинского месторождения. Макроскопическое описание пород дано по керновому материалу, полученному при бурении 2 разведочных и 1 эксплуатационной скважин Северо-Останинского лицензионного участка. Определение вещественного состава и текстурно-структурных характеристик пород проведено по петрографическим шлифам и двусторонним полированным пластинам с использованием микроскопа Olympus BX53. Для уточнения минеральных компонентов пород применялся дисперсионный конфокальный микроскоп комбинационного рассеяния Thermo Fisher Scientific DXR2 Raman (для получения КР-спектров минералов и состава фаз газовой-жидких включений в доломитах), использование криотермокамеры Lincam MDSG-600 позволило детализировать условия формирования коллекторов.

Верхнедевонские мелководно-шельфовые карбонаты Пудинского мегавала свидетельствуют о многоступенчатой доломитизации и сложной диagenетической истории. Перекристаллизация протолита во вторичные доломиты отмечается лишь в местах

выхода карбонатного биогерма на эрозионную поверхность фундамента [1]. Основным интерес в исследованиях отводится вторичным доломитам, поскольку именно эти породы в пределах Северо-Останинского месторождения являются продуктивными.

На основе ранее проведенных исследований установлена последовательность диагенетических преобразований и их влияние на фильтрационно-емкостные свойства пород [2, 3]. Так, протолитами являются органогенные, органогенно-обломочные, оолитовые и пизолитовые известняки, которые по мере погружения на глубину перекристаллизовывались (рис. 1). По мере метасоматической проработки протолитов отмечается тенденция к разрушению первичных кальцитовых зерен и формированию вторичных, преимущественно, идиоморфных ромбоэдрических кристаллов доломита с произвольной упаковкой. При этом на ранних стадиях диагенеза происходило формирование ксеноморфного доломита, замещающего компоненты пелитоморфных агрегатов кальцита. Микритизированные зерна, чаще всего, при этом перекристаллизации не подвергались за счет своей низкой проницаемости. Такие породы обладают низкими фильтрационно-емкостными свойствами за счет практически полного отсутствия пустотно-порового пространства. На последующих стадиях диагенеза процентное содержание доломита увеличивалось, что оказывало влияние на коллекторские свойства пород за счет растворения остаточного кальцита с образованием вторичных, межзерновых пор доломитизации-перекристаллизации, к которым и приурочены битумоиды.

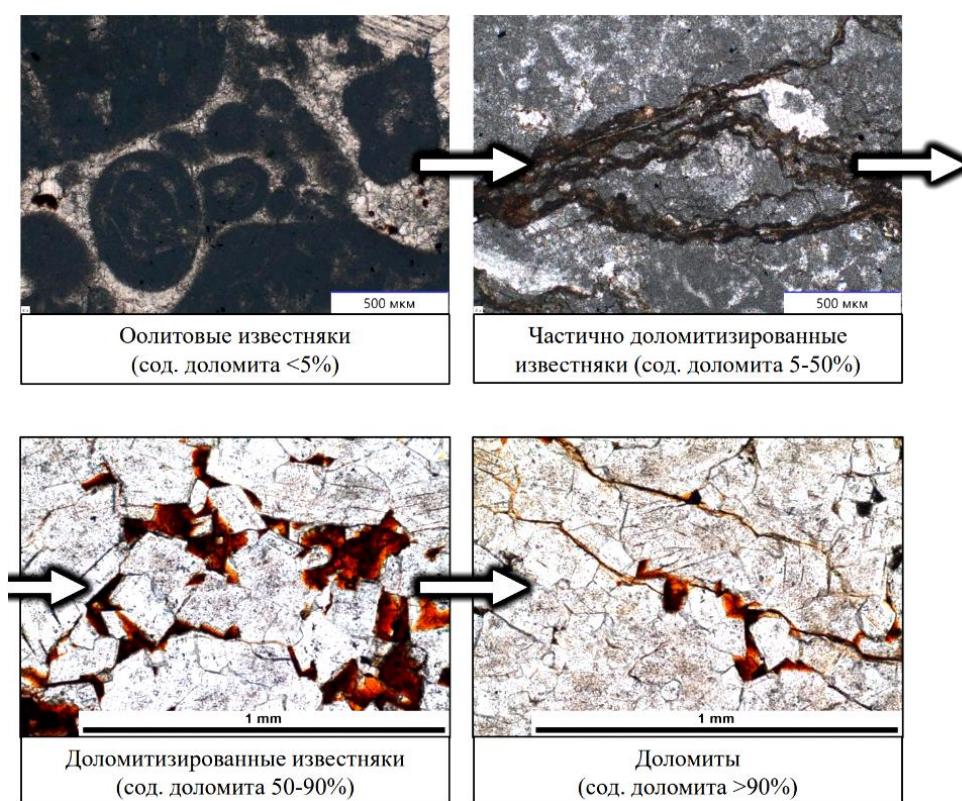


Рис. 1. Последовательность постседиментационных преобразований карбонатных пород пласта М₁ Северо-Останинского месторождения

Во вторичных доломитах и кальцитах фиксировалось достаточно большое количество газово-жидких включений (ГЖВ), в которых вещественный состав газовой и жидкой фаз и включений определялся по спектрам комбинационного рассеяния (КР-спектры) (рис. 2-3).

Название	Химическая формула	Фазовое состояние (норм. усл.)	Класс УВ	Волновое число, см ⁻¹
Углекислый газ	CO ₂	газ		1285 и 1391
Декан	C ₁₀ H ₂₂	жидкое	Парафиновые	1431
Пентацен	C ₂₂ H ₁₄	твердое	Ароматические	1598
Метан	CH ₄	газ	Парафиновые	2906
Матрица				
Доломит	(CaMg)CO ₃	твердое		176, 299, 725, 1097

Рис. 2. Вещественный состав газовой-жидких включений по результатам спектроскопии комбинационного рассеяния

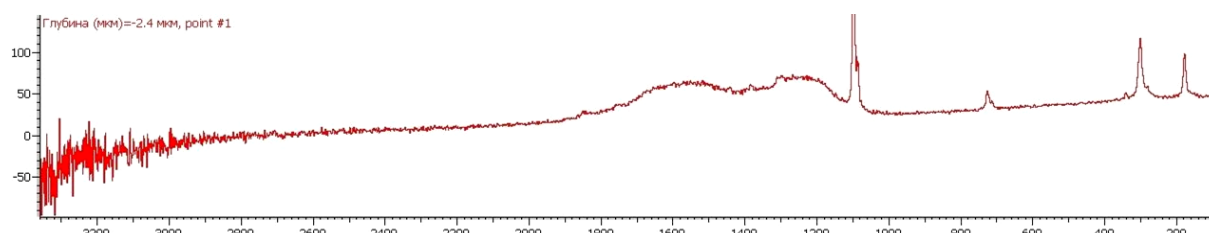


Рис. 3. Спектр комбинационного рассеяния

Основной интерес отводился двух- и трехфазным ГЖВ (газ-жидкость, газ-жидкость-УВ), размер которых превышал 2–5 мкм. Такие газовой-жидкие включения являются первичными для вторичной минеральной (доломитовой) матрицы и вторичными – для протолита, и их состав напрямую характеризует растворы, за счет которых происходила перекристаллизация первичной породы и возможная миграция углеводородов.

Вещественный состав газовой фазы зачастую включал в себя компоненты CO₂, CH₄, C₁₀H₂₂, C₂₂H₁₄ [5], наличие которых в ГЖВ указывает на их образование из растворов, переносящих УВ. При этом отмечается очень слабая структурная организация углеродистого материала, что характерно для керогена.

Большой интерес при изучении отводился вопросу генезиса коллекторов. В этих целях изучение ГЖВ проводилось с использованием криотермокамеры и оптического микроскопа с пятисоткратным увеличением. Метод микрокриотермометрии позволил определить при переходе фаз в ГЖВ три параметра по температуре: гомогенизации, эвтектики и плавления льда.

По результатам исследований получены температуры гомогенизации +93,0 – +144,2 °С (среднее – 118,6 °С), плавления льда -5 – -1,5 °С (среднее -1,8 °С) и эвтектики -48,3 – -43,3 °С (среднее -45,8 °С). Такое осредненное значение температуры эвтектики характерно для водных растворов с вещественным составом CaCl₂±MgCl₂-H₂O. По температурам плавления льда [4] оценена концентрация солей в растворах, которая составляет 4–4,5 % мас. экв. NaCl. Учитывая, что рассчитанное значение меньше 5 % мас. экв. NaCl (морская вода) и температуры гомогенизации являются низкими и составляют в среднем +118,6 °С, данные растворы, из которых происходила кристаллизация вторичного доломита, являются результатом смешения низкотемпературных, слабосоленых метеорных (более пресных, чем реликтовая морская вода) и высокотемпературных гидротермальных. Высокая вариабельность полученных данных подтверждает факт кристаллизации вторичных минералов из растворов нескольких конфигураций.

Таким образом, перекристаллизация протолитов во вторичные доломиты оказала благотворное влияние на повышение ФЕС пород за счет растворения остаточного кальцита

с образованием вторичных, межзерновых пор доломитизации и перекристаллизации. Наличие в ГЖВ углеводородов указывает на их образование из флюидов, переносивших УВ. Растворы, за счет которых происходила перекристаллизация, являются результатом смешения метеорных и гидротермальных источников.

Список литературы

1. Ежова А. В. Изучение палеозойских коллекторов Северо-Останинского нефтяного месторождения по керну и шламу. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2011. – Книга 1. – С. 21–102.
2. Западно-Сибирский нефтегазовый конгресс: материалы Международного научно-технического конгресса студенческого отделения общества инженеров нефтегазовой промышленности Society of Petroleum Engineers (SPE) / отв. Ред. А. М. Тверяков. – Тюмень: ТИУ, 2024. – С. 101–104 – Текст: непосредственный. ISBN 978-5-9961-3255-3.
3. Краснощекова Л.А., Гарсия Бальса А.С., Белозеров В.Б. Состав флюидных включений по КР-спектрам в палеозойских карбонатных породах Северо-Останинского месторождения, Западная Сибирь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 187–203.
4. Bodnar, R. J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions / R. J. Bodnar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – V.57. – №3. – pp. 683–684.
5. Geofluids. Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes // *Vapor-Liquid Equilibrium Data Bibliography*. – 215. – V.4. – pp. 419–437.

Научный руководитель: Краснощекова Любовь Афанасьевна, к.г.-м.н., доцент, ТПУ, Томск, Россия.

Гидрогеологические особенности эксплуатации месторождений подземных вод юга Восточной Сибири (на примере Хакасии и Красноярского края)

Аннотация. Целью исследования является комплексное рассмотрение и актуализация информации по гидрогеологическим особенностям эксплуатации месторождений подземных вод посредством инфильтрационных водозаборов в условиях изменчивости климата и антропогенной активности для обеспечения условий получения воды максимально возможного качества, а также ликвидации и предупреждения имеющихся проблем.

Ключевые слова: моделирование, водные ресурсы, запасы вод, гидрогеохимия, минеральные равновесия.

Alexandra V. Nikitenkova
National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia, avk92@tpu.ru

Hydrogeological features of exploitation of underground deposits in the south of Eastern Siberia (on the example of underground water deposits in the Republic of Khakassia and Krasnoyarsk Krai)

Abstract. The aim of the study is a comprehensive review and updating of information on the hydrogeological features of exploitation of groundwater deposits by means of infiltration water intakes under conditions of climate variability and anthropogenic activity to ensure conditions for obtaining water of the highest possible quality, as well as the elimination and prevention of existing problems.

Keywords: modeling, water resources, water reserves, hydrogeochemistry, mineral equilibria.

Обеспечение населения чистой питьевой водой – это одна из основных проблем современности. Российская федерация, обладая большими ресурсами пресных вод достаточного качества, в последние десятилетия все острее начинает нуждаться в пересмотре подходов к эксплуатации имеющихся водных ресурсов в связи как с растущей антропогенной нагрузкой, так и с природно-климатическими изменениями. Особый интерес для рассмотрения представляет республика Хакасия и юг Красноярского края, в которых сочетаются различные природно-климатические условия. Как показала практика, качество поверхностных и подземных вод территории ухудшается в связи с рядом природно-антропогенных процессов. Ряд работ отечественных ученых посвящен изучению процессов восполнения ресурсов подземных вод [2, 3, 5, 7], а также проблем водоснабжения территории исследований [4]. В связи с вышесказанным, комплексное изучение и моделирование эксплуатации существующих инфильтрационных водозаборов, а также особенностей гидрохимии питающих их вод является крайне актуальной задачей, решение которой может позволить уладить ряд проблем с водообеспечением.

Материалы и методы исследований. В качестве исходных данных использовались материалы изысканий и исследований, проводимых на этапе разведки и оценки запасов месторождений подземных вод; результаты мониторинговых наблюдений, полученных в ходе эксплуатации соответствующих месторождений; данные по составу подземных вод, полученные из открытых источников от соответствующих эксплуатирующих организаций [9], а также материалы, собранные автором в ходе научно-исследовательской работы. Дополнительно для анализа территории и картографических построений использовались космоснимки LandSat и цифровые модели рельефа (SRTM).

Обработка данных проводилась в ГИС ArcGIS 10, пакете гидродинамического моделирования modflow 8 [6] и комплексе гидрогеохимического моделирования HydroGeo [1].

Исследование проводилось по трем основным направлениям: первое было реализовано в ГИС и направлено на подготовку картографического материала и комплексный анализ территорий для оценки областей питания, а также на подготовку исходных данных для гидродинамического моделирования и оценку возможных источников изменчивости химического состава подземных вод; второе направление включало в себя гидродинамическое моделирование условий эксплуатации месторождений – в нем реализовано моделирование для двух месторождений: Моховского (часть работ по которому рассмотрена ранее [8]) и Черногорского, которое эксплуатируется как основное для водоснабжения городов Черногорск и Абакан; заключительное направление включало в себя гидрогеохимическое моделирование, направленное на анализ минеральных равновесий, в частности, чтобы дать оценку возможности выпадения в осадок вторичных минеральных образований на водоподъемном оборудовании, в рамках которого также были исследованы воды инфильтрационного водозабора г. Минусинск.

В результате проведенной работы по дешифрированию космоснимков LanSat8/9 была проанализирована территория и условия питания Моховского месторождения [8], а также водосборный бассейн Черногорского месторождения подземных вод, для которого охарактеризованы потенциальные источники антропогенного влияния. Дополнительно, за счет дешифровки, был получен вспомогательный материал для наглядного картографического оформления карт. Изучение морфометрических особенностей территории по цифровой модели SRTM позволило оценить водосборные бассейны, а также выявить территории, с которых возможен приток загрязняющих веществ к рассматриваемым водозаборам.

В результате гидродинамического моделирования были построены многослойные гидрогеологические модели в программном комплексе ModFlow 8. Результаты исследования моделей получены путем моделирования работы водозаборных скважин на нормативных значениях водоотбора (взяты по усредненным значениям, полученных по данным водоканала за 2020-23 годы). Установлено, что при рассматриваемых условиях эксплуатации применительно к Моховскому водозабору возможно ухудшение качества вод при отходе береговой линии Красноярского водохранилища (рост расстояния до области питания) за счет подтягивания вод глубинных верхне-девонских отложений с увеличением минерализации, а в случае с Черногорским месторождением подземных вод за счет расширения депрессионной воронки возможно подтягивание вод из дренажных каналов, собирающих сток с жилых районов города Черногорска, в следствие чего есть риск загрязнения питьевых вод. Согласно результатам моделирования, данный процесс может произойти в течение сроков эксплуатации порядка 15–20 лет.

В результате моделирования гидрогеохимических взаимодействий были оценены параметры насыщенности вод к потенциально образующимся из данных типов вод минералам, на основании анализа которых сделан вывод о том, что для всех рассматриваемых водозаборов есть вероятность выпадения в качестве вторичных минералов в виде кальцита и доломита в достаточно больших объемах, что подтверждает фактические наблюдения [4], с другой стороны, позволяет предложить меры по водоподготовке для того, чтобы обезопасить водоподъемное оборудование, а также минимизировать вероятность выпадения вторичных отложений внутри хозяйственно-питьевых водопроводов.

В качестве основных выводов хотелось бы отметить следующее:

1. Гидрогеологические условия всех рассмотренных месторождений в результате воздействия с внешних природно-антропогенных факторов дают неустойчивый и не всегда предсказуемый режим питания подземных вод, вследствие чего их качественные и количественные характеристики в течение времени эксплуатации водозаборов могут сильно меняться, что требует дополнительного изучения.

2. Гидродинамическое моделирование показывает, что в ряде случаев из-за природно-антропогенных факторов (таких как регулирование стока и жизнедеятельность человека) возможно ухудшение качества отбираемой воды.

3. Для вод всех водозаборов характерна насыщенность к карбонатным минералам, что требует проведения дополнительной водоподготовки, которая по факту чаще всего не производится и без которой происходит переотложение вторичных минералов на водоподъемном оборудовании и в сетях для транспортировки воды, что ведет к дополнительным экономическим и временным издержкам при водоснабжении населения.

Предполагается, что работа будет продолжена изучением водозаборов городов Саяногорск, Абаза и ряда других населенных пунктов для изучения влияния природно-антропогенных факторов на особенности восполнения запасов подземных вод и совершенствования методики исследований, позволяющей получать комплексную и многофакторную оценку функционирования инфильтрационных водозаборов.

Список литературы

1. Dutova E. M., Nikitenkov A. N., Kuzevanov K. I. The HydroGeo Software Package and Its Usage // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 98.
2. Боровский Б. В., Дробноход Н. И., Язвин Л. С. Оценка запасов подземных вод. – Киев, 1989. – 407 с.
3. Гаев А. Я. и др. Гидрогеологические аспекты развития водохозяйственных технологий урбанизированных территорий на примере Оренбуржья // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 24–33.
4. Дутова Е. М. и др. Геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения Республики Хакасия // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 394. – С. 239–249.
5. Елисеев В. М. Отчет по гидрогеологическому и инженерно-геологическому доизучению с геоэкологическим картированием масштаба 1:200000 зоны г. г. Абакан, Черногорск, Минусинск (лист N-46-XX). – 2002. – 28075 ф. – Красноярский ТГФ.
6. Кузеванов К. И. Моделирование работы системы взаимодействия скважин в среде PMWIN (Processing Modflow). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 64 с.
7. Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод. – М.: Недра, 1985. – 370 с.
8. Румак А. В. Публикация в сборнике материалов конференции «Геологический международный саммит» по теме «Гидрогеологические условия Моховского месторождения подземных вод (республика Хакасия)», – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2023 – 277 с. (с.185–188).
9. ГУП РХ «Хакресводоканал». – Электронный ресурс. – URL: <https://www.hakresvod.ru/> (дата обращения: 13.11.2024).

Научный руководитель: Дутова Екатерина Матвеевна, д.г.-м.н., профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

Инженерно-геологическая характеристика гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты в связи с их складированием

Аннотация. Показана актуальность проблем размещения гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты. Рассмотрены условия образования материала. Обсуждаются сложности изучения физико-механических свойств отходов. Приведены результаты определения гранулометрического состава и физико-механических свойств отходов, полученных при переработке серной кислоты.

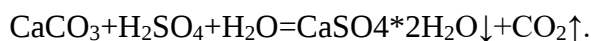
Ключевые слова: гипс, отход, техногенный грунт, физико-механические свойства, нейтрализация серной кислоты, намывные техногенные отвалы.

Вопросы складирования и использования промышленных отходов, площади которых достигают больших размеров приобретают важное значение для охраны окружающей среды. Использование промышленных отходов как искусственных грунтов – это определенные сложности из-за их слабой изученности и постоянной пространственно-временной изменчивости состава, строения и свойств.

В качестве объекта исследования выбран техногенный гипсосодержащий отход нейтрализации серной кислоты известняком. Процесс переработки невостробованной и низкосортной концентрированной серной кислоты на многих предприятиях горной, металлургической, химической и других промышленности является актуальным на территории Российской Федерации [2]. Разработано и реализуется несколько способов ее утилизации, в том числе: 1) использование кислоты в других производствах; 2) регенерация отходов с целью получения более пригодной серной кислоты; 3) нейтрализация кислоты щелочами (в т.ч. известняком) [1]. Так, ОАО «Святогор» производит 300 тыс. тонн в год контактной серной кислоты, наличие сбыта которой сезонное, а также зависит от ежегодно повышающихся требований потребителей к качеству кислоты [1].

Используемый в работе материал является техногенным грунтом, из которого будет формироваться гипсохранилище. Полученный отход представляет собой влажный, водонасыщенный порошок серого цвета, тиксотропный.

Известно, что процесс нейтрализации описывается уравнением:



Реакция сопровождается выделением тепла и нагревом гипсовой пульпы до 40–45°C, уменьшается первоначальный объем кислоты из-за связывания воды в кристаллогидрат двуводного гипса и выделения углекислого газа [6].

В результате реакции образуется кристаллогидрат двуводного гипса, основу фазового состава которого составляет гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), в осадке также присутствуют кальцит (CaCO_3), α -кварц ($\alpha\text{-SiO}_2$) и следы доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) [1].

Двуводный гипс относится к специфическим грунтам, что обуславливает необходимость специальных исследований его вещественного и гранулометрического состава, а также количественных показателей состояния и свойств и прогноз их изменения в процессе техногенеза при формировании гипсохранилища. При размещении в гипсохранилище двуводный гипс представляет собой техногенный грунт, не имеющий аналогов среди природных образований.

Формирование намывных осадков обусловлено совокупностью процессов осаждения привнесенного материала, структурообразования, физико-химического и гравитационного

уплотнения, скорость протекания которых во многом зависит от технологических факторов – интенсивности намыва и нагружения намывных пород. При этом формирование намывных массивов сопровождается гидрогеомеханическими процессами, характер которых определяется развитием и рассеиванием избыточного порового давления; его изучение в условиях конкретных гидроотвальных сооружениях показало, что на образование избыточного порового давления в гидроотвалах оказывают влияние мощность пород, скорость намыва или нагружения, дренажные условия и компрессионно-фильтрационные свойства пород [4].

Изучение закономерностей формирования механических свойств проводилось на 3 пробах двуводного гипса, полученных при переработке серной кислоты известняком.

Для определения гранулометрического состава мы использовали методы, которые описаны в ГОСТ 12536–2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Стоит обратить внимание, что данный норматив распространяется на дисперсные песчаные и глинистые грунты, в нем методика по работе с засоленными грунтами дана кратко. Это накладывает определенные сложности при выполнении испытаний, обработке полученных результатов и дальнейшей классификации техногенного гипсосодержащего отхода. Также были выполнены определения гранулометрического состава с использованием метода лазерной дифракции.

Базовыми испытаниями для оценки поведения грунта и получения необходимых параметров для той или иной модели поведения материала являются компрессионные и трехосные испытания грунта, а также одноплоскостной срез [3].

Зависимость коэффициента пористости и плотности от нормальных напряжений определялась в компрессионном приборе при нагрузке 25; 100; 250; 500 кПа при полном водонасыщении материала.

Прочностные характеристики определяли в приборах одноплоскостного среза по консолидированно-дренированной схеме испытаний при нормальных напряжениях 10; 20; 25; 50; 75; 100; 200; 300; 500; 800; 1000 кПа при естественной влажности.

Для определения фильтрационных параметров был выполнен ряд опытов с предварительным уплотнением образцов на компрессионно-фильтрационных приборах при переменном градиенте напора.

Физические характеристики и гранулометрический состав образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физические характеристики и гранулометрический состав [составлено автором]

Номер образца	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020	Естественная влажность, %	Плотность частиц грунта, г/см ³	Число пластичности	Показатель текучести	Гранулометрический состав							
						Размер фракций, мм							
						2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
Образец 1	суглинок легкий пылеватый	56,2	2,49	0,113	3,300	-	-	-	3,64	35,87	43,71	0,48	16,29
Образец 2	суглинок легкий пылеватый	60,2	2,37	0,119	3,070	-	-	-	-	17,79	65,75	0,81	15,65
Образец 3	суглинок легкий пылеватый	39,8	2,32	0,101	2,030	-	-	-	3,13	23,81	58,85	0,83	13,37

По гранулометрическому составу количество частиц размером <0,002 мм варьируется от 13 до 16 %; 0,05–0,002 мм – от 44 до 66 %; 2–0,05 мм – от 17 до 39 %. По классификации дисперсных грунтов, предложенной В.В. Охотиным, материал относится к суглинку легкому пылеватому [5]. По показателю текучести образцы отходов имеют текучую консистенцию.

Результаты сдвиговых испытаний представлены на рисунке 1.

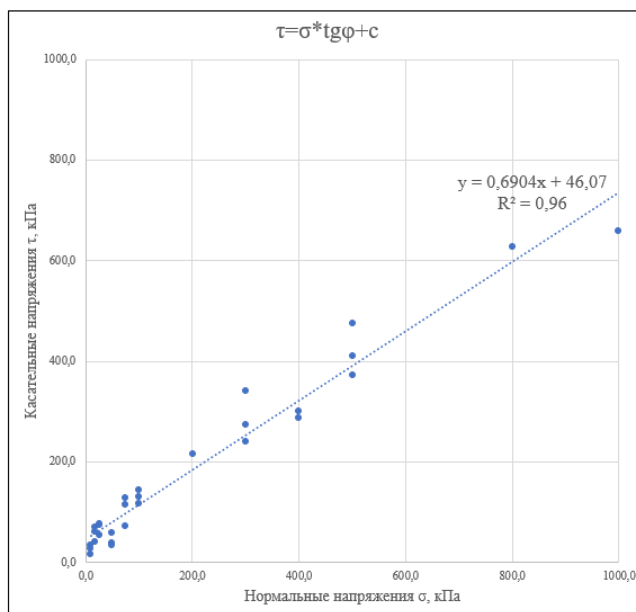


Рис. 1. Результаты сдвиговых испытаний [составлено автором]

Средние значения прочностных характеристик, а именно сцепление и угол внутреннего трения соответственно равны 46 кПа и 35° .

Результаты компрессионных испытаний представлены на рисунке 2 и 3.

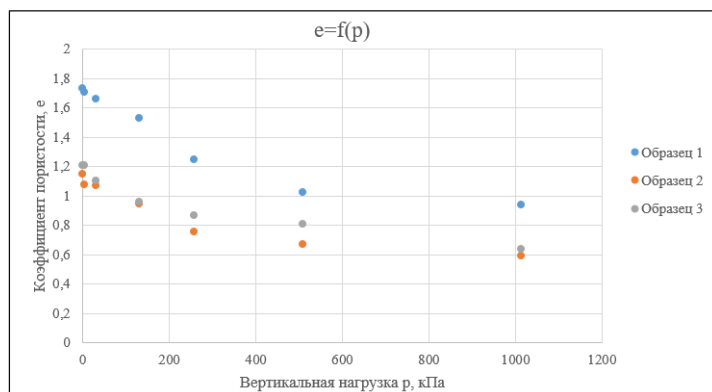


Рис. 2. Результаты компрессионных испытаний [составлено автором]

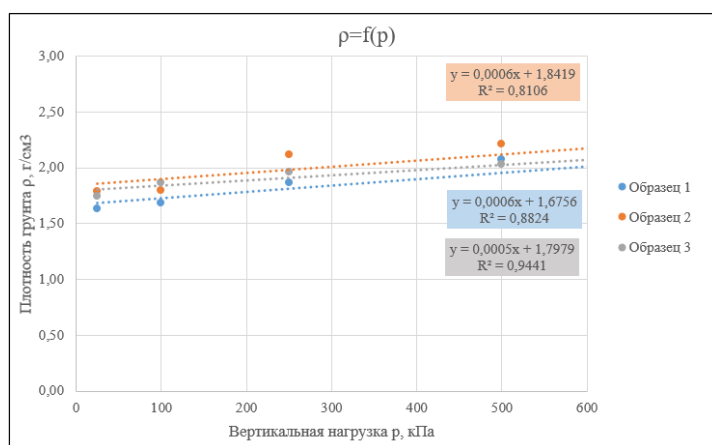


Рис. 3. Результаты компрессионных испытаний [составлено автором]

Модуль деформации по данным компрессионных испытаний составляет 0,6–12,5 МПа в диапазоне нагрузок $p=0,025\text{--}0,5$ МПа. Гипсосодержащий отход является средне и сильнодеформируемым, а по коэффициенту сжимаемости – среднесжимаемым.

Результаты фильтрационных испытаний представлены на рисунке 4.

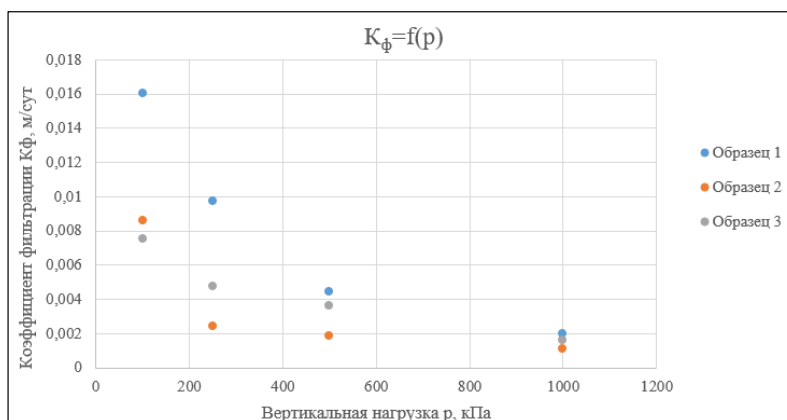


Рис. 4. Результаты фильтрационных испытаний [составлено автором]

Коэффициент фильтрации гипсосодержащего отхода изменяется от 0,001 до 0,016 м/сут.

Выполненные в лабораторных условиях испытания по изучению гранулометрического состава, физических и механических свойств гипсосодержащего отхода нейтрализации серной кислоты позволили прийти к выводу о том, что возникают определенные сложности при применении рекомендаций существующих стандартов. В проведение испытаний необходимо вносить некоторые корректировки.

Выявлены зависимости изменения плотности, пористости и коэффициента фильтрации от нормальной нагрузки. Оценили прочностные и деформационные свойства исследуемых техногенных грунтов.

Список литературы

1. Взоротов С. А. Особенности процесса нейтрализации технической серной кислоты природным известняком // Бутлеровские сообщения. – 2019. – Т. 58, № 4. – С. 110–118. – EDN: ZTRUWD.
2. Здобин, Д. Ю. Семенова Л. К. О гранулометрическом анализе глинистых грунтов: лазерные и классические методы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2011. – № 6. – С. 560-567. – EDN: OJWQDF.
3. Зиянгиров Р. С., Черняк Э. Р. Инженерно-геологические свойства нефелиновых песков – отвалов апатит-нефелинового производства в связи с их складированием // Инженерная геология, 1979. № 5. С. 66–77.
4. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Поспехов Г. Б., Васильева А. Д. Инженерно-геологические особенности формирования техногенных массивов из различных видов фосфогипса // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 69–74. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11 EDN: HTCRXK.
5. Охотин В. В. Грунтоведение. Л., Издание Военно-транспортной академии. – 1940. С. 49.
6. Прокудина Е. В., Тропников Д. Л., Каратаев А. В., Шукшина О.В. Нейтрализация технической серной кислоты природным известняком на ОАО «Святогор» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 8. – С. 340–345. – EDN WJGFVL.

Оценки потенциала нефтегазоматеринских пород по результатам геохимических исследований Южно-Каспийского бассейна

Аннотация. На основе анализа геохимических характеристик нефтегазоматеринских толщ был использован методический подход для оценки в них значений Corg, Tmax, HI. Для исследований было проведено моделирование отложений диатомовой, майкоской и эоценовой толщ. Использовались данные полученные лабораторным методом с обнажений, находящихся на суше, а также скважинная информация акватории Южно-Каспийского бассейна. Проведенные исследования свидетельствуют о высоких перспективах использования данного участка на поиск новых перспективных структур.

Ключевые слова: органическое вещество, Corg, НГМТ, геохимические исследования.

Pavel A. Romanov

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia, romanovpa@mgri.ru*

Estimates of the potential of oil and gas source rocks based on the results of geochemical studies of the South Caspian Basin

Abstract. Based on the analysis of geochemical characteristics of oil and gas source strata, a methodical approach was used to evaluate the values of Corg, Tmax, HI in them. For the studies, modeling of diatomaceous, Maiko and Eocene strata deposits was carried out. Data obtained by the laboratory method from outcrops located on the ground, as well as well information from the South Caspian basin, were used. The studies indicate high prospects for using this site to search for new promising structures.

Keywords: organic matter, Corg, NGMT, geochemical studies.

Основными методами проведения работы являются геохимические исследования с использованием специализированных программных комплексов для проведения численного бассейнового моделирования. Основными параметрами для моделирования в нефтегазоматеринских толщах (НГМТ) были исходные значения следующих геохимических параметров: Corg – процентное содержание органического углерода в осадочных породах; HI (водородный индекс) – отношение количества сгенерированных УВ; Тип ОВ – тип керогена определяется главным образом на основе химической и углепетрографической характеристик керогена.

Геохимические исследования были проведены в лаборатории геохимии углеводородов МГРИ. На основе полученных результатов методом Пиро-ГХ/МСД разработанного на базе комплекса приборов, состоящих из пиролизической ячейки EGA/PY-3030D (Frontier) и хромато-масс спектрометра Agilent 7890B/5977B (Рис. 1). Предложенная схема хроматографической части комплекса, позволяющая одновременно реализовать несколько режимов работы в рамках одного прибора, таких как имитация работы классических пиролизаторов для оценки массовой доли свободных углеводородов и углеводородов пиролиза.

Данный метод прямого определения углеводородного (УВ) потенциала пород и органического вещества (ОВ) позволяет выявить спектр параметров, отражающих качественные и количественные характеристики ОВ пород, в том числе: содержание органического углерода (ТОС), водородный (HI) индексы, температура максимального выхода углеводородов при пиролизе керогена (Tmax), и другие параметры.



Рис. 1. Прибор Пиро-ГХ/МСД/

При температуре до 300 °С выделяются свободные жидкие УВ (пик S1); углеводороды, выделяющиеся при пиролизе керогена в процессе программируемого нагрева до 600 °С, фиксируются пиком S2, в вершине пика S2 замеряется температура (Tmax). При температуре 300 °С одновременно на другом детекторе замеряется пик S3, фиксирующий соединения, обогащенные кислородом. Кроме того, определяется общее содержание органического углерода – Сорг или ТОС (total organic carbon). Tmax отвечает зонам нефтегазообразования (<430 °С – незрелое ОБ или протокатагенез, 430-465 °С – главная зона нефтеобразования (ГЗН = нефтяное окно), >460-465 °С – главная зона газообразования (ГЗГ = газовое окно). Водородный индекс (hydrogen index) $HI = (S2 \cdot 100) / TOC$ характеризует генерационный потенциал ОБ, замеряется в мг, кг УВ/г, т ТОС.

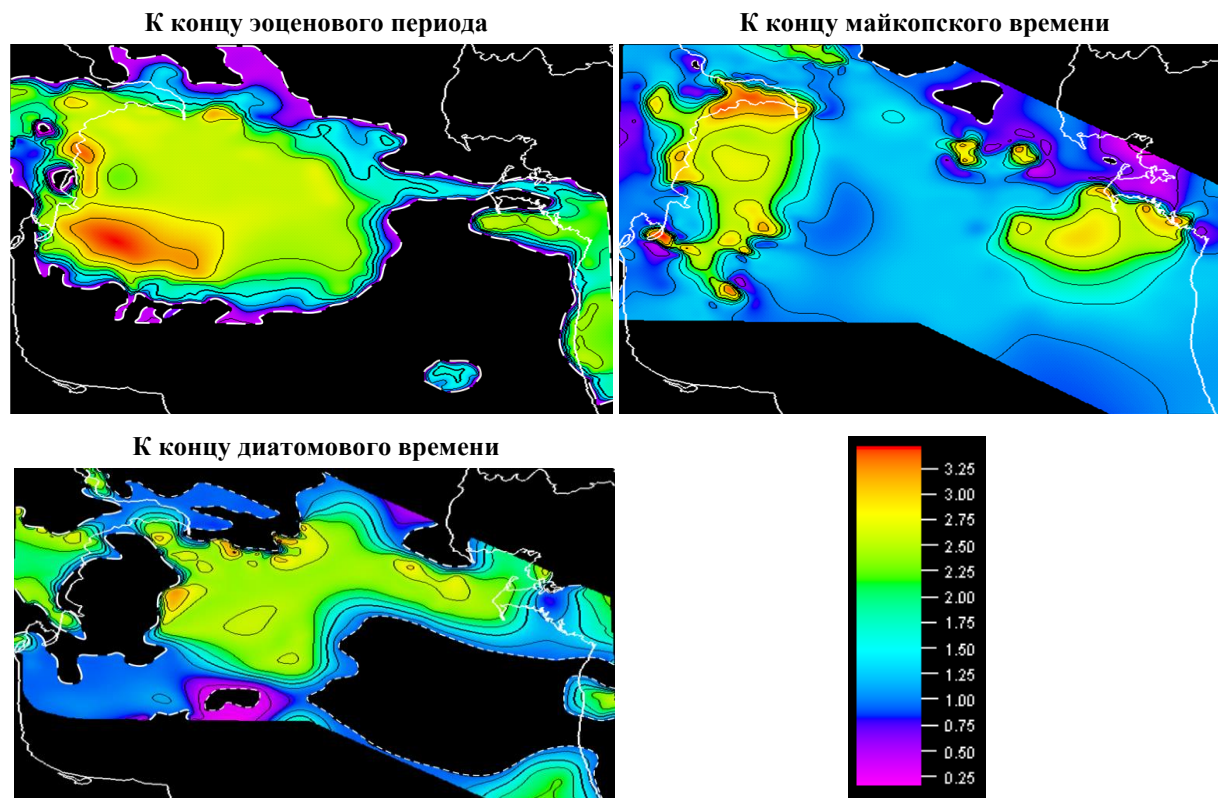


Рис. 2. Карты геохимического параметра Corg НГМТ Южно-Каспийского бассейна

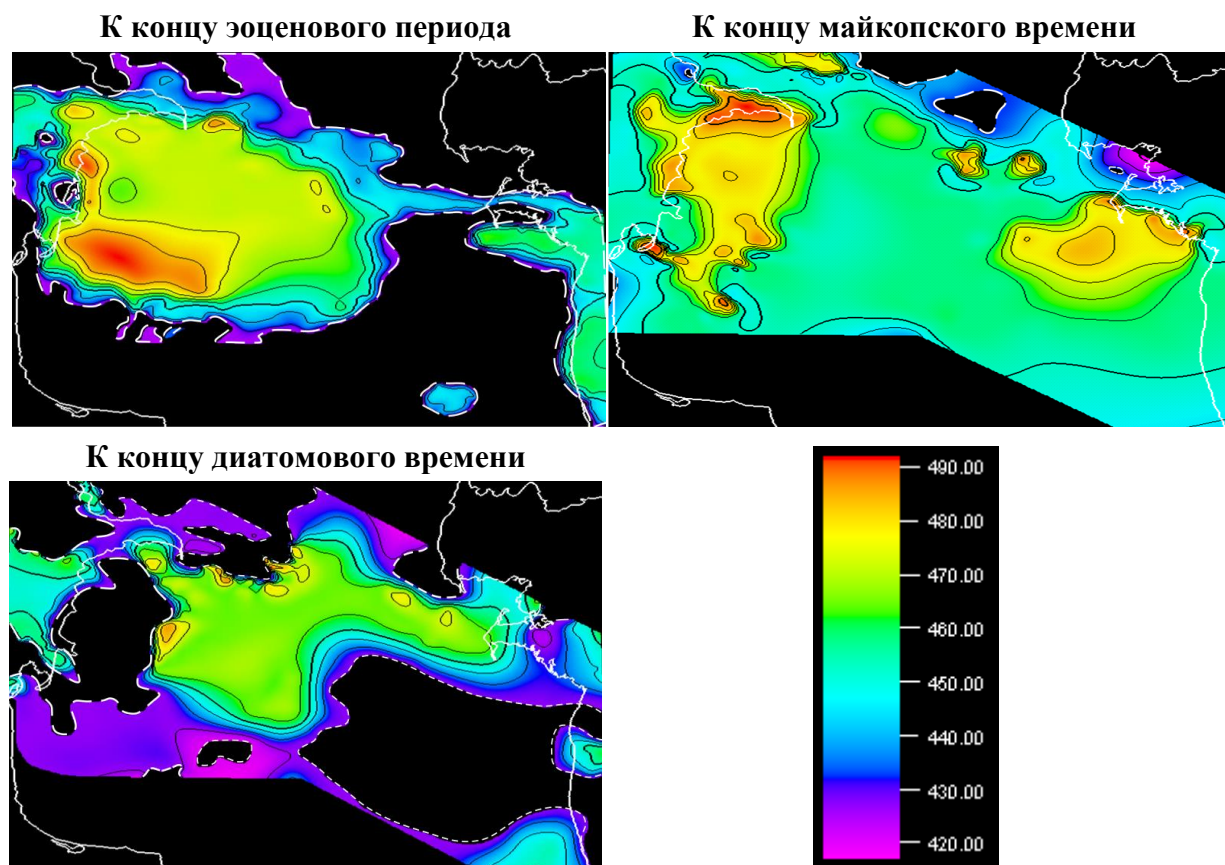


Рис. 3. Карты геохимического параметра $T_{\max}$ НГМТ Южно-Каспийского бассейна

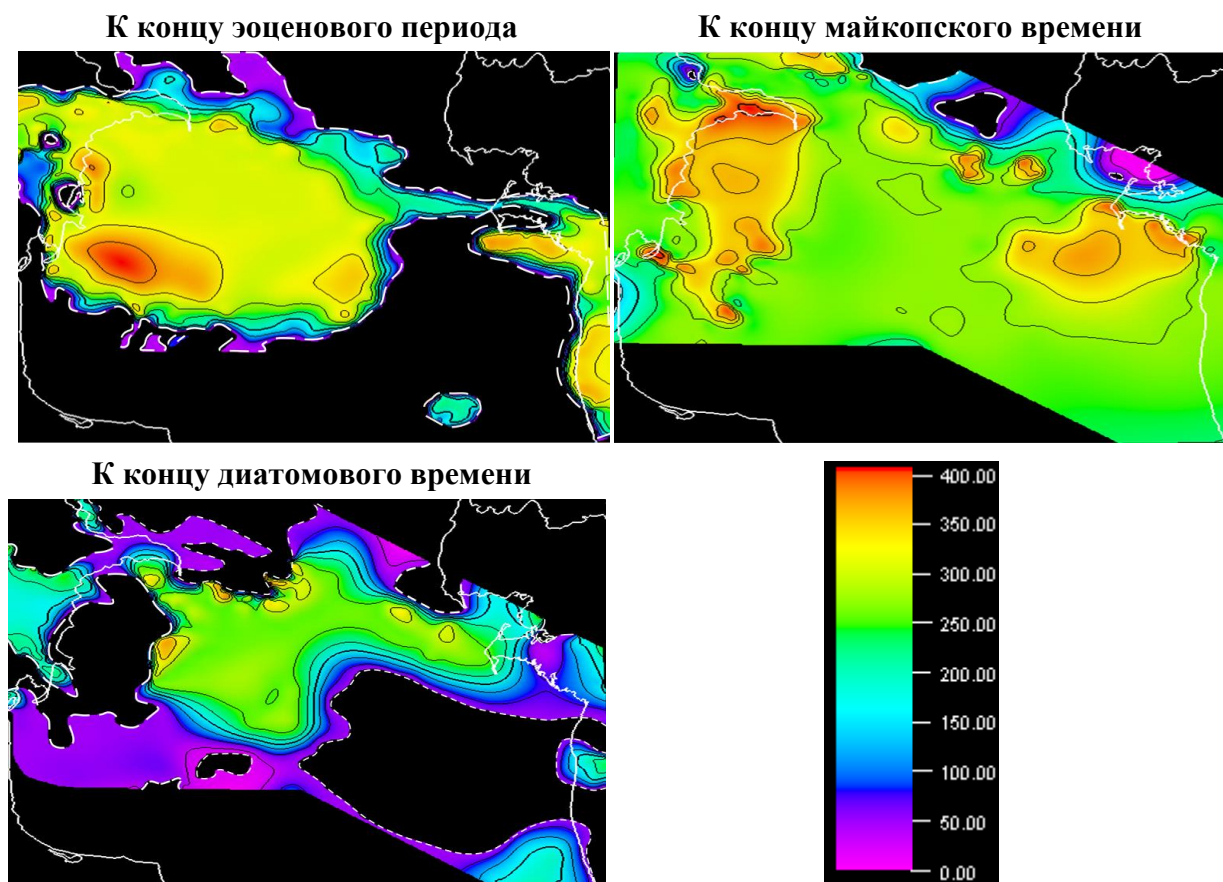


Рис. 4. Карты геохимического параметра HI НГМТ Южно-Каспийского бассейна

В протокатагенезе породы, относящиеся к категории «хорошая нефтематеринская порода», характеризуются повышенными концентрациями ОБ (Сорг или ТОС > 2 %), породы, содержание битумоида и УВ $\geq 0,1$ и 0,06 %, соответственно. Для этого же этапа катагенеза, ОБ, способное генерировать жидкие УВ, обладает следующими параметрами: НН > 300 мг УВ/г ТОС, жидкие и газовые УВ – НН = 200-300 мг УВ/г ТОС, только газовые УВ – эти параметры составляют < 200 мг УВ/г ТОС и 5, соответственно ¹.

Привлечение результатов лабораторных измерений органического углерода, максимальной температуры и водородного индекса дает возможность произвести моделирование по всей территории исследований (Рисунок 2, 3, 4).

По результатам моделирования карт по основным геохимическим параметрам следует, что в Южно-Каспийском бассейне, в отношении перспектив нефтегазоносности, сохраняют свою высокую привлекательность районы Абшеронского порога, Туркменского шельфа и юго-западной части Каспийского моря.

Список литературы

1. Условия формирования и перспективы поисков месторождений нефти и газа в акватории Каспийского моря / В. Ю. Керимов, Б. В. Сенин, У. С. Серикова [и др.] // Научный журнал Российского газового общества. – 2023. – № 1(37). – С. 6–15. – DOI 10.55557/2412-6497-2023-1-6-15. – EDN QXOYWA.
2. Forecast of hydrocarbons accumulations in the Meso-Cenozoic complex of the Black Sea-Caspian region from modeling results / R. N. Mustaev, E. A. Lavrenova, V. Yu. Kerimov, P. A. Romanov // SOCAR Proceedings. – 2022. – No. SI1. – DOI 10.5510/ogp2022si100658. – EDN HXJKNG.
3. Яндарбиев Н. Ш., Козлова Е. В., Фадеева Н. П., Крылов О. В., Наумчев Ю. В. Геохимия углеводородов Терско-Каспийского прогиба // Георесурсы. 2017. № 5. С. 227–239.

¹ Санникова, Ирина Алексеевна. Геолого-геохимические условия формирования нефтегазоносности доманиковых отложений Тимано-Печорского бассейна : автореферат дис. ... кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.12 / Санникова Ирина Алексеевна; [Место защиты: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)]. – Москва, 2019. – 23 с.

Анализ пространственного распределения геолого-промышленных параметров северо-западного фланга Новороссийского IV месторождения цементных мергелей (Краснодарский край)

Аннотация. Для анализа распределения геолого-промышленных параметров были выделены толщи по содержанию CaCO_3 , силикатному и глиноземному модулям. В работе были построены и проанализированы профили по данным химического опробования в соответствии сменой литологического состава. На основе полученных данных был сделан вывод, что породы, слагающие Новороссийское IV месторождение, являются качественным цементным сырьем.

Ключевые слова: цементное сырье, картирование толщ, силикатный модуль, глиноземный модуль.

Darya A. Tokareva
YURSU (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russia,
dashatokareva20007@gmail.com

Analysis of spatial distribution of geological and industrial parameters of the northwestern flank of the Novorossiysk IV cement marl deposit (Krasnodar region)

Abstract. To analyze the distribution of geological and industrial parameters, the strata were identified by CaCO_3 content, silicate and alumina modules. In the work, profiles were constructed and analyzed based on chemical sampling data in accordance with the change in lithological composition. Based on the data obtained, it was concluded that the rocks composing the Novorossiysk IV deposit are high-quality cement raw materials.

Keywords: cement raw materials, mapping of strata, silicate module, alumina module.

Новороссийское IV месторождение цементных мергелей расположено на территории муниципального образования город Новороссийск Краснодарского края, на северной окраине пос. Верхнебаканский, в 1,5 – 2 км севернее станции «Тоннельная» Северо-Кавказской железной дороги, в 15 км к северо-западу от г. Новороссийска [1].

Наша задача – анализ распределения геолого-промышленных параметров путем выделения толщ по содержанию CaCO_3 , силикатному и глиноземному модулям в пределах северо-западного фланга Новороссийского IV месторождения.

Химический состав мергелей определяется литологическим составом толщ, изменение содержаний тех или иных литологических разностей пород отражается на химическом составе.

Профили (рисунки 1.1-1.6) построены по данным химического опробования по содержанию CaCO_3 в программе ГИС «SURFER», методом интерполяции «Обратных расстояний».

Толщи, слагающие Новороссийское IV месторождение, являются сырьем для цементного производства при двухкомпонентном составе шихты, в смеси «высоких» и «низких» мергелей. «Высокие» являются поставщиком окиси кальция, «низкие» приносят SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . К «высоким» мергелям принято относить толщи пород с содержанием CaCO_3 более 75 %, а к «низким» – менее 75 %. Соотношение «низких» и «высоких» мергелей в шихте различное, и зависит от конкретного состава мергелей и колеблется от 1:2 до 1:5, составляя в среднем 1:3 [1].

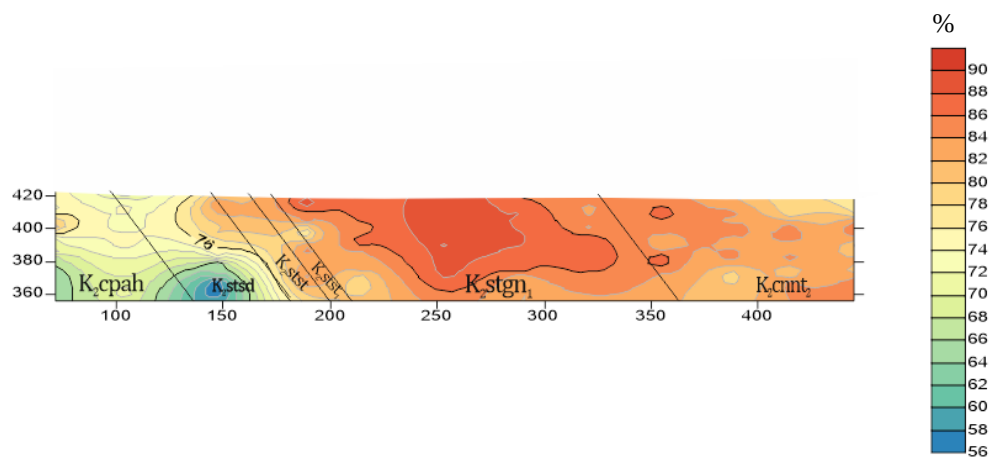


Рис. 1.1. Распространение CaCO_3 в профиле V-V'

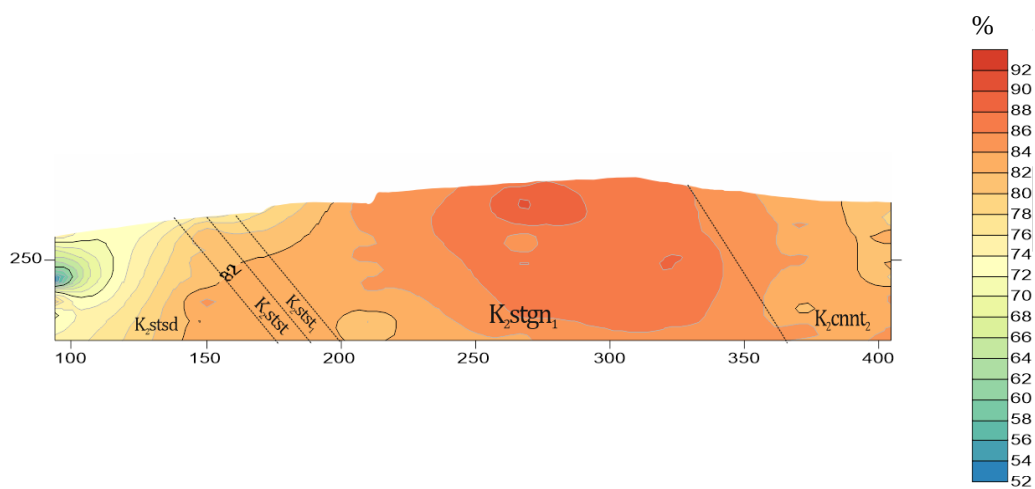


Рисунок 1.2. Распространение CaCO_3 в профиле VI-VI'

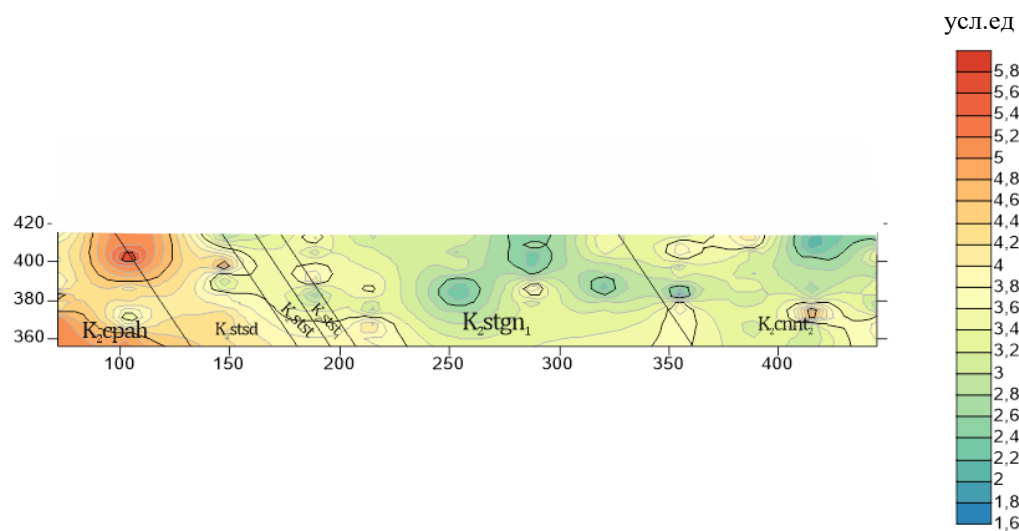


Рис. 1.3. Распространение силикатного модуля в профиле V-V'

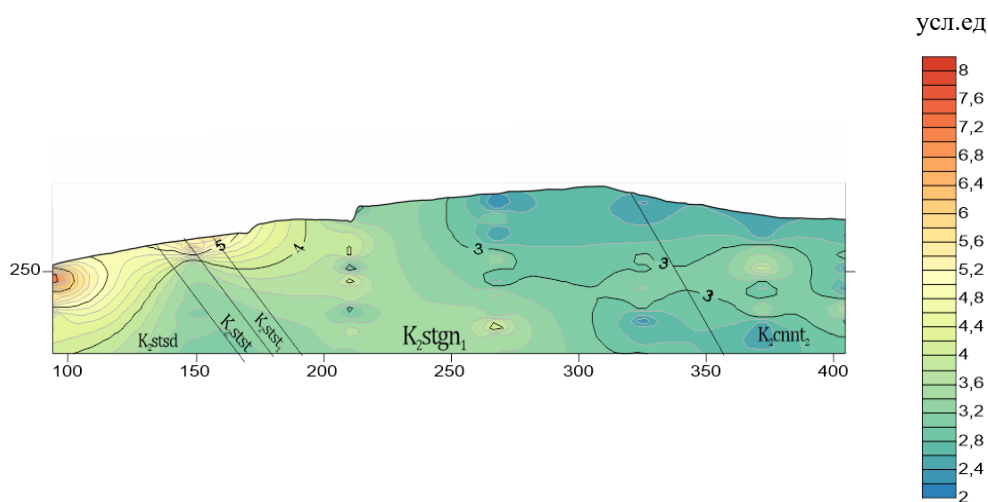


Рис. 1.4. Распространение силикатного модуля в профиле VI-VI'

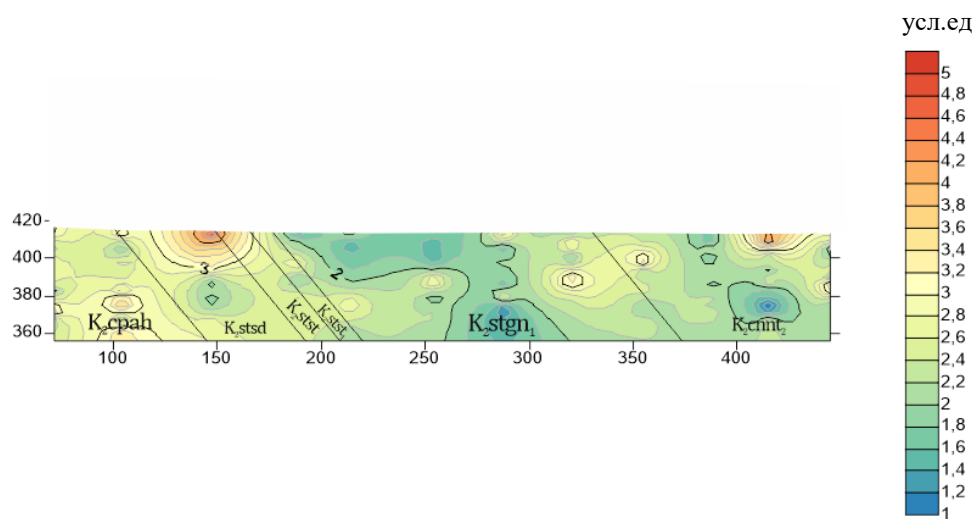


Рис. 1.5. Распространение глиноземного модуля в профиле V-V'

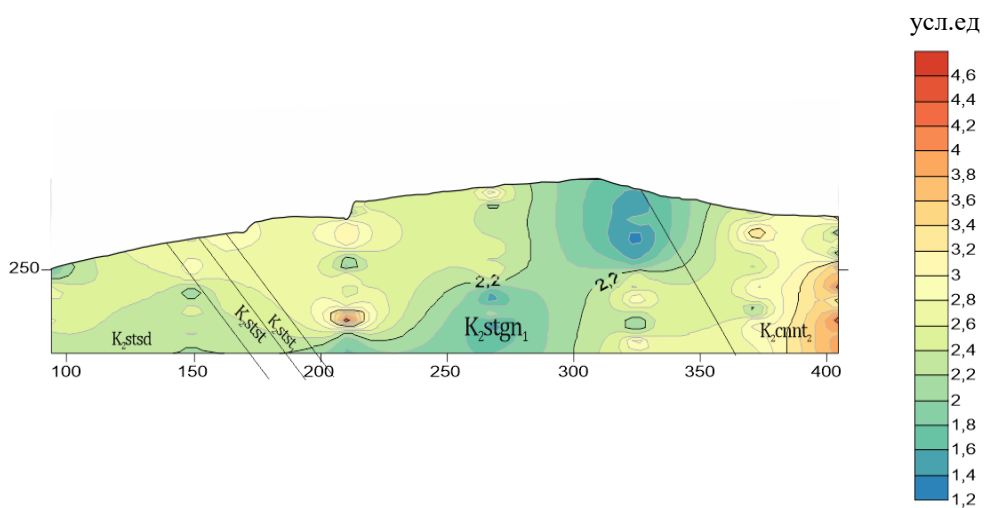


Рис. 1.6. Распространение глиноземного модуля в профиле VI-VI'

Условные обозначения к рис. 1.1-1.6:

$K_2\text{спah}$ – Ахейская свита, $K_2\text{std}$ – Суджукский горизонт, $K_2\text{stst}_2$ – Средний горизонт,
 $K_2\text{stst}_1$ – Фукоидный горизонт, $K_2\text{stgn}_1$ – Нижнегениохская подсвита,
 $K_2\text{cnt}_2$ – Верхненатухайская подсвита

Флишевый характер отложений полезной толщи predetermined включение в пробы нескольких слоев с разным химическим составом. При небольшой длине пробы (3,0 м), эти различия отражаются в химическом составе отдельных проб иногда значительным образом. Однако в дальнейших расчетах среднего по пачке происходит усреднение.

В юго-западной части разрезов мы наблюдаем пониженное содержание CaCO_3 (до 75 %). Общая мощность толщи «низких» мергелей – 150 м.

На разрезе V-V' (рисунок 1.1) преобладают отложения ахейанской свиты мощностью до 75 м. Содержания CaCO_3 варьируются от 56 до 65 %. Это объясняется удалением от контакта с «натуралами» и сменой литологического состава. Толща «низких» мергелей по ахейанской свите характеризуется минимальной карбонатностью. Силикатный модуль в толще от 4,4 до 5, в среднем повышен, требует корректировки, а глиноземный – в пределах нормы от 2 до 2,6 (рисунки 1.3, 1.5; таблица 1.1).

Мощность суджукского горизонта около 60 м. Содержание CaCO_3 по горизонту от 70 до 77 %. На двух разрезах фиксируются несколько проб с содержанием CaCO_3 меньше 70 %. Высокая карбонатность (до 73–77 %) отмечается в средней части горизонта. Силикатный модуль варьирует от 4,8 до 5,6, в среднем повышен, глиноземный от 2 до 2,6, показатели в пределах нормы.

Мощность среднего горизонта 15 м, содержание CaCO_3 от 60 до 68 %. Силикатный модуль так же в среднем повышен (от 4,4 до 5), глиноземный в пределах нормы (от 2,2 до 2,9).

Ближе к центральной части разрезов содержание CaCO_3 увеличивается (рисунки 1.1–1.2). Из этого следует, что между средним и фукоидным горизонтом проходит граница «низких» и «высоких» мергелей. Общая мощность толщи «высоких» мергелей – 335 м.

Мощность фукоидного горизонта 10 м. Содержание CaCO_3 в пределах от 75 до 80 %. Горизонт характеризуется несколько пониженной карбонатностью из-за границы с «низкими» мергелями. Силикатный модуль повышен (от 4 до 4,6), глиноземный в пределах нормы (от 2,4 до 2,8).

В центральной части разреза выделяется высокое содержание CaCO_3 – 86–90 %. Границы этого содержания совпадают с границами нижнегениохской подсвиты. Мощность – 145 м. По направлению к геологической кровле карбонатность снижается до 82 %. Силикатный (от 3,4 до 3,8) и глиноземный (от 2 до 2,4) модули находятся в пределах нормы, что позволяет считать сырье качественным для производства цемента.

Толща верхненатухайской подсвиты характеризуется умеренной карбонатностью, от 80 до 84 %. Мощность – 180 м. По обоим модулям подсвита характеризуется как выдержанная, с допустимыми величинами, что позволяет считать отложения верхненатухайской подсвиты качественным сырьем для производства цемента.

Таблица 1.1

Показатели модулей согласно технологическому регламенту завода

Модуль	Предельный показатель, усл. ед.
Силикатный	2,2-2,6
Глиноземный	0,7-1,1

Проанализированные карты распределения геолого-промышленных параметров позволили убедиться в выдержанности слоев пород и их химического состава по простиранию и падению. Имеющиеся незначительные колебания по большей части

объяснимы. Прежде всего это влияние разрывных нарушений, в которых по зонам дробления породы сильно глинизированные, и это снижает их карбонатность на любой глубине, а также влияние приповерхностной трещиноватости, которая приводит к глинизации пород.

На основе проведенных анализов, породы, слагающие толщу Новороссийского IV месторождения, могут характеризоваться, как качественное цементное сырье по химическому составу.

Список литературы

1. Технический проект разработки Новороссийского IV месторождения цементных мергелей ОАО «Новоросцемент», 2018. – 266 с. Архив ОАО «Новоросцемент».

Научный руководитель: Дудкина Анна Евгеньевна, к. г. н., доцент, ЮРГПУ(НПИ) им. М. И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Устюгов Дмитрий Леонидович¹

Ноа Сегура Эктор Лунс²

Мила Дома Юлиеми³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, Ustyugov_DL@pers.spmi.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, s233146@smud.spmi.ru;
Сьего-де-Авила университет Максимо Гомес Базс (УНИКА),
Сьего-де-Авила, Куба, hectorlms@unica.cu

³ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия, st116052@student.spbu.ru;
Институт Геологии и Палеонтологии/Геологическая Служба Кубы (ИГП/СГК),
Гавана, Куба, yuliemi@igp.minem.cu

Анализ уровней подземных вод на основе методов машинного обучения на примере гидрогеологического бассейна Ла Яна (Республика Куба)

Аннотация. Сложная динамическая система грунтовых вод еще больше усложняет задачу прогнозирования уровня грунтовых вод, поэтому необходимо изучить продукты, такие как наземное дистанционное зондирование Земли, чтобы помочь в прогнозировании уровня грунтовых вод. В гидрогеологическом бассейне Ла Яна на Кубе уровень грунтовых вод в мониторинговых скважинах прогнозировался с помощью данных дистанционного зондирования и алгоритмов машинного обучения. Лучшей из моделей оказалась Gradient Boosting с CAO = 0,75 м. Полученные результаты являются приемлемыми, и существует возможность разработки более точных прогнозов с учетом большего количества гидрогеологических переменных.

Ключевые слова: Уровней Подземных Вод, Дистанционное Зондирование Земли, Машинного Обучения, Республика Куба.

Dmitrii L. Ustyugov ¹

Noa Segura Hector Luis²

Milá Doma Yuliemi de la Caridad³

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia, Ustyugov_DL@pers.spmi.ru

² Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg,
Russia, s233146@smud.spmi.ru;
University of Ciego de Avila Maximo Gomez Baez,
Ciego de Avila, Cuba, hectorlms@unica.cu

³ Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, st116052@student.spbu.ru;
Institute of Geology and Paleontology/ Geological Survey of Cuba (IGP/SGC),
Havana, Cuba, yuliemi@igp.minem.cu

Analysis of groundwater levels based on machine learning methods on the example of the hydrogeological basin of La Yana (Republic of Cuba)

Abstract. The complex dynamic groundwater system further complicates the task of predicting groundwater levels, so it is necessary to explore products such as ground-based Earth distant sensing to help predict groundwater levels. In the La Jana hydrogeologic basin in Cuba, groundwater levels in monitoring wells were predicted using remote sensing data and machine learning algorithms. The best of the models was found to be Gradient Boosting with CAO = 0.75 m. The results obtained are acceptable and there is a possibility to develop more accurate forecasts taking into account more hydrogeological variables.

Keywords: Groundwater Levels, Earth Remote Sensing, Machine Learning, Republic of Cuba.

Введение. На подземные воды приходится около 99 % всего объема жидкой пресной воды Земли [7], поэтому изучение характеристик подземных водоносных горизонтов, особенно их потенциал пополнения, важно для защиты их от чрезмерного истощения [2]. Подземных вод связан с тем или иным поверхностным водосбором [1], а генезис инфильтрации – с поверхностными процессами [5]. Моделирование водного баланса в ненасыщенной зоне над уровнем грунтовых вод [8] позволяет установить взаимосвязь между пополнением подземных вод и балансом поверхностных вод [4, 9]. Сложная динамическая система подземных вод еще больше усложняет задачу прогнозирования уровня грунтовых вод [10]. Следовательно, необходимо изучить продукты дистанционного зондирования Земли, поддерживающие прогнозирование подземных вод в режиме реального времени, и подходы к снижению влияния ошибок продуктов дистанционного зондирования на производительность моделей, основанных на данных [6]. Поэтому целью исследования является прогнозирование ежемесячных изменений уровня грунтовых вод на основе данных дистанционного зондирования Земли в гидрогеологическом бассейне Ла-Яна, Республика Куба.

Материалы и методы. Исследование проводилось в районе, расположенном между координатами -78,9726; 21,7109 и -78,2826; 22,1112 в системе координат EPSG:4326-WGS 84. Площадь территории 1 280 Км², Сьего-де-Авила, Куба (рис. 1.б). Выборка данных состояла из мониторинговых скважин с 12-летними месячными записями (01.2010-12.2022) в сети станций мониторинга Национального института водных ресурсов, как показано на рис 1.б. Пространственная информация была обработана в базе данных 12 суббассейнов и 7 мониторинговых скважин (рис. 1.б) с использованием геоинформационных систем QGIS Desktop-3.28.9. и SAGA-9.2.0.

Информация об эвапотранспирации ($ET_{MOD16A2}$) была получена из спутникового продукта MOD16A2 Version 6.1 Evapotranspiration/Latent Heat Flux, а информация об осадках (P_{CHIRPS}) из данных Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS), которые были извлечены из набора данных Google Earth Engine (GEE), где был определен водный баланс поверхности. Программа Orange Data Mining (ODM), позволил проводить машинное обучение и разрабатывать прогностические модели на основе имеющихся данных. Переменные баланса поверхностных вод анализировались с помощью алгоритмов машинного обучения: Gradient Boosting, AdaBoost, Linear Regression, Partial Least Squares (PLS), Support Vector Machines (SVM). Модели машинного обучения были обучены и оценены в соотношении 70 % (01.2010–04.2017) обучения и 30 % (05.2017–12.2022) (рис. 1.а) оценки в ODM для функции уравнения 2.

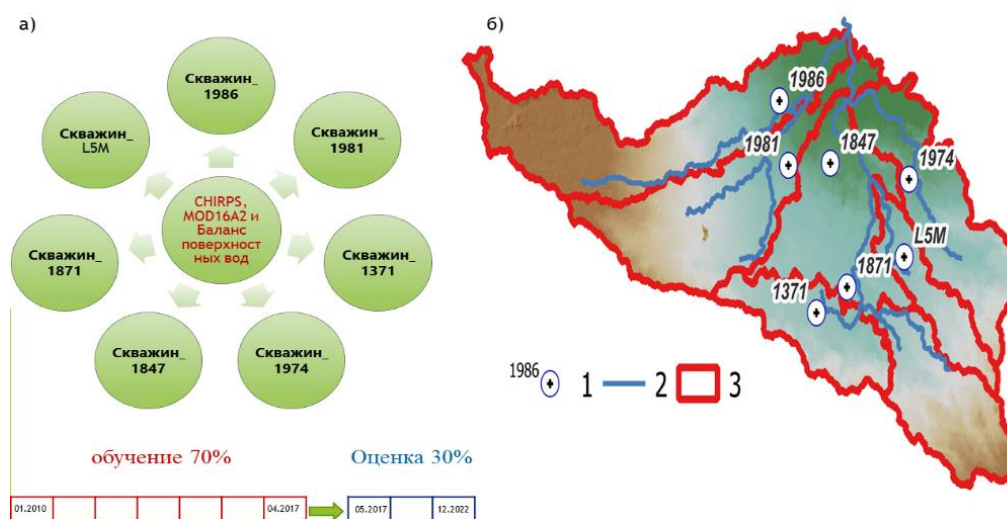


Рис. 1. Схема расположения изученной площади исследования:
а) схема моделирования, анализа, обучения и прогнозирования данных;
б) 1 – мониторинговые скважины; 2 – дренажная сеть; 3 – границы суббассейнов.
Источник: Программное обеспечение QGIS Desktop 3.28.9

Баланс поверхностных вод (уравнение 1) рассматривался как основной источник пополнения в каждом гидрогеологическом суббассейне, который без значительных внешних потоков и с учетом коэффициента запаса (S_s) постоянно вызывает изменение уровня подземных вод (dH) во времени (dt). Таким образом, мы можем выразить уравнение 2 в линейной причинно-следственной модели как функцию независимых переменных во времени, которые вызывают (dH). Для определения модели с наилучшей точностью прогноза для каждого суббассейна были проанализированы среднемесячная абсолютная ошибка (CAO) (урав. 3) и годовой суммы среднемесячной ошибки для каждой модели.

$$P_{CHIRPS} - Et_{MOD16A2} = S_s \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

$$W(P_{CHIRPS}, Et_{MOD16A2}, dt) = dH \quad (2)$$

$$CAO = \frac{\sum(Z_{\text{МОД}} - Z_{\text{СКВ}})}{n} \quad (3)$$

Обсуждение результатов. В результате анализа 7 мониторинговых скважин было установлено, что наилучшие прогнозы показали модели *GB* показала наилучшие прогнозы с меньшей годовой суммарной ошибкой (63,26 мм/год), что свидетельствует о ее большей эффективности по сравнению с остальными моделями с распределением CAO от 0,6 м до 1 м между вторым и третьим квартилями соответственно (рис. 2). Средняя ошибка CAO составила 0,75 м, что аналогично значениям, полученным в [13, 15], что демонстрирует потенциал сочетания данных дистанционного зондирования с моделями машинного обучения для оценки ресурсов подземных вод.

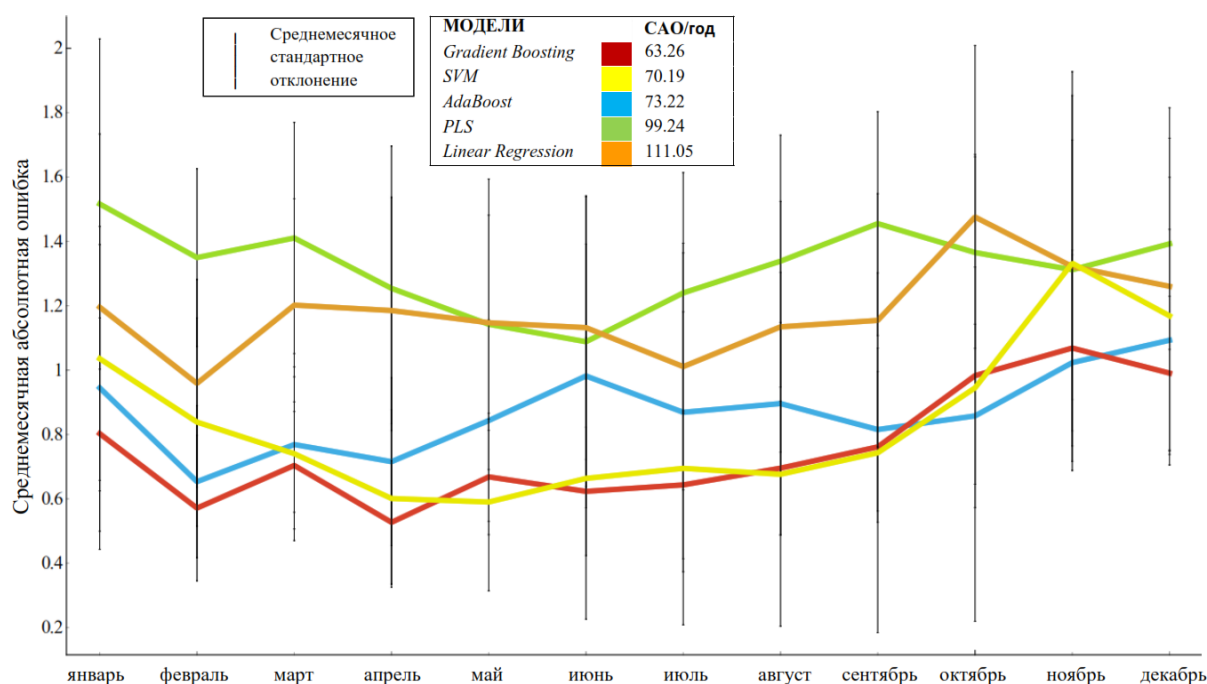


Рис. 2. Средняя абсолютная ошибка для каждой модели

Заключение. С помощью данных дистанционного зондирования с платформы GEE можно прогнозировать уровень грунтовых вод в мониторинговых скважинах. Наибольшие ошибки прогнозирования наблюдались в засушливые периоды с сентября по март, когда выпадает меньше осадков и увеличивается забор подземных вод путем откачки для нужд сельского хозяйства. Необходимо улучшить и оптимизировать анализ гидрогеологической модели бассейна и учесть переменные, связанные с социальным

обеспечением и сельскохозяйственным орошением, чтобы получить более точный прогноз уровня подземных вод.

Список литературы

1. Головина Е. И., Гребнева А. В. Особенности управления ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Калининградской области) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2022. № 52 (4). С. 85–94. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2022-4-85-94>.
2. Alifujiang Y. [и др.]. Changes in intra-annual runoff and its response to climate variability and anthropogenic activity in the Lake Issyk-Kul Basin, Kyrgyzstan // CATENA. 2021. (198). С. 104974. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104974>.
3. Arabameri A. [и др.]. Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping // Geoscience Frontiers. 2020. № 5 (11). С. 1609–1620. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.11.009>.
4. Guevara-Ochoa C. [и др.]. Impact of rainfed agriculture on spatio-temporal patterns of water balance and the interaction between groundwater and surface water in sub-humid plains // Science of The Total Environment. 2024. (912). С. 169247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169247>.
5. Khaustov V. V., Ustiugov D. L. Formation of drainage waters of Tynyauz deposit in ecological aspect // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. № 4 (87). С. 042006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/4/042006>.
6. Liu Q. [и др.]. Simulation of regional groundwater levels in arid regions using interpretable machine learning models // Science of The Total Environment. 2022. (831). С. 154902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154902>.
7. Naciones Unidas N. U. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas, Hacer visible el recurso invisible / N. U. Naciones Unidas, Paris, Francia: UNESCO, 2022. 245 с.
8. Pozdniakov S. P. [и др.]. Variability in spatial–temporal recharge under the observed and projected climate: A site-specific simulation in the black soil region of Russia // Journal of Hydrology. 2020. (590). С. 125247. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125247>.
9. Xu P. [и др.]. Estimation of shallow groundwater recharge in central Qinghai-Tibet Plateau by combining unsaturated zone simulation and improved water table fluctuation method // Journal of Hydrology. 2024. (630). С. 130689. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130689>.
10. Zhang Q. [и др.]. A new real-time groundwater level forecasting strategy: Coupling hybrid data-driven models with remote sensing data // Journal of Hydrology. 2023. (625). С. 129962. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129962>.

А 437 **Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов. В 2 томах. Том 1 / Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. СПб, 2025. 344 с. (XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов, 2–6 декабря 2024 г.)**

ISBN 978-5-00253-007-6

ISBN 978-5-00253-008-3 (Том 1)

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

**XX ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС
СТУДЕНТОВ ВЫПУСКНОГО КУРСА И АСПИРАНТОВ**

2–6 декабря 2024 г.

Тезисы докладов

Том 1

Тезисы докладов 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 06.06.2025. Формат 60×84/8. Уч.-изд.л. 35,6.
Тираж 70 экз. Заказ 306.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

КОМПАНИИ-ПАРТНЕРЫ УНИВЕРСИТЕТА
PARTNER COMPANIES OF THE UNIVERSITY

Public Joint Stock Company
«PhosAgro»



ПАО «ФосАгро»

Group of companies BP



Группа компаний BP

Public Joint Stock Company
«GAZPROM»



ПАО «ГАЗПРОМ»

Public Joint Stock Company
«ROSNEFT»



ПАО «РОСНЕФТЬ»

Public Joint Stock Company
«NOVATEK»



ПАО «НОВАТЭК»

Public Joint Stock Company
«Gazpromneft»



ПАО «Газпром нефть»

CJSC Group of companies «Titan»



ЗАО «Группа компаний «Титан»

Public Joint Stock Company
«Surgutneftegas»



ПАО «Сургутнефтегаз»

SC «Russian copper company»



ЗАО «Русская медная компания»



ГОРНЫЙ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II

Россия, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2
Организационный комитет
Тел. 8-812-328-84-96

WWW.VKK.SPMI.RU

