

**XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

НОВЫЕ ИДЕИ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

**3 – 4 АПРЕЛЯ 2025 г.
МОСКВА**



ТОМ 3

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**Инновационные технологии
геологической разведки
и горного дела**

УДК 082 + [550.8+553] (082)
ББК 94.3 + 26.21я43 + 26.34я43

Новые идеи в науках о Земле: в 9 т. Материалы XI Международной научной конференции «Новые идеи в науках о Земле» - М.: Издательство МГРИ, 2025.

Т. 3: ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ И ГОРНОГО ДЕЛА / ред. коллегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. - М.: Издательство МГРИ, 2025 – 346 с.

ISBN 978-5-907595-10-1

УДК 082 + [550.8+553] (082)
ББК 94.3 + 26.21я43 + 26.34я43

ISBN 978-5-907595-03-3 (Том 3)

© РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 3. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ И ГОРНОГО ДЕЛА	8
Подсекция 3.1. Актуальные проблемы автоматизации и энергетики геологической разведки и горного дела	8
Башкуров А.Ю.* Альтернативная энергетика и ее влияние на экологию окружающей среды	8
Гаглоев З.Я.*, Стадник Д.А., Стадник Н.М. Использование нейронных сетей для кинематического анализа моделей горно-геологических информационных систем	11
Кормес А.А.* Технологические аспекты автоматизации процессов проходки и оборудования камер для станка 2КВ в горных выработках.....	15
Мбох Нгома А П Л* Общий анализ влияния новых технологий на горнодобывающую деятельность.....	19
Меркулов М.В.* Разработка энергетических комплексов буровых установок глубокого бурения на нефть и газ	23
Мухаматов М.Д.*, Подаревский Р.Д.*, Адамова Л. С., Меркулов М.В. Тенденции развития цифровизации и применения искусственного интеллекта в сфере геологоразведки и недропользования.....	27
Оливетский И.Н. Роль Метрологии в современном горном деле.....	31
Подаревский Р.Д.*, Адамова Л. С. Перспективы развития во внедрении солнечной энергии в процессы ведения геологоразведочных работ	34
Подаревский Р.Д.*, Меркулов М.В. Исследование потенциала ветроустановок как возобновляемого источника энергии в условиях ведения геологоразведочных работ	38
Барменков Е.Ю.* Цифровые двойники в горном деле	42
Подсекция 3.2. Бурение скважин	46
Белов Н.М.*, Петенев П.Г. Анализ конструкции породоразрушающего инструмента, снижающего гидродинамическое давление бурового раствора при сооружении скважин комплексом ССК.....	46
Лалетина К.В.*, Нескоромных В.В. Совершенствование резцов PDC для армирования буровых долот.....	50
Севостьянов Д.А.*, Петенёв П.Г. Анализ эффективности систем отбора проб при бурении комплексами ССК.....	55
Антропов В.С.*, Попова М.С. Компьютерное моделирование в разработке бурового инструмента типа PDC	59
Ильязов Р.Р.*, Шахвердев А.Х. Информативность газового каротажа в современных условиях бурения.....	63
Маде А.Р.* Соловьев Н.В. Обоснование параметров технологического процессов цементирования обсадных колонн в условиях агрессии на месторождении Доба (республика Чада).....	67
Акаласова С.Н.*, Соловьев Н.В. Технология безамбарного бурения с целью повышения экологической безопасности на месторождении Жанажол (РК).....	71
Ганин И.П.*, Сердюк Н.И. Мониторинг самоходных буровых установок	75
Дегтярев Н.А.*, Попова М.С. Основные направления совершенствования бурового инструмента типа PDC	79
Сердюк Н.И.*, Ганин И.П. Современные технологии автоматизации спускоподъёмных операций буровых установок	83
Махмудов Н.Н.*, Бозорбоева З.Р. Требования к конструкции скважин, их бурению, методам вскрытия пластов и освоению скважин газоконденсатное месторождение Назаркудук	87

Алексеева А.К., Шишкина А.С.*, Хохлова Ю.Н., Иншакова Н.Ю., Тарасенко А.К., Турова А.В. Малоглубинное стратиграфическое бурение как инструмент геологического изучения осадочного чехла в пределах Александровской зоны поднятий в северо-западной части Баренцева моря.....	91
Петина В.А.*, Соловьёв Н.В. Особенности и результаты параметрической скважины Чумпаловская-1 глубиной 6250 м.....	95
Васильев А.Н.*, Шишляев В.В., Тунгусов С.А. Опыт применения российского специализированного программного обеспечения при проектировании строительства скважин.....	99
Гиниатуллин Р.Р.*, Агзамов Ф.А. Совершенствование конструкций скважин для месторождений Среднего Приобья, оптимизация затрат при их тиражировании.....	103
Кириков Д.В.*, Нескоромных В.В., Петенёв П.Г. Производственные испытания динамически стабилизирующего породоразрушающего инструмента.....	106
Сырчина А.С.* О возможности применения наноглин при бурении скважин в сложных горно-геологических условиях.....	111
Воропаев Е.А.* Применение методов интенсивной пластической деформации, как способ улучшения механических свойств алюминиевых сплавов для изготовления бурильных труб.....	115
Рявкин Д.А.*, Яхин А.Р. Повышение показателей эффективности бурения скважин на основе автоматизации бурения и осцилляции буровой колонны.....	119
Черновол Д.В.*, Белов А.П. Уменьшение затрат времени при принятии решений в наклонно направленном бурении.....	123
Черноволот С.Г.*, А.Р. Яхин Износ режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами PDC.....	127
Шаймулин Р.М.*, Тунгусов С.А., Сырчина А.С. Освоение водозаборной скважины с применением эжекторного насоса на примере узла водозабора.....	131
Попов В.О.*, Соловьёв Н.В., Курамшина Э.Р. Влияние анизотропии на изменения интенсивности искривления скважины.....	135
П.В. Овчинников* Современные технологии повышения качества цементирования скважин.....	139
Румянцев А.Д.*, Тунгусов С.А. Бурение и отбор керна в сложных горно-геологических условиях: анализ и выбор эффективного способа бурения.....	143
Склянов В.И.* Научные основы высокооборотного алмазного бурения на больших глубинах разведочных скважин малого диаметра с применением скважинных преобразователей механической энергии.....	147
Талалаев Р.С.*, Склянов В.И. Применение забойного мультипликатора для интенсификации процесса разрушения горных пород долотами PDC при проведении ЗБС.....	151
Цыганков М.А.*, Вайнерман Б.П. Проектирование профиля наклонно-направленной скважины на Пильтун-Астохском месторождении (шельф о. Сахалин).....	155
Данилова К.С.*, Сырчина А.С. Обоснование выбора рациональной рецептуры бурового раствора в условиях потери деформационной устойчивости горных пород на примере месторождения Х.....	159
Башкуров А.Ю.* Опыт использования горизонтальных скважин на месторождении Кенкияк.....	163
Фатьянов А.А.*, Джумаев Э.М., Свечников Д.Ю. Машинное обучение и численное моделирование: новый подход к предотвращению аварий в бурении.....	166
Ионов Е.О.*, Сырчина А.С. Опыт использования телеметрического оборудования при бурении наклонно-направленной скважины на месторождении Х.....	170

Каминский Я.П., Склянов В.И., Сырчина А.С. Обоснование параметров технологии бурения с применением долот PDC при бурении водозаборных скважин.....	174
Крюков Н.А.*, Вайнерман Б.П. Снижение вибрационных нагрузок при бурении наклонно-направленной добывающей скважины (на примере Ярудейского месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции)	178
Курамшина Э.Р.*, Соловьев Н.В. Влияние химического состава глин и вида реагента на фильтрационную характеристику бурового раствора	182
Лукашук Д.Р.*, Сырчина А.С. Опыт отбора проб грунтов и определения их параметров при инженерно- геологических изысканиях в Московской области.....	186
Мартюшин С.А.*, Овчинников П.В. Обеспечение надежности конструкции скважины в интервалах пластичных соленосных отложений.....	190
Мартюшина Е.Е.*, Соловьев Н.В. Супрамолекулярные системы полимерных буровых растворов для эффективного сооружения скважин	194
Мартюшина Е.Е.*, Сырчина А.С. Термостойкие вязкоупругие смеси на основе сшитых полимерных гелей	198
Маслак С.В.*, Сырчина А.С. Особенности бурения добывающей нефтяной скважины на Киньяменском месторождении	202
Мезенцев Д.Ю.*, Соловьев Н.В., Денисов О.В. Разработка и применение роторно-управляемой системы РУС-120-ГТ.....	206
Николаенко В.В.* Способ промывки песчаной пробки и крепления ПЗП в газодобывающей скважине с применением колтубинга.....	210
Заливин В.Г., Соловьёв Н.В.* Способ изоляции зон интенсивного поглощения	214
Заливин В.Г., Соловьёв Н.В.* Эффективные технологии применения пены при бурении геологоразведочных скважин	218
Подсекция 3.3. Горное дело и общепромышленные методы решения общегеологических задач	222
Truong Van Tu*, Nguyen Tien Hung, Nguyen The Vinh. Selection of fluids and proppants for hydraulic fracturing in Vietnam	222
Адамова Л.С.*, Дмитрак Ю.В. Тонкое измельчение минерального сырья: влияние и перспективы	226
Борисенко Д.И.* Акустическая диагностика очагов пожаров в угольных пластах.....	230
Боровков Ю.А., Кадыргулов Р.Р., Вильмис А.Л., Шалаева А.А.* Выбор и формирование из техногенного сырья покрытий в почве горных выработок	234
Бочаров И.А.*, Иляхин С.В. Совершенствование технологии отбойки горных пород скважинным методом с применением невзрывчатых расширяющих смесей.	238
Бу Хонг Зуонг*, Нгуен Тьен Хунг, Нгуен Те Винь, Арсентьев Ю.А. Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа геофизических данных буровых скважин для угольной промышленности	242
Бу Хонг Зыонг*, Некоз С.Ю., Арсентьев Ю.А., Калиничев В.Н. Влияние минералов на качество коллектора в миоценовых породах нефтяного месторождения Белый Тигр, Вьетнам.....	246
Даниленко И.С.*, Логачёв В.В. Разработка технологии биовыщелачивания пиритового огарка	250
Демишкан В.Ю.*, Иляхин С.В. Оценка влияния фиброволокн на повышение прочности грунтобетона на разных этапах твердения грунтобетонной смеси	254
Долгополов М.А.*, Брюховецкий О.С. К вопросу повышения эффективности закладочных работ на горных предприятиях	257

Долгополов М.А.*, Брюховецкий О.С., Найдено И.Ю. Рациональный способ приготовления твердеющей закладочной смеси на основе хвостов обогащения при подземной разработке месторождений	261
Енютин В.И. Краткий обзор скважинных гидрораскалывающих устройств и области их применения.....	265
Иванова Е.В.*, Коротаев Д.Н. Исследование влияния технологических режимов электроискрового модифицирования поверхностей деталей горнодобывающего оборудования на основе регрессионного анализа	269
Исайчева Е.А.*, Яшин В.П. Анализ способов контроля за деформацией бортов карьера	273
Каримов Н.М.*, Халимов И.У., Хамидов С.Б. Перспективы применения электрокинетических явлений при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания	277
Комаров Д.П.*, Радченко Д.Н. Биоинспирированные роботизированные технологии подземной добычи руд на больших глубинах: переход к новому технологическому укладу	281
Абрамов А.М.*, Лукин Д.С.*, Дьяченко Е.Н. Метод создания гидроизоляции рудного тела с применением гидрогеологических методов при разработке месторождений с использованием физико-химической геотехнологии	284
Насыров А.А.* О важности преподавания дисциплины «Теория горения и взрыва» для всех направлений подготовки в МГРИ (МГРИ)	288
Нгуен Тьен Хунг*, Ву Хонг Зыонг, Ву Тьет Тхат, Арсентьев Ю.А. Использование машинного обучения и искусственного интеллекта для прогнозирования модуля Юнга с целью оптимизации процесса бурения скважин	292
Нгуен Тьен Хунг*, Дыонг Ву, Арсентьев Ю.А. Прогнозирование проницаемости карбонатных резервуаров месторождений нефти с использованием метода гидравлических единиц потока	296
Романевич К.В.*, Мулев С.Н., Иванов Д.А. Определение области влияния микросейсмического события на массив горных пород в процессе сейсмомониторинга угольных шахт и рудников	300
Савватеев Я.В.*, Иляхин С.В., Корнилов Б.А. Повышение контрастности отраженного сигнала георадиолокационного зондирования под действием фонового поля (поля подсветки) при поисках кристаллосырья.....	304
Терешин И.А.*, Негурица Д.Л. Моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего грунтово-породного массива при строительстве жилого комплекса в мегаполисе.....	308
Халимов И.У., Шарафутдинов У.З., Юлдашев Ш.Ш., Хамидова М.Н. Геологические аспекты влияния глинистых минералов на процесс подземного выщелачивания урана.....	312
Халимов И.У.*, Каримов Н.М., Муродуллаева М.У. Перспективы отработки остаточных запасов урана из отработанных блоков подземного выщелачивания	316
Хамидов С.Б.*, Аликулов Ш.Ш. Оптимизация расположения геотехнологических скважин при изменении гидродинамического режима растворов в процессе подземного выщелачивания урана	320
Бунякин П.А.*, Яшина В.И., Яшин В.П. Михайловский ГОК - история и направления развития	324
Енина Е.Д.*, Шишляев В.В. Подходы к определению хрупкости угольных пластов для оптимизации параметров проведения гидравлического разрыва пласта.....	328
Подсекция 3.4. Технология и техника освоения континентальных, шельфовых и глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых	332
Салахов И.Н.*, Некоз К.С. Учебный стенд подземного выщелачивания.....	332

Салахова К.Н.*, Вильмис А.Л., Чеснова Е.С. Сравнительное исследования по кислотному выщелачиванию в пачуках и массообменных аппаратах	335
Родомышльский Д.В.*, Сурин С.Д.*, Грызлов А.М.*, Чулкова В.В. Разработка континентальных, шельфовых погребенных россыпей методом скважинной гидродобычи.....	339
Чопенко В.А.*, Тушов А.И. Планирование разработки месторождений на основе анализа картограммы коэффициентов вскрыши	343

СЕКЦИЯ 3. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ И ГОРНОГО ДЕЛА

Подсекция 3.1. Актуальные проблемы автоматизации и энергетики геологической разведки и горного дела

Альтернативная энергетика и ее влияние на экологию окружающей среды

Башкуров А.Ю.* (МГРИ, Bashkurov_A@inbox.ru)

Аннотация

В настоящее время, в мире существует много экологических проблем, которые связаны с использованием энергетики. Она оказывает сильное влияние на окружающую среду экосистемы в целом.

Ключевые слова

Возобновляемые источники энергии, альтернативная энергетика

Теория

В настоящее время, в мире существует много экологических проблем, которые связаны с использованием энергетики. Она оказывает сильное влияние на окружающую среду экосистемы в целом. Чего стоит электроэнергия, которая производится на ТЭС (тепловая электростанция). При строительстве электростанции, или других проектов, происходит значительное загрязнение окружающей среды. Для такого рода проектов характерно токсичное и радиационное загрязнение, соответственно могут возникать эффекты, при которых скорость сжигания кислорода больше скорости его образования, за счет фотосинтеза земных растений на данной территории, но помимо данной проблемы, ТЭС, наряду с топливом, потребляет большое количество воды $150\,000\text{ м}^3$, $18\,000\text{ т}$ угля, что приводит к загрязнению водоема – охладителя. На данный момент, планируется разработка методов преобразования энергии, которые будут меньше воздействовать на окружающую среду (рис 1). [1]



Рисунок 1. Структура выработки электроэнергии в мире

Экологических проблем в энергетике достаточно много, но перечислим некоторые из них:

1) экологические последствия развития солнечной энергетики – это, космические электростанции, солнечные станции, которые пока что не относятся к экологическим чистым станциям, так как в случае создания солнечной электростанции увеличится опасность загрязнения подземных вод, концентраторы, которые сильно изменяют структуру почвенных условий, растительности. На данной электростанции нагревается воздух, который проходит через солнечные излучения – изменяется тепловой баланс, изменяется влажность, бывают случаи, что происходит возгорание системы. Основную опасность предоставляют жидкости, которые содержат различные химикаты, те же хроматы, затемнение больших территорий солнечными концентраторами, большая материалоемкость, воздействие на климат космических электростанций.

2) влияние ветроэнергетики на природную среду;

Начнем с того, что все начинается со строительства ветровых электростанций, так как при строительстве, происходит загрязнение атмосферы, почв, нанесение вреда растительному и животному миру. Происходит загрязнение атмосферы при использовании сыпучих материалов, эксплуатация при строительстве воздействует на человека, на атмосферный воздух, на водные объекты.

Наиболее важный фактор влияния на окружающую среду - это акустическое воздействие. В зарубежной практике выполнено достаточно исследований и натурных изменений уровня и частоты шума для различных ветроустановок (ВЭУ) с ветроколесами, отличающимися конструкцией, материалами, высотой над землей, и для разных природных условий.

Шумовые эффекты от ВЭУ имеют разную природу и подразделяются на механические и аэродинамические воздействия. Последние, в свою очередь, могут быть низкочастотными (менее 16-20 Гц) и высокочастотными (от 20 Гц до нескольких кГц). Они вызваны вращением рабочего колеса и определяются следующими явлениями: образованием разряжения за ротором или ветроколесом с устремлением потоков воздуха в некую точку схода турбулентных потоков; пульсациями подъемной силы на профиле лопасти; взаимодействием турбулентного пограничного слоя с задней кромкой лопасти.

Удаление ВЭУ от населенных пунктов и мест отдыха решает проблему шумового эффекта для людей. Однако шум может повлиять на фауну, в том числе на морскую фауну в районе экваториальных ВЭУ. [2] По зарубежным данным, вероятность поражения птиц ветровыми турбинами оценивается в 10%, если пути миграции проходят через ветровой парк. Размещение ветровых парков повлияет на пути миграции птиц и рыб.

Помехи, вызванные отражением электромагнитных волн лопастями ветровых турбин, могут сказываться на качестве телевизионных и микроволновых радиопередач, а также различных навигационных систем в районе размещения ветрового парка ВЭУ на расстоянии нескольких километров. Наиболее радикальный способ уменьшения помех - удаление ветрового парка на соответствующее расстояние от коммуникаций. В ряде случаев помех можно избежать, установив ретрансляторы. Этот вопрос не относится к категории трудноразрешимых, и в каждом случае может быть найдено конкретное решение. [3]

3) возможные экологические проявления геотермальной энергетики;

Основные последствия геотермальной энергии, является не только оседание почвы, но и сейсмические эффекты, загрязнение поверхностных и грунтовых вод, выброс бурового раствора, сброс отработанных термальных вод, в основном эти проблемы характерны для ГеоТЭС, выброс тепла в атмосферу, выброс метана и других химических элементов.

- экологические последствия использования энергии океана;

Эта проблема относится к различным электростанциям, у которых при использовании термальной энергии океана, происходит утечка аммиака, пропана, метана и других веществ, применяемых для промывки теплообменников, выделение углекислого газа.[4] Один из важных вопросов влияния на окружающую среду преобразования энергии волн в прибрежной зоне – это воздействие на процессы в ее пределах. Вещества, перемещаемые волнами, называются прибрежными наносами. Движение их необходимо для стабилизации береговой полосы, одним словом, баланс между эрозией и отложениями. В связи с этим цепь из преобразователей энергии волн целесообразно устанавливать в местах намечаемых волноломов, чтобы они выполняли двойную функцию: использование энергии волн и защиту побережья.

4) экологическая характеристика использования биоэнергетических установок;

Биоэнергетическая станция является одной из эффективной и, конечно же, безопасной. Она способствует избавлению окружающей среды от загрязнения всевозможными способами. Но, конечно же, есть и неблагоприятные воздействия на экологию:

- выброс тепла – меняется тепловой баланс;
- взрывоопасность;
- выброс различных химических и токсичных веществ: окиси углерода, биогаза;
- большое количество отходов – промывочные воды, перегонки.

И в заключение, хотелось бы надеяться, что в будущем, будут решены эти экологические проблемы, которые, присутствуют не только в России, но и в других странах мира. Все эти проблемы, в настоящее время, решаются очень медленно, и далеко не эффективно.

Библиография

1. Безруких П. П., Арбузов Ю. Д., Борисов Г. А., Виссарионов В. И., Евдокимов В. М., Малинин М. К., Огородов Н. В., Пузаков В. Н., Сидоренко Г. И., Шпак А. А. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии России / Под общей ред. П. П. Безруких. - СПб.: Наука, 2002. - 314 с.
2. Бобров А.В. Возобновляемые источники энергии: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс] / А.В. Бобров, В.А. Тремясов. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 216 с.
3. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности / Междунар.энергет. агентство. – М.: ОЭСР/МЭА, 2004. – 120 с.
4. Удалов С.Н. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013 – 459 с.+ цв. вкл. –(Серия «Учебники НГТУ).

Использование нейронных сетей для кинематического анализа моделей горно-геологических информационных систем

Гаглов З.Я.* (СКГМИ, zavengagloev@gmail.com),

Стадник Д.А. (МГРИ, stadnikda@mgri.ru),

Стадник Н.М. (СКГМИ, kun17@yandex.ru)

Аннотация

Инновационные технологии в горном деле представляют собой современные подходы и инструменты, применяемые для улучшения процессов добычи полезных ископаемых и обеспечения безопасности работников на горных предприятиях. Активное развитие любой отрасли на сегодняшний день немыслимо без внедрения инновационных технологий, в том числе интеллектуальных. Тренд на повсеместную цифровизацию деятельности предприятий охватывает все без исключения сферы национального хозяйства. Применение нейросетевых моделей в горном деле способствует повышению эффективности производства, снижению затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова

Инновационные технологии, автоматизация, эффективность, безопасность, искусственный интеллект, нейросетевые модели

Теория

Современная разведка полезных ископаемых в России переживает период трансформации, обусловленный истощением легкодоступных запасов и необходимостью освоения трудноизвлекаемых ресурсов. Основной акцент делается на внедрение инновационных технологий, что позволяет повысить точность прогнозирования. Учитывая современные тенденции, формирование геологических и технологических баз данных на основе архивной проектной документации (рис. 1), ее обработка прикладными программами, является стандартом работы с таким обширным массивом информации. Одним из ключевых направлений является развитие моделей в горно-геологических информационных системах (ГГИС), которые впоследствии становятся базой для автоматизации горного производства.

Такой подход зарекомендовал себя с хорошей стороны, но при всех своих достоинствах слабым местом, ограничивающим применение данного метода, является трудоемкость и высокие квалификационные требования, предъявляемые к специалистам для работы с моделями. Кроме того, многие предприятия развивают проекты с применением постояннодействующих цифровых моделей горнотехнических систем («цифровых двойников»), искусственного интеллекта (ИИ), и т.п. Однако, из-за сложности подобных моделей (рис.2) большая часть времени уходит на их исправление и подготовку моделей в ГГИС к обработке методами ИИ. Также вычислительные ресурсы предприятий нередко нуждаются в модернизации при переходе к использованию технологий ИИ.

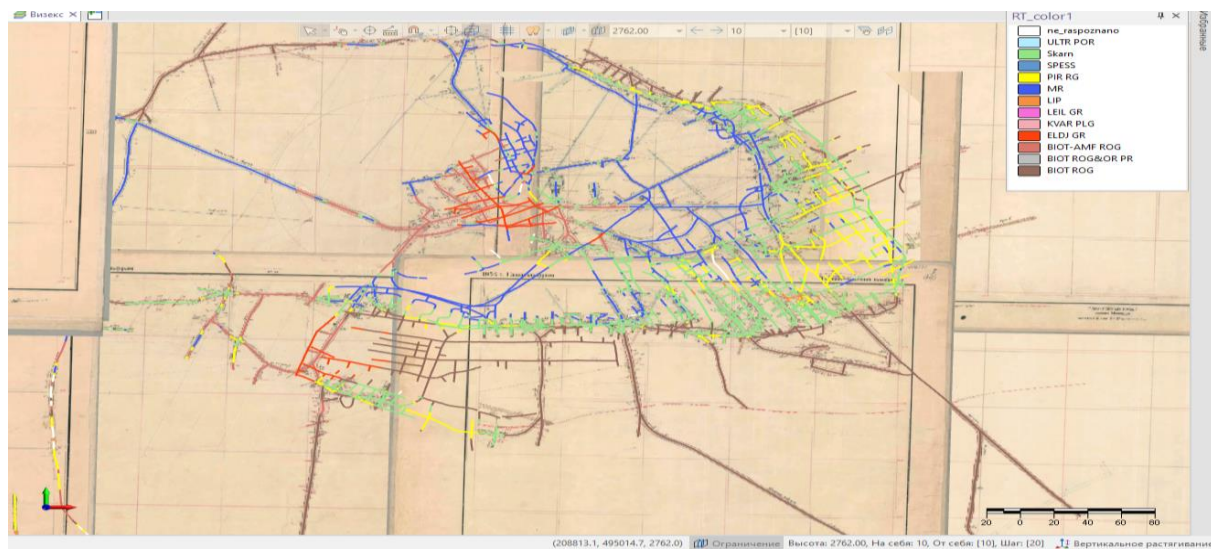


Рисунок 1. Процесс оцифровки выработок с учетом типа горных пород в ГГИС Micromine

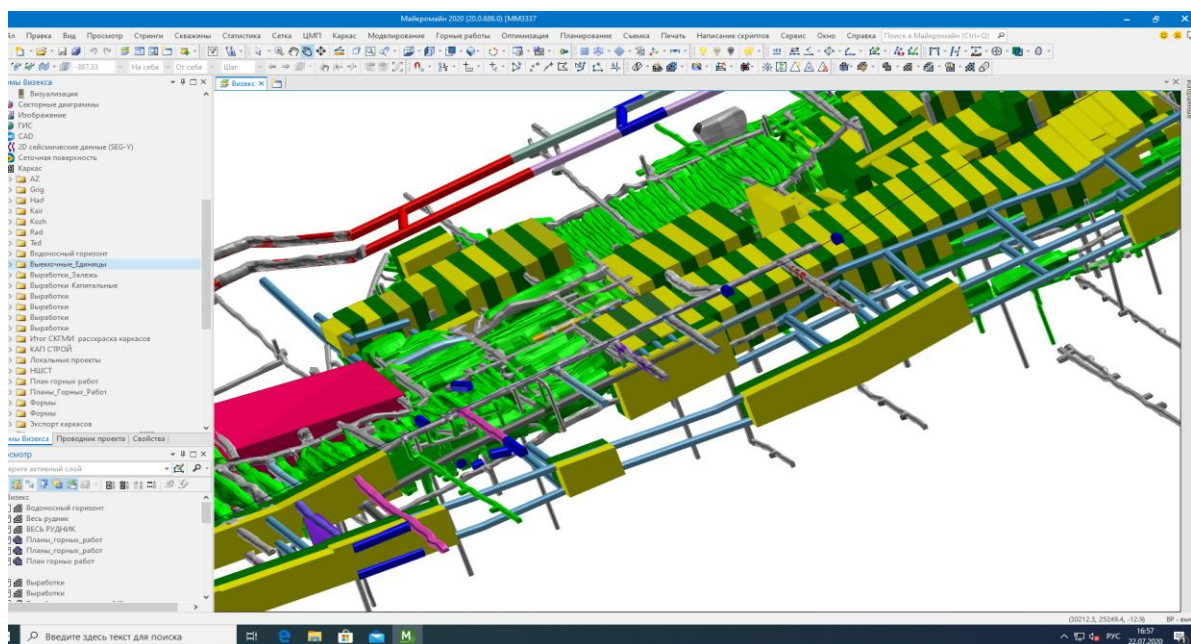


Рисунок 2. Пример «цифрового двойника» горнодобывающего предприятия

Наиболее подходящим классом задач для применения алгоритмов искусственного интеллекта при обработке данных горнотехнических моделей является кинематический анализ. Данный класс задач выделяется возможностью использования данных, имеющихся в геологических 3D-каркасах. Кинематический анализ заключается в обработке триангуляционных каркасных моделей, которые хранятся в ГГИС в формате сеточных поверхностей, а звеньями сетки выступают треугольные грани, несущие информацию о ее ориентации в пространстве. Для решения задач кинематического анализа достаточно знать средние характеристики граней, но для систем ИИ при обработке данных 3D-модели без участия человека критически необходима детальная проработка функционала по разделению отдельных объектов по группам и признакам. Учитывая особенности и требования при работе

с 3D-моделью алгоритма обучения нейронной сети необходимо производить по схеме, представленной на рис. 3.



Рисунок 3. Схема обучения нейронной сети

При пробном испытании данной схемы обучение нейронной сети производилось тремя различными методами: SGD-стохастический градиентный спуск; L-BFGS-B-итерационный метод оптимизации и Adam-стохастический метод оптимизации.

Результаты обучения нейронной сети приведены в таблице 1 и свидетельствуют о высокой эффективности классификации моделей каркасов и точности распознавания более 98%. Наилучшими показателями обладает нейронная сеть, обучаемая методом L-BFGS-B, что объясняется наличием нескольких локальных максимумов в классе объекта «горные выработки». Точность модели классификации составила 98,2%, она обладает высокой специфичностью и не дает ложноположительные результаты (99,4%).

Таблица 1. Результаты обучения нейронной сети

МЕТОД	Площадь ограничения прямой	Точность классификации (ТК)	Общая ТК и полнота	Точность	Полнота	Кросс-энтропия	Специфичность
SGD	0.998	0.921	0.884	0.850	0.922	0.226	0.933
L-BFGS-B	0.988	0.982	0.982	0.983	0.982	0.194	0.994
ADAM	0.998	0.940	0.923	0.944	0.940	0.130	0.950

Выводы

Технологии искусственного интеллекта могут применяться для обработки данных горнотехнических моделей в ГГИС. Использование искусственного интеллекта позволяет автоматизировать процесс сбора и оцифровки информации с бумажных носителей о залегании месторождений полезных ископаемых, тектонических нарушениях, структурных и горно-геологических характеристиках, горных выработках, сведений о волнистости, шероховатости и многих других.

Библиография

1. Дэвис Д. С. Статистический анализ данных в геологии. — М.: Недра, 1990. — 319 с.
2. Мельниченко И. А., Кожухов А. А., Омельченко Д. Р., Мосейкин В. В. Построение трехмерной модели месторождения с использованием принципов блочного моделирования и искусственных нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10. — С. 5—19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_5.
3. Сергунин М. П., Еременко В. А. Обработка структурных геологических моделей алгоритмами искусственного интеллекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 2—13. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_2.
4. Цифровизация деятельности российских компаний горнодобывающей отрасли / Е.С. Матерова, Ж.А. Аксенова, Р.Р. Шарафуллина и др. // Уголь. 2024;(11):117-121. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-117-121.
5. Сергунин М. П., Еременко В. А. Обработка структурных геологических моделей алгоритмами искусственного интеллекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 2—13. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_2.

Технологические аспекты автоматизации процессов проходки и оборудования камер для станка 2КВ в горных выработках

Кормес А.А. * (МГРИ, kormesaa@mail.ru)

Аннотация

Представлен комплексный анализ технологических процессов проходки и оборудования камер для размещения горного комбайна 2КВ при подземной разработке рудных месторождений. Рассмотрены методики расчета геометрических параметров выработок, определения объемов горных работ, параметров буровзрывных работ и организации проходческих операций.

Ключевые слова

Камера, станок 2КВ, буровзрывные работы, проходка выработок

Теория

Автоматизация процессов проходки и оборудования камер для станка 2КВ в горных выработках представляет собой важный шаг к повышению эффективности и безопасности горных работ. Внедрение современных технологий автоматизации позволяет значительно сократить время на выполнение операций, снизить трудозатраты и минимизировать риски для работников.

Современные системы автоматизации обеспечивают мониторинг и управление процессами в реальном времени. Это включает в себя использование датчиков и сенсоров, которые отслеживают параметры работы оборудования, такие как скорость проходки, давление, температуру и другие критически важные показатели. Данные, собранные с этих устройств, передаются в централизованную систему управления, где они обрабатываются и анализируются. На основе полученной информации операторы могут принимать обоснованные решения о корректировке работы станка, предотвращая потенциальные аварийные ситуации.

Кроме того, автоматизация позволяет интегрировать системы управления с программным обеспечением для планирования и оптимизации горных работ. Это дает возможность более точно прогнозировать время завершения проходки, определять наиболее эффективные маршруты и методы работы, а также координировать действия различных подразделений.

Важным аспектом автоматизации является также возможность дистанционного управления оборудованием. Это позволяет операторам находиться на безопасном расстоянии от потенциально опасных участков, что существенно снижает риск травм на производстве. Внедрение роботизированных систем и беспилотных технологий открывает новые горизонты для автоматизации, позволяя проводить работы в условиях повышенной опасности, таких как затопленные или сильно загрязненные участки.

Таким образом, автоматизация процессов проходки и оборудования камер для станка 2КВ в горных выработках не только повышает эффективность, но и значительно улучшает безопасность, создавая более комфортные условия труда для работников и снижая воздействие на окружающую среду

Методология исследования

Методологическую основу исследования составили расчетно-аналитические методы определения геометрических и технологических параметров горных выработок. Использованы методики профессора М.М. Протодяконова по расчету горного давления, нормативные документы в области безопасности горных работ и рекомендации по проектированию подземных выработок.

Геометрические параметры камер

При проектировании камер для размещения комбайна 2КВ принципиальное значение имеют их точные геометрические параметры. Для камеры размещения станка установлены следующие минимальные технологические размеры:

- Высота от почвы: 4150 мм
- Ширина: 4100 мм
- Глубина от оси рельсового пути: 4335 мм

Для камеры разбуривателя характерны несколько иные параметры:

- Высота от почвы: 3100 мм
- Ширина: 2800 мм
- Глубина: 4000 мм

Расчет объемов горных работ

Объем работ по камере размещения станка 2КВ определяется по формуле:

$$V = B \left(L_4 \cdot H + \frac{H_2 + H}{2} L_2 \right) = 4,2 \left(2,06 \cdot 4,2 + \frac{3,6 + 4,2}{2} 1,4 \right) = 59,3 \text{ м}^3 \quad (1)$$

Определение объемов выработок осуществляется с учетом коэффициента излишка объема, который не должен превышать 1,03. Площадь поперечного сечения и объем камер рассчитываются графоаналитическим методом с применением специальных формул.

Объем работ по камере размещения станка 2КВ в проходке:

$$V_{\text{прох}} = V_{\text{ц}} = 59,3 \cdot 1,03 = 61,1 \text{ м}^3 \quad (2)$$

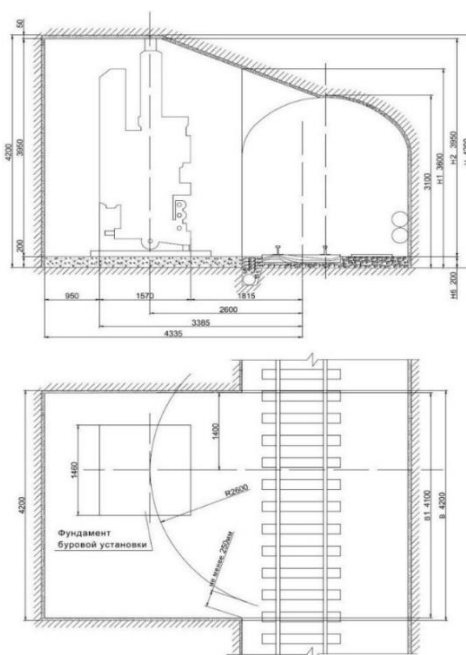


Рисунок 1. Схема к расчету объема камеры

Буровзрывные работы

Технология проходки камер предусматривает использование буровзрывного метода. Для бурения шпуров применяется переносное буровое оборудование:

- Перфоратор ПП-80
- Распорная колонка с податчиком ЛКР-ТЗ.

Основные параметры буровзрывных работ включают:

- Диаметр шпуров: 42 мм
- Длина шпуров: 1,7-2,0 м
- Количество шпуров за цикл: 21-31 шт
- Применяемое взрывчатое вещество: Детонит М

Таблица 1. Параметры буровзрывных работ

Наименование	Единицы измерения	Количество
Площадь поперечного сечения камеры в черне	м ²	17,64
Коэффициент крепости пород	f	10
Число перфораторов ПП-80	шт	2
Диаметр шпура	мм	42
Длина шпура	м	2,2–1,9
Количество шпуров на цикл	шт	31
Число шпурометров на цикл	м	61,9
Количество ВВ на цикл	кг	26,8
Выход породы за первый цикл	м ³	29,4
Выход породы за второй цикл	м ³	31,7
Выход породы по камере	м ³	61,1
Продвигание забоя за цикл	м	1,71
Коэффициент использования шпура	η	0,9
Тип взрывного прибора: КВП-1/100М	шт	1

Уборка горной массы

Объем отбитой горной массы с учетом разрыхления при взрывной отбойке составит:

$$V_{г.м} = V \cdot K_p, \text{ м}^3 \quad (3)$$

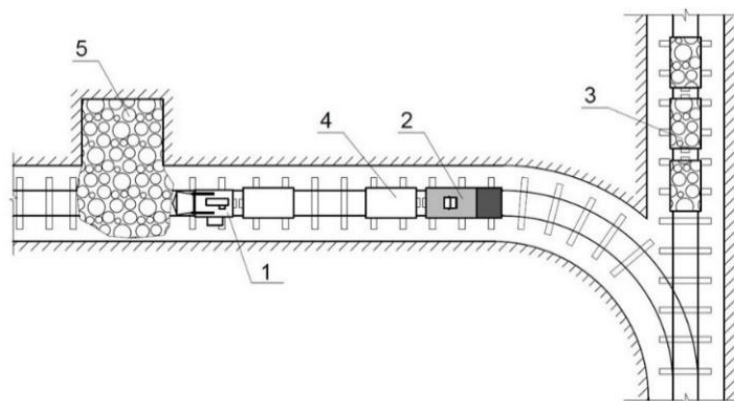
Для первого и второго цикла:

$$V_{г.м1} = 29,5 \cdot 1,5 = 44,1 \text{ м}^3$$

$$V_{г.м2} = 31,7 \cdot 1,5 = 47,55 \text{ м}^3$$

Процесс уборки горной массы механизирован с использованием:

- Погрузочная машина ППН-1с
- Шахтные вагоны ВГ-4м
- Контактный электровоз К-10



1 – ППН-1с; 2 – электровоз; 3 – груженный вагон; 4 – порожний вагон;
5 – камера

Рисунок 2. Схема обмена вагонеток при проведении камеры

Организация работ

Проходка камер осуществляется проходческой бригадой из 6 человек. Продолжительность одного цикла составляет 7,2 часа, полная подготовка камеры занимает одни сутки.

Крепление выработок

В зависимости от физико-механических свойств пород применяются различные методы крепления:

- Торкретбетонирование
- Анкерное крепление
- Штанговое крепление

Выводы

Представленная технология проходки камер для размещения комбайна 2КВ демонстрирует комплексный подход к организации горных работ, учитывающий особенности горно-геологических условий, технические характеристики оборудования и требования безопасности.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой методов оптимизации проходческих процессов, снижения трудоемкости и повышения безопасности горных работ.

Научная новизна заключается в систематизации технологических решений и детальном анализе процессов оборудования специализированных камер в условиях рудных месторождений.

Библиография

1. Бабаев С.А., Мирзоев Г.Г. Современные технологии автоматизации горных работ // Горный журнал. 2019. № 5. С. 45-49.
2. Ломоносов Г.Г. Инновационные методы проходки горных выработок // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 3. С. 12-18.
3. Петров А.В. Безопасность и эффективность подземной разработки рудных месторождений // Горная промышленность. 2020. № 2. С. 34-38.
4. Смирнов К.П. Буровзрывные работы в современном горном производстве // Недропользование XXI век. 2018. № 4. С. 66-72.

Общий анализ влияния новых технологий на горнодобывающую деятельность

Мбох Нгома А П Л* (МГРИ, loicngoma16@yahoo.fr)

Аннотация

цель этой статьи-изучить различные достижения в области техники добычи полезных ископаемых, изучить их влияние на горнодобывающую деятельность и будущие перспективы с учетом, в частности, социальных, экономических, а также экологических критериев.

Ключевые слова

Технологии, прогресс, добыча полезных ископаемых, деятельность

Теория

Добыча полезных ископаемых-это совокупность видов деятельности, связанных с добычей минеральных ресурсов из недр. Это включает в себя разведку и разведку, а именно поиск месторождений руд или сырья, таких как железо, золото, медь, уголь, алмазы : добыча сырья, которая может осуществляться различными способами в зависимости от типа месторождения и глубины ; переработка и обогащение. и перерабатывать его для получения готовой продукции, пригодной для использования в промышленности ; Восстановление участков после эксплуатации с помощью мер по восстановлению окружающей среды, которые могут включать рекультивацию почв, пересадку растительности и очистку сточных вод.. Деятельность по добыче полезных ископаемых показана на Рис.1.



Рисунок1. Горнодобывающая деятельность

За прошедшие годы технический прогресс принес много инноваций в этой области. Именно поэтому в настоящее время в горнодобывающей промышленности используются новые технологические инструменты для более оптимальной работы, в частности, в случае : Гиперспектральная визуализация, которая позволяет более точно ориентироваться на залежи руды, снижая потребность в глубокой разведке поверхности и сводя к минимуму помехи. Искусственный интеллект и машинное обучение, Автоматизированное горнодобывающее оборудование, в том числе автономные грузовики, буровые установки и экскаваторы, которые повышают безопасность, производительность и эффективность. Они снижают потребность в человеческом труде в опасных условиях, сводят к минимуму риски и улучшают общие экологические показатели. Спутниковые снимки, беспилотные летательные аппараты и другие технологии дистанционного зондирования позволяют осуществлять постоянный мониторинг участков добычи полезных ископаемых на предмет воздействия на окружающую среду, такого как загрязнение воды, оседание земель и вырубка лесов. Это обеспечивает раннее выявление проблем и быстрое реагирование. Такие технологии, как лазерная спектроскопия деградации и другие датчики в реальном времени, позволяют точно

идентифицировать и извлекать руды. Это уменьшает объем обрабатываемых материалов и сводит к минимуму воздействие горных работ на окружающую среду.

Таким образом, автоматизация, замена дизельного оборудования электрическим, беспилотные летательные аппараты, передающие данные в режиме реального времени, более безопасное подземное оборудование, глубоководные роботы и очистка нейтральной воды-это лишь некоторые из изменений, которые, безусловно, произойдут в цепочке создания стоимости горнодобывающей промышленности. Это хорошая новость для производительности, безопасности работников, гендерного равенства и воздействия на окружающую среду. Однако неясно, что эти изменения означают для отношений между горнодобывающими компаниями и местными сообществами, а также для роли правительств в их поддержке при одновременном увеличении вклада отрасли в устойчивое развитие. Понимание различных последствий этих новых технологий и их продуманное и скоординированное планирование будут иметь решающее значение для того, чтобы правительства, предприятия и сообщества могли позитивно использовать эти изменения.изменения.

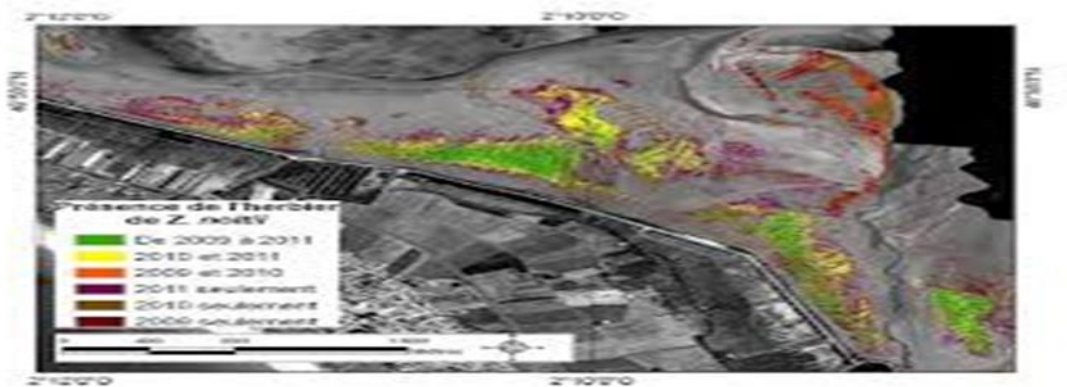


Рисунок 2. гиперспектрального изображения почвы

Выводы

I. *положительное влияние новых технологий на добычу полезных ископаемых*

- Повышение эффективности и производительности за счет систем автоматизации, робототехники и искусственного интеллекта, которые значительно повышают эффективность работы. Например, грузовые автомобили с автономным управлением работают непрерывно и безопаснее, чем транспортные средства, управляемые человеком, что приводит к увеличению пропускной способности и сокращению времени простоя. Аналогичным образом, профилактическое обслуживание на основе искусственного интеллекта сводит к минимуму отказы оборудования и оптимизирует распределение ресурсов.
- Повышение безопасности за счет расширения прав и возможностей, что значительно снижает подверженность человека воздействию опасных сред, что приводит к меньшему количеству несчастных случаев и травм на рабочем месте. Дистанционное управление оборудованием и передовые системы безопасности повышают безопасность работников, снижают как человеческие затраты, так и страховые обязательства.
- Передовые методы разведки, такие как гиперспектральная визуализация и геологическое моделирование на основе искусственного интеллекта, позволяют более точно идентифицировать и извлекать минерализованные тела. Это повышает эффективность извлечения ресурсов, максимизируя добычу ценных полезных ископаемых.

Усовершенствованные методы переработки еще больше улучшают этот результат, позволяя извлекать руды, которые ранее были нерентабельными

- Новые технологии способствуют внедрению более экологически безопасных методов добычи полезных ископаемых. Это включает сокращение потребления воды за счет рециркуляции и эффективной очистки, улучшенные методы санитарии для восстановления обрабатываемых земель. Интеграция возобновляемых источников энергии еще больше снижает углеродный след отрасли.

- Мы также отмечаем принятие решений на основе данных : большой объем данных, генерируемых современными операциями по добыче полезных ископаемых, может быть проанализирован с использованием расширенной аналитики и искусственного интеллекта для оптимизации различных аспектов бизнеса, включая распределение ресурсов, планирование производства и управление рисками. Это приводит к лучшему принятию решений и повышению эксплуатационных характеристик.

II. негативное влияние новых технологий на добычу полезных ископаемых :

- Что касается негативного воздействия, то внедрение новых технологий часто требует первоначальных инвестиций в новое оборудование, программное обеспечение и обучение. Это может стать препятствием для небольших горнодобывающих компаний.

- Также следует отметить технологическую сложность. Это связано с тем, что сложность новых технологий требует специальных навыков и знаний, что создает потребность в переподготовке существующей рабочей силы и привлечении квалифицированных специалистов. Это может привести к нехватке навыков и увеличению затрат на рабочую силу.

- Еще одна проблема, связанная с технологическим прогрессом, - это безопасность данных и управление ими : использование принятия решений на основе данных повышает важность надежных мер безопасности данных для защиты конфиденциальной информации от кибератак и утечек данных. Эффективные системы управления данными также необходимы для эффективного принятия решений.

- К трудностям, связанным с защитой данных, добавляется проблема интеграции : интеграция новых технологий в существующие операции может оказаться сложной задачей, требующей тщательного планирования и координации. Проблемы совместимости между различными системами и необходимость адаптации существующих рабочих процессов могут привести к задержкам и сбоям.

- В качестве еще одной проблемы мы также отмечаем проблемы, связанные с этическими соображениями : использование ИИ и автоматизации поднимает этические соображения, касающиеся перемещения рабочих мест и потенциальных искажений в алгоритмах. Тщательное планирование и ответственное внедрение имеют решающее значение для снижения этих рисков.

- Совершенно другой проблемой является чрезмерная зависимость от технологий, которые могут создавать уязвимости. Сбои системы или кибератаки могут значительно нарушить работу. Для минимизации этих рисков необходим сбалансированный подход, сочетающий технологические достижения и человеческий опыт.

Библиография

1. Чергин СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЖИНА -Б.К. Колесниченко, Д.С. May 2005.
Url https://www.researchgate.net/publication/387007017_SYRE_DLA_PROIZVODSTVA_DZINA.
October 2024
2. О.В. Близняк, И.Е. Лепёхина, В.В. Уранова, Р.Р. Исякаева. Определение содержания экстрактивных веществ в растительном сырье амаранта тёмного

3. О.В. Близняк, О.В. Близняк, И.Е. Лепёхина, В.В. Уранова. Исякаева Определение содержания экстрактивных веществ в растительном сырье амаранта тёмного. January 2022 Url : https://www.researchgate.net/publication/361160721_Opredelenie_soderzania_ekstraktivnyh_veses_tv_v_rastitelnom_syre_amaranta_temnogo_A_gypochondriacus
4. Яковец Ю.В. Научно-техническая революция и экономика горного дела journal of mining institute. https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/11457?setLocale=ru_RU
5. Сайт межправительственного форума по горнодобывающей промышленности, минералам, металлам и устойчивому развитию. 8-05-2019 гг.
6. отраслевой сайт minière.com техника добычи полезных ископаемых : самые эффективные методы в 2024 году-
7. Хайдаралиев Шохбоз. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Скиф. Вопросы студенческой науки

Разработка энергетических комплексов буровых установок глубокого бурения на нефть и газ

Меркулов М.В.* (МГРИ, merkulovmv@mgri.ru)

Аннотация

В докладе проанализированы вопросы разработки энергетических комплексов для установок разведочного бурения на нефть и газ. Рассмотрены параметры оборудования систем энергоснабжения и особенности подобных установок, приводятся особенности технологической схемы.

В основу исследований положены ряды экспериментальных работ, проводимых в разные периоды, в различных организациях, результаты которых отмечены в докладе.

Ключевые слова

Энергетические комплексы буровых установок, системы энергоснабжение

Теория

Повышение эффективности геологоразведочного производства неразрывно связано со снижением затрат топлива и энергии на бурение геологоразведочных скважин. Разведочное бурение на нефть и газ отличается от разведки на твердые полезные ископаемые большими глубинами скважин, значительными установленными мощностями оборудования и более длительными сроками работ. Увеличение объемов работ в районах с суровым климатом требует значительных затрат топлива на отопление и обогрев блока очистки, хранения и приготовления бурового раствора. В таких условиях снижение издержек на энергоснабжение приобретает все большую актуальность.

Основными потребителями энергии буровой установки являются привода лебедки, ротора и буровых насосов. Наиболее энергоемким является привод лебедки, его расчетная нагрузка составляет около 200 кВт для установок 1 класса до 4000 кВт для буровых 12 класса. Мощность приводов насосов изменяется от 375 до 1180 кВт. Привод ротора имеет мощность от 180 до 750 кВт. Таким образом, общая установленная мощность только основного оборудования буровых установок изменяется от 900 до 6000 кВт [2].

Буровая установка питается от группы дизель-генераторов переменного тока, число которых определяется единичной мощностью дизель-генераторов и суммарной мощностью исполнительных механизмов при наличии необходимого резерва. Мощность дизель-генераторов суммируется на общих шинах распределительного устройства [4].

Кроме ДЭС в комплекс оборудования буровой входит котельная установка. Передвижные котельные установки серии ПКН предназначены для выработки насыщенного пара давлением до 0,8 МПа и температурой до 176°C. Работают на сырой нефти, мазуте, дизтопливе. Основное применение - продувка нефтяных скважин. Отличаются высокой степенью монтажной готовности, минимальными затратами на пуско-наладочные работы, простотой и удобством в эксплуатации [3].

Система обогрева буровой установки комбинированная (котельная установка, парогенераторы, электрокалориферы, тепловые пушки, электроТЭНы). Потребителями теплоты является система подготовки и циркуляции бурового раствора, насосный блок, сама скважина и буровой инструмент, а также кабина бурильщика [2].

Таким образом, при бурении скважин на нефть и газ используются два вида энергоисточников, работающих на жидком топливе, что позволяет максимально эффективно использовать утилизируемую теплоту дизель-агрегатов для экономии топлива котельной установкой. Использование в системе отопления электрических калориферов, тепловых

пушек и электрических теплоэлектронагревателей (ТЭН) позволяет рассматривать вопросы дозагрузки дизель-агрегатов при низких технологических нагрузках. В этом случае, одним из направлений повышения эффективности и экономии топлива является утилизация теплоты дизельных электростанций для использования ее в системе отопления буровой. Поиск путей решения этой проблемы является задачей актуальной, отличающейся научной новизной и требующей практического использования.

Трудность решения этой проблемы связана с тем, что тепловой режим буровой установки зависит от разнообразных факторов, основными из которых являются климатические условия, особенности существующих строительных и объемно-планировочных решений, специфика технологических операций, выполняемых при бурении скважин на нефть и газ.

С другой стороны, величина теплового потока, утилизированного от системы охлаждения и отработанных газов дизельных электростанций, зависит от нагрузки буровой установки, которая определяется технологическими параметрами работы, глубиной скважины, режимами бурения и т.п. Поэтому главной проблемой является разработка такой технологической схемы, которая позволит обеспечить:

- независимую работу дизель-генераторов на технологическую нагрузку;
- заданный температурный режим работы дизель-генераторов;
- передачу максимально возможного количества теплоты котельной установке;
- резервное энергоснабжение.

Алгоритм дальнейших разработок приводится на рисунке 1.

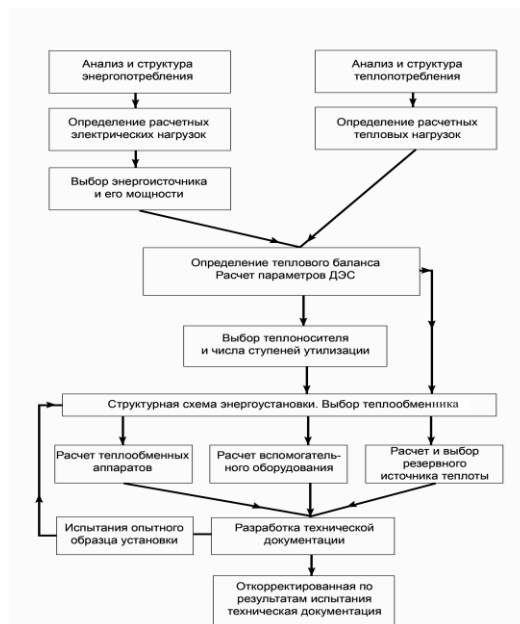


Рисунок 1. Блок-схема разработки энергетического комплекса буровых установок глубокого бурения

Нами учтен и обобщен опыт работы в этом направлении, получены и проанализированы данные испытаний опытных образцов утилизаторов тепла для передвижных ДЭС, разработанных Ворошиловградским отделением СПКТБ "Союзгеотехника", а также блоков утилизации тепла, применяемых при глубоком бурении на нефть и газ [1].

Однако основные рекомендации и предложения в области утилизации тепла были сформулированы на основе испытания конструкций установок, разработанных на кафедре энергетики МГРИ-МГРИ [5,6].

При разработке схемы использования утилизируемой теплоты дизель-генераторов буровой установки был рассмотрен опыт использования утилизируемой теплоты дизельных электростанций и возможные схемы работы утилизаторов теплоты с котельными установками.

Утилизируемое тепло стационарных ДЭС используется, как правило, для подпитки горячей водой котельной установки поселка, реже, для обогрева отдельных потребителей. Одними из первых на Северо - Востоке утилизацию тепла внедрили в Дукатской ГРЭ на электростанции поселка, оборудованной дизель-агрегатами типа "Шкода 6S-275». Проведенные испытания, показали, что тепловая нагрузка такого утилизатора составила 178 кВт при нагрузке на генераторе дизель - агрегата 230 кВт и расходе воды 10200 кг/ч. Вода, поступающая в теплообменник при 4°C, нагревалась до 19°C. Экономии топлива составила 17 кг/ч условного топлива на 1 дизель-агрегат [1].

В Нежданинской ГРП объединения "Якутскгеология" утилизируемое тепло использовали для подогрева воды из обратной магистрали теплосети поселка и подпитывающей воды котельной. При номинальной нагрузке генератора дизель - агрегата «Шкода 6S-275» тепловой поток, поступающий газами, составляет 122 кВт.

Представляет интерес опыт комплексной утилизации тепле ДЭС базового поселка Чаро - Токкинской ГРЭ объединения "Якутскгеология". Дизельная электростанция базового поселка комплектовалась 4 дизель-агрегатами типа Г-66 с генераторами мощностью 630 кВт каждый. Электрическая нагрузка генераторов ДЭС составляла от 1200 кВт в зимний период до 800 кВт в летнее время. Расчетная тепловая нагрузка утилизатора, по данным экспедиции, достигала 217,7 кВт

Большой опыт эксплуатации утилизационных установок на глубоком бурении накоплен в Переволоцкой экспедиции глубокого бурения объединения "Оренбурггеология". В экспедиции использовались установки индийского производства фирмы "Термакс" типа TMS-20R.

Паропроизводительность утилизатора составляла 900 кг/ч при температуре 183°C и давлении 10 кг/см². Перепад температур газов на входе и выходе из утилизатора изменялся от 47° до 180°C. Установка полностью автоматизирована.

По данным, полученным в Переволоцкой экспедиции, тепловой поток, утилизируемый от силовых дизелей установки, в зимний период составлял от 300 кВт до 833 кВт. Всего за отопительный период получено 1283,5 Гкал тепла. Замеры параметров работы утилизатора при температуре окружающего воздуха (-18) + (-21) °C позволили получить следующие цифры: при работе пяти дизелей температура в обогреваемом здании составляла +5 +8. °C при одном воздухоподогревателе и до +13°C при трех воздухоподогревателях [1]. Утилизатор вырабатывает тепловой поток мощностью около 500 кВт. Утилизованного тепла вполне достаточно для обогрева буровой установки. Паровой котел включается в работу лишь при необходимости, для получения пара на технологические нужды.

Ворошиловградским отделением СПКТБ "Союзгеотехника» была разработана и испытана в ПГО "Актюбинскгеология" на буровой "Уралмаш 3Д" установка утилизации теплоты выхлопных газов с воздушным теплоносителем [1].

По данным испытаний, проведенных СПКТБ "Союзгеотехника", утилизируемый тепловой поток изменялся в зависимости от нагрузки дизель - агрегата в пределах от 50 до 125,0 кВт. Применение установки позволило подучить реальную экономию за счет

отключения двух калориферов мощностью 40 кВт и исключив отопление оборудования в зимнее время.

Анализ существующего опыта утилизации тепла стационарных дизельных электростанций свидетельствует о том, что до сего времени не разработана оптимальная схема утилизационной установки, которая с высокой степенью эффективности могла бы быть рекомендована в качестве надежной базовой автоматизированной теплоэлектроцентрали для обеспечения установок глубокого бурения на нефть и газ. Подобные разработки должны проводиться на основе разработанной теоретической базы с учетом возможности их автоматизации [5, 6].

Выводы

Полученные результаты теоретических исследований и практического применения систем утилизации теплоты предопределяет необходимость разработки автоматизированной установки на базе несложных в надежных в работе теплообменных аппаратов на основе результатов практических и теоретических исследований.

Работа выполнена в соответствии с планом работ энергетической секции РАЕН.

Библиография

1. Жернаков А.П. и др. Экономия топливно-энергетических ресурсов при проведении геологоразведочных работ. - Волгоград.: ИН-ФОЛИО, 2011. – 352 с.
2. Информация с сайта: [Нефтегазовое оборудование ООО «Уралмашхолдинг»] - Режим доступа: <http://www.uralmash-ngo.com/> - Время актуальности: 20.01.15 г.
3. Информация с сайта: [РосТепло.ru / Каталог оборудования / Автономное теплоснабжение / Модульные котельные / ПКН-2 ГМ - Паровые котельные установки] - Режим доступа: <http://www.rosteplo.ru/katalog/6/14/589> - Время актуальности: 20.01.25 г.
4. Информация с сайта: [Энергетическая компания Альтернатива/Продукция /Контейнерные генераторы] - Режим доступа: http://www.altgen.ru/production/konteynerniye_generatory/ - Время актуальности: 20.01.25 г.
5. Меркулов М.В., Косьянов В.А., Головин С.В. Повышение энергоэффективности разведочного бурения посредством автоматического регулирования работы теплоутилизационных установок. // Горный журнал. 2018. № 11. С. 51-55.
6. Меркулов М. В., Косьянов В.А., Головин С.Г. Теплотехника, техническая термодинамика и теплоснабжение геологоразведочных работ.- М: Юрайт, 2022. – 330 с.

Тенденции развития цифровизации и применения искусственного интеллекта в сфере геологоразведки и недропользования

Мухаматов М.Д.* (МГРИ, munavvarspace@gmail.com),

Подаревский Р.Д.* (МГРИ, podarevsky-r@mail.ru),

Адамова Л. С. (МГРИ, adamovals@mgri.ru),

Меркулов М.В. (МГРИ, merkulovmv@mgri.ru)

Аннотация

В наше время цифровизации подвержены все важнейшие секторы промышленности, связи, экономики, здравоохранения и даже транспорта. Многие наблюдатели, опираясь на то, какой темп набирает развитие данной отрасли, всё чаще приходят к единственному умозаключению – мы стремимся уже не к технической эволюции, а к самой настоящей революции.

При проведении геологоразведочных работ, как известно, приходится систематизировать, обрабатывать и анализировать огромные массивы различной по роду и направленности информации. Для оптимизации этих процессов, расширения возможностей и дальнейшей экономической выгоды необходимо внедрять сквозные цифровые технологии. Особенно в этом может помочь новый быстро развивающийся инструмент в виде ИИ.

Ключевые слова

Цифровизация, геологоразведочные работы, цифровые технологии, геоинформационные системы, искусственный интеллект, большие данные

Теория

Цифровизация – это применение прорывных технологий, трансформирующих операционные процессы и бизнес-модели за счёт новых форматов взаимодействия и принятия решений на базе использования продвинутой аналитики, искусственного интеллекта, мобильных и носимых устройств, роботизации и интеграционных технологических платформ [1].

В сфере геологоразведки и недропользования цифровизация выступает в качестве процесса разработки и внедрения современных цифровых технологий, программных продуктов и аппаратурных комплексов для решения ключевых задач геологического исследования недр, воспроизводства минерально-сырьевой базы и организации рационального недропользования [3].

Переход на цифровые технологии в геологоразведке начался несколько десятилетий назад, и к настоящему времени более 80% всей информации представляется в цифровом виде: многие научные работы, как и каждая из тех, что представлены в рамках конференции, изложены в формате компьютерных файлов. Стремительно развивающиеся информационные технологии и непрерывно расширяющиеся и усложняющиеся геологические задачи требуют существенного углубления и расширения областей применения – при правильном использовании цифровых помощников мы с большей эффективностью и меньшими затратами по времени можем структурировать огромные пласты информации, оптимизировав каждый производственный процесс [3].

В настоящее время для решения геологических и многих других задач используются следующие сквозные цифровые технологии [3]:

- Искусственный интеллект и нейротехнологии;
- Облачные технологии;
- Машинное обучение;

- Виртуальная и дополнительная реальность;
- Беспилотные авиационные системы (БАС/БВС);
- Видеоаналитика и техническое зрение;
- Big Data (большие данные);
- ГИС-технологии и др.

По своей сути искусственный интеллект – это способность машины или компьютерной системы выполнять задачи, для которых обычно требуется человеческий интеллект. Это включает в себя программирование систем для анализа данных, обучения на основе опыта и принятия разумных решений – под руководством человека [1]. Так, сейчас на базе блока ТПИ реализуется комплексный проект под названием «Цифровая партия», который охватывает цифровизацию всех основных производственных процессов при выполнении геологоразведочных работ – планирование, сбор и обработка полевых данных, мониторинг работы оборудования, обеспечение связи, автоматизация лабораторий, геолого-математическое моделирование, автоматизация процесса поддержки принятия управленческих решений [2].

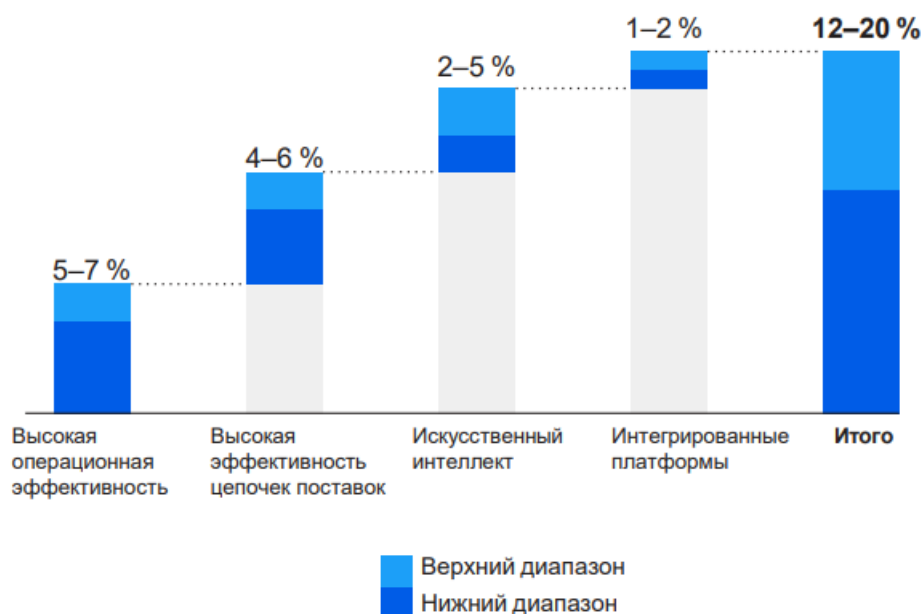


Рисунок 1. Повышение эффективности благодаря цифровизации (% экономии от общих операционных затрат)

По линии геологоразведки и добычи наиболее востребованы следующие цифровые решения:

- искусственный интеллект и продвинутая аналитика, включая обработку больших массивов данных, предиктивное техническое обслуживание, облачные вычисления, которые позволяют повышать производственную эффективность, минимизировать сбои и число отказов оборудования, точнее оценивать риски и снижать затраты на инфраструктуру;
- промышленный интернет вещей, с помощью которого осуществляется мониторинг трубопроводных систем и предотвращаются утечки и повреждения, в том числе в удаленных районах с экстремальными условиями, и тем самым предотвращается как финансовый, так и экологический ущерб;

- роботизация процессов, включая применение дронов и глубоководных роботов в буровых и ремонтных операциях, что помогает снизить риск человеческих ошибок и повысить безопасность условий труда работников;
- дополненная и виртуальная реальность, позволяющая, в частности, проводить практическое обучение сотрудников без необходимости посещения месторождений, а также предоставлять доступ к специалистам, которые недоступны в конкретной точке технического обслуживания [4].

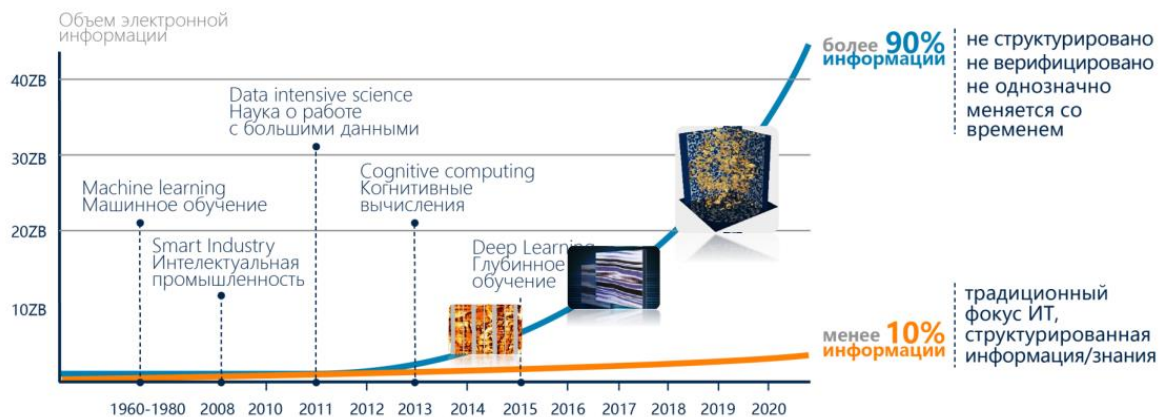


Рисунок 2. График накопления данных и извлекаемой из их объема информации

Очень важно, что с течением времени количество и качество данных растёт, появляются более высокоплотные данные сейсморазведки. Например, при проведении очень плотной сеймики подбор обработки графиков под данный объём информации производится только через три-шесть месяцев. Необходимо думать не только о том, как извлекать и группировать эти колоссальные объёмы информации, но и о том, как комплексировать её между собой [5].

Классикой сбора данных в вопросе цифровизации геологоразведочных процессов является Big Data, сочетающая в себе три ключевые характеристики:

- разнородность (предпринимаются попытки комплексировать и интегрировать данные от шлейфов вплоть до региональных сейсмопрофилей – данные на десятки сотен километров);
- объём (информация по десяткам, сотням тысяч скважин, находящихся на территории страны);
- скорость (колоссальная скорость обработки информации вне зависимости от её объема) [5].

Технологии Big Data являются одним из ключевых драйверов развития информационных технологий современного периода. Представляет собой целый комплекс различных инструментов, подходов и методов работы с информацией, позволяющих решать набор важных задач. За многие годы в геологоразведке накопился огромный объём информации, новые подходы к работе с ней позволяют обнаруживать закономерности и точнее моделировать процессы, более эффективно обнаруживать перспективные месторождения. В сфере добычи и переработки нефти сбор данных о работе оборудования

позволяет удаленно контролировать работу любого актива, оптимизировать производственные процессы, предсказывать возможные аварии и сбои в работе [3].

Выводы

Новые методы цифрового анализа больших массивов данных существенно раздвинули рамки традиционных технологий геологоразведочных работ. Множество рутинных операций с данными, требующих большого объема ручной и аналитической работы, переложили на новые машинные алгоритмы, освободив многих специалистов для контроля процессов и более глубокого осмысления всего объема полученной информации [5].

Вероятнее всего, на сегодняшний день наибольших перспектив следует ожидать от применения новых алгоритмов на этапе комплексирования различных методов построения непротиворечивой геологической модели среды на базе согласования данных всех методов её изучения в скважинах, на поверхности Земли и в космосе. Цифровизация геологоразведочных работ обеспечивает наиболее легкое извлечение всех этих необходимых пластов информации с дальнейшей возможностью их анализа и комплексирования на всех уровнях технологического процесса.

На данный момент в нашей стране довольно продуктивно используется практически весь набор отечественного софта, автоматизирующего процессы геологоразведки ТПИ. В частности, на нескольких десятках геологоразведочных проектов успешно налажен процесс сбора и документирования полевых геологических и буровых данных в цифровом виде. Вся информация поступает на корпоративные серверы, осуществляется онлайн-мониторинг работ, формируется геологическая база данных и выполняется геолого-математическое моделирование. При этом вся технологическая цепочка по сбору, передаче и обработке геологических данных реализована на отечественном прикладном ПО [2].

Библиография

1. «Искусственный интеллект: что это, как он работает и почему он важен», 2022 г. URL: <https://www.iso.org/ru/artificial-intelligence> (Дата обращения: 26.02.2025)
2. «Отечественные цифровые проекты для геологоразведки: опыт АО «Росгео», 2024 г. URL: <https://www.vnedra.ru/geologorazvedka/otechestvennye-cifrovye-proekty-dlya-geologorazvedki-opyt-ao-rosgeo-24786/> (Дата обращения: 26.02.2025)
3. «Геоинформатика. 2021. № 4», 2021 г. URL: https://geoinformatika.ru/?page_id=10107 (Дата обращения: 26.02.2025)
4. Периодический научно-технический журнал «Газпром Нефти» №1, Том 8, 2023 г. URL: <https://ntc.gazprom-neft.ru/nauchnaya-deyatelnost/> (Дата обращения: 26.02.2025)
5. А. Бочков, «Цифровизация геологоразведки», 2021 г. URL: <https://oilgascom.com/cifrovizaciya-geologorazvedki-a-bochkov-gazprom-neft/> (Дата обращения: 26.02.2025)

Роль Метрологии в современном горном деле

Оливетский И.Н. (МГРИ, olivetskyin@mgri.ru)

Аннотация

Рассмотрена роль Метрологии в современном горном деле. Основные аспекты Метрологии в горном деле. Влияние Метрологии на безопасность и эффективность проведения горных работ. Основной спектр задач решаемых Метрологией при проведении горных работ.

Ключевые слова

Метрология, горное дело, аспекты, безопасность, эффективность

Теория

«Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры»

Д.И.Менделеев

Метрология — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и точности. В современном горном деле метрология играет критическую роль, обеспечивая безопасность, эффективность и экономическую целесообразность производственных процессов. Точные измерения и соблюдение стандартов являются основой для успешного управления производственными процессами и повышения качества работы.

Рассмотрим основные аспекты Метрологии в горном деле, представленные на рисунке 1.

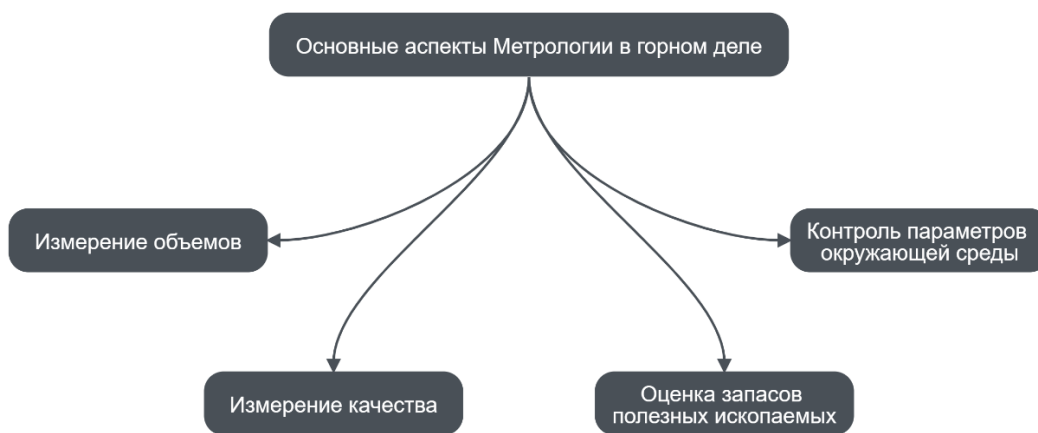


Рисунок 1. Основные аспекты Метрологии в горном деле

1. Измерение объемов и качества добываемых пород:

- специалисты горного дела должны точно измерять объемы добываемых полезных ископаемых и контролировать их качество. Методы и средства Метрологии обеспечивают точность этих измерений, что позволяет принимать обоснованные решения о дальнейшей эксплуатации месторождений.

2. Контроль параметров окружающей среды:

- в процессе добычи важно контролировать уровень загрязнения воздуха, воды и почвы, а также состояние грунтов. Метрологические методы позволяют проводить точные замеры, что необходимо для соблюдения экологических норм и стандартов.

3. Оценка запасов полезных ископаемых:

- точные измерения помогают геологам и инженерам правильно оценивать запасы месторождений, что напрямую влияет на экономическую эффективность проектов. Ошибки в измерениях могут привести к неправильным выводам и экономическим потерям.

Влияние Метрологии на безопасность и эффективность

1. Повышение безопасности:

- точные измерения позволяют своевременно выявлять и устранять потенциальные опасности, такие как утечки газа, нестабильность грунтов и другие риски. Это снижает вероятность аварий и травм на производстве.

2. Оптимизация производственных процессов:

- использование метрологических методов помогает оптимизировать процессы добычи и переработки полезных ископаемых. Это включает в себя контроль за состоянием оборудования, мониторинг условий труда и повышение общей производительности.

3. Снижение затрат:

- точные измерения позволяют более эффективно использовать ресурсы, снижая затраты на материалы и энергию. Это напрямую влияет на экономическую целесообразность горных работ.

Метрология охватывает широкий спектр задач, включая:

- измерение физических величин: таких как вес, объем, плотность, температура и давление, которые необходимы для контроля производственных процессов;

- стандартизация методов измерений: обеспечение того, чтобы все измерения проводились в соответствии с установленными стандартами, что позволяет минимизировать ошибки и повышать точность;

- разработка и использование эталонов: создание и применение стандартных эталонов для калибровки измерительных приборов;

- повышение качества продукции: за счет точных измерений и контроля качества на всех этапах производства;

- снижать риски путем выявления и устранения возможных ошибок и несоответствий на ранних стадиях;

- контролировать состояние оборудования, регулярно проводя проверки и калибровки, что снижает риск аварий;

- мониторинг условий труда, обеспечение соответствия условий работы установленным нормам безопасности;

- проведение испытаний и тестирований для оценки надежности и безопасности производственных процессов и оборудования;

- оптимизация производственных линий за счет точного контроля и управления процессами;

- снижение затрат на ресурсы благодаря более эффективному использованию материалов и энергии;

- повышение производительности благодаря минимизации простоев и повышению точности выполнения операций. Метрология обеспечивает соблюдение технических стандартов, регламентирующих параметры оборудования и материалов.

Решение вышеприведенных задач имеет большое значение для поддержания высокого качества продукции и надежности производственных процессов. Сертификационные стандарты, основанные на метрологических данных, гарантируют соответствие продукции и

услуг установленным нормам безопасности и качества. Это особенно важно для выхода на международные рынки и соблюдения законодательства.

Выводы

В настоящее время специалисты горного дела используют адаптированные метрологические методы для повышения точности измерений и управления производственными процессами. Это позволяет минимизировать риски и повышать общую эффективность работы. Метрология является неотъемлемой частью современного горного дела, обеспечивая точность и сопоставимость измерений. Без точных измерений невозможно обеспечить безопасность, эффективность и экономическую целесообразность горных работ. Понимание и применение метрологических стандартов и методов является необходимым условием для успешной профессиональной деятельности специалистов горного дела.

Библиография

1. Стурова Д.Ю. Современные тенденции в Метрологии / Стурова Д.Ю., Астапов С.Ю., Астапова И.А. // В сборнике: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. Мичуринск.- 2023.- С. 244-247.
2. Рахмонбердиев Ю.Б.У. Метрология и качество продукции оптимизация производства // В сборнике: WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS. сборник статей LXXIV Международной научно-практической конференции. Пенза,- 2023.- С. 38-40.
3. Керимов Р.А. Роль измерений в метрологии // В сборнике: Социум и жизненное пространство личности (междисциплинарные аспекты). Сборник статей VI Международной научно-практической конференции. Под редакцией Е.В. Ерёминой, В.Ф. Мухамеджановой. Пенза.- 2023.- С. 65-69.

Перспективы развития во внедрении солнечной энергии в процессы ведения геологоразведочных работ

***Подаревский Р.Д.* (МГРИ, podarevsky-r@mail.ru),
Адамова Л. С. (МГРИ, adamovals@mgri.ru)***

Аннотация

Специфика деятельности горнодобывающих компаний заставляет их искать различные варианты электроснабжения месторождений, так как зачастую те удалены от основного энергоисточника на десятки и сотни километров.

На сегодняшний день при ведении геологоразведочных работ потребляется как электрическая, так и тепловая энергия, что даёт возможность более широкого применения возобновляемых источников энергии путём непосредственного получения тепла, как, например, в случае с использованием солнечных источников энергии.

Ключевые слова

Энергия Солнца, возобновляемые источники энергии, ресурсосбережение, зелёная энергетика, солнечные электростанции

Теория

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются неотъемлемым элементом развития энергетической и нефтегазовой отраслей. Это та энергия, которая получается от природных источников и пополняется со скоростью, превышающей скорость её потребления. Ярчайшими примерами таких энергоисточников являются солнечный свет и ветер, используемые человеком постоянно [1]. В противоположность им приводятся ископаемые виды топлива – уголь, нефть и газ. Они являются невозобновляемыми ресурсами, на формирование которых уходят сотни миллионов лет. При сжигании ископаемых видов топлива для производства энергии происходят выбросы вредных парниковых газов, таких как углекислый газ. На сегодняшний день возобновляемые источники энергии являются более дешевой альтернативой в большинстве стран и создают в три раза больше рабочих мест, чем ископаемые виды топлива [2].

Солнечная энергия является самым богатым из всех энергетических ресурсов и может использоваться даже в пасмурную погоду. Скорость, с которой солнечная энергия улавливается Землей, примерно в 10 тыс. раз превышает ту, с которой человечество потребляет энергию.



Рисунок 3. СЭС на золотодобывающем предприятии «Ресурсы Албазино», п. Оглонги

Солнечная энергетика преобразует солнечный свет в электроэнергию с помощью солнечных панелей (батарей) – устройств, которые используют солнечную энергию для генерации электрического тока.

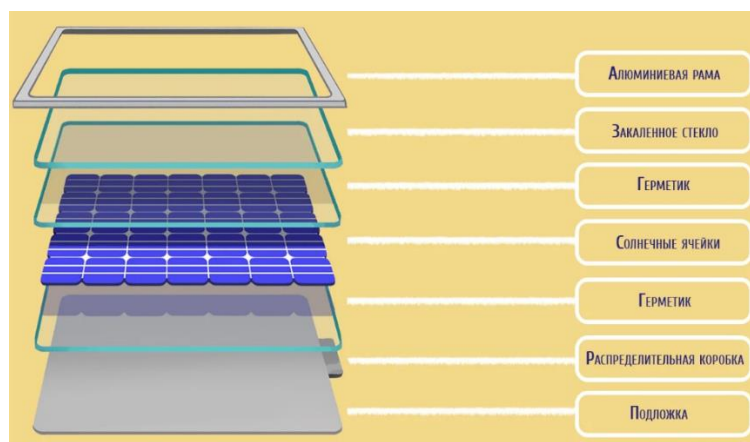


Рисунок 4. Устройство солнечной батареи

Общий принцип работы солнечной батареи основан на фотоэлектрическом эффекте, который возникает при попадании солнечных лучей на кремниевые пластины, из которых данные панели состоят. Пример подобной установки представлен на рисунке 2. Фотоэлектрические элементы в панелях генерируют электричество при попадании на них солнечного света [3]. Наиболее распространёнными видами солнечных батарей являются:

1. Монокристаллические солнечные батареи, которые имеют скругленные края и однородную поверхность панелей. Использование данной разновидности обеспечивает КПД вплоть до 28 %.
2. Поликристаллические солнечные батареи – более бюджетный вариант с панелями квадратной формы и неоднородной структурой элементов. Средний КПД составляет 20 %.

На объектах горнодобывающей отрасли довольно часто возникает потребность в электроснабжении труднодоступных объектов, находящихся на изолированных территориях и не имеющих возможности подключения к централизованной сети. В этом случае популярным решением являются автономные гибридные электростанции (АГЭУ), которые, помимо фотоэлектрических (солнечных) панелей, оснащены системами накопления энергии для обеспечения бесперебойного энергоснабжения объекта, а их работа синхронизирована с ДГУ (дизель-генераторной установкой). Солнечные электростанции данного типа могут быть любой мощности и проектируются под определённую задачу и возникающие вместе с ними потребности горнодобывающих предприятий. Использование солнечной генерации на таких объектах позволяет существенно снизить затраты на дизельное топливо и эксплуатацию ДГУ [4].

На сегодняшний день реализовано достаточно решений по внедрению солнечных установок в добывающей и нефтегазовой промышленности, чтобы судить об эффективности данного метода:

- АГЭУ мощностью 1 МВт была установлена на территории крупной золотодобывающей компании Хабаровского края. Объект располагается на изолированной территории, где энергоснабжение обеспечивалось дизель-генераторной установкой. Предприятие столкнулось с проблемой высоких затрат на электроснабжение – стоимость 1 кВт·час составляла 17 рублей. Было предложено решение на основе солнечных модулей –

введена автономно-гибридная электростанция, которая позволила снизить затраты на покупку топлива для ДГУ на 60%. Срок окупаемости внедрённого оборудования АГЭУ составил 3 года.

- СЭС наземного типа мощностью 10 МВт были установлены на территории Волгоградского нефтеперерабатывающего завода ПАО «Лукойл».
- СЭС наземного типа мощностью 1 МВт установили на территории Омского нефтеперерабатывающего завода («Газпром-нефть»).

Все эти внушительные результаты были в кратчайшие сроки достигнуты всего одной российской компанией «Хевел» [4]. На момент написания данной работы в стране действуют порядка 60-ти СЭС, ещё десять крупных находятся на стадии проектирования [5].



Рисунок 5. Проект по автономному использованию СЭС, месторождение «Светлое» в Охотском районе

Теоретический потенциал солнечной энергетики в России составляет более 2300 млрд. т. условного топлива. Количество солнечной энергии, поступающей на территорию РФ в течение трех дней, превышает энергию всего годового производства электроэнергии в стране [6].

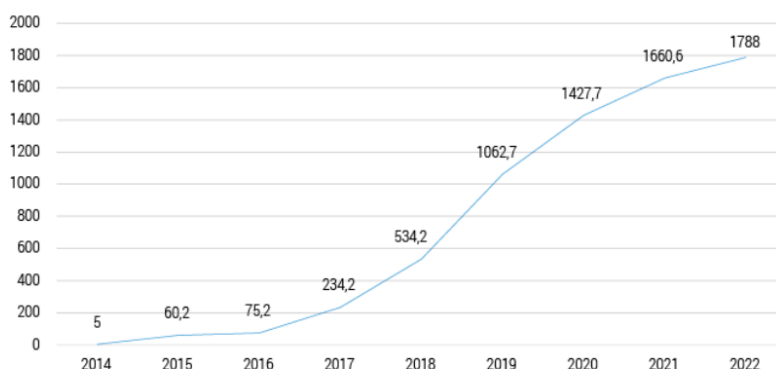


Рисунок 6. Динамика установленной мощности СЭС ЕЭС России с 2014–2022 гг.

Согласно официальным данным, при текущем уровне добычи и потреблении разведанных запасов нефти в России хватит на 25 лет, природного газа — на 70 лет, поэтому вопрос возобновляемых источников энергии в нашей стране становится всё более актуальным. Одним из факторов, сдерживающих развитие отрасли, является то, что цена электрической

энергии, необходимая для обеспечения окупаемости строительства объектов ВИЭ, значительно превышает текущую цену на электрическую энергию [6].

Выводы

Солнечная энергия является одним из наиболее экологически чистых и доступных источников энергии на Земле.

Значимость солнечной энергетики заключается в её способности снижать зависимость от нефти, газа и других ископаемых видов топлива, которые являются ограниченными ресурсами и ведут к загрязнению окружающей среды.

При проведении геологоразведочных работ примерно половина потребляемой энергии расходуется на выработку тепла и не требует высокого качества в её выходных параметрах по типу стабильности частоты и напряжения, что нередко имеет место быть при выработке электроэнергии теми же ветроагрегатами [7].

Тем не менее, возобновляемые источники энергии имеют ряд отрицательных свойств. Они не могут полностью компенсировать потребности в энергообеспечении геологоразведочных работ, но вполне могут использоваться как второстепенные, а в благоприятных по необходимым для повышенной эффективности работы условиям районах даже выступить в качестве основных, но не без «подстраховки» дизельных электростанций.

При рациональном подходе и правильном использовании фотоэлектрических установок в различных секторах горнодобывающей промышленности солнечная энергия таит в себе огромный потенциал [7].

Библиография

1. «Солнечные электростанции: эксплуатация на площадках нефтегазового комплекса», 2021 г.
URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/697644-solnechnye-elektrostantsii-ekspluatatsiya-na-nezadeystvovannykh-ploshchadkakh-neftegazovogo-kompleks/> (Дата обращения: 23.02.2025)
2. «Энергия Солнца в возобновляемой энергетике», 2022 г. URL: <https://www.renwx.ru/ru/ii/solnechnaya-ehnergetika/> (Дата обращения: 23.02.2025)
3. «Устройство солнечной батареи», 2021 г. URL: <https://e-solarpower.ru/stati/iz-chego-sostoyat-solnechnye-batarei/> (Дата обращения: 23.02.2025)
4. «Электроснабжение месторождений. Век солнечной энергетики». Журнал «Добывающая промышленность №2», 2020 г. URL: https://dprom.online/series/dp2020_2/ (Дата обращения: 23.02.2025)
5. Солнечные электростанции России, 2021 г. URL: <https://nova-sun.ru/alternativnaya-energetika/krupnejshie-solnechnye-elektrostantsii-v-rossii?noamp=mobile&> (Дата обращения: 23.02.2025)
6. «Солнце на службе человека», 2015 г. URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2015/4/41/ (Дата обращения: 23.02.2025)
7. Безруких П. П., «Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России», Санкт-Петербург, «Наука», 2002 г.

Исследование потенциала ветроустановок как возобновляемого источника энергии в условиях ведения геологоразведочных работ

**Подаревский Р.Д.* (МГРИ, podarevsky-r@mail.ru),
Меркулов М.В. (МГРИ, merkulovmv@mgri.ru)**

Аннотация

Развитие горных и геологоразведочных работ в удалённых и труднодоступных районах связано с энергосистемами на основе дизельных электростанций, КПД которых не превышает 40%. В этих условиях общие затраты на энергоснабжение могут превышать 20% от общего объёма финансирования геологоразведочных работ.

Повышение энергоэффективности возможно с использованием возобновляемых источники энергии, в частности, ветрогенераторов.

Ключевые слова

Возобновляемые энергоисточники, ресурсосбережение, экономия энергоресурсов, ветроустановки

Теория

Возобновляемая энергетика – область хозяйства, науки и техники, охватывающая производство, передачу, преобразование, накопление и потребление электрической, тепловой и механической энергии, получаемой за счёт возобновляемых источников энергии [1].

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – источники энергии, образующиеся на основе постоянно существующих или периодически возникающих процессов в природе, а также жизненном цикле растительного и животного мира и жизнедеятельности человеческого общества. К таким источникам относят солнечную, ветровую и геотермальную энергию, энергию морских приливов и волн, биомассы (растения, различные виды органических отходов), низкопотенциальную энергию окружающей среды и так далее [2].

Различные виды ВИЭ находятся на разных стадиях освоения. Так, на данный момент особенно активно развивается ветроэнергетика – более 24% в год от общего объёма ВИЭ [1]. С 2014 года мощность ветроэлектростанций входящих в ЕЭС России превысила 2 ГВт (рисунок 1), а доля в установленной мощности электростанций ЕЭС России выросла с 0 до 0,93% [4].

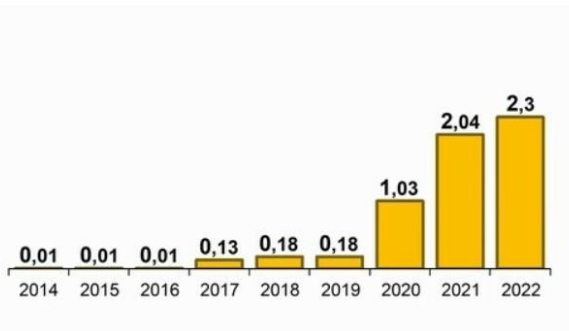


Рисунок 7. Динамика выработки электроэнергии на ВЭС ЕЭС России (млрд. кВт·ч)

После вступления Крыма и Севастополя в общий рынок электроэнергии России суммарная установленная мощность ВЭС Крымской энергосистемы на 2022 год составила 83,8 МВт. Выработка электроэнергии на ВЭС ЕЭС России с 2014 года выросла до более чем

5,5 млрд кВт·ч [3]. Активное применение ветроустановок происходит на Чукотке – речь об Анадырской ВЭС, обеспечивающей электроэнергией населения посёлков Шахтерский, Угольные Копи и аэропорт «Угольный». Выработка электрической энергии в 2018 году составила 2,5 млн кВт·ч. Параллельно станции установлена ДЭС, что делает Чукотскую ВЭС №1 ярким примером использования именно гибридной системы энергообеспечения [6].

Ветродвижитель – устройство, преобразующее энергию ветра в энергию вращательного движения. Рабочим органом, воспринимающим энергию (давление) ветрового потока и преобразующим её в механическую энергию вращения вала, является ротор, барабан с лопатками или ветроколесо. Основные разновидности ветроагрегатов изображены на рисунке 2 [4].

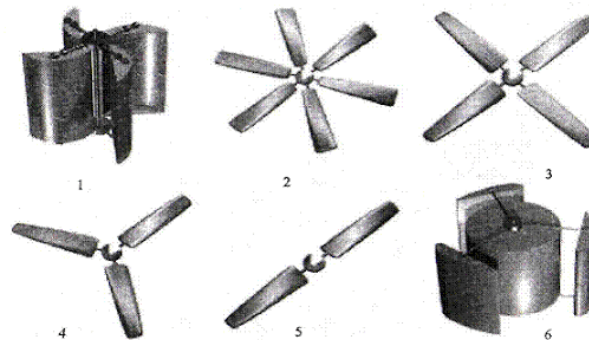


Рисунок 8. Типы ветродвижателей: 1 и 6 – карусельные (лопастные и ортогональные соответственно), 2-5 – с горизонтальной осью вращения (крыльчатые)

Традиционная компоновка ветряков (крыльчатая, с горизонтальной осью вращения) – неплохое решение для агрегатов малых размеров и мощностей. Но когда размахи лопастей выросли, данная компоновка утратила свою эффективность: на разной высоте ветер дует в разные стороны, что не только препятствует ориентировке агрегата, но и приводит к возникновению опасности разрушения лопастей. К тому же, в данном исполнении ветряка необходимо устройство автоматического поворота оси вращения (крыло-стабилизатор) [4].

Карусельные ветродвижатели могут работать при любом направлении ветра, не меняя своего положения, имеют больший момент вращения и быстро наращивают силу тяги при увеличении скорости ветра, после чего сама скорость вращения стабилизируется. Они также способны работать без дополнительных стабилизаторов направления и в целом считаются более простыми в эксплуатации [1].

Ортогональные ветроагрегаты перспективны для большой энергетики, но для их запуска требуется «разбег» – к установке необходимо подвести энергию – раскрутить достаточно, чтобы та перешла из режима двигателя в режим генератора [1].

Как уже говорилось ранее, ВЭС являются очень перспективной отраслью в области возобновляемых энергоисточников. На данный момент проектируются всё новые установки, такие как, например, Спираль Архимеда: инновационная разработка базируется на многовековом опыте использования силы ветра. Однако современное устройство кардинально отличается от привычных громоздких ветрогенераторов. Это компактная система LIAM F1 UWT, монтируемая на кровлю жилых строений. Данное изобретение обещает трансформировать подход к энергообеспечению домохозяйств, обеспечивая выработку до 1500 кВт/ч электроэнергии ежегодно, составляя достойную конкуренцию традиционным солнечным панелям [7].

Для снижения затрат на производство электроэнергии и экономии топлива предлагается рассмотреть гибридную энергетическую систему с участием ветродвигателей: ветроагрегат (ВА) располагается в непосредственной близости от ЦДЭС и подключается к ней на генераторном напряжении, причем ВА может лишь частично обеспечивать электрическую нагрузку, работая, главным образом, на экономию топлива [2].

Величину затрат и получаемой экономии или ущерба, связанных с использованием ВА, можем рассчитать по следующей зависимости:

$$\begin{aligned}
 Z = & -K_{\text{ВА}} - \left(0,56 \cdot p \cdot K_{\text{ВА}} + P_{\text{В}} \cdot T_{\text{В}} \cdot q \cdot (c_1 \cdot c_2 \cdot l_{\text{ц}} \cdot 10^{-3}) + \frac{P_{\text{В}}^2 \cdot l_1 \cdot T_{\text{В}} \cdot q \cdot c_1 \cdot j}{U_{04}^2 \cdot \gamma \cdot s_6} \right) \cdot \\
 & \left[\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right] + \left[\frac{K_{\text{ВА}}(1 - p \cdot n)}{(1 + i)^n} \right] + \\
 & \left(0,56 \cdot p \cdot K_{\text{В}} \cdot C_{\text{П}} + P_{\text{В}} \cdot T_{\text{В}} \cdot q \cdot (c_1 + c_2 \cdot l_{\text{ц}} \cdot 10^{-3}) + \frac{P_{\text{В}}^2 \cdot l_1 \cdot T_{\text{В}} \cdot q \cdot c_1 \cdot j}{U_{04}^2 \cdot \gamma \cdot s_6} \right) \cdot C_{\text{П}} \cdot \\
 & \cdot \left[\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right] + K_{\text{ВА}} \cdot p \cdot C_{\text{П}} \cdot \left[\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right]; \quad (1)
 \end{aligned}$$

Где:

$K_{\text{ВА}}$ – капиталовложения на покупку ветроагрегата, транспортирование, строительство;

p – коэффициент амортизационных отчислений;

$P_{\text{В}}$ – мощность, вырабатываемая ветроагрегатом, кВт;

$T_{\text{В}}$ – время работы ветроагрегата, ч;

c_1 – стоимость топлива на базе, кг/руб;

c_2 – стоимость перевозки тонны топлива на 1 км;

$l_{\text{ц}}$ – расстояние от базы с топливом до ДЭС, км;

l_1 – расстояние от ветроагрегата до потребителя, км;

q – удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч;

j – число ветроагрегатов, шт;

U_{04} – напряжение, вырабатываемое ветроагрегатом, В;

γ – проводимость материала проводов, см;

s – площадь сечения проводов, мм;

i – ставка альтернативного вложения;

n – количество временных интервалов;

$C_{\text{П}}$ – ставка налога на прибыль.

Полученная зависимость, по сути, является технико-экономической моделью, позволяющей определить область эффективного использования ветроагрегата в зависимости от величины входящих параметров. С некоторой корректировкой эта формула может быть вполне применима и для других систем энергоснабжения [1].

Выводы

С помощью представленной технико-математической модели можно обосновать проект совместного использования гибридной системы энергоснабжения для различных условий проведения геологоразведочных работ. Меняя различные параметры в данной формуле, мы можем прогнозировать целесообразность использования ветроагрегата, сроки его окупаемости, а также подобрать ветроагрегат с оптимальными параметрами для конкретных условий. Таким образом, в работе приводится характеристика и методика определения потенциала ВИЭ, которая может быть использована для оценки энергоресурсов в условиях геологоразведочных работ. Это поможет обосновать возможность совместного

использования традиционных и возобновляемых энергоисточников в энергетических сетях ГГР.

Предложенная технико-математическая модель может обосновать использования гибридных систем энергоснабжения для различных условий ГГР. Она позволит прогнозировать целесообразность использования данной системы и оптимизировать её параметры. Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении оптимизации энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии (ВА) и углубления значений в решении теоретических проблем рационального использования возобновляемых источников энергии на геологоразведочных работах.

Библиография

1. Брюховецкий О.С., Лимитовский А. М., Меркулов М. В. «О перспективе использования возобновляемых источников энергии при производстве геологоразведочных работ» М., Известия ВУЗов. Геология и разведка. №3 2007 г.
2. А. П. Жернаков, В. В. Алексеев, А. М. Лимитовский, Ю. В. Шевырев, В. А. Косьянов, И. А. Ивченко «Экономия топливно-энергетических ресурсов при проведении геологоразведочных», Волгоград «Ин-Фолио», 2011 г.
3. Голицын М. В., Голицын А. А., Пронина Н. М., «Альтернативные энергоносители», Москва, «Наука», 2004 г.
4. Власов В. К., «Ветро двигатели. Теория и практика», Москва, «ТЕХНОСФЕРА», 2020 г.
5. Артюшевская Е. Ю., Хруленко О. С. «Повышение энергетической эффективности электроснабжения за счет ветроэнергетических установок в регионах арктической зоны», 2023. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-elektrosnabzheniya-za-schet-vetroenergeticheskikh-ustanovok-v-regionah-arkticheskoy-zony/viewer> (Дата обращения: 22.02.2025).
6. Анадырская ВЭС. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Анадырская_ВЭС (Дата обращения: 22.02.2025).
7. Спираль Архимеда: новая эра энергетики. URL: <https://www.pravda.ru/news/science/2161586-novaja-era-domashnei-energetiki-vetrjak-iz-niderlandov/> (Дата обращения: 22.02.2025)

Цифровые двойники в горном деле

Барменков Е.Ю.* (МГРИ, Barmenkoveu@mgri.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются концепция цифровых двойников и их применение в горной отрасли. Подробно описаны преимущества использования цифровых двойников, включая повышение эффективности добычи, снижение затрат, улучшение безопасности и минимизацию воздействия на окружающую среду. Оценка влияния новых технологий на традиционные методы работы в горной промышленности подчеркивает важность инноваций для достижения устойчивого роста в отрасли. Анализируются перспективы дальнейшего внедрения цифровых технологий в горное дело и их влияние на устойчивое развитие отрасли.

Ключевые слова

Цифровой двойник, горное дело, риски, безопасность, инновации

Теория

Современные технологии стремительно преобразуют все сферы нашей жизни, и горное дело не является исключением. Одним из наиболее значительных достижений последних лет стало внедрение цифровых двойников — виртуальных моделей, которые отражают физические объекты и процессы в реальном времени. Эти инновационные инструменты позволяют не только оптимизировать производственные процессы, но и повысить безопасность, снизить затраты и улучшить экологические показатели. В условиях возрастающей конкуренции и необходимости соблюдения строгих экологических стандартов, применение цифровых двойников становится не просто актуальным, а жизненно необходимым для успешного функционирования горнодобывающих предприятий.

Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели физических объектов и процессов, которые позволяют проводить анализ, мониторинг и оптимизацию работы в реальном времени. С помощью анализа данных, полученных с помощью датчиков и систем мониторинга, можно выявить наиболее эффективные методы работы, оптимизировать маршруты транспортировки и минимизировать затраты на ресурсное обеспечение. Это позволяет не только увеличить объем добычи, но и снизить воздействия на окружающую среду. Пример цифрового двойника представлен на рисунке 1.

Одной из ключевых задач в горном деле является обеспечение безопасности работников. Цифровые двойники могут использоваться для моделирования потенциальных рисков, таких как обрушения, выбросы газов или затопления. С помощью анализа данных о состоянии шахт и карьеров, можно заранее выявлять опасные участки и принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций. Кроме того, цифровые двойники могут быть интегрированы с системами управления безопасностью, что позволяет в реальном времени реагировать на изменения условий работы.

Цифровые двойники также играют важную роль в управлении техническим состоянием оборудования. Системы предиктивной аналитики, основанные на данных цифровых двойников, позволяют прогнозировать возможные неисправности и планировать профилактическое обслуживание. Это снижает время простоя оборудования и увеличивает его эксплуатационный срок, что в свою очередь положительно сказывается на экономических показателях предприятия.

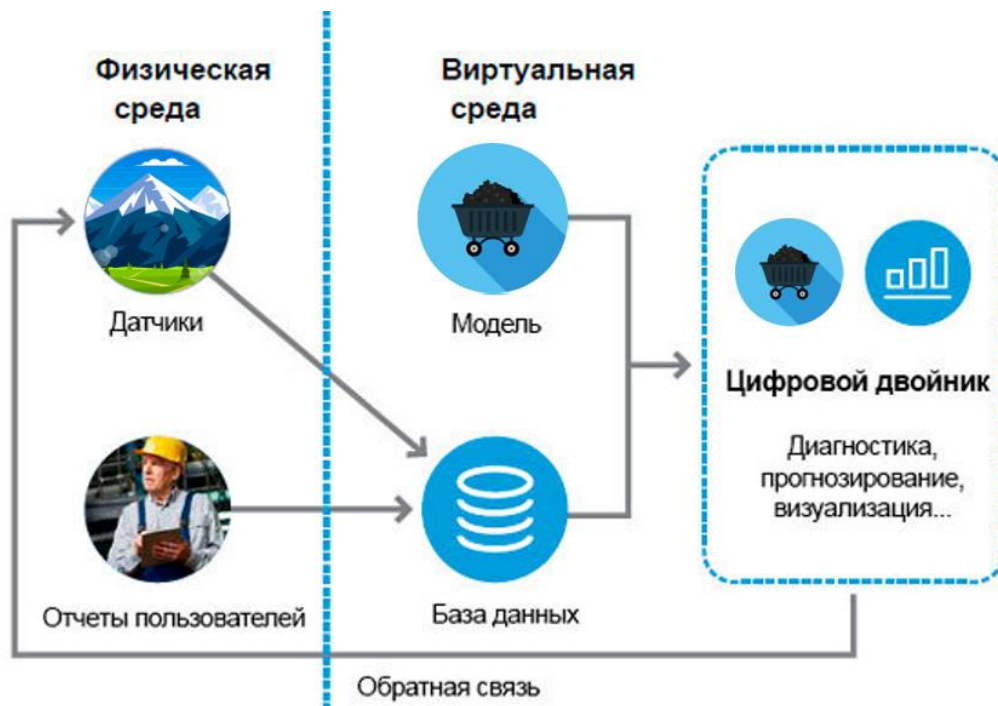


Рисунок 1. Пример цифрового двойника

С учетом растущих требований к устойчивому развитию, цифровые двойники помогают горнодобывающим компаниям минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Моделирование процессов позволяет анализировать влияние добычи на экосистему, оптимизировать использование водных ресурсов и управлять отходами. Например, с помощью цифровых двойников можно оценить, как изменения в технике добычи будут влиять на окружающую среду, что позволяет принимать обоснованные решения с точки зрения экологии.

Внедрение цифровых двойников в различные сферы деятельности открывает новые горизонты для оптимизации процессов и повышения эффективности. Одним из ключевых преимуществ цифровых двойников является возможность реалистичного моделирования и тестирования различных сценариев без риска для реальных ресурсов. Это позволяет специалистам выявлять потенциальные проблемы и оптимизировать операции еще на этапе проектирования или в процессе эксплуатации.

Кроме того, цифровые двойники значительно улучшают процесс принятия решений. С помощью аналитики и визуализации данных, которые предоставляет виртуальная модель, компании получают более глубокое понимание своих процессов и могут принимать обоснованные решения на основе актуальной информации. Это особенно важно в условиях быстроменяющегося рынка, где скорость реакции на изменения может стать конкурентным преимуществом.

Цифровые двойники также способствуют улучшению взаимодействия между различными подразделениями компании. Общая виртуальная модель позволяет всем заинтересованным сторонам видеть единую картину и работать с согласованной информацией. Это уменьшает вероятность ошибок, связанных с недопониманием или недостатком информации, и способствует более слаженной командной работе.

В конечном итоге, внедрение цифровых двойников позволяет компаниям не только снизить затраты и повысить эффективность, но и создать более гибкую и адаптивную

организацию, способную быстро реагировать на вызовы и возможности, которые предоставляет современный рынок.

Внедрение и использование цифровых двойников сопряжены с рядом серьёзных проблем. В первую очередь, одной из основных трудностей является необходимость обеспечения высокой точности данных, которые используются для создания и обновления цифровых двойников. В противном случае, результаты анализа могут оказаться недостоверными и привести к ошибочным выводам.

Кроме того, цифровые двойники требуют значительных вычислительных ресурсов и инфраструктуры, что может стать препятствием для малых и средних предприятий. Не всегда есть возможность инвестировать в необходимое оборудование и программное обеспечение, что ограничивает доступ к этой технологии. Также стоит учитывать, что интеграция цифровых двойников в существующие системы может быть сложной задачей. Существующие процессы и технологии не всегда совместимы с новыми решениями, что требует времени и дополнительных затрат на адаптацию.

Не менее важным аспектом является необходимость квалифицированного персонала, способного работать с цифровыми двойниками. Отсутствие специалистов, обладающих необходимыми знаниями и навыками, может существенно замедлить процесс внедрения и использования этой технологии. Вдобавок, вопросы безопасности и защиты данных становятся всё более актуальными. Цифровые двойники, как и любые другие системы, уязвимы для кибератак, что может привести к утечкам конфиденциальной информации или повреждению систем.

Таким образом, несмотря на очевидные преимущества цифровых двойников, их успешное применение требует тщательной проработки множества аспектов, включая технические, организационные и человеческие факторы. Необходимо учитывать все эти сложности, чтобы извлечь максимальную пользу из этой инновационной технологии.

Применение цифровых двойников в горном деле открывает новые горизонты для повышения эффективности и безопасности в этой высокотехнологичной отрасли. Благодаря возможности моделирования и анализа данных в реальном времени, компании могут оптимизировать производственные процессы, снижать затраты и минимизировать риски, связанные с человеческим фактором и природными условиями. Цифровые двойники предоставляют ценную информацию для принятия обоснованных решений, что способствует более устойчивому и экологически безопасному ведению горного производства. В условиях быстро меняющегося мира и растущих требований к ресурсам, внедрение таких технологий становится не просто преимуществом, а необходимостью для успешного развития горнодобывающей отрасли. Перспективы дальнейшего развития цифровых двойников обещают еще более глубокую интеграцию инноваций в процессы добычи и переработки, что, безусловно, будет способствовать улучшению общего состояния отрасли и повышению её конкурентоспособности.

Библиография

1. Дозорцев В. М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 9. – С. 3–11.
2. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / А. Прохоров, М. Лысачев; науч. ред. Боровков А. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр.
3. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли/ В.Н. Быкова [и др.]/ Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – № 1 (28). – С. 8.

4. Царева А.Е. Влияние цифровизации бизнес-процессов на эффективность работы предприятия / А.Е. Царева, А.Л. Баранников // Социально-экономические процессы современного общества: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Чебоксары, 26 февр. 2021 г.) / редкол.: Э.В. Фомин [и др.] – Чебоксары: ИД «Среда», 2021. – С. 143-146.

Подсекция 3.2. Бурение скважин

Анализ конструкции породоразрушающего инструмента, снижающего гидродинамическое давление бурового раствора при сооружении скважин комплексом ССК

**Белов Н.М.* (СФУ, nikitosikyky@gmqil.com),
Петенев П.Г. (СФУ, PPetenev@sfu-kras.ru)**

Аннотация

При бурении скважин комплексом ССК на больших глубинах и в сложных геологических условиях возникает проблема прокачки бурового раствора из-за высокого гидродинамического давления, возникающего из-за перепада давлений в промывочных каналах алмазной буровой коронки, приводящее к гидроподпору. Высокое гидродинамическое давление ведет к ухудшению работы оборудования, приводящее к снижению механической скорости бурения или остановке бурения. В данной статье изучено влияние разных конструкций алмазной буровой коронки на гидродинамическое давление бурового раствора.

Ключевые слова

алмазная буровая коронка, буровой раствор, гидродинамическое давление, комплекс ССК, моделирование, Ansys

Теория

На сегодняшний день наблюдается рост глубин геологоразведочных скважин. Неотъемлемой частью бурения является буровой раствор. Он необходим для очистки забоя от разрушенной породы в виде шлама, охлаждать породоразрушающий инструмент, смазывать бурильную колонну для снижения трения об стенку скважины, а также обеспечивать устойчивость стенок скважины. По мере углубления скважины необходимо повышать расход бурового раствора для преодоления гидравлических сопротивлений. Также при бурении мягких и глинистых породах возникает проблема образования на породоразрушающем инструменте и бурильной колонне сальников, затрудняющих прокачку бурового раствора и приводящих к повышению гидродинамического давления из-за снижения площади сечения затрубного пространства. Кроме того, поток жидкости высокой плотности, движущийся с большой скоростью, создает избыточное гидродинамическое давление на породу на забое, что затрудняет отделение продуктов разрушения от массива [1-2]. Также известно, что увеличение подачи промывочной жидкости в 2 раза приводит к возрастанию давления в 4 раза, а мощность на привод насоса повышается в 8 раз [3].

На больших глубинах при бурении комплексом ССК проблема высоких давлений появляется при циркуляции бурового раствора из-за малых внутритрубных кольцевых пространств и роста гидравлических сопротивлений, что ухудшает условия работы бурового оборудования. Также данная проблема возникает при бурении в сложных геологических условиях, где присутствуют такие осложнения, как набухающие горные породы, обрушение неустойчивых стенок скважин. Исследования в области бурения комплексом ССК показали, что основные потери давления возникают при движении бурового раствора в кольцевом пространстве между бурильной колонной и стенкой скважины. Например, при увеличении расхода промывочной жидкости до 40 л/мин потери давления увеличиваются на 15–19%, а при снижении расхода до 20 л/мин — снижаются на 28–32% [4].

Существует несколько путей снижения гидродинамического давления, создаваемого в призабойной части колонкового набора:

- уменьшение расхода бурового раствора;
- снижение реологических характеристик бурового раствора таких, вязкость, напряжение сдвига;
- увеличение кольцевого пространства;
- специальные конструкции породоразрушающего инструмента и колонкового набора.

Если для расчета $\Delta P_{к.п.}$ использовать формулу Дарси-Вейсбаха (1), то без учета потерь давления между соединениями бурильных труб и стенками скважины, величина гидродинамического давления ($P_{ГД}$, Па) будет равна:

$$P_{ГД} = P_{ГС} + \Delta P_{к.п.} = \rho \cdot g \cdot H + \sum_{i=1}^n \left\{ \lambda \cdot i \cdot \frac{v_i^2 \cdot \rho \cdot l_i}{[2 \cdot (D_i - d_n)]} \right\} \quad (1)$$

где n - число интервалов кольцевого пространства с неизменной величиной зазора между трубами и стенками скважины; λ_i - коэффициент гидравлических сопротивлений при движении бурового раствора в i - м интервале кольцевого пространства; v_i - скорость потока бурового раствора в i - м интервале кольцевого пространства (м/с); l_i - длина i - го интервала кольцевого пространства с неизменной величиной зазора между трубами и стенками скважины (м); D_i - диаметр скважины на i - м интервале (м); d_{ni} - наружный диаметр труб на i - м интервале скважины (м). Очевидно, что для предупреждения гидроразрыва пластов и поглощений бурового раствора необходимо, чтобы гидродинамическое давление было меньше давления гидроразрыва ($P_{ГД} < P_{ГР}$). Из этих двух давлений регулируемым (управляемым) является только гидродинамическое. Значит снижение величины гидродинамического давления возможно за счет уменьшения плотности, вязкости, скорости потока бурового раствора и увеличения зазора между бурильными трубами и стенками скважины, а также конструктивными особенностями породоразрушающего инструмента.

Для комплексного решения проблем высокого давления в циркуляционной системе комплекса ССК необходимо заниматься проработкой как внутренней, так и наружной геометрии породоразрушающего инструмента и колонкового набора. Самое высокое давление возникает внутри колонковой трубы, поэтому необходимо разработать такую конструкцию, способную увеличить внутренний кольцевой зазор для промывочной жидкости, но в то же время конструктивные изменения не повлияли на поперечный диаметр керна.

Разработкой технических решений для борьбы с высокими давлениями занимались многие исследователи. Например, были проведены производственные испытания алмазной буровой коронки с увеличенным затрубным кольцевым зазором между стенкой скважины и бурильной колонны за счет увеличения диаметра матрицы, что позволило снизить гидродинамические потери давления [4]. Ещё были разработаны алмазные буровые коронки с целью снижения кавитационного эффекта, приводящего к скорому износу матрицы, за счет наклона промывочных каналов на торце матрицы против стороны вращения для снижения завихрения бурового раствора [5]. На сегодняшний день производятся алмазные буровые коронки с конфигурацией матрицы Cyclone компанией Fordia для бурения рыхлых и глинистых пород [6]. Главной особенностью алмазной буровой коронки с конфигурацией матрицы Cyclone является снижение сальникообразований за счет турбулизации потока из-за промывочных каналов, расположенных под углом и против вращения бурильной колонны, а неизученность влияния угла наклона промывочных каналов относительно оси торца коронки на гидродинамическое давление до сих пор является актуальным. Данные коронки сегодня производятся с углом наклона промывочных каналов под 45° , что позволяет провести

исследования, направленные на изучение влияния угла наклона промывочных каналов, относительно оси торца матрицы.

Для данного исследования было проведено моделирование в программном обеспечении Ansys в модуле CFX. Были построены 3D-модели алмазной буровой коронки типоразмера NQ ($\varnothing 76$ мм), расширителя NQ ($\varnothing 76,2$ мм), керноприемной трубы, керна, а также исследуемого элемента – модель течения жидкости по внутритрубному и затрубному пространствам (рис. 1).

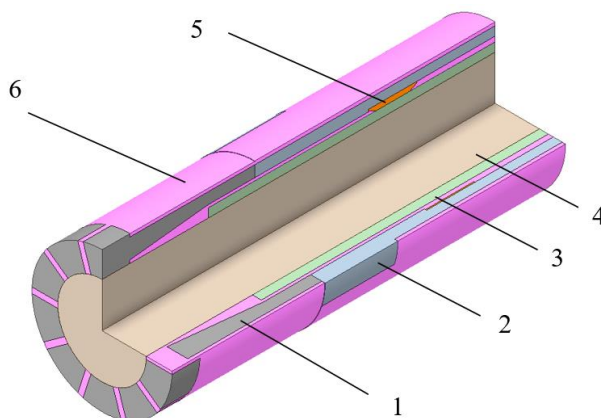


Рисунок 1 – 3D-модель для исследования гидродинамики бурового раствора,
где 1 – алмазная буровая коронка; 2 – алмазный расширитель;
3 – керноприемная труба; 4 – керн; 5 – стабилизатор керноприемной трубы;
6 – модель промывочной жидкости

Для моделирования были заданы граничные условия со следующими характеристиками: расход промывочной жидкости – 60 л/мин; частота вращения буровой колонны – 1000 об/мин; промывочная жидкость – вода техническая.

На рисунке 2 продемонстрированы результаты моделирования циркуляции промывочной жидкости по внутритрубному и затрубному пространствам колонкового набора комплекса ССК с типоразмером алмазной буровой коронки и расширителя NQ. На данном рисунке отчетливо видно резкий перепад давления во внутренней части промывочного канала алмазной коронки и только после прохождения узкого пространства давление не меняется. Также видно, что самое высокое давление возникает в кольцевом пространстве между колонковой трубой и керноприемником, что может быть в дальнейшем предметом исследования.

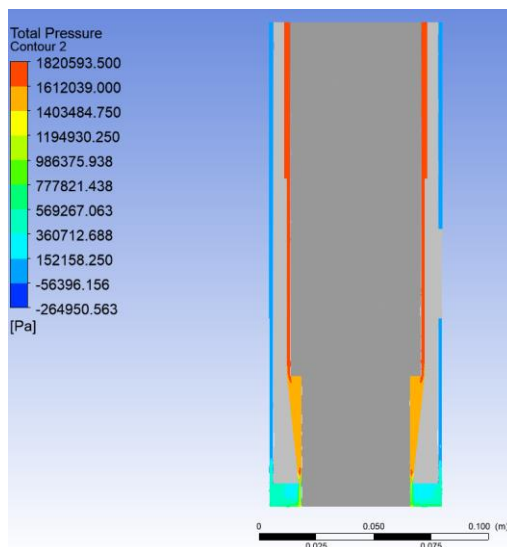


Рисунок 2 – профиль давления в процессе циркуляции промывочной жидкости, где 1 – алмазная буровая коронка с расширителем; 2 – керноприемная труба с креном; 3 – контуры давлений бурового раствора

Выводы

На полученных результатах моделирования показано, что высокое давление возникает во внутритрубном кольцевом пространстве и резкий перепад давления во промывочных каналах алмазной коронки, поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния геометрии внутренней части колонкового набора и формы промывочных каналов на гидродинамическое давление.

Библиография

1. Сулакшин С.С. Бурение геологоразведочных скважин: Справочное пособие. — М.: Недра, 1991. — 334 с.
2. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве: Учеб. пособие — М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. — 199 с.
3. Нескоромных В.В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: учебное пособие / В.В. Нескоромных. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. — 294 с.
4. Неверов А. Л., Повышение эффективности сооружения глубоких скважин комплексами со съёмными керноприемниками за счет снижения гидродинамического давления / Неверов А. Л., Минаков А. В., Жигарев В. А., Каратаев Д. Д. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — Новосибирск: Изд. ТПУ. — 2016. — №6. — С. 75–85.
5. Горшков Л.К. Особенности циркуляционной системы алмазных буровых коронок нового поколения/ Буканов А.А., Осецкий А.И., Спирин В.И., Будюков Ю.Е. // Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности, образовании и экологии – 2013. — С. 3-9.
6. Fordia. The fundamental guide to core bit configurations. Catalog 2021. Available at: <https://www.fordia.com/en/products/core-drilling-tools/diamond-tools/diamond-core-bits/legends>

Совершенствование резцов PDC для армирования буровых долот

Лалетина К.В. (Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, lkv2@mail.ru),*

Нескоромных В.В. (Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, sovair@bk.ru)

Аннотация

В настоящий момент широкое распространение получило бурение долотами с резцами PDC. Данный инструмент позволяет реализовывать бурение с высокой механической скоростью (до 20–40 м/ч, а порой и более при бурении мягких пород и горных пород средней твердости). При этом часто достигается высокий ресурс бурового инструмента – 1000 и более метров проходки [2].

Анализируя известные, в том числе современные, разработки [4], можно говорить об актуальности направления совершенствования долот, армированных резцами PDC.

В работе предлагаются и анализируются конструкции резцов PDC с продольным отверстием фасонного сечения с целью повышения показателей бурения за счет или снижения сил сопротивления, действующих на резец, или интенсификации процесса разрушения горной породы резцом.

Ключевые слова

Бурение, резцы PDC, долото, механическая скорость бурения, ресурс долота

Теория

Исследование условия снижения сопротивления на резец

Во время работы резец под действием осевой нагрузки и частоты вращения реализует резание-скалывание породы, при этом на резец действует сопротивление находящейся перед резцом разрушенной горной породы и среды, представленной буровым раствором с частицами шлама. Сопротивление вращению резца возрастает по мере роста линейной скорости и максимально на наружной кромке торца долота [1].

Важно заметить, что сопротивление среды является лишь составной частью усилия резания-скалывания породы. Значительное влияние на усилие резания-скалывания оказывают силы трения, силы внутреннего трения в деформируемых объемах породы.

Сопротивление среды R_c при установке резца в корпусе долота с отрицательным углом резания увеличивает усилие F_n , частично компенсирующее действующую осевую нагрузку, что приводит к уменьшению глубины резания-скалывания и углубление за один оборот инструмента на забое (рис. 1), которое в свою очередь напрямую влияет на механическую скорость бурения [2, 3]:

$$v_m = h_0 \omega ,$$

где h_0 – углубление за один оборот, м; ω – частота вращения бурового инструмента, мин⁻¹.

Углубление за один оборот напрямую зависит от глубины внедрения резца в породу h и числа резцов в линии резания N .

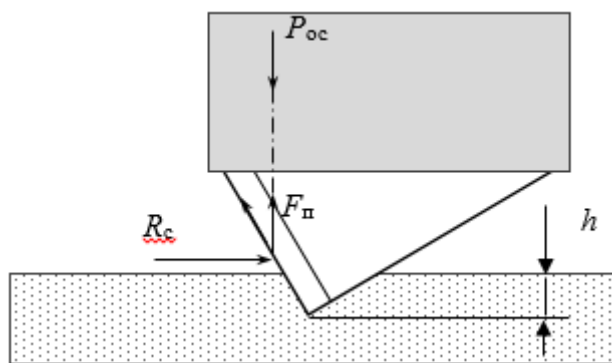


Рисунок 1. Механизм работы резца PDC

Сопротивление среды R_c является суммой сопротивлений, возникающих при перемещении резца в среде бурового раствора R_p и разрушенной породы R_n . Сопротивления со стороны раствора и породы можно рассчитать по формуле [3]:

$$R_p = 0,5v_p^2\rho_p S_1 C_c$$

$$R_n = 0,5v_p^2\rho_n S_2 C_c$$

где v_p – линейная скорость перемещения резца, м/с; ρ_p, ρ_n – плотность раствора и породы, соответственно, Н/м³; S_1, S_2 – площади резца над породой и в породе, м²; C_c – коэффициент сопротивления со стороны резца, определяемый формой плоскости резца (для плоского равно 1).

Чем меньше площадь воздействия среды, тем меньше усилие F_n , вызванное сопротивлением среды R_c .

Таким образом, для увеличения или поддержания высоких значений механической скорости необходимо поддерживать оптимальное значение глубины резания-скалывания. Один из способов – увеличение осевой нагрузки на резец. Однако данный способ значительно увеличивает энергоёмкость процесса.

Другим способом является снижения сопротивления среды, оказывающей влияние на работу резца. Величина сопротивления может быть снижена за счет уменьшения площади, на которую воздействует среда. Для этого в корпусе резца может выполняться отверстие.

Поскольку отверстие в резце не должно пересекать активно работающую зону резца, высота которой равна величине заглубления резца в породе h , и должно находиться на некотором расстоянии от нее, расстояние от крайней точки резца до отверстия должно быть больше трети диаметра резца, что накладывает ограничение на размеры отверстия. Увеличить площадь отверстия позволяет его геометрическая форма. В резцах большего диаметра для бурения мягких горных пород возможно наличие эксцентрично расположенного отверстия, что позволит сделать отверстие еще более крупным.

В результате разработаны конструкции резцов с концентрическими отверстиями круглого, пятиугольного и квадратного сечения. Для резцов большого диаметра дополнительно предлагается конструкция с круглым отверстием, расположенным эксцентрично (рис. 2 а).

С точки зрения снижения сопротивления, наиболее подходящие формы отверстий – квадрат и круг, расположенный эксцентрично. Однако необходимо учитывать, что резец находится под действием осевой нагрузки и силы реакции породы, а отверстие в нем снижает его прочностные характеристики. С этой точки зрения резец с профильным пятиугольным или квадратным будет иметь большую толщину стенки по сравнению с резцом с круглым

отверстием, что положительно влияет на прочность резца. Однако в этом случае отверстие в резце будет забиваться частицами разрушенной породы, в результате чего заявленный результат – снижение сопротивления среды и повышение механической скорости – достигаться не будет.

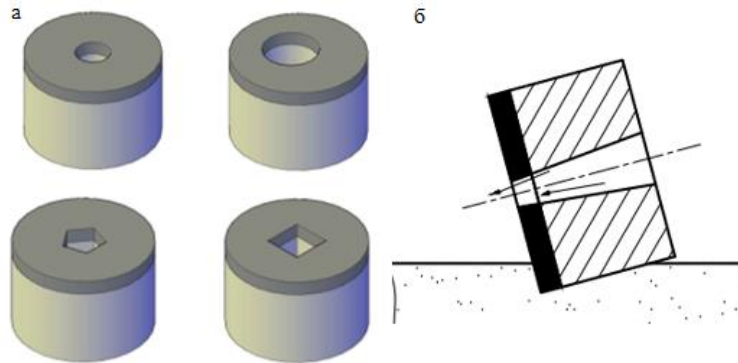


Рисунок 2. Конструкции резцов: а – с отверстием постоянного сечения; б – с отверстием, диаметр которого уменьшается к рабочей грани

Исследование условий разрушения горной породы при подаче бурового раствора через продольное отверстие в резце

За счет струи очистного агента, поступающей из промывочного канала бурового долота в отверстие резца PDC, осуществляется направление энергии жидкости непосредственно в горную породу, находящуюся в зоне разрушения, что предотвращает зашламование отверстия резца, повышает напряжение в горной породе, способствует очищению зоны контакта резца с горной породой. Иными словами, предлагается использовать отверстие в резце в качестве гидромониторной насадки. Такой вариант исполнения (см. рис. 2 б) ведет к повышению скорости потока жидкости (эффект Вентури), вследствие чего также улучшаются условия очистки отверстия в резце по сравнению с резцом с отверстием постоянного сечения, что подтверждается результатами компьютерного моделирования (рис. 3).

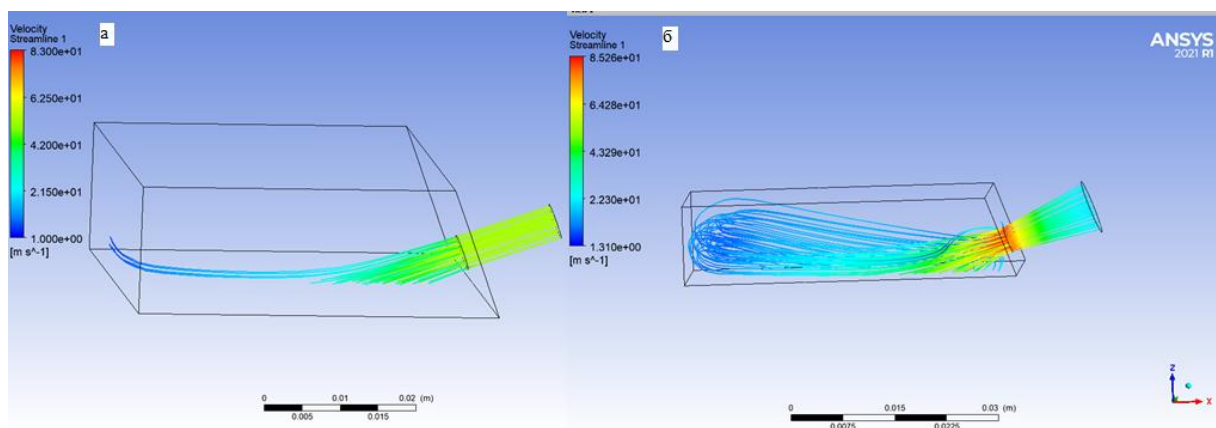


Рисунок 3. Результаты компьютерного моделирования: а – резец с сечением постоянного диаметра; б – резец с отверстием переменного диаметра

На рисунке 3 а показаны результаты моделирования потока жидкости для резца с отверстием постоянного сечения. Скорость потока на входе в резец 53 м/с, на выходе из резца

скорость начинает падать до 40 м/с. На рисунке 3 б представлено моделирование потока жидкости для резца с отверстием переменного сечения. Скорость потока на входе 20,7 м/с, скорость на выходе – 83 м/с. Видно, что поток с большей скоростью врывается в забой и его энергии хватает для лучшей очистки забоя от шлама.

Резцы предлагаемых конструкций рекомендуется устанавливать ближе к периферической части матрицы долота, так как при увеличении диаметра линии работы резца увеличивается его линейная скорость перемещения, что ведет к увеличению сопротивления породы разрушению и снижению эффективности работы резцов и долота в целом. При этом буровое долото оснащается резцами одной из предложенных конструкций в зависимости от твердости и характера разрушения горной породы, для бурения которой применяется долото. Таким образом, размещение резцов, способных интенсифицировать процесс разрушения породы, в данной области (рис. 4) на матрице позволит повысить эффективность долота.

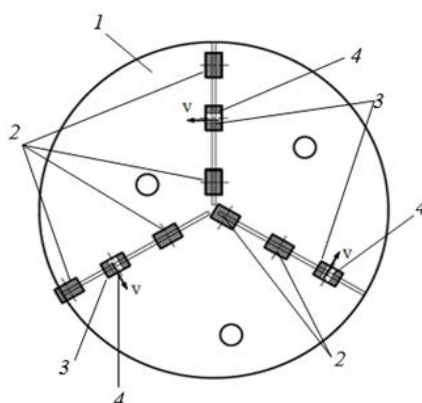


Рисунок 4. Предлагаемая схема расположения резцов новой конструкции в долоте: 1 – матрица долота; 2 – резцы типа PDC; 3 – корпус резца PDC; 4 – отверстие в резце PDC

Выводы

При бурении на резец PDC оказывают воздействие горная порода и буровая среда, представленная буровым раствором с частицами шлама, в результате чего снижается эффективность работы резца. Одним из путей снижения сопротивления перемещению резца в среде бурового раствора, насыщенного шламом, является исполнение резца полым, т.е. с продольным сквозным отверстием. Для повышения прочности и эффективной работы такого резца продольное отверстие рекомендуется выполнять в виде пятиугольника.

С целью повышения механической скорости бурения предлагаются конструкции резцов PDC с продольным отверстием, которое может использоваться в качестве дополнительного промывочного отверстия. В результате планируется добиться интенсификации процесса разрушения горной породы и улучшений условий очистки долота, что приведет к повышению эффективности процесса бурения за счет подачи буровой жидкости с напором непосредственно в зону разрушения породы резцом. Продольные отверстия в этом случае целесообразно выполнять в виде ускорителей потока, а также профильными.

Библиография

1. Борисов К.И. Научный метод оценки эффективности процессов динамического разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Борисов Константин Иванович ; Томск, 2012. – 197 с.

2. Нескоромных, В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие / В.В. Нескоромных. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.
3. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, Л. Баочанг. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – 268 с.
4. Патент № 2653212 Российская Федерация, МПК. E21B 10/60 (2006.01). Алмазное буровое долото : 2017124419 : заявл. 11.07.2017 : опубл. 07.05.2018 / Полушин Н.И., Лаптев А. И., Кушхабиев А. С., Котельникова О. С., Сорокин Е. Н., Карзаков С. Г. ; заявитель ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС».

Анализ эффективности систем отбора проб при бурении комплексами ССК

Севостьянов Д.А. (Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, dmitrysvst@mail.ru),*

Петенёв П.Г. (Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, pawel-whait@mail.ru)

Аннотация

Рассмотрены и проанализированы конструкции съемных керноприемных устройства, а также овершотов на затраты времени при спускоподъемных операциях.

Представлена методика анализа конструкций, зависимость геометрических форм и результаты гидродинамики процессов и эффективности снарядов.

Ключевые слова

Бурение глубоких скважин, съемный керноприёмник, овершот, спускоподъёмные операции

Теория

Исследование условий снижения времени на спуск-подъем керноприёмника

Колонковое бурение продолжает играть важную роль в геологоразведочном бурении скважин, а его объем значительно вырос. Вместе с тем, для обеспечения высоких технико-экономических показателей и снижения материальных затрат необходимы качественные изменения в области разработки нового оборудования и инструмента. Создание высокоэффективной конструкции съемного керноприемного устройства и овершота для бурения геологоразведочных скважин по-прежнему является одной из важнейших задач развития этой отрасли. На больших глубинах при бурении комплексом ССК возникает проблема с ростом непроизводительного времени, связанного со спускоподъемными операциями керноприемной трубы и овершотом. Непроизводительное время на спускоподъемные операции, в зависимости от глубины скважины, а также её наклона, типоразмера и свойств жидкости может варьироваться от (5 минут до 60 минут) за один рейс, (по мере углубки) учитывая количество рейсов, оно может составлять более 50% смены. Такие показатели ведут к повышению стоимости 1 м метра бурения ССК, где время на спускоподъемные операции увеличиваются с глубиной скважины [1]:

$$T = 2C \cdot H + t$$

где C – время на спуск-подъем 1 м троса с керноприемником, ч/м; H – глубина скважины, м; t – время на извлечения керна и смена керноприемника, ч.

Время на спуск-подъем зависит от таких параметров как: глубина скважины, тип промывочной жидкости, угол наклона мачты, скорости навивки каната на барабан лебедки, типоразмера инструмента, а также его геометрической формы.

На некоторые из данных параметров мы не можем повлиять, такие как: глубина скважины и угол наклона мачты, т. к. они напрямую связаны с геологическим заданием, скорость навивки каната на барабан лебедки достигает пиковой скорости 1,6 м/с при максимальных оборотах двигателя бурового станка, использование другого (нерегламентированного) типа промывочной жидкости может привести к аварийной ситуации. Остается не так много способов снизить время на спуск-подъем керноприемника. Исходя из формулы и рассуждений можно отметить интересные и более благоприятные способы снижения времени на спуск-подъем керноприемника.

Использование двух керноприемных узлов позволяет сократить время на операции связанных с извлечением керна, этот метод обеспечивает возможность параллельной работы с двумя узлами, что ускоряет процесс и повышает общую производительность буровых работ. Применение двух узлов также позволяет оперативно реагировать на возможные проблемы, такие как повреждение одного из узлов, что способствует бесперебойной работе, однако на затраченное время спуск-подъема керноприемника такой способ никак не влияет.

Досылка керноприёмника при циркуляции бурового раствора способствует более быстрому и эффективному процессу бурения, но имеет свои пределы по увеличению спуска снаряда и связаны с производительностью насосного оборудования, а также может возникнуть поршневой эффект, который, наоборот, может увеличить время на спуск.[4]

Применение утяжелителя на керноприёмный узел улучшает стабильность и контроль над процессом спуска оборудования, однако увеличение веса керноприёмного снаряда может негативно сказаться на скорости его подъёма, что делает использование утяжелителей в некоторых случаях контрпродуктивным решением.

Для бурения с отбором керна комплексом ССК чаще всего используется классический комплекс, у которого жидкость попадает в керноприемную трубу, проходит через зазоры между колонной бурильных труб и снарядом, а также через радиальные отверстия (рис. 1). Для решения проблем, связанных со спускоподъёмными операциями, могут использоваться специальные конструкции комплекса ССК с увеличенными и дополнительными отверстиями для потока промывочной жидкости.



Рисунок 1. Протекание жидкости во время спуска

На время спуска овершота влияет скорость навивки каната на барабан лебёдки, но также важное значение имеет геометрическая форма устройства. Оптимальная форма способствует более эффективному и быстрому соединению с керноприёмным устройством, что ускоряет процесс спускоподъёмных операций и снижает риск возможных неисправностей или задержек при соединении компонентов.

Геометрическая форма отверстий в конструкции керноприёмного устройства и овершота является ключевым фактором, влияющим на эффективность и скорость спускоподъёмных операций. Правильно спроектированные отверстия обеспечивают оптимальное взаимодействие между компонентами оборудования, что способствует более быстрому и надёжному процессу бурения. Это приводит к сокращению времени на выполнение операций, повышению общей производительности и снижению затрат на бурение.

Поскольку проблема до сих пор является актуальной, разработаны конструкции узлов керноприемных снарядов и овершотов с более обтекаемой и более пропускной формы.

С точки зрения увеличения обтекаемости, наиболее подходящей формой является округленная форма промывочных отверстий. Однако необходимо учитывать и угол, и размер таких отверстий играет важную роль, к примеру, оптимальный угол для свободного передвижения жидкости у зарубежных производителей составляет 45° (рис. 2 а). Как было сказано ранее увеличение веса негативно может сказаться на подъёмных операциях. Оптимальным решение — это создание дополнительного отверстия в подшипниковом узле керноприемного устройства (рис. 2 б), так как большее количество жидкости скапливается во время спуска именно в керноприемной трубе. [2]

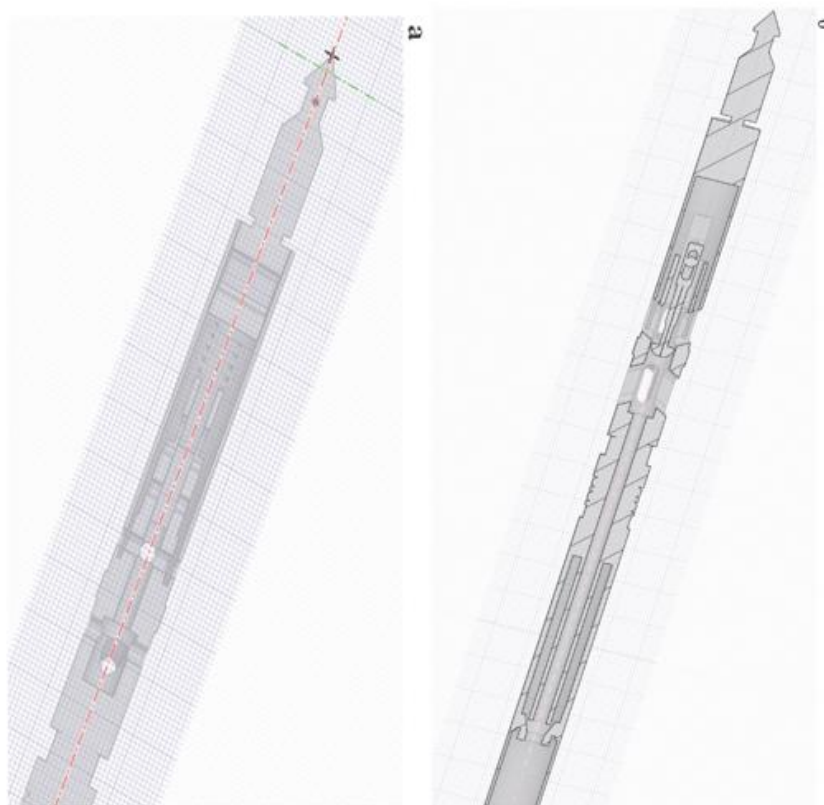


Рисунок 2. Конструкции керноприемных узлов: а – классический снаряд; б – с видоизмененными промывочными каналами и с отверстием в подшипниковом узле

Исследование условий разрушения горной породы при подаче бурового раствора через продольное отверстие в резце

Ранее уже проводились исследования эффективности съёмного керноприемного в глубоких скважинах, но про исследования спускоподъёмных операций не было сказано [3]. Данная форма промывочных отверстий снижает значения коэффициента сопротивления формы, тем самым придавая узлу более обтекаемую форму. Иными словами, создавая более обтекаемую форму тела, снижается сопротивления жидкости на спуск узла и увеличивается его проходная способность. За счет дополнительного отверстия в подшипниковом узле, а именно в шпинделе, поток промывочной жидкости не упирается в керноприемную трубу, а проходит через узел, тем самым уменьшая поршневой эффект и увеличивая пропускную способность снаряда (Эффект Бернулли), вследствие чего уменьшая время на спускоподъёмные операции по сравнению с классическим съёмным керноприемником (рис 3).

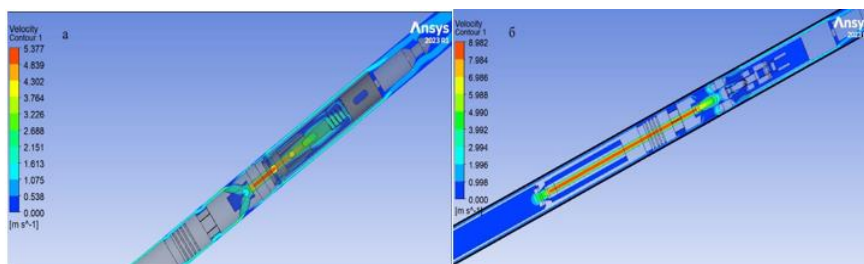


Рисунок 3. Результаты компьютерного моделирования: а – классического снаряда; б – с видоизмененными промывочными каналами и отверстием в подшипниковом узле

На рисунке 3 а показаны результаты моделирование потока жидкости через классический съемный керноприемник, пиковая скорость достигается до 5 м/с, однако средняя скорость обтекаемости такого снаряда составляет 1,01 м/с, это обусловлено тем, что жидкость в керноприемной трубе никуда не поступает и создает поршневой эффект, такой же эффект хоть и в малой степени наблюдается в стопорном узле. На рисунке 3 б представлено моделирование потока жидкости через изменённую конструкцию керноприемного устройства. У данной конструкции скорость потока в пике достигает 8,9 м/с, а его средняя скорость составляет 2 м/с, концентрация давления снижается в керноприемной трубе.

Предлагаемая конструкция действительно решает проблему, связанную со временем спуска снаряда, но не до конца, так как скорость в стопорном узле падает до 1 м/с.

Выводы

Существующие конструкции действительно снижают время на спускоподъемные операции, однако не столь эффективно как показывают результаты моделирования. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание оптимальной конструкции, которые включает себя элементы прошлых конструкций и модификации существующих.

Библиография

1. Нескромных, В.В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 130200 «Технология геологической разведки» / В.В. Нескромных; Сиб. федер. ун-т, Ин-т горн. дела, геологии и геотехнологий. - Красноярск : СФУ, 2014. - 348 с. : цв.ил. - Библиогр.: 344 с.
2. HIGH PRODUCTIVITY CORE DRILLING SYSTEM US 9,359,847; B2 E21 B 25/02
3. Бурение скважин комплексами со съемными керноприемными в сложных горно-геологических условиях на примере Талнахского рудного узла А. Л. Неверов, А. В. Минаков, П. Н. Самородский [и др.]; Красноярск : СФУ, 2024 – 304 с.
4. Нескромных, В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие / В.В. Нескромных. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с

Компьютерное моделирование в разработке бурового инструмента типа PDC

**Антропов В.С.* (Югорский государственный университет, qq3kas@gmail.ru),
Попова М.С. (Югорский государственный университет, alleniram83@mail.ru)**

Аннотация

Развитие нефтегазового комплекса неразрывно связано с освоением недр Земли. В условиях Западной Сибири при вскрытии геологических разрезов богатых на углеводородные ресурсы процесс сооружения скважин сталкивается с проблемой разрушения неоднородных горных пород, зачастую находящихся в мерзлом состоянии. Механизм разрушения таких пород может резко изменяться в зависимости от технико-технологических параметров бурения, что сказывается на формировании ствола скважины.

Одной из возможностей влияния на механизм разрушения горных пород и, как следствие, на буровой процесс является разработка конструкции бурового инструмента новой формы, с учетом всех процессов, сопутствующих бурению. При этом лабораторные исследования затруднительны и материалоемки, поэтому применение современных систем компьютерного моделирования во многом решают инженерные задачи. Компьютерное моделирование становится незаменимым инструментом, который применяется в проектировании буровых инструментов, исследовании их взаимодействия с горными породами и прогнозировании поведения систем в реальных условиях

Ключевые слова

Компьютерное моделирование, бурение, алмазный резец, буровой инструмент, долото, PDC

Теория

Современные технологии, новации в области материаловедения и конструирования бурового инструмента, а также многолетний опыт применения средств разрушения горных пород выявили наиболее перспективный буровой инструмент, вооружение которого состоит из синтетического алмазного сырья. Материал на основе алмазного сырья позволяет изготавливать режущие элементы различной формы и размеров. Так, современные буровые долота армируются резцами PDC, режущая грань которых может иметь различную форму (рис. 1).

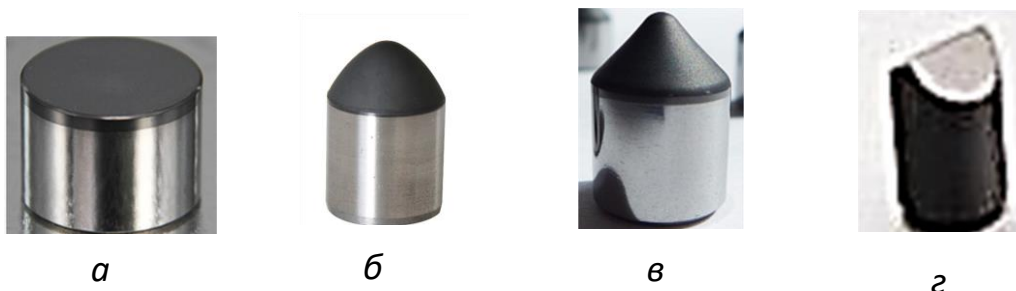


Рисунок 1. Виды резцов типа PDC различной формы режущей грани: а – плоской; б – сферической; в – конической; г – усеченной

При взаимодействии с горной породой форма режущей грани определяет область и характер распространения поля напряжений, тем самым регулирует эффективность разрушения горной породы. На сегодняшний день известны результаты научных

исследований работы единичного резца при разрушении горных пород. Информация о поведении износа и эффективности бурения, полученная на основе экспериментов с одним резцом, является актуальной и может быть экстраполирована для понимания поведения инструмента в целом на забое скважины. Однако, при разработке бурового инструмента следует учитывать взаимное влияние работы группы резцов.

При этом, как показывают ранее проведенные исследования [1-5], операционные параметры, такие как осевая нагрузка на долото и крутящий момент, определяемые при постоянной скорости проходки, можно считать независимыми от количества резцов. Это условие обеспечивается рациональным распределением резцов по долоту, что гарантирует равномерный износ и распределение нагрузки на каждый PDC-элемент.

Обобщая результаты известных научных исследований, на глубину внедрения отдельного резца в горную породу оказывают влияние следующие факторы: размер, форма, передний и фронтальный угол установки резца, ориентирование режущей грани резца, физико-механические свойства разрушаемых горных пород, скорость перемещения резца, осевое усилие, передаваемое от резца на породу, наличие жидкости в области контакта резца с горной породой и ее свойства. При этом именно сопротивление горной породы на забое скважины является препятствующим усилием при внедрении резцов в породу. Отсюда следует, что только совокупное рассмотрение всех перечисленных явлений позволит дать точную оценку характера взаимодействия долота с горной породой в процессе ее разрушения и эффективности работы инструмента в заданных условиях.

Разработка бурового породоразрушающего инструмента, армированного алмазным материалом, требует помимо анализа механизма разрушения породы резцом, одновременно учитывать и другие факторы, влияющие на эффективность его работы на забое. Особую сложность при исследовании работы бурового инструмента в процессе бурения создают процессы, протекающие на забое скважины, где непрерывно циркулирующий очистной агент насыщается шламом и взаимодействует с разрушенной и не разрушенной горной породой, элементами бурового инструмента. В то же время, при неизменных прочих условиях, направление и скорость течения очистного агента в области режущей части инструмента зависит от частоты вращения бурового инструмента, а гидравлическое давление изменяется с глубиной. Отсюда возникает необходимость дополнения известной классической теории механики разрушения горных пород гидродинамическими процессами.

Компьютерное моделирование позволяет одновременно изучить потоки бурового раствора, давление, температуру и скорость в любой точке скважины. Это дает возможность проектировать системы циркуляции и улучшать качество очистки ствола. (рис.2).

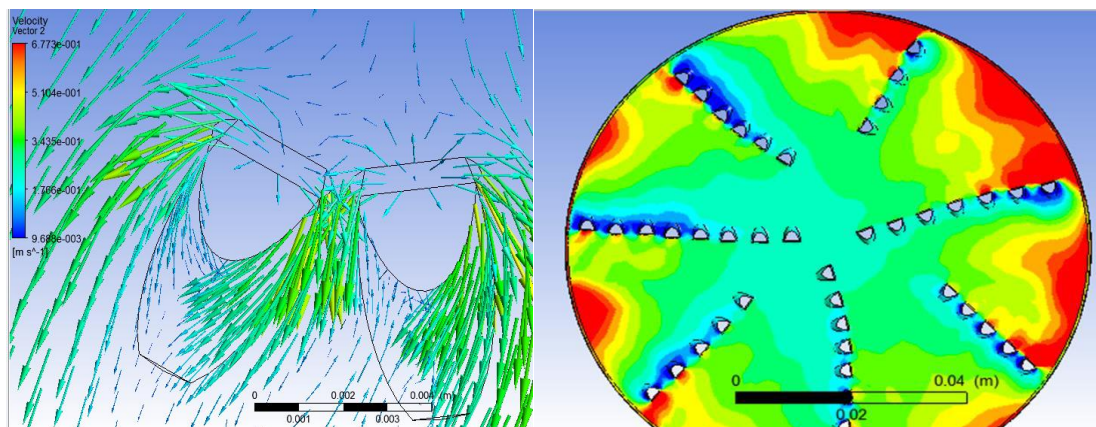


Рисунок 2. Результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов, возникающего на забое при бурении буровым инструментом, армированным резцами *PDC*

Исследование распределения нагрузок на резцы долота помогает выявить наиболее уязвимые точки конструкции (рис. 3). Это особенно важно для создания долговечных инструментов, которые выдерживают высокие нагрузки в сложных геологических условиях.

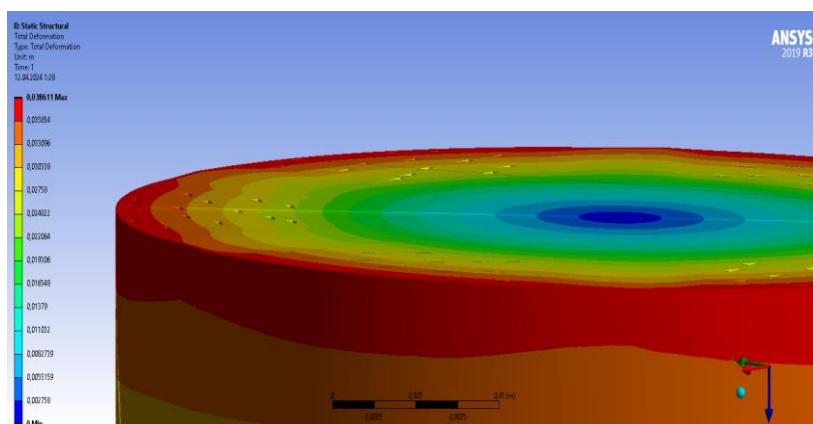


Рисунок 3. Результаты компьютерного моделирования поля напряжений, возникающего на забое при бурении буровым инструментом, армированным резцами *PDC*

Выводы

Эффективный для бурения алмазный буровой инструмент – инструмент, обеспечивающий оптимальное для геологических условий силовое воздействие на горную породу с целью ее разрушения, высокую механическую скорость бурения, сохранение заданной траектории движения ствола скважины без отклонений, обладающий высоким ресурсом и позволяющий в полной мере решать производственные задачи. Одним из факторов достижения наилучших показателей бурения является разработка такой конструкции рабочей части инструмента, с помощью которой, реагируя на изменение горно-геологических условий регулированием параметров режима бурения, быстро достигаются предпосылки для эффективного разрушения горной породы в любой момент процесса.

Классические методы конструирования бурового инструмента, как правило, сосредоточены на решении конкретной задачи, без учета или с минимизацией побочных эффектов, возможность возникновения которых не исключена в процессе бурения скважин. При выборе определенного метода разработки инструмента система взаимодействия его рабочей поверхности с забоем скважины упрощается, принятые допущения в дальнейшем могут привести к аварийным ситуациям.

Библиография

1. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 166 с
2. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Влияние среды призабойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 119–127.
3. Попова, М. С. Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента / М. С. Попова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 4. – С. 159-171. – DOI 10.18799/24131830/2024/4/4320.
4. Нескоромных, В. В. Особенности силового воздействия алмазного резца на породу в процессе бурения скважин / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, А. Ю. Харитонов // Булатовские чтения. – 2021. – Т. 1. – С. 349-353.

Информативность газового каротажа в современных условиях бурения

***Ильязов Р.Р.* (ИГИРГИ, МГРИ, rilyazov@mail.ru),
Шахвердев А.Х. (МГРИ, ah_shah@mail.ru)***

Аннотация

В докладе рассматривается актуальная проблема при бурении горизонтальных скважин - наличие зоны непромера у скважинных каротажных приборов. В связи с чем высока вероятность выхода из целевого интервала, при проводке горизонтальных скважин, и как следствие уменьшение дебита. В этих случаях возрастает ценность газового каротажа, проводимого станцией геолого-технологических исследований (ГТИ). Метод основан на определении объема и состава газов, содержащихся в промывочной жидкости, поступающей на поверхность из скважины, и является прямым методом, в отличие от других видов каротажа, решающих задачу выделения в разрезе скважины продуктивных коллекторов и их насыщения. Результаты газового каротажа в процессе бурения представляют собой информацию о насыщении пластов.

Основное внимание уделено современному опыту применения газового каротажа, как дополнительного источника информации при геонавигации, в сложных геолого-технологических условиях бурения. Рассмотрены примеры оперативного определения вскрытия пласта и нахождения ГНК по данным газового каротажа.

Таким образом показано, что газовый каротаж – актуальный метод исследования скважин, способный снизить неопределённость при проводке горизонтальных скважин.

Ключевые слова

геолого-технологические исследования, газовый каротаж, сопровождение бурения, геонавигация

Теория

Рациональная разработка месторождений жидких и газообразных углеводородов предусматривает высокую степень достоверности исходной промысловой информации, в том числе геолого-физических параметров коллекторов и насыщающих пластовых флюидов. Неопределённость, неточность, недостаточность необходимой информации и принятые упрощения в процессе проектирования увеличивают уровень риска на любой стадии рентабельной разработки и на этапе развития месторождения в целом. Иной подход или игнорирование достоверности данных только увеличивает категорию природных и техногенных трудноизвлекаемых запасов углеводородов [1]. Полученная дополнительная информация играет важную роль для повышения эффективности выработки трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ) и получения дополнительной косвенной информации, подтверждающей оценку эффективности геолого-технологических мероприятий [2-6]. Следовательно, любые технологии, обеспечивающие высокую достоверность замеров и наблюдений, становятся гарантией успешности принятых проектных решений [7]. Одной из таких технологий является – газовый каротаж.

В связи с необходимостью поддержания добычи и рентабельности разработки, в современных условиях, добывающим компаниям приходится повышать долю горизонтальных скважин, в сложных геолого-технологических условиях. Проводка таких скважин требует оперативной геонавигации в процессе бурения, для чего требуются точные и оперативные данные о геологическом строении вскрываемого разреза и насыщении коллектора, поэтому наиболее перспективными являются оперативные методы исследования скважин в процессе бурения (LWD).

Несмотря на все усовершенствования каротажных приборов, все еще остается нерешенной проблема наличия зоны непромера - расстояние от долота до точки записи данных регистрирующего прибора. В результате чего информация о типе породы и ее свойствах поступает с задержкой от 7 до 24м (в среднем 12м). Всегда есть вероятность того, что долото уже разбуривает породы не целевого интервала, а показания приборов каротажа ещё не «дошли» до этой глубины. В итоге последующий «возврат» в целевой пласт (корректировка траектории ствола скважины) влечет за собой уменьшение проходки по продуктивной части горизонтального ствола скважины и, как следствие, уменьшение дебита скважины. В подобных случаях возрастает важность газового каротажа, проводимого станцией ГТИ. В настоящем докладе основное внимание будет уделено информативности газового каротажа, как дополнительного источника информации при геонавигации, в сложных геолого-технологических условиях бурения, а также при последующей эксплуатации скважины.

Газовый каротаж в процессе бурения используется не только для контроля и предупреждения ГНВП в процессе бурения скважин, но и для оперативной оценки насыщения пластов, свойств пластовых флюидов, определения ГНК и ВНК [8]. Последние достижения в этой технологии, повысили достоверность и точность метода, тем самым подтвердив актуальность этих исследований [9]. Использование данных оперативного газового каротажа, с поправкой на газ рециркуляции, позволяет получать данные сопоставимые с лабораторными исследованиями пластового флюида в лабораторных условиях [10].

Газовый каротаж относится к прямым методам исследования скважин и проводится непосредственно в процессе бурения, без перерыва в работе буровой бригады и оборудования. Это дает ему дополнительные преимущества, в случае, когда традиционный комплекс ГИС оказался технически или экономически неэффективным. Все основные методики основываются на соотношении легких компонентов ГВС к тяжелым, называемым флюидными коэффициентами. На сегодняшний день, наиболее широкое применение получили следующие методики по интерпретации: ОПУСЗ (методика Лукьянова Э.Е.), Методика Wetness ratio (Wh), Balance ratio (Bh), Character ratio (Ch), Соотношения Пикслера (C_{1abc}/C_{iabc}), Соотношения Старосельского В.И.

Указанные методики позволяют отслеживать изменение характера насыщения пласта на основе соотношения доли тяжелых и легких углеводородов в анализируемой ГВС. Благодаря этому становится возможным определение фазового состава углеводородов, которые содержатся в пласте, а также выявлять межфлюидные контакты (газонефтяной и водонефтяной контакты) [9]. Методики не являются универсальными, их эффективность зависит от состава нефти и геологического разреза, поэтому интерпретация газового каротажа производится на основании нескольких, наиболее показательных методик, что позволяет значительно повысить точность и надежность результатов. Сегодня, указанные методики, внедрены в программное обеспечение для оперативной интерпретации геофизических данных, в результате чего стал возможным автоматический анализ корректности данных газового каротажа и его интерпретация, что также снизило влияние человеческого фактора [9].

С целью определения информативности газового каротажа в современных условиях бурения производился анализ сходимости данных ГИС во время бурения (LWD) и данных газового каротажа, проводимых при строительстве горизонтальных скважин (т.е. скважин со значительным отходом от вертикали). Для анализа выбирались скважины, расположенные на группе месторождений, административно относящихся к Нефтеюганскому району в Западной Сибири. Рассматриваемые месторождения являются нефтяными; залежи располагаются в отложениях терригенного типа. Данные ГИС регистрировались в процессе бурения горизонтальных скважин зарубежными и отечественными приборами. Выбор Юганской группы месторождений связан со стабильно хорошим качеством данных и полным комплексом ГИС на данных скважинах. В качестве эталона определения

коллектор\неколлектор использовались данные гамма-гамма плотностного каротажа, интерпретация которого производилась, как непосредственно в процессе бурения скважины, так и по завершению бурения скважины, при помощи специализированных программных средств (корпоративное ПО «Горизонт+») и экспертного опыта петрофизика-интерпретатора. Также, на этапе сбора информации, к анализу не принимались, скважины с искажениями газового каротажа, связанные с физическими проблемами газового хроматографа – отказ оборудования (периодический или полный), искажения из-за неправильной обработки данных и их передаче, ошибки при настройке времени отстаивания газопоказаний, не подтвержденные метрологические характеристики оборудования (регламентное обслуживание и поверки). Для нивелирования субъективности интерпретатора и, соответственно, снижения влияния человеческого фактора, интерпретация данных газового каротажа производилась с помощью методик автоматической интерпретации. Результаты интерпретации отражаются на планшетах являющимися стандартными отчетами, для оперативной визуализации геологического разреза бурящийся скважины, на основе которого принимаются решения о дальнейшей проводке скважины и дизайне хвостовика. По данным критериям, для анализа, было отобрано 466 горизонтальных скважин, пробуренных в 2021-2023гг. Газовые аномалии фиксировались как по количественному признаку, так и по составу анализируемой газовой смеси, при этом применялись различные подходы по интерпретации газового каротажа в зависимости от технологии бурения.

Итоговый процент сходимости данных ГИС и газового каротажа выражался в отношении интервалов коллектора/неколлектора по данным ГИС и интервалов коллектора/неколлектора по данным газового каротажа. Отмечено, что газовый каротаж не теряет своей информативности при использовании утяжеленного бурового раствора и раствора на углеводородной основе. На рисунке 1 представлены результаты сравнения данных ГИС и газового каротажа, при бурении горизонтальных скважин, где среднее значение корреляции составило 83%.

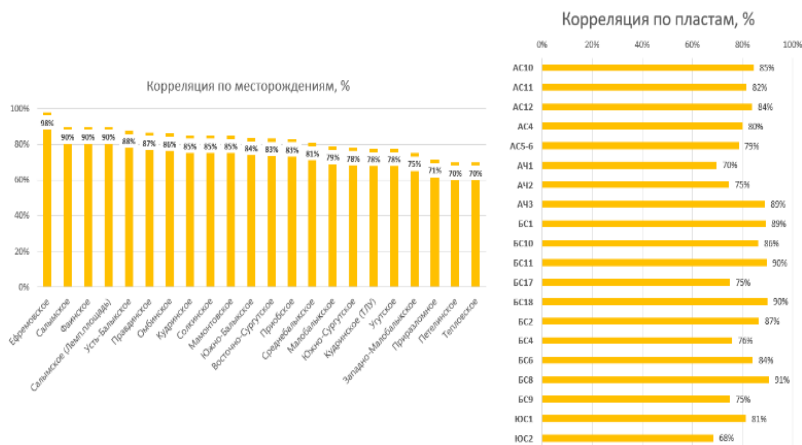


Рисунок 1. Результаты сравнения данных ГИС и газового каротажа, при бурении горизонтальных скважин Корреляция данных ГИС и газового каротажа

Выводы

1. Газовый каротаж относится к прямым методам исследования скважин и проводится непосредственно в процессе бурения, без перерыва в работе буровой бригады и оборудования. Это дает ему дополнительные преимущества, в случае, когда традиционный комплекс ГИС оказался технически или экономически неэффективным.

2. Сравнение данных ГИС и газового каротажа, показывают высокий процент корреляции, также показано, что газовый каротаж не теряет своей информативности при использовании утяжеленного бурового раствора и раствора на углеводородной основе.

3. Вышеизложенное обуславливает необходимость дальнейшего развития, апробации и популяризации метода для расширения его возможностей.

Библиография

1. О включении высокообводненных запасов недонасыщенных нефтью коллекторов в категорию трудноизвлекаемых/ Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Поздышев А.С., Ильязов Р.Р. // Нефтяное Хозяйство. 2023. № 4. С. 34-39.
2. Оптимизация плотности сетки скважин и ее влияние на коэффициент извлечения нефти / Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э. // Нефтяное хозяйство. 2007. № 12. С. 54-58.
3. Oil recovery by in-situ gas generation: volume and pressure measurements / Bakhtiyarov S.I., Panakhov G.M., Abbasov E.M., Shakhverdiyev A.Kh. // Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2006. 2006. FEDSM2006. Miami, FL, 2006. С. 1487-1492.
4. Способ гидроразрыва пласта / Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Чукчеев О.А., Галеев Ф.Х. // Патент на изобретение RU 2122111 С1, 20.11.1998.
5. Способ определения технологической эффективности методов увеличения нефтеотдачи пластов / Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э., Шарифуллин Ф.А. // Патент на изобретение RU 2095548 С1, 10.11.1997.
6. Шахвердиев А.Х. Оптимизация системы поддержания пластового давления при заводнении залежей // Нефтяное хозяйство. 2001. № 3. С. 42-44.
7. Трудноизвлекаемые запасы недонасыщенных нефтью коллекторов: научная статья (ЕСОЭН)/ Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Давыдов А.В. // Геология и недропользование. 2022. № 5 (9). С. 78-86.
8. Применение газового каротажа для геонавигации и оперативного определения межфлюидных контактов при проводке горизонтальных скважин / Ильязов Р.Р., Никифоров С.А., Черников Е.Ю., Рахимов Т.Р. // Нефтяное Хозяйств. 2023. №4. С. 72-77.
9. Ильязов Р.Р. Современные возможности газового каротажа при бурении скважин и необходимость его комплексного метрологического обеспечения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2023. №8(368). С. 11-18.
10. Лоерманс Т. Расширенные геолого-технические исследования скважин: первые среди равных // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 3. Ч. 1. С. 216-221.

Обоснование параметров технологического процессов цементирования обсадных колонн в условиях агрессии на месторождении Доба (республика Чад)

***Маде А.Р. * (МГРИ, madealhadji6@gmail.com),
Соловьев Н.В. (МГРИ, solovyevnv@mgrl.ru)***

Аннотация

Данный доклад представляет собой анализ и обоснование параметров технологического процесса цементирования обсадных колонн в условиях агрессии флюидов. Нами рассматриваются пути решения данной проблемы, включая технологический процесс цементирования обсадных колонн в условиях агрессивных сред.

Ключевые слова

Цементирование скважин, виды цементирования, цементирование в процессе цементирования и эксплуатации скважин, оценка агрессивности среды, физический метод, химический метод, технические решения

Источники финансирования

Источники финансирования отсутствуют.

Теория

Цементирование скважин - это технологический процесс, направленный на создание надежной изоляции между различными пластами в скважине путем заполнения пространства между обсадной колонной и стенками скважины цементным раствором.

Цементный камень, затвердевая, образует прочную оболочку, которая предотвращает:

- Проникновение пластовых флюидов (нефти, газа, воды) из одного пласта в другой.
- Миграцию цементного раствора в пористые пласты.
- Коррозию оборудования.

Основные этапы процесса цементирования:

❖ Приготовление цементного раствора: смешивание цемента, воды и различных добавок для получения раствора с указанными свойствами.

❖ Затвердевание цементного камня: цементный раствор постепенно затвердевает, образуя прочный цементный камень.

❖ Контроль качества цементирования осуществляется методом опрессовки и геофизических исследований для оценки качества выполняемых цементационных работ.

Цементирование играет ключевую роль в процессе бурения и эксплуатации скважин.

Основные цели этого процесса:

- ✓ Изоляция продуктивных пластов: Обеспечение притока нефти или газа именно из того пласта, который разрабатывается.
- ✓ Предотвращение прорывов пластовых флюидов: Защита окружающей среды и оборудования от загрязнения.
- ✓ Укрепление стенок скважины: Повышение устойчивости скважины и предотвращение обрушения.
- ✓ Создание условий для эффективной работы оборудования: Обеспечение герметичности и надежности скважины. [4]



Рисунок 1. Схема цементирования с одной пробкой

Сероводородостойкие цементы — это специальные виды цемента, разработанные для использования в условиях, где присутствует сероводород (H_2S). Сероводород является агрессивным химическим веществом, которое может вызывать коррозию обычных цементов, что приводит к разрушению бетонных конструкций. [2]

1. Физический метод:

Поглощение: Удаление H_2S из газового потока путем его абсорбции жидким абсорбентом, таким как раствор диметилэтанолamina (ДМЭА) .

Абсорбция газа сероводорода так же возможна при использовании других абсорбентов, таких как активированный уголь или силикагель, для связывания H_2S поверхностью этих реагентов.

Окисление H_2S происходит за счет преобразования его в безвредный сульфат натрия (Na_2SO_4) при сжигании или обработки окислителями, такими как перекись водорода или гипохлорит натрия после удаления сероводорода из бурового раствора.

2. Химический метод:

Для борьбы с агрессивностью H_2S мы используем метод сульфатного разрушения оборудования и использование химических реагентов, обладающих сложным бактерицидным и антикоррозионным действием. [2]

Агрессивность сероводорода осложняется тем, что при строительстве и ремонте скважин с высоким содержанием в продуктивных пластах сероводорода, он часто проявляется совместно с диоксидом углерода (CO_2).

Сероводородная H_2S агрессия-ее последствия:

- создание аварийных ситуаций
- повышение эксплуатационных расходов и затрат на ремонт
- потери продукции
- загрязнение окружающей среды
- резкое сокращение сроков службы оборудования и коммуникаций
- появление H_2S в буровом растворе в свободном состоянии
- серьезные нарушения в процессе бурения: взрывы, пожары, отравления персонала, коррозия бурового оборудования инструмента

➤ для растворов на водной основе- попадая H_2S снижает pH до 5-6%, что ведет к резкому изменению его свойств – коагуляция, деструкция химических реагентов и т.п.

Кроме того, сероводород растворяется в воде, образует определенную слабую кислоту, что при $pH < 7$ буровые растворы находятся в пастообразном состоянии, что ведет к образованию сальников и прихватов.

Влияние H_2S на свойства растворов на нефтяной основе менее значительное, но тоже отрицательное.

H_2S вызывает разрушение оборудования в результате электрохимической, общей коррозии и водородного охрупчивания – усиливается наводороживание стали, приводящее к охрупчиванию стали и коррозионному растрескиванию – которое опасно тем, что оно визуально не обнаруживается, а разрушение происходит неожиданно.

Очень высокая эффективность H_2S требует особых мероприятий по борьбе с H_2S -агрессией.

Реагенты-нейтрализаторы их большое множество, но не всем требованиям они отвечают, которые предъявляются к поглотителям:

- ❖ реакция полная прогнозируемая и быстрая;
- ❖ поглощение должно происходить в любом физическом и химическом окружении;
- ❖ реологические и фильтрационные свойства, корка не должна ухудшаться при высокой температуре при поддержке избытка поглотителя;
- ❖ количество поглотителя должно быстро и легко измеряться на буровой;
- ❖ поглотитель и продукты его реакции не должны вызывать коррозию металла;
- ❖ поглотитель должен быть доступен и экономичен в применении.

3. Жизнедеятельность бактерий в растворах и коррозия.

Наиболее сильная коррозия в результате жизнедеятельности бактерий в технологических жидкостях вызывается бактериями сульфатвосстанавливающего класса: (СВБ) - сульфатвосстанавливающие бактерии. [2]

Для размножения этих бактерий нужны анаэробные (без кислорода) условия, которые возникают:

- а. в закрытом межтрубном пространстве, заполненном покерной жидкостью ;
- б. в жидкостях для заканчивания, капремонта ;
- в. в буровых растворах при продолжительных остановках циркуляции. Даже в циркуляционной системе некоторых неподвижных местах, например под окалиной или под отложениями грязи, кислорода может быть очень мало – там они и образуются – анаэробные бактерии.

Эти бактерии могут иметь галофильные или термофильные штаммы, устойчивые к действию больших концентраций хлоридов и повышенных температур.

Выводы

Цементирование скважин – это сложный технологический процесс, играющий критическую роль в нефтегазовой промышленности. Качество выполненного цементирования напрямую влияет на безопасность, эффективность и долговечность эксплуатации скважины.

Ключевые выводы это обеспечить надежную изоляцию различных пластов, предотвратить прорывы пластовых флюидов, укрепить стенки скважины и создать условия для эффективной работы оборудования.

Таким образом, важно отметить, что выбор способа борьбы с H_2S зависит от определенных условий эксплуатации, технических возможностей и экономических соображений.

Для эти агрессивность среди используются различные методы борьбы с H_2S , используются включая абсорбцию, адсорбционное поглощение, нейтрализацию и окисление. Выбор того или иного метода основывается на технических проверках, проводимых специализированными учреждениями. Помимо технических методов, важную роль в борьбе с H_2S играют меры безопасности персонала.

Библиография

1. В.М. Мильштейн. Цементирование буровых скважин. Краснодар, 2003. – 375 с.
2. Соловьёв Н.В. Методические рекомендации по составлению курсового проекта «Разработка технологического регламента промывочной жидкости для бурения скважины» по дисциплине «Очистные агенты и тампонажные смеси» М., МГРИ, 2006 г.
3. Калинин А.Г., Левицкий А.З., Мессер А.Г., Соловьев Н.В. «Практическое руководство по технологии бурения скважин на жидкие и газообразные полезные ископаемые». Недра, М., 2001 г.
4. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Soci%C3%A9t%C3%A9_des_hydrocarbures_du_Tchad)

Технология безамбарного бурения с целью повышения экологической безопасности на месторождении Жанажол (РК)

***Акаласова С.Н.* (МГРИ, sakalasova@bk.ru),
Соловьев Н.В. (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru)***

Аннотация

Актуальной задачей природопользования является сохранение лесов, водоемов и биоразнообразия, а также защита редких и исчезающих видов. Важную роль в этом играет снижение техногенного воздействия при строительстве скважин, так как данный процесс может приводить к загрязнению и нарушению природных экосистем.

Технология безамбарного бурения направлена на повышение экологической безопасности за счет минимизации отходов, сокращения загрязнения почвы и воды, а также эффективного управления отходами бурения. Для разработки природоохранных мероприятий необходимо детально анализировать технологические процессы, выявлять основные источники загрязнения и разрабатывать методы их устранения.

Ключевые слова

Амбарное бурение, безамбарное бурение, отходы, утилизация

Теория

Амбарное бурение остается широко распространенной практикой в нефтедобывающей отрасли, несмотря на его серьезные экологические последствия. В мировом масштабе накопление отходов бурения оценивается в миллионы тонн ежегодно, что создает значительную угрозу для экосистем, водоемов и почвы. Основные отходы, образующиеся в процессе бурения, включают буровой шлам, отработанные буровые растворы (ОБР) и буровые сточные воды (БСВ) [2]. Эти отходы содержат токсичные компоненты, такие как углеводороды, тяжелые металлы и химические реагенты, которые могут разлагаться десятилетиями, что ведет к долгосрочному загрязнению.

Для хранения буровых отходов на территории месторождений создаются шламовые амбары, занимающие значительные территории. В среднем, один шламовый амбар занимает площадь от 400 до 1000 м² и может вмещать от 600 до 2100 тонн бурового шлама. На крупных месторождениях, где одновременно бурится несколько скважин, количество амбаров может достигать 100–250. На примере месторождения Жанажол, если количество бурового шлама от одной скважины составляет 775,79 тонн в год, а отработанного бурового раствора – 193,30 тонн в год, то при 666 действующих скважинах общее годовое накопление может достигать 516 676 тонн шлама и 128 738 тонн ОБР соответственно [4].

Конструкция шламовых амбаров варьируется в зависимости от условий эксплуатации и включает одно- или двухсекционные сооружения. Как правило, для обеспечения гидроизоляции они строятся в глинистых породах без дополнительной облицовки, а их глубина может составлять от 2 до 4 метров. Для эффективного хранения и отбора отработанного бурового раствора в амбарах предусмотрены углубления на дне, что способствует оседанию шлама в одном месте и минимизирует распространение отходов [3].

Далее представлены наиболее распространенные профили шламовых амбаров, включая варианты с уступом (с «карманом»), с пологим дном и двухсекционный с переточной трубой (рис. 1). Эти конструкции, однако, являются постоянным источником загрязнения окружающей среды в течение всего цикла строительства скважин и даже после их завершения, так как значительная часть отходов своевременно не ликвидируется.

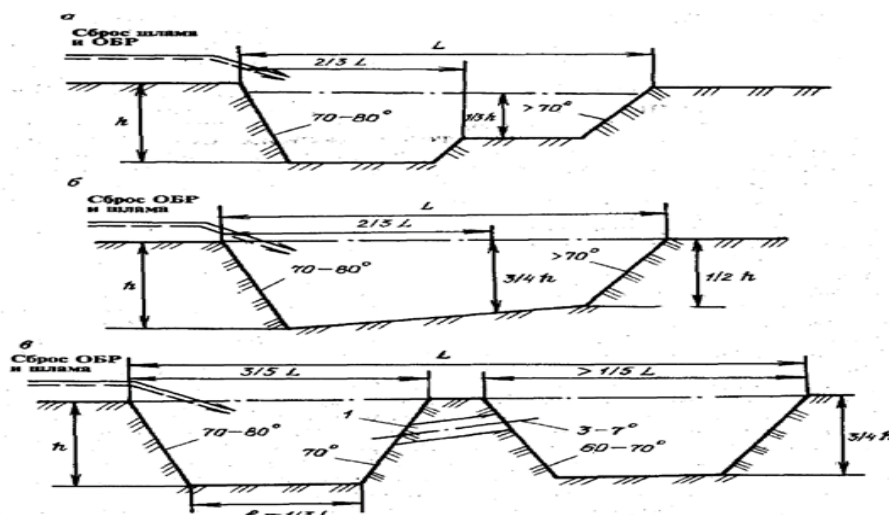


Рисунок 1. Профили шламового амбара (поперечный разрез): а - с уступом (с «карманом»); б - с пологим дном; в - двухсекционный с переточной трубой в теле перемычки

Загрязнение почвы, воздуха и подземных вод происходит в результате хранения отходов в амбарах. Исследования показывают, что до 6,5% содержимого амбаров ежегодно попадает в окружающую среду, что эквивалентно 30000 – 50000 тонн загрязняющих веществ для одного месторождения. Это приводит к ухудшению водопроницаемости почв, изменению растительного покрова, накоплению токсичных углеводородов в растениях, миграции животных и физическому нарушению почвенно-растительного покрова.

Кроме того, несвоевременный возврат земель после бурения наносит урон сельскому хозяйству, а компании сталкиваются с экономическими потерями из-за выплат штрафов основному землепользователю. Высокие затраты на рекультивацию, достигающие до 5 млн рублей на один амбар, и риск загрязнения подземных вод, особенно при отсутствии качественной гидроизоляции, подчеркивают необходимость перехода к безамбарным технологиям, которые минимизируют негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, основным загрязняющим фактором в процессе бурения являются отходы, накапливаемые в шламовых амбарах, что создает серьезную экологическую угрозу и требует поиска альтернативных решений для эффективного управления отходами [5].

В целях уменьшения загрязнения окружающей среды нефтегазодобывающим комплексом разрабатываются и внедряются новые природосберегающие технологии. Одной из таких технологий является безамбарное бурение, которое значительно снижает объемы производственных отходов и минимизирует негативное воздействие на экосистему.

Технология безамбарного бурения позволяет проводить очистку загрязненной промысловой жидкости без использования котлованов-отстойников. Это обеспечивает замкнутый цикл повторного водопотребления и снижает необходимость в емкостном парке, что ведет к уменьшению занимаемой площади под землеотводы. Применение специального токсикологического контроля способствует соблюдению природоохранных требований при очистке бурового раствора. Кроме того, исключается возможность фильтрации загрязнителей в подстилающие горизонты, что положительно сказывается на окружающей природной среде [1].

Для очистки бурового раствора от шлама применяются различные механические устройства, такие как вибрационные сита, гидроциклонные шламоотделители (песко- и илоотделители), сепараторы и центрифуги. На первом этапе очистки буровой раствор обрабатывается реагентами-флокулянтами, которые повышают эффективность работы

очистных устройств. Размеры удаляемых частиц зависят от стадии очистки: вибросита удаляют частицы от 70-80 мкм и крупнее, пескоотделители — 40-74 мкм, илоотделители — 20-40 мкм, а центрифуги снижают содержание твердой фазы до 5 мкм.

Строительство скважины по безамбарной малоотходной технологии подразумевает размещение оборудования для очистки бурового раствора между вышечным и емкостным блоками на дополнительном емкостном основании. Принципиальная схема расположения бурового оборудования представлена ниже (рис. 2.).

Система очистки включает блок коагуляции-флокуляции, который позволяет достичь полного разделения отработанного бурового раствора на осветленную воду и шлам (кек). Осветленная вода используется в системе оборотного водоснабжения буровой установки, а твердые отходы направляются на утилизацию. Несмотря на сложность и высокую стоимость системы очистки, ее применение оправдано благодаря увеличению скоростей бурения, снижению расходов на регулирование свойств бурового раствора и соблюдению требований по защите окружающей среды.



Рисунок 2. Принципиальная схема расположения бурового оборудования по очистке бурового раствора при бурении по безамбарной технологии

В составе циркуляционной системы аппараты устанавливаются в следующей технологической цепочке: скважина — блок грубой очистки от шлама (вибросита) — дегазатор — блок тонкой очистки от шлама (песко- и илоотделители, сепаратор) — блок регулирования содержания и состава твердой фазы (центрифуга, гидроциклонный глиноотделитель). Вибросито является первым этапом многоступенчатой очистки бурового раствора, удаляя грубые частицы породы. Дегазатор, который может отсутствовать в некоторых системах, отвечает за удаление газа из бурового раствора. После этого происходит тонкая очистка с помощью пескоотделителей и илоотделителей, которые удаляют твердые частицы различного размера. Завершающим этапом является центрифуга, которая эффективно отделяет мелкие частицы и регулирует состав бурового раствора.

Выводы

Безамбарное бурение снижает техногенное воздействие, повышает рентабельность и обеспечивает экологическую безопасность. Отходы уменьшаются на 90%, а затраты на очистку шлама снижаются на 30–40% за счет уменьшения использования реагентов. Экологическая нагрузка сокращается на 80–90% благодаря исключению утечек и замкнутому циклу водопотребления.

Механическая скорость бурения увеличивается на 15–20% за счет снижения содержания шлама, уменьшения износа долота, стабилизации вязкости раствора и улучшенной очистки ствола скважины.

Отпадает необходимость в емкостях для хранения шлама, исключаются затраты на его транспортировку и утилизацию. Переработанные отходы можно использовать повторно, например, для строительства. Это делает процесс бурения более экономичным, эффективным и безопасным для окружающей среды.

Библиография

1. Бруй Л. К., Шемлей Н. В., Атвиновская Т. В. Буровые и тампонажные растворы: учебное пособие. – Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2019. – С. 18–25.
2. Буровой супервайзинг / Под ред. В. Н. Кузнецова. – М.: НИПЦ ГНТ, 2018. – 311 с.
3. Кубарев П. Н. и др. Методические подходы к обращению с отходами, образующимися при бурении скважин // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 9. – С. 30–33.
4. Раздел охраны окружающей среды (РООС) к ИТП №721 на строительство скважины №2678, месторождение Жанажол / НИИ по РНГМ АО «СНПС-Актобемунайгаз». – 2024. – 228 с.
5. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча нефти. – М., 2017. – 266 с.

Мониторинг самоходных буровых установок

*Ганин И.П. * (МГРИ, ganinip@mgri.ru),
Сердюк Н.И. (МГРИ, serdukni@mgri.ru)*

Аннотация

Рассматриваются технологии on-line мониторинга диагностических параметров буровых установок. Анализируется возможность применения технологий мониторинга на мобильных буровых установках, для которых минимизация времени простоя является приоритетом.

Ключевые слова

Мониторинг эксплуатационных параметров буровых установок, on-line системы сбора и обработки информации, каналы связи в геологоразведке

Источники финансирования

Источники финансирования отсутствуют.

Теория

Согласно определению – мониторинг (Observability – наблюдаемость), это процесс непрерывного сбора и анализа информации о состоянии сложного объекта для принятия обоснованных управленческих решений и достижения показателей назначения - конкретных измеримо-достижимых показателей. Одним из важных аспектов мониторинга производства является отслеживание диагностических параметров работы оборудования, что позволяет оценивать текущее состояние техники, ее использование во времени, предотвращать поломки, сокращать простои и повышать производительность.

Специалистами горной и нефтегазовой отраслей мониторинг большей частью воспринимается как средство удаленного наблюдения за работой оборудования, главным образом обеспечивающее повышение эффективности и безопасности производственных технологических процессов. Применительно к буровым работам интерес для специалистов представляет: оперативный анализ работы буровых бригад; сбор и регистрация первичных данных с буровых с целью осуществления безаварийной проводки скважин при минимальных затратах; оптимизация процесса углубления скважин; выбор и поддержание рационального режима бурения с контролем отработки долот; отслеживание нарушений в работе бурового оборудования, связанных с выходом за допустимые режимы эксплуатации, нарушениями технологии; диагностирование работоспособности отдельных узлов и механизмов буровых установок; прием данных с буровых, обработка и накопление полученных данных в центральном офисе и др.

В сравнении с вышеперечисленным, наблюдается заметное отличие в понимании задач мониторинга эксплуатационных процессов у его непосредственных разработчиков. Под «мониторингом бурения» разработчиками чаще всего понимается вид коммерческой услуги по созданию специализированной информационной системы, внедренной тем или иным способом в процесс управления буровыми установками. IT компаниями, на коммерческой основе, предлагается: внедрение технологий передачи данных с буровых, серверов со специализированным программным обеспечением, локальных сетей на буровых площадках с удаленным доступом к создаваемым базам данных, подготовка персонала, обеспечивающего поддержание процесса мониторинга в рабочем состоянии. Наряду с этим предлагаются организационные мероприятия по перестройке управления предприятием в целом, путем изменения коммуникационных процессов в организации на основе обширного использования

цифровых технологий. Акцент делается на применение цифровых инструментов дополнительно к инструментам, используемым на буровой, или полностью замещающих их. В специализированной литературе [1, 3] приводятся примеры успешной реализации удаленного сбора данных с буровых площадок при бурении нефтегазовых скважин в РФ. Информационная система «Удаленный мониторинг бурения» и ее более современная версия ИС «WellOnline» разработки ООО «Петровайзер» установлены и используются для удаленного управления строительством скважин в ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НК «РОСНЕФТЬ», ПАО «Газпром нефть», ПАО АНК «Башнефть». В каждой такой реализации, данные с буровых доставляются через спутниковые каналы на офисные сервера, которые в свою очередь подключены к высокоскоростным локальным или глобальным вычислительным сетям, позволяющим пользователям комфортно обрабатывать доставленные данные (рисунок 1).

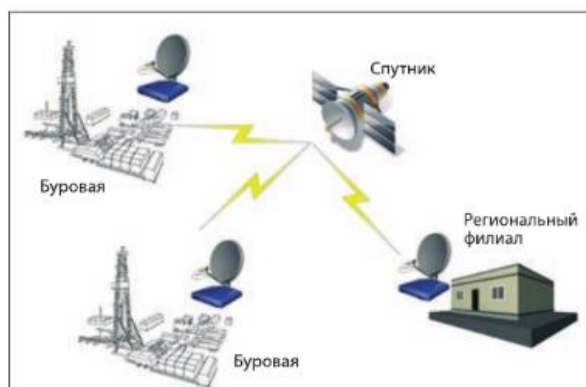


Рисунок 1. Система централизованного мониторинга работы бурового оборудования

Необходимым условием является наличие на буровой площадке канала передачи данных, сервера со специализированным программным обеспечением, локальной сети буровой площадки, сервера офиса, персонала, осуществляющего обеспечение процесса мониторинга. Но здесь важно отметить, что применительно к строительству нефтегазовых скважин основой успешного внедрения систем мониторинга удаленных объектов, наряду с большими денежными и материальными ресурсами владельцев нефтегазовых активов, является наличие работоспособных цифровых систем сбора информации, уже существующих на больших буровых установках. Станции геолого-технологических исследований (ГТИ) в бурении применяются для регистрации, обработки, хранения, передачи и визуализации данных о различных параметрах бурения. Наличие цифровой среды позволяет дооснащать буровую установку комплексами сбора данных с основных узлов и агрегатов бурового оборудования. На все основные узлы и агрегаты установки устанавливаются дополнительные датчики. Сбор и анализ данных о работе оборудования выполняется в режиме реального времени, система отображает текущее состояние оборудования и оповещает об отклонениях от рабочих режимов, что дает возможность превентивно проводить техническое обслуживание.

Подобная ситуация с применением мониторинга имеет место и на открытых горных работах при бурении взрывных скважин [2]. On-line системы управления буровзрывными работами типа DrillManager позволяют: обеспечивать навигацию и позиционирование на проектные координаты буровых скважин с точностью до 10 см, осуществлять мониторинг работы и простоев буровых станков, осуществлять мониторинг параметров бурения и анализ

полученных данных. Все параметры бурения передаются на главный компьютер диспетчера. Диспетчер в режиме реального времени контролирует работу буровых станков на блоке, отслеживает время и статус работ, их местоположение.

Может сформироваться впечатление, что все вышеупомянутые разработки легко и эффективно применимы и на самоходных геологоразведочных буровых установках. Но трудности заключаются не в отсутствии компьютеров, серверов, программного обеспечения, или по-другому интегрированной коммуникационной среды, в которой устройства обмениваются контентом и действиями внутри нее и управляют ими. Причина достаточно серьезна – отсутствие устойчивой высокоскоростной связи с мобильными буровыми установками. Когда речь идет об удаленном автоматизированном управлении буровыми установками, то здесь, безусловно, необходимы надежные высокоскоростные каналы связи. Применительно к мобильным буровым установкам это является проблемой.

Относительно надежной остается аналоговая радиосвязь, которая по-прежнему используется в геологоразведке, особенно в регионах с ограниченной инфраструктурой. Она обеспечивает надёжную коммуникацию, но имеет ограниченную пропускную способность и низкую скорость передачи данных. Для обеспечения связи с отдалёнными объектами может использоваться спутниковая связь. Она позволяет обеспечить глобальное покрытие и высокую надёжность, но связана с высокими затратами на оборудование и эксплуатацию. Спутниковая связь характеризуется задержкой между передачей и приёмом информации. Это затрудняет дистанционное управление объектами в реальном времени. На сигналы спутниковой связи могут влиять климатические условия, солнечные вспышки и электромагнитное излучение и пр.

Технологические решения, связанные с применением цифровых технологий, в том числе на буровых, неразрывно связаны с беспроводными технологиями связи: 4G/LTE, Wi-Fi. Технология LTE обеспечивает высокоскоростную передачу данных, позволяет передавать большие объёмы информации, включая видеоданные, что существенно для удалённого мониторинга и управления оборудованием на месторождениях. LTE создавалась в первую очередь для передачи данных с высокой скоростью. При этом LTE требует развёртывания густой сети специальных базовых станций и наземной инфраструктуры под них, что затратно на удалённых или труднодоступных территориях. Для обеспечения работы базовых станций необходимо формировать наземную систему из волоконно-оптических кабелей, либо устанавливать радиорелейные станции на высоких антенно-мачтовых сооружениях. Зона действия базовой станции LTE технологически ограничена дальностью 25 км при условии отсутствия препятствий. Wi-Fi позволяет обеспечить высокоскоростную передачу данных на короткие расстояния, но имеет ограниченное покрытие. Улучшенная технология Wi-Fi Mesh позволяет увеличить дальность передачи данных, но также требует установки специализированного оборудования. Для удаленного автоматизированного управления сложными объектами наиболее перспективно применение технологий беспроводной связи 5G, производительность которой превосходит любые результаты других беспроводных сетей. 5G обеспечивает сверхбыструю передачу данных и низкую задержку. Для развёртывания 5G необходимы частотные диапазоны 3.4÷3.8 ГГц. Но эти частоты закреплены за Министерством обороны РФ и Роскосмосом, поэтому недоступны для коммерческих сетей. Частоты 3.4÷3.8 ГГц наиболее оптимальны для работы 5G, на них строятся 5G-сети во всем мире. В России операторы сотовых сетей вынуждены обустраивать 5G-сети на других частотах 4.4÷4.9 ГГц. Это требует оборудования отличного от стандартного, изготовление его крайне затратно, так как требует создания оригинальных технологий и элементной базы. Развитие высокоскоростных технологий связи привязано к высокоразвитым регионам с высокой плотностью сетевых вышек.

Несмотря на безусловные преимущества, которые обеспечивает применение современных цифровых технологий, в т.ч. для организации удаленного автоматизированного мониторинга эксплуатационных процессов, для небольших мобильных буровых установок непосредственное применение подобных технологий в шаблонном виде проблематично. Причина не только в возможном отсутствии в местах проведения работ устойчивых высокоскоростных каналов передачи информации, а в несоизмеримо высокой стоимости их реализации применительно к самоходным буровым установкам. Работа мобильных установок в удаленных районах, в условиях отсутствия устойчивой высокоскоростной связи не снимает задачу совершенствования буровых работ. Ее решение перспективно по трем направлениям: 1 – оптимизация режимов непосредственно углубки скважины; 2 – контроль рабочего времени установок; 3 – диагностика и прогнозирование работоспособности бурового оборудования [4]. Два последних направления безусловно являются наиболее значимыми с экономической точки зрения организации работы мобильных установок.

Выводы

Минимизация времени простоя для самоходных буровых является приоритетом. Применительно к мобильным буровым установкам техническим решением может служить применение электронных регистраторов рабочего времени и параметров работы узлов буровых установок. Регистрирование и накопление информации целесообразно осуществлять в цифровом виде, по определённым алгоритмам, по видам информации - непрерывно или дискретно с привязкой ко времени и месту проведения бурения. Последующая обработка информации должна производиться с применением соответствующих программных средств уже на стационарных компьютерах. В качестве средств накопления информации целесообразно использовать твердотельные накопители. Важным моментом является возможность считывания – снятия информации по беспроводным каналам, если не в постоянном режиме, то периодически, когда для этого открываются возможности.

Библиография

1. Алексеев О.О. Будущее бурения: преимущества автоматизированных буровых установок / О.О. Алексеев, Ф.Х. Мухаметов, П.Э. Востриков и др. // Бурение и нефть: специализированный журнал / ООО «Бурнефть» - Москва: №7-8, 2023 г.
2. Клебанов А.Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. – 2020. – №1. - с. 8-12.
3. Кравцов А.С. Автоматизация технологических процессов в нефтегазовом производстве / А.С. Кравцов, В.А. Седельникова, К.А. Чижов и др. // Московский экономический журнал. – 2021. - №9 – с.705-711.
4. Система мониторинга технологических параметров процесса бурения на базе самоходной буровой установки. Пат. на изобретение 274508 Рос.Федерация Р.А. Кондратьев, А.В. Бунаков – заявл.29.05.2020; опублик. 23.03.2021, Бюл. №9 -17с.

Основные направления совершенствования бурового инструмента типа PDC

**Дегтярев Н.А.* (Югорский государственный университет, nik.degtyarev.2004@gmail.com),
Попова М.С. (Югорский государственный университет, alleniram83@mail.ru)**

Аннотация

Качество сооружения скважин в определенной степени отражается на результатах дальнейших работ нефтегазодобывающей отрасли. Одним из основных факторов, оказывающих влияние на бурение скважины является характер взаимодействия долота с горной породой. Анализ работы бурового инструмента на забое скважины показал, что соотношение конструкции режущей поверхности бурового инструмента и физико-механических свойств разрушаемых горных пород определяет не только характер работы инструмента, но и условия формирования стенок скважины.

В работе проведен анализ возможных проблем, возникающих при сооружении скважин буровым инструментом типа *PDC*, рассмотрены направления устранения возможного отрицательного влияния работы инструмента на сооружение скважин, установлено, что вооружение бурового инструмента оказывает влияние на распределение поля напряжений, создаваемому в массиве горных пород. Определено, что решение проблем работы бурового инструмента типа *PDC* возможно путем изменения конструкции его режущей части и применения комплексного подхода, учитывающего все процессы и явления, участвующие в разрушении горных пород и углублении скважины в процессе бурения.

Ключевые слова

Бурение, алмазный резец, буровой инструмент, долото, *PDC*

Теория

Бурение скважин – один из основных неотъемлемых видов работ нефтегазодобывающего комплекса. Качество сооружения скважин отражается на результатах геологоразведочных, нефтегазодобывающих, промыслово-исследовательских работах. Процесс бурения как объект исследования отличается сложностью и многокомпонентностью. Одним из ключевых факторов, отражающихся на качестве сооружаемой скважины является характер взаимодействия долота с горной породой в процессе бурения.

Современный рынок бурового инструмента представлен широкой номенклатурой, при этом одним из перспективных является алмазный буровой инструмент. Это связано с возможностью синтеза алмазного сырья и изготовления из него режущих элементов различной формы, которые при этом обладают прочностными параметрами, не уступающими резцам из твердого сплава или из природного алмазного сырья.

Долота типа *PDC* являются перспективными и востребованными на производстве. Одной из основных проблем, с которой встречаются при бурении, являются неоднородности геологического разреза: анизотропия пород, часто перемежающиеся структуры, зоны мерзлоты, горно-геологические нарушения и т.д. При встрече с породами, склонными к изменению свойств при разрушении, буровой породоразрушающий инструмент испытывает большие динамические нагрузки, продольные и поперечные колебания, подвергается преждевременному износу, что влечет за собой нарушение параметров конструкции скважины, технологии вскрытия продуктивных горизонтов, возникновение аварийных ситуаций, отклонение от заданного направления бурения.

Анализ механизма разрушения горной породы резцами типа *PDC* (рис. 1) показал, что одной из основных причин возникновения динамических колебаний является характер

распределения поля напряжения, возникающего от силового воздействия инструмента на забой.

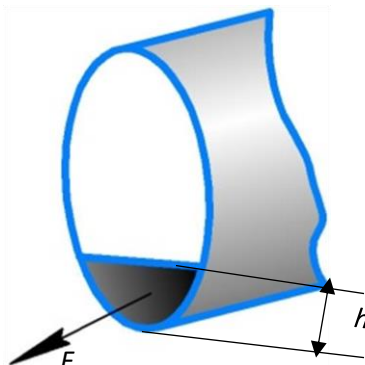


Рисунок 1. Схема механизма разрушения горных пород резцом типа *PDC*: F – сила воздействия резца на горную породу; h – глубина внедрения резца в забой

Доказано, что при взаимодействии с горной породой форма режущей грани определяет область и характер распространения поля напряжений, тем самым регулирует эффективность разрушения горной породы [1-4]. Для детального изучения поля напряжений в горной породе за основу принят метод компьютерного моделирования основанный на реализации механизма разрушения горных пород стандартным резцом типа *PDC*.

Как показывают результаты компьютерного моделирования (рис. 2), наиболее нагруженными являются резцы, находящиеся ближе к наружному диаметру бурового инструмента, а те, что располагаются в центральной части его рабочего торца – менее нагруженные. Таким образом поле напряжений неравномерно распределяется по поверхности всего тела бурового инструмента, что, помимо неравномерной динамики, приводит к неравномерному износу инструмента, что подтверждается результатами производственного бурения [5]. При этом, угол ориентации резца определяет характер воздействия резца на горную породу, что приводит к изменению области распространения напряжения в горной породе (рис. 1).

Такая картина распределения напряжения на контакте бурового инструмента с горной породой ведет к возникновению еще одной проблемы, решение которой важно для качественной реализации работы алмазного инструмента, – неравномерному нагреву его режущей части. Учитывая форму и размеры стандартного резца типа *PDC*, решением перегрева резцов может выступать только возможность эффективного удаления шлама и охлаждения резцов, что в свою очередь зависит от циркуляции бурового раствора. При этом, если конструкция долота не позволяет организовать оптимальную для сложившихся условий циркуляцию жидкости в пределах *PDC*, образуются зоны, где шлам скапливается, ухудшая условия работы и способствуя перегреву инструмента. Все эти факторы вместе создают комплексную проблему, которую необходимо решать комплексными мерами.

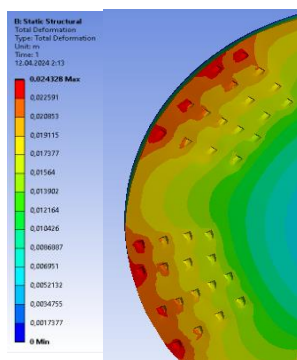


Рисунок 2. Результаты компьютерного моделирования поля напряжений, возникающего на забое при бурении буровым инструментом, армированным резцами *PDC*

Одним из известных направлений, позволяющих решить проблемы работы бурового инструмента типа *PDC* является изменение формы резцов. Переход от традиционной цилиндрической формы к клиновидной или ступенчатой позволяет достичь равномерности распределения нагрузки. Помимо этого, фигурная поверхность *PDC* снижает вибрации, способствует эффективному разрушению горных пород. Благодаря такому изменению можно уменьшить износ отдельных элементов на 20–25%, что продлевает срок службы инструмента.

Как показали результаты компьютерного моделирования, еще одним важным направлением совершенствования конструкций бурового инструмента типа *PDC* является изменение расположения резцов. Предварительные исследования показали, что углы ориентации резцов позволяют изменить характер взаимодействия долота с забоем. При помощи применения компьютерного моделирования появляется возможность определения участков, наиболее подвергшихся нагрузке, и корректировки конструкции режущей части долота таким образом, чтобы минимизировать зоны перегрузки.

Для снижения перегрева режущей части долот необходима разработка специальных каналов для циркуляции бурового раствора. Такие системы помогут эффективно отводить тепло от рабочей зоны резцов, снижая их температуру на 50–100°C. Что позволит сохранить свойства алмазных элементов даже в условиях интенсивного трения. При этом следует отметить, что использование современных композитов и легированных сплавов, таких как материалы с добавлением кобальта, повышает не только механическую прочность, но и термостойкость резцов. Это значит, что даже при высоких температурах инструменты будут сохранять свои эксплуатационные характеристики, что особенно важно в сложных геологических условиях. В тоже время добавление специальных термоактивных присадок в буровой раствор снижает трение и способствует равномерному распределению температуры в рабочей зоне долота. Такой комплексный подход позволяет избежать локальных перегревов и обеспечивает более стабильную работу инструмента даже при высоких нагрузках.

Таким образом, повышение эффективности *PDC*-инструментов – это комплексная задача, которая требует интеграции инженерных решений, новых материалов и цифровых технологий.

Выводы

Стандартная цилиндрическая форма резцов *PDC* приводит к возникновению поперечных колебаний, перегреву режущей грани, что снижает эффективность работы бурового инструмента.

Вооружение бурового инструмента оказывает влияние на распределение поля напряжений, создаваемому в массиве горных пород.

Устранение проблем, возникающих в процессе бурения возможно путем выбора конструкции бурового инструмента, одновременно учитывая физико-механические свойства горных пород, динамические, гидравлические и температурные процессы, сопутствующие бурению.

Библиография

1. Борисов, К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография / К.И. Борисов. - Томск: Изд-во ТПУ, 2013. - 166 с
2. Нескоромных, В.В. Влияние среды призабойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC / В.В. Нескоромных, М. С. Попова, Л. Баочанг - DOI 10.14515/monitoring.2017.6.02. - Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021. - Т. 332., № 9. - С. 119-127.
3. Попова, М. С. Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента / М. С. Попова. - DOI 10.18799/24131830/2024/4/4320. - Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2024. - Т. 335, № 4. - С. 159-171.
4. Нескоромных, В. В. Особенности силового воздействия алмазного резца на породу в процессе бурения скважин / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, А. Ю. Харитонов - Текст : непосредственный // Булатовские чтения. - 2021. - Т. 1. - С. 349-353.
5. Третьяк А.Я., Борисов К.А. Классификация поломок пластин PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин // Результаты исследований–2020. Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск, 2020. – С. 252–254.

Современные технологии автоматизации спускоподъёмных операций буровых установок

***Сердюк Н.И. * (МГРИ, serdukni@mgri.ru),
Ганин И.П. (МГРИ, ganinip@mgri.ru)***

Аннотация

Рассматриваются причины, определяющие актуальность одного из направлений автоматизации самоходных буровых установок геологоразведочного бурения. Высокая трудоемкость и травмоопасность выполнения спускоподъёмных операций (СПО) обуславливает необходимость исключения ручного труда при их выполнении. Рассмотрены технические решения по автоматизации СПО в нефтегазовом деле, при бурении взрывных скважин на открытых горных работах, при осуществлении горизонтально-направленного бурения. Сделан вывод об областях рационального применения схем автоматического наращивания бурильных колон при строительстве скважин различного назначения, перспективности их применения на самоходных буровых установках геологоразведки.

Ключевые слова

Спускоподъёмные операции, автоматизация самоходных буровых установок, автоматическая подача буровых штанг

Источники финансирования

Источники финансирования отсутствуют.

Теория

Современные буровые станки должны быть оснащены автоматическими системами, которые позволяют выполнять многие операции без непосредственного или с минимальным участием человека. Это уменьшает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, повышает эффективность процесса. Основные риски травмирования бурового персонала связаны с выполнением машинно-ручных и ручных операций во время спуска и подъёма бурильной колонны и её наращивания. Главная причина травм – это несовершенство спускоподъёмного инструмента и неизбежность случаев нарушения согласованности действий с бурильщиком, в особенности при отсутствии достаточных навыков. Мобильность самоходных буровых установок существенно повышается при понижении высоты буровых мачт и уменьшения длины свечей. Но одновременное увеличение количества операций по разъединению и соединению замковых соединений бурильных труб, объёма ручного труда связанного с увеличением количества манипуляций с бурильными трубами при работе «на вынос» приводят к увеличению травматизма, что в особенности проявляется на поисковом и разведочном бурении в отдалённых труднодоступных районах, отличающихся экстремальными условиями проведения работ [1].

Естественным решением подобной проблемы является автоматизация спускоподъёмных операций, иначе выполнение технологических работ с бурильными трубами с минимальным присутствием помощников бурильщика в наиболее опасных зонах. По данному вопросу известно достаточно большое количество инженерных разработок. Они довольно эффективны, но каждая в своей технологии реализации буровых работ. Непосредственно перенести многие разработки на самоходные буровые установки не представляется возможным.

Для мобильных буровых установок удобнее хранить и транспортировать бурильные трубы в горизонтальном положении. Относительно малая высота мачт самоходных буровых, необходимость сохранения мобильности установок ограничивают возможности применения емких вертикальных свече-приёмников. Если рассматривать задачу автоматизации работы с трубами путем вертикального магазинирования бурильных труб, то необходимо также иметь: специальную талевую систему, центраторы, автоматические механизмы захвата и расстановки свечей. При горизонтальном расположении бурильных труб при проведении спускоподъемных операций, операционным элементом, вызывающим наибольшие затруднения является автоматическое извлечение свечи или даже отдельной бурильной трубы из штабеля и приведение ее в вертикальное положение с целью последующего соединения с бурильной колонной, а также выполнение этих действий в обратной последовательности.

На больших стационарных установках при бурении нефтегазовых скважин применяются автоматические приемные мосты, объединяющие в себе механические, электрические и гидравлические элементы оборудования. С их помощью обеспечивается транспортировка труб из зоны размещения в зону буровых площадок, быстрый и эффективный подъем труб на рабочую площадку станка, с их последующей установкой над устьем скважины. Приемные мосты имеют функцию автоматического подъема и опускания бурильной колонны, могут применяться с различными типами буровых установок, при этом требуется применение верхнего привода. Трубы со стеллажей захватываются автоматически гидравлическими захватами и забрасываются в наклонный желоб моста, в нижнем конце которого располагается толкатель. Толкатель и дополнительные подъёмные элементы обеспечивают надвиг трубы на рабочую площадку станка по желобу до тех пор, пока конец трубы автоматически не будет захвачен элеватором. Захват происходит за счет взаимодействия штроп с гидравлическими цилиндрами, которые направляют элеватор к трубе. После того, как труба захвачена элеватором, блок манипулятора осуществляет подъем трубы в вертикальное положение с ее последующим центрированием над устьем скважины, производится автоматическое соединение с верхним приводом и самой бурильной колонной. Управление мостом осуществляется одним человеком, находящимся непосредственно возле моста, или дистанционно. Автоматизированные приемные мосты значительно повышают безопасность персонала и снижают объем ручных работ при подъеме труб, так и при их укладке после окончания бурения [3]. Однако применение подобной схемы осуществления спускоподъемных операций на мобильных буровых установках в настоящее время нашло применение только в единичных случаях по причине высокой стоимости системы и несколько меньшей производительности в сравнении с ручным выполнением операций.

Еще один вариант автоматизированных спускоподъемных операций с буровым ставом (специфическое отраслевое название бурильной колонны) широко применяется при бурении взрывных скважин на карьерах. Применяют кассетирующие устройства (сепараторы) механизма подачи штанг, предназначенные для хранения штанг и подачи их на ось бурения в процессе наращивания бурового става (рисунок 1). На станках шарошечного и шнекового бурения применяют кассеты барабанного, секторного типов и индивидуальные. На станках пневмоударного бурения - преимущественно барабанного. Емкость кассет секторного типа не превышает трех-четырех штанг, а барабанного - восьми, что определяется относительно небольшой глубиной взрывных скважин. Индивидуальные кассеты имеют в установке одну штангу. В мачте могут быть установлены не более 3-х кассет индивидуального типа [4].

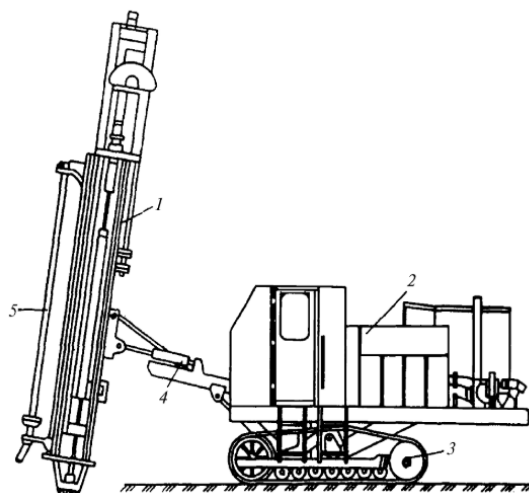


Рисунок 2. Станок ударно-вращательного бурения ЗСБУ-100-32 [5]: 1 - рабочий орган; 2 - кузов; 3 - ходовая часть; 4 - манипулятор; 5 - кассета

Механизм свинчивания (развинчивания) прикрепляется к нижней части мачты и представляет собой зажимное устройство в виде выдвижной вилки или штоков двух гидроцилиндров, захватывающих проточки нижней штанги, и храповой механизм стягивания резьбы, приводимые в действие силовыми гидроцилиндрами. После страгивания резьбового соединения процесс развинчивания (свинчивания) осуществляется вращателем [5].

Схема использования кассет для накопления буровых штанг используется не только на карьерных буровых станках. Например, отечественная мобильная буровая установка МБУ D517 (рисунок 2) для бурения технологических скважин погружным пневмоударником с поверхности земли в скальных грунтах, оснащена кассетным механизмом автоматической подачи 3-х буровых штанг длиной 5 м (рисунок 3) [6].



Рисунок 3. Мобильная буровая установка МБУ D517 [6]



Рисунок 4. Кассета для трех буровых штанг [6]

Кассетная схема подачи буровых штанг применяется на станках горизонтально-направленного бурения (ГНБ) в строительстве. Станок ГНБ - это самоходная машина гусеничном шасси. Основные рабочие элементы агрегата (бур, дизельный двигатель, гидравлика, панель управления, место оператора) смонтированы на раме. На ней же установлен буровой лафет с тисками и каретка, отвечающая за подачу штанг и их

поступательное движение. Над лафетом располагается кассета со штангами и механизм подачи штанг на лафет.

Выводы

Рассмотренные технические решения позволяют сделать заключение, что при глубинах бурения до 30 м метров для автоматизации буровой установки любого назначения рациональной является конструктивная схема подача бурильных труб из кассет, перемещаемых в вертикальное положение с помощью гидроцилиндров. Начальное снаряжение кассет бурильными трубами должно осуществляться в горизонтальном положении, что удобно с использованием специальных перегружателей.

Если решается задачи бурения более глубоких скважин, то конструктивным решением может служить дальнейшее совершенствование автоматизированных приемных мостов в сочетании с верхним приводом. Однако это потребует новых, более компактных и дешевых конструкций устройств, позволяющих: перехватывать бурильные трубы при подъеме с приёмных мостков, автоматически центрировать их над скважиной.

Библиография

1. Риск производственного травматизма для работников геологоразведочных организаций. Oborudka.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://oborudka.ru/handbook/693.html> (дата обращения 20.02.2025).
2. Лачинян Л.А. Самоходная буровая установка с автоматизацией спуско-подъемных операций. // Научно-технический журнал Инженер-нефтяник 2017, №4, с.12-15 [Электронный ресурс]. URL: http://xn----itbabblfquccb9a5a3a1p.xn--p1ai/file/dijest/2017/4_2017.pdf (дата обращения 20.02.2025).
3. Как работает автоматизированный приемный мост? - Записки нефтяника и не только. - LiveJournal [Электронный ресурс] URL: <https://mechanismone.livejournal.com/7266.html?ysclid=m7j7091jml919604678> (дата обращения 20.02.2025)
4. Устройства для хранения и подачи штанг, свинчивания (развинчивания) бурового става. Энциклопедия техники: [Электронный ресурс] URL: <https://enciklopediya-tehniki.ru/ustroystva-dlya-hraneniya-i-podachi-shtang-svinchivaniya-razvinchivaniya-burovogo-stava.html?ysclid=m7lph54x2r288991068> (дата обращения 20.02.2025)
5. Квагинидзе В.С., Козовой Г.И., Чакветадзе Ф.А., Антонов Ю.А., Корецкий В.Б. Буровые станки на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: Учебное пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2021 — 296 с.: ил. (Библиотека горного дела) ISBN 978-5-98672-525-3, UDK: 622.271:622.242
6. Брошюра-D517. Страна Росатом [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2020/06/17/rezident-toser-ozersk-sozdal-burov/?ysclid=m7lmk49hee497519771> (дата обращения 20.02.2025)

***Требования к конструкции скважин, их бурению, методам вскрытия пластов
и освоению скважин газоконденсатное месторождение Назаркудук***

***Махмудов Н.Н. * (ТашГТУ им. Ислама Каримова, mahmudovnn@mail.ru),
Бозорбоева З.Р. (ТашГТУ им. Ислама Каримова, davronbeksobirov705@gmail.com)***

Аннотация

В статье анализировано, всего на месторождении Назаркудук пробурены две разведочные скважины (скв. 1, 2). Из их числа скважина 1 используется для добычи, а скважина 2 – ликвидирована и рассмотрены методы применения промывочной жидкости при вскрытии продуктивного пласта. Дан подробный анализ влияния различных факторов на продуктивность скважин в процессе вскрытия пласта.

Ключевые слова

Аэризация, продуктивность, дебит, буровой раствор, промывочной жидкостью

Теория

Месторождение Назаркудук расположено в пределах Култак-Камашинского инвестиционного блока. В административном отношении месторождение Назаркудук расположено на территории Нишанского района Кашкадарьинской области Республики Узбекистан, в тектоническом – восточнее Гирсанского вала, в пределах центральной части Бешкентского прогиба Чарджоуской ступени (рисунок 1.).

Месторождение Назаркудук открыто в 2009 г. при испытании поисковой скважины 1 Назаркудук, в которой получен промышленный приток газа с конденсатом. Всего на площади месторождения было пробурено 2 поисков-разведочных скважин, в результате чего выявлена залежь с промышленными запасами газа в карбонатных отложениях верхней юры.

Конструкция проектных эксплуатационных скважин.

Рекомендуется следующая конструкция проектных эксплуатационных скважин:

- шахтовое направление Ø 530 мм спускается на глубину 7 м;
- удлиненное направление Ø 426 мм спускается на глубину 100 м;
- кондуктор Ø 340 (324) мм спускается на глубину 700 м;
- техническая колонна Ø 245 мм спускается на глубину 2700 м;
- техническая колонна - «хвостовик» Ø 193,7 мм спускается на глубину 2600 м - 3650 м;
- эксплуатационная колонна Ø 140x127 мм спускается на проектную глубину 3700 м.

Исходя из принятой конструкции проектных эксплуатационных скважин и технической характеристики буровых установок, для бурения скважин рекомендуется буровая установка Уралмаш-3Д (4Э). Допускается использование и других буровых установок с аналогичными техническими характеристиками [1].

Рекомендации по составу бурового раствора

Исходя из прогнозируемых осложнений, связанных с геологическим строением и термобарическими характеристиками разреза, способностью к физико-химическому взаимодействию пород с буровым раствором, возможных пределов минерализации, забойных температур и пластовых давлений в процессе строительства скважин, а также опыта бурения разведочных скважин на месторождении Назаркудук и аналогичных площадях, выбран основной тип раствора – полимер-бентонитовый.

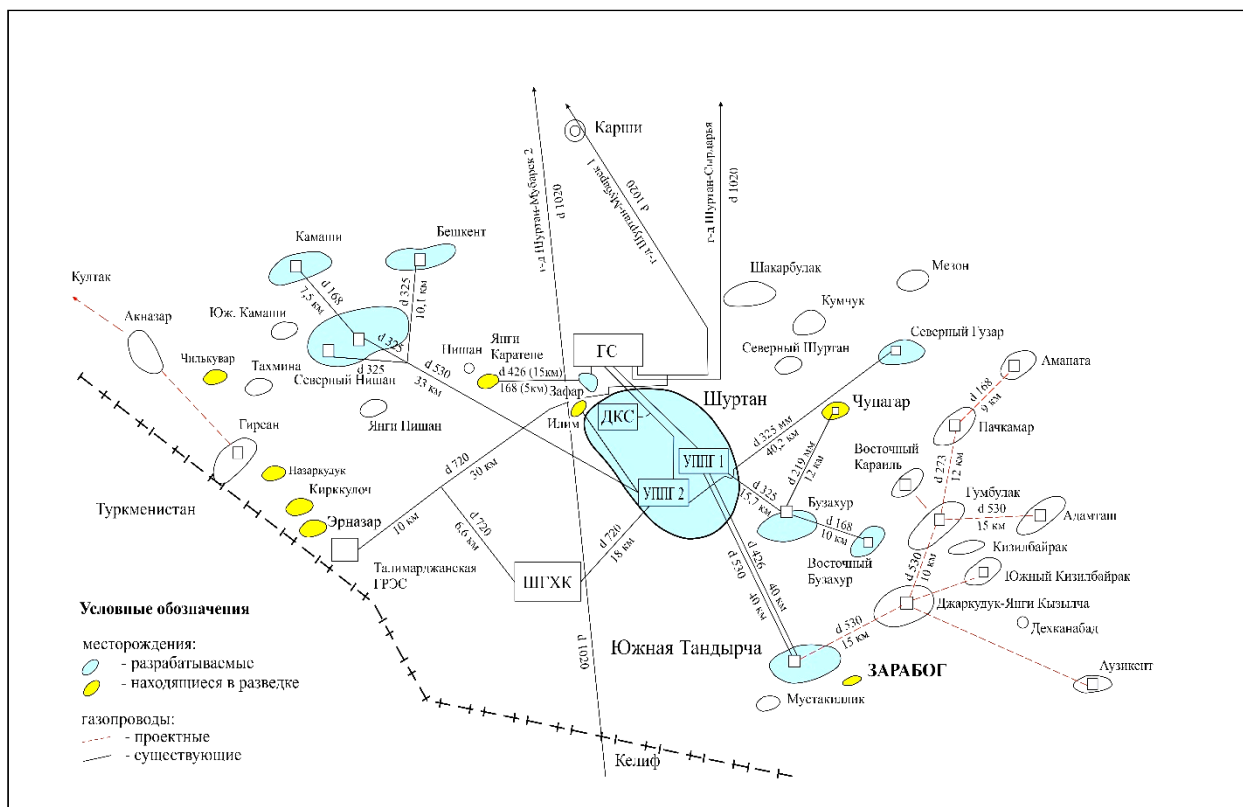


Рисунок 1. Обзорная схема района расположения газоконденсатного месторождения Назаркудук

Для бурения в этом интервале рекомендуется полимер-бentonитовый раствор.

С целью получения ниже приведенных параметров, буровые растворы обрабатываются реагентами КМЦ, К-4, Na_2CO_3 , Na OH , нефтью.

Параметры:

плотность	– 1800 - 1850 кг/м ³ (1,80 - 1,85 г/см ³);
условная вязкость	– 60 - 70 с;
водоотдача	– 5 - 7 см ³ за 30 мин;
СНС1-10	– 35 ÷ 50/45 ÷ 70 дПа;
толщина корки	– 1,0 - 1,5 мм;
водородный показатель pH	– 9 - 10.

Для приготовления 1 м³ рекомендуемых растворов используются следующие материалы и химреагенты: КМЦ до 20 кг; К-4 (10 %) до 100 л; Na_2CO_3 до 40 кг; Na OH до 5 кг; нефть до 50 л; Навбахорский бентонит до 100 кг; барит до получения требуемой плотности, остальное – вода [2].

Способ бурения и бурильный инструмент

Бурение до проектной глубины осуществляется роторным способом.

Типы пород разрушающего инструмента выбраны в соответствии с твердостью пород, слагающих разрез скважины, опыта бурения разведочных скважин на месторождении Назаркудук и площадях с аналогичным геологическим разрезом.

Для создания осевой нагрузки на долото используются утяжеленные бурильные трубы диаметром 203 мм, 178 мм и 146 мм. Проработку ствола скважины перед спуском обсадных колонн следует осуществлять с включением в КНБК калибраторов соответствующего диаметра.

Для ускорения сроков схватывания тампонажного раствора рекомендуется использование ускорителя сроков схватывания, в частности, кальцинированной соды (2 % - 3 %). В качестве буферной жидкости рекомендуется использовать воду затворения. Время ОЗЦ – 24 часа.

Цементирование промежуточной колонны Ø 245 мм производится одноступенчатым способом с использованием тампонажных цементов ПЦТ-III-06.6-100 с плотностью цементного раствора 1600 кг/м³. В качестве буферной жидкости используется вода затворения. Время ОЗЦ – 48 часов.

Цементирование промежуточной колонны – «хвостовик» Ø 193,7 мм – производится УЩЦ-1-120 с плотностью цементного раствора 2150 кг/м³ – 2160 кг/м³. В качестве буферной жидкости используется вода затворения. Время ОЗЦ – 48 часов. В качестве замедлителя сроков схватывания рекомендуется НТФ в количестве 0,05 % - 0,10 % [2,3]

Цементирование 140x127 мм эксплуатационной колонны производится двухступенчатым способом с использованием шлакового тампонажного цемента типа УЩЦ - 1-120 с плотностью цементного раствора 2150 кг/м³ - 2160 кг/м³ (первая порция) и ПЦТ-III-06.6-100 с плотностью 1600 кг/м³ (вторая порция), в качестве замедлителя сроков схватывания рекомендуется НТФ в количестве 0,05 % - 0,1 %.

Подбор рецептур тампонажных растворов необходимо производить заблаговременно на предварительных пробах цемента, воды, реагентов.

Вскрытие продуктивных отложений

Для получения необходимой информации по продуктивному горизонту предусматривается проведение стандартного комплекса ГИС в масштабе 1:200, т.е. ст. каротаж двумя зондами, ПС, БКЗ-5-ю зондами, БК, МЗ, МБК, АК, ИК, ГК, НГК, кавернометрия.

Вскрытие продуктивных горизонтов производится кумулятивной перфорацией с использованием перфораторов ПКО-89 или их аналогов. Плотность перфорации составляет не менее 20 отв/пог. м., по возможности – 50 отв/пог. м. В качестве лифтовой колонны предусматривается использование ЛТ Ø 89 мм с толщиной стенки 5,51 мм, из стали марки L-80 [4].

Выводы

Рекомендуется проведение исследований по отработке долот, режимов бурения, типов буровых растворов с целью выбора оптимальных показателей и повышения технико-экономических показателей бурения.

За весь срок реализации проекта, согласно рекомендуемому варианту 1, дисконтированный (10 %) денежный поток наличности составит 2,20 млн. долл. США, внутренняя норма рентабельности (IRR) – 12,5 %, при сроке окупаемости капитальных вложений – 10 лет. Доход государства (налоги, отчисления) составит 72,8 млн. долл. США.

В работе даны рекомендации по повышению эффективности добычи, сбора, подготовки газа и контролю за разработкой ГКМ Назаркудук.

Библиография

1. Буровое оборудование: Справочник: В 2-х т. — М.: Недра, 2000. — Т. 1. — 269 с.
2. Двойников М.В. Проектирование траектории скважин для эффективного бурения роторными управляемыми системами / М. В. Двойников // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 254–262. – DOI 10.25515/PMI.2018.3.254.

3. Jeong J., Lim, C., Park B.C., Bae. J., Shin S.C. Multi-Objective Optimization of Drilling Trajectory Considering Buckling Risk. Appl. Sci. 2022, 12, 1829: <https://doi.org/10.3390/app12041829>.

4. Назаров У.С., Махмудов Ф.М., Кузьмич А.Е., Игамбердиев Р.А., Борн Р.И. Руководящий документ. Комплексное проектирование систем разработки (доработки) и обустройства (дообустройства) месторождений углеводородного сырья - RH 39.0-110:2012. Ташкент — 2012. — с.8-13.

Bibliographia

1. Drilling Equipment: A Handbook (2 Vols.). (2000). Moscow: Nedra. Vol. 1. 269 p.
2. Dvoynikov, M. V. (2018). Design of Well Trajectories for Effective Drilling with Rotary Steerable Systems. Journal of the Mining Institute, 231, 254–262. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.3.254>
3. Jeong, J., Lim, C., Park, B. C., Bae, J., & Shin, S. C. (2022). Multi-Objective Optimization of Drilling Trajectory Considering Buckling Risk. Applied Sciences, 12(4), 1829. <https://doi.org/10.3390/app12041829>
4. Nazarov, U. S., Makhmudov, F. M., Kuzmich, A. E., Igamberdiev, R. A., & Born, R. I. (2012). Guidance Document: Integrated Design of Development (Re-Development) and Infrastructure (Re-Infrastructure) Systems for Hydrocarbon Fields (RH 39.0-110:2012). Tashkent. pp. 8–13.

Малоглубинное стратиграфическое бурение как инструмент геологического изучения осадочного чехла в пределах Александровской зоны поднятий в северо-западной части Баренцева моря

***Алексеева А.К. (ФГБУ «ВНИИОкеангеология», a.alexeeva@vniio.ru),
Шишкина А.С.* (ФГБУ «ВНИИОкеангеология», a.Shishkina@vniio.ru),
Хохлова Ю.Н. (ФГБУ «ВНИИОкеангеология», j.hohlova@vniio.ru),
Инишаква Н.Ю. (ФГБУ «ВНИИОкеангеология», n.inshakova@vniio.ru),
Тарасенко А.К. (ФГБУ «ВНИИОкеангеология» a.tarasenko@vniio.ru),
Турова А.В. (ФГБУ «ВНИИОкеангеология», a.turova@vniio.ru)***

Аннотация

По оценкам экспертов, в Арктике сосредоточено более 30% мировых запасов газа и около 13% запасов нефти. Разработка новых месторождений обеспечит энергетическую безопасность России. В условиях санкционных ограничений и высокой стоимости глубокого морского бурения основным «инструментом» нового этапа геологического изучения недр Арктики становится малоглубинное стратиграфическое бурение.

В данной работе представлены результаты малоглубинного стратиграфического бурения, успешно проведенного ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в период 2023-2024 гг. за счет средств федерального бюджета в северо-западной части Баренцева моря с целью устранения значимых неопределенностей в моделях геологического строения осадочного чехла и прогнозируемых нефтегазоносных системах.

Ключевые слова

Баренцево море, малоглубинное стратиграфическое бурение, неопределенность стратификации осадочного чехла

Теория

Область изучения – Александровская зона поднятий в северо-западной части Баренцева моря, Центрально-Баренцевская ПНГО, входящая в Западно-Баренцевскую НГП, большая часть которой находится под юрисдикцией Королевства Норвегии (Рисунок 1а).

По значению начальных суммарных ресурсов (НСР) углеводородов (УВ) акватория Баренцева моря занимает второе место среди 13 морей РФ. На Рисунок 1б представлена схема распределения плотности НСР (геологические) с выделенным участком работ. Очевидно, что плотность более 200 тыс т. УТ/км² соответствует нефтегазоносным областям (НГО) с открытыми месторождениями.

Плотность изученности сейсморазведочными работами МОГТ 2D/3D Баренцева моря составляет 0,54 км/км². На Рисунок 2 представлена схема профилей, данные по которым в формате SEG-Y сохранились в ФГБУ «Росгеолфонд», с отображением мест заложения малоглубинных скважин (российский и норвежский сектор).

Однако, любая степень изученности сейсморазведочными работами, при отсутствии данных глубокого бурения, не дает достоверного представления о возрасте пород, слагающих осадочный чехол. Проблема точности определения возраста — это распространённое явление, которое возникает из-за различий в идентификации отражающих горизонтов (ОГ) и сейсмокомплексов в районах, где нет подтверждения литолого-стратиграфической схемы бурением.

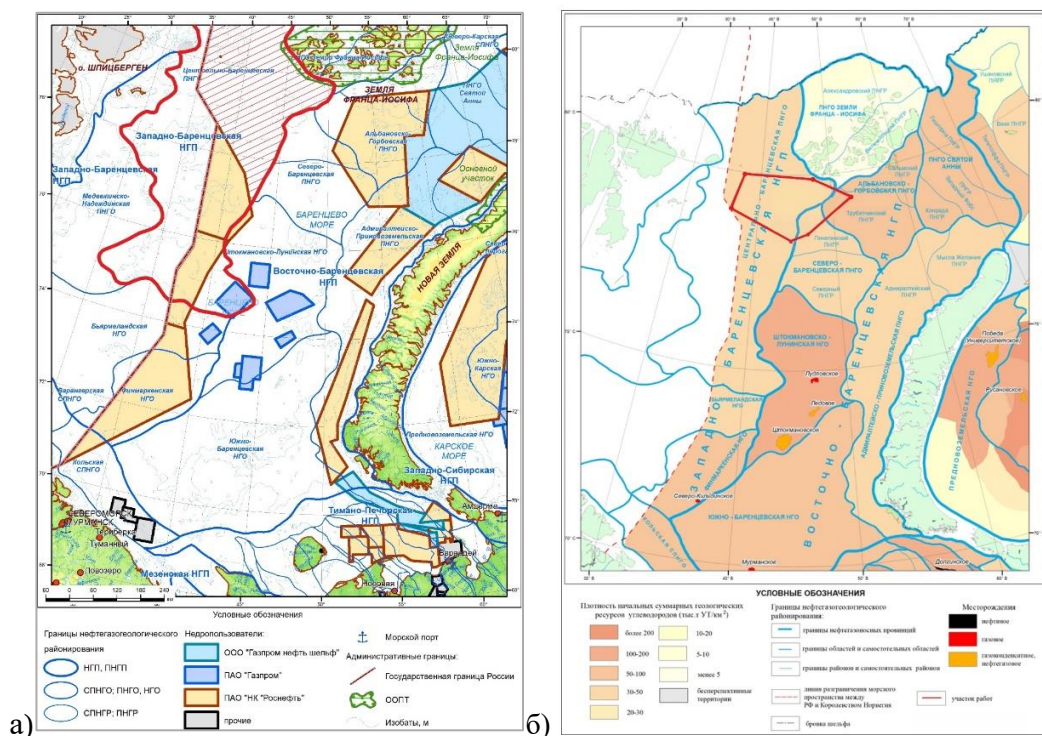


Рисунок 1. Схемы нефтегазгеологического районирования Баренцева моря
а) красным – Центрально-Баренцевская ПНГО; б) красным – участок работ в пределах Центрально-Баренцевской ПНГО [Алексеева и др., 2020ф]

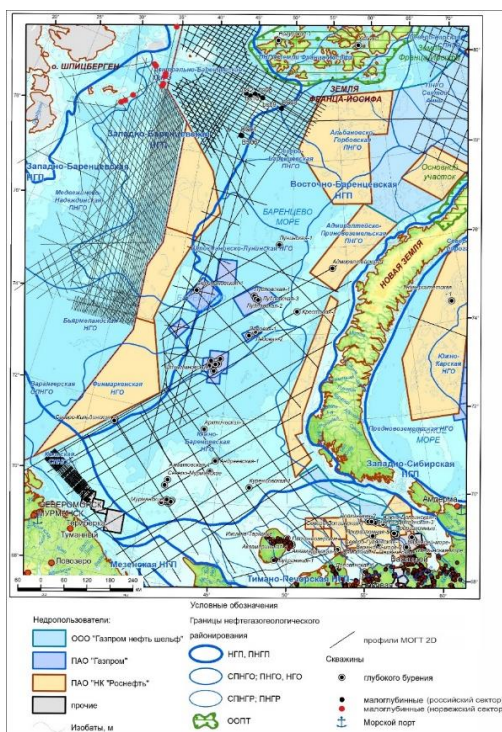


Рисунок 2. схема профилей по акватории Баренцева моря, данные по которым в формате SEG-Y сохранились в ФГБУ «Росгеолфонд», с отображением мест заложения малоглубинных скважин (российский и норвежский сектор) (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

До 2023 г. существовало множество сейсмостратиграфических моделей осадочного чехла северной части акватории Баренцева моря.

С целью актуализации сейсмостратиграфической модели и уточнения перспектив нефтегазоносности Центрально-Баренцевской ПНГО ФГБУ «ВНИИОкеангеология» провело работы по малоглубинному стратиграфическому бурению в полевые периоды 2023-2024 гг.

По результатам бурения были проведены лабораторные исследования образцов керн (петрофизические, литологические, стратиграфические, геохимические). Был установлен возраст интервала разреза. Так, в скважине BS-03 ранее по априорной геологической модели предполагалось вскрыть юрско-меловой интервал, однако по результатам исследований керн установлен только юрский возраст отложений, с выделенными местными фиумской и хеферовской свитами (Рисунок 3).

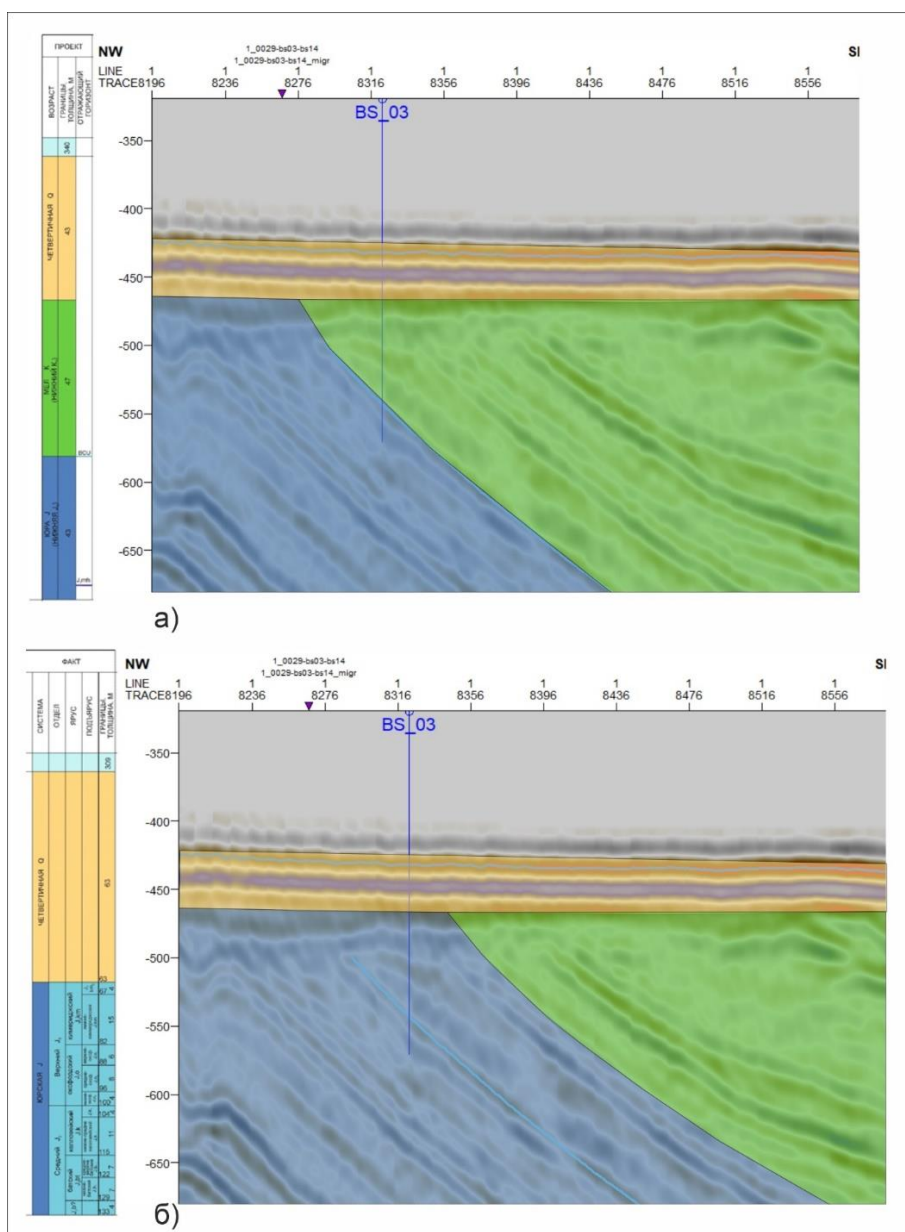


Рисунок 3. Сравнение априорной (а) и полученной (б) сейсмогеологических моделей по результатам данных бурения BS-03

Выводы

В неразбуренных областях невозможно создать геологическую модель осадочного чехла с установлением достоверного возраста разреза, и, как следствие, невозможно определить элементы углеводородной системы (УВС).

Решение данной проблемы и устранение неопределенностей возможно с помощью получения фактической информации по данным бурения.

При отсутствии глубокого параметрического бурения наличие фактических данных способно обеспечить малоглубинное стратиграфическое бурение, которое при благоприятных условиях, позволяет изучить осадочный разрез, получить необходимые для установления элементов УВС данные, выполнить прогноз нефтегазоносности.

Библиография

1. Отчет ФГБУ «ВНИИОкеангеология» о результатах работ, выполненных за 2020 год Государственное задание Федерального агентства по недропользованию № 049-00018-20-03 от 13 октября 2020 г. на 2020 год и плановый период 2021 и 2022 годов Авторы разделов по направлению "Обеспечение геологоразведочных работ на углеводородное сырье на континентальном шельфе РФ, в Арктике и Мировом океане в 2019-2021 гг.": Алексеева А.К., Зуйкова О.Н., Руденко М.Н. и др. СПб: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2020.
2. Отчет ФГБУ «ВНИИОкеангеология» о проведении тематических и опытно-методических работ, связанных с геологическим изучением недр, выполненных за 2023 год. Государственное задание № 049-00018-23-02 от 21 марта 2023 г. и на плановый период 2024 и 2025 годов, Книга 3, том 1. "Тематические и опытно-методические работы по геологическому изучению недр в пределах нефтегазоперспективных зон на акваториях Российской Федерации". Авторы разделов по направлению: Алексеева А.К., Руденко М.Н., Хохлова Ю.Н. и др. – ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург, 2023.
3. Грамберг И.С. Баренцевоморская шельфовая плита // ВНИИГиМРМО «ВНИИОкеангеология», Ленинград Недра, 1988 г., Труды, Т. 196, С. 264.
4. Грушевская О.В., Васильева Е.А., Петрушина Е.П., Кот О.Н., и др. «Создание региональной сети опорных геолого-геофизических профилей с целью изучения геологического строения, структуры и оценки перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Баренцева моря», ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2022 г
5. Павлов С.П., Заварзина Г.А., Шлыкова В.В. и др. Отчет по государственному контракту № 10/03/70-307 от 13.04.2007 г. «Изучение геологического строения и оценка перспектив нефтегазоносности Пинегинской площади Баренцева моря». ОАО МАГЭ, г.Мурманск, 2009.
6. Симонов В.А., Карякин Ю.В., Котляров А.В. Физико-химические условия базальтового магматизма архипелага земля Франца-Иосифа // Геохимия. - 2019. - Т.64. - № 7. - С.700-725. - ISSN 001
7. Шлыкова В.В., Величко Б.М., Федухина Т.Я. и др. Отчет по гос. контракту № 12/03/70-350 от 28.11.2007 г. «Изучение геологического строения и перспектив нефтегазоносности северо-западной части российского сектора Баренцева моря (прогиб Франц-Виктория)». ОАО МАГЭ, г.Мурманск, 2010.
8. Geological Assessment of Petroleum resources in eastern parts of Barents sea North // www.npd.no. – 2017.

***Особенности и результаты параметрической скважины
Чумпаловская-1 глубиной 6250 м***

***Петина В.А.* (ФГБОУ ВО «МГРИ, vicka.petina@yandex.ru),
Соловьёв Н.В. (ФГБОУ ВО «МГРИ, solovyevnv@mgri.ru)***

Аннотация

Параметрическая скважина Чумпаловская-1, расположенная в зоне сочленения Терско-Каспийского краевого прогиба с Ногайской ступенью на территории Северного Кавказа, направлена на изучение геологического строения и оценку перспектив нефтегазоносности мезозойских отложений на глубине 6250 метров. Бурение скважины осуществляется в сложных геологических условиях, характеризующихся аномально высокими пластовыми давлениями, высокими температурами и наличием соленосных и гипсоносных отложений.

Для бурения разработан специальный буровой раствор, выдерживающий высокие температуры и давление и позволяющий пройти отложения солей, гипса и выдержать попадание всех потенциальных загрязнителей. Технология не имеет аналогов в мире. Скважина является самой глубокой на территории Кавказа. В процессе бурения осуществлен отбор шлама и керна для детального литолого-стратиграфического анализа, изучения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов и оценки нефтегазового потенциала. Полученные данные использованы для уточнения геологического строения региона, интерпретации геофизических материалов и формирования массива первичных данных для последующих исследований.

Ключевые слова

Параметрическая скважина, аномальные высокие пластовые давления (АВПД), термостойкий буровой раствор, отбор керна, отбор шлама, пластоиспытание

Теория

В непосредственной близости от участка работ известны Курское нефтяное месторождение и Советское нефтяное месторождение. На Советской и Курской площадях, где выполнен значительный объем поискового бурения до максимальной глубины 5888 м со вскрытием верхнеюрских соленосных отложений, установлена нефтеносность ряда горизонтов палеогена и мела.

Строительство параметрической скважины Чумпаловская-1 (Кабардино-Балкарская Республика) проводилась в 2 этапа (1 этап в интервале 0-4900 м, 2 этап – 4900-6250 м), в сложных горно-геологических условиях, обусловленных чередованием карбонатных пород, неустойчивых глинистых и солевых отложений, наличием зон аномальных пластовых давлений, повышенных температур, большими глубинами залегания углеводородного сырья, сопряжено с возникновением осложнений.

Бурение скважины Чумпаловская № 1 пробурено с буровой установки (БУ) ZJ70D, взятой в аренду у ООО «Эр Джи Нефтемаш Групп». Данная установка представляет собой стационарную установку с грузоподъемностью 450 т предназначенная для бурения на глубину до 7000 м. БУ ZJ70D оснащена тремя буровыми насосами RJF 1600, каждый из которых имеет мощность 1600 кВт и электропривод с плавным регулированием частоты вращения. В состав входят также емкости для бурового раствора объемом 550 м³ и четырехступенчатая система его очистки, и четыре дизельгенератора мощностью по 1040 кВт. Конструкция К-образной вышки высотой 45,72 м и оснастка талевого системы по форме 6×7 обеспечивает надежность и безопасность бурового процесса, что позволяет проводить работы на больших

глубинах с высотой. Скважина - вертикальная. Допустимый темп искривления ствола скважины – не более 2 градусов на 100 м.

При расчете конструкции (таблица 1) параметрической скважины Чумпаловской-1 учитывались: совмещенный график давлений гидроразрыва пород и пластовых давлений, прогноз геологических осложнений в процессе бурения, продуктивность разреза, необходимость достижения конечной глубины 6 250 м, а также требования «Правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности».

С учетом всех этих данных предусматривается следующая конструкция скважины:

Таблица 1. Конструкция скважины и глубина спуска

№ п/п	Наименование колонны	Интервал, м		Диаметр Колонн мм	Способ бурения	Типоразмер долота	Высота подъема цемента	Необходимость (причина) спуска колонны
		от	до					
I этап – бурение скважины до глубины 4900 м								
1	Направление	0	100	720	СПВ	Спец.долото 760 мм	до устья	Перекрытие неустойчивых четвертичных отложений, предохранение устья от размыва
2	Кондуктор	0	1700	508	СПВ	III 584.2 GTX (527)	до устья	Перекрытие апшерона, акчагыла, карагана и верха чокрака, склонных к осыпям и обвалам стенок скважины. Устье скважины оборудуется ПВО.
3	1-ая промежуточ.	0	3400	340	ГЗД	444.5 PDC	до устья	Перекрытие склонных к обвалам майкопских глин
4	2-я промежуточ. (хвостовик)	3150	4900	273	ГЗД	311 PDC	3150-4900	Перекрытие меловых отложений, несовместимых по условиям бурения с нижележащими отложениями
II этап – бурение скважины в интервале 4900-6250 м								
5	3-я промежуточ.	0	5250	219х245	СПВ	244.5 PDC	до устья	Перекрытие верхней солевой толщи юры
6	4-я промежуточ. (хвостовик)	4750	5900	168	СПВ	190.5 PDC	4750-5900	Перекрытие нижней солевой толщи юры
7	Эксплуатац.	0	4750	168			0-4750	Для раздельного испытания перспективных объектов

8	Эксплуатац. (хвостовик)	5650	6250	114	СПВ	139.7 PDC	5650- 6250	Для отдельного испытания перспективных объектов

Предлагаемая конструкция скважины обеспечивает возможность проведения полного комплекса геофизических исследований, испытания пластов в открытом стволе и в колонне, а также условия безопасного ведения работ при ликвидации нефтегазопроявлений, охрану недр и окружающей среды за счет прочности и долговечности крепи скважины, герметичности обсадных колонн и кольцевых пространств, изоляции флюидосодержащих горизонтов друг от друга, от проницаемых пород и дневной поверхности [3].

Отбор керна. В результате проведения исследований для получения литолого-стратиграфической, геохимической и петрофизической характеристик разреза выполнен отбор керна на глубине 1250 м, что составляет 20,0% от общей глубины скважины. Отбор керна в параметрической скважине Чумпаловская-1 отобран с помощью отечественных керноотборных снарядов УКРБИ-185/100, УК 146/80 и УК 127/80 с глубины 3380 м, в интервалах: 3380-3480 м, 3680-3730 м, 3870-4040 м, 4220-4240 м, 4430-4560 м, 4710-4780 м, 4840-4900 м, 4900-5035 м, 5235-53

Отбор шлама начинается с глубины 100 м с через 5 м проходки, а в интервалах, требующих более детального изучения, через 2-3 м проходки, а в зонах повышенных газопоказаний – от глубины выхода газовой пачки для оперативного контроля разреза без отбора керна. После обработки (отмывка, просушка, маркировка) шлам проходит экспресс-анализы: плотность, пористость, карбонатность, фракционный ситовой анализ, литологическое описание с использованием микроскопа и фотографирование проб. В процессе бурения отбор шлама происходил в интервалах 4850-5148 м (1 ствол) и 4836-5447 м (2 ствола). В интервале 5447-5453 м шлам не отбирался в связи с отсутствием циркуляции пластовой жидкости при поглощении.

В ходе проведения испытаний коллекторских горизонтов в открытых стволовых скважинах были измерены их гидродинамические параметры, характер насыщения и состав пластовых жидкостей, а также уточнены градиенты пластовых давлений. Испытания проводятся поэтапно, включая проработку интервалов ствола, геофизические исследования (ГИС), установку испытательного оборудования, возбуждение притока и отбор проб. В процессе бурения исследовалось пять объектов в интервалах 2930–3115 м, 3115–3170 м, 3380–3740 м, 4710–4820 м и 4845–4900 м. Отобраны пробы пластовой жидкости и газа, которые необходимо провести детальный анализ продуктивных горизонтов. Испытание объекта предусматривается проводить пластоиспытателем ИП-146 на трубах типа КИИ-146-2М с диаметром резинового элемента 220 мм с пакеровкой в открытом стволе Ø 244,5 мм после отбора керна [1].

При получении притока в результате испытания скважины отбираются пробы пластовых флюидов различных типов, в том числе:

- На устье из бурильных труб при подъеме ИП в случае «прошивки» (всплытия) пластовых флюидов через столб жидкости долива (буфер).
- При обратной промывке в процессе удаления пластового флюида из бурильных труб.
- На устье при подъеме компоновки ИПТ из бурильных труб ниже циркуляционного клапана.

При бурении скважины на глубине 6250 м при температуре 220°C была разработана и применена специальная рецептура бурового раствора, адаптированная к сложным геологическим условиям (высокие давления, температура и наличия соленосных отложений).

В ходе работ использовались четыре буровых раствора с различным составом и назначением [2]. Тип и параметры бурового раствора предложены MI SWACO с учетом опыта буровых работ в регионе. Для интервала 0-100 м выбран пресный бентонитовый раствор вследствие его экологичности.

Интервал 100-3400 м: Использование системы Klash эффективно предотвратило гидратацию и дисперсию активных глин, что позволило избежать неконтролируемого роста реологии и уменьшило количество осложнений, связанных с обвалами стенок скважины.

Интервал 3400-4900 м: Буровой раствор показал высокую термостабильность в условиях температуры 150-190°C и устойчивость к агрессивным пластовым флюидам. Его применение обеспечило стабильность скважины, предотвращение АВПД и снижение риска поглощения промывочной жидкости.

Интервал 4900-6250 м: Применение бурового раствора на углеводородной основе обеспечило стабильность скважины при экстремальных условиях, включая присутствие солей, высокие перепады температур и давления, а также агрессивные среды с содержанием кальция и кислот. Разработанная рецептура раствора обеспечила термостабильность до 220°C и эффективную защиту от сероводородной агрессии. Особенности рецептуры раствора: барит (утяжелитель), кальция карбонат (кольматант), кальция хлорид (рассол инвертной фазы), Versagel HT (загуститель), Ecotrol HT и (контроль НТНР-фильтрации), Surewet (смачивающий агент) и Zinc Oxide (нейтрализатор сероводорода), что обеспечивает высокую эффективность и термостабильность системы.

Выводы

В результате бурения параметрической скважины Чумпаловской-1 получены уникальные геолого-геофизические и технологические сведения, которые позволяют оценить глубинное строение северокавказского региона, развивать новые технологии нефтегазодобывающей промышленности и инфраструктуры соседних республик Северного Кавказа.

Библиография

1. Технология бурения нефтяных и газовых скважин : учебник для студентов вузов. — В 5 т. Т. 5 / под общ. ред. В. П. Овчинникова. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. — 322 с.
2. Контроль и управление процессом бурения в условиях аномальных пластовых давлений В.П. Овчинников, В.М. Гребенщиков: Учеб. пособие для вузов. - Тюмень : Изд-во «Нефтегазовый университет», 2010. - 123с
3. Спутник буровика: Справочник. -3-е изд, перераб. И доп.-М.: Недра, 1990. – 303 с.: ил.
4. Я. А. Рязанов /Энциклопедия по буровым растворам / Оренбург: издательство «Летопись», 2005 – 664 с.

Опыт применения российского специализированного программного обеспечения при проектировании строительства скважин

***Васильев А.Н. * (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», A_Vasilev@vniigaz.gazprom.ru),
Шишляев В.В. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», V_Shishlyayev@vniigaz.gazprom.ru),
Тунгусов С.А. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», S_Tungusov@vniigaz.gazprom.ru)***

Аннотация

Задача цифровизации процессов подготовки строительства, освоения и эксплуатации скважин на сегодняшний день является актуальной и находит решение в применении специализированного программного обеспечения (ПО).

В мире широко представлены ПО для расчетов при строительстве скважин как западного производства именитых нефтесервисных гигантов, наряду с которыми используются отечественные ПО, не уступающие по функционалу и адаптированные для применения в российских условиях.

Активное применение отечественного ПО недропользователями, проектными институтами, буровыми подрядчиками, различными консалтинговыми компаниями и другими заинтересованными лицами позволяет совершенствовать ПО в постоянном режиме, обеспечивая технологический суверенитет, пусть в небольшой, но достаточно важной области топливно-энергетического комплекса.

Ключевые слова

Опыт, программное обеспечение, строительство скважин

Теория

Устойчивый рост объемов бурения в России, продолжающийся последние десятилетия достиг в 2024 г. 30,17 млн. м [1], при этом, по экспертным оценкам, более половины объема приходится на горизонтальное бурение (скважины с горизонтальным, субгоризонтальным окончанием, многозабойные скважины). Выполнение работ по строительству скважин трудно представить без применения специализированного программного обеспечения (ПО) для выполнения инженерных расчетов, как на стадии подготовки проектной документации (ПД) на строительство скважин, так и непосредственно в процессе бурения и крепления скважин. Особенно важно, использование ПО для горизонтального бурения как более технологического процесса в сравнении с вертикальными и наклонно направленными скважинами. Необходимость разработки российского специализированного ПО в области строительства скважин акцентировались авторами [2], в том числе, ввиду невозможности включения результатов расчета операций при бурении и креплении в зарубежном ПО (при проектировании), вследствие несоответствия требованиям отечественной нормативной документации в области строительства скважин.

Проектирование строительства горизонтальных скважин, в том числе, с большими отходами ствола от вертикали, требуют решения сложных задач. К основным из которых можно отнести следующие.

Доведение требуемых осевых нагрузок до долота и предупреждения возникновения, так называемого «buckling» эффекта (баклинг-эффект), проявляющегося как при бурении, так и при спуске хвостовика, баклинг-эффект характеризуется потерей устойчивости в виде продольного изгиба колонны.

Обеспечение циркуляции бурового раствора с выносом образовавшегося шлама исходя из необходимой плотности бурового раствора (создание репрессии) с целью предупреждения

нефтегазоводопроявления (ГНВП), а с другой стороны предотвращение поглощения (или возможного гидравлического разрыва пласта) вследствие превышения суммарными давлениями гидростатического столба бурового раствора и гидравлических потерь в кольцевом пространстве скважины (эквивалентная циркуляционная плотность) градиента гидроразрыва пласта.

Рассмотрим программное обеспечение для расчетов в бурении как зарубежного производства, так и отечественного. Зарубежное ПО представлено в большом количестве, вот только некоторые, из них: Wellplan, WellCat, Compass Halliburton (Landmark); Well Design, Geosteering, Trajectory Planning модули в Petrel, TechLog, TDAS (OLGA Wells модуль в OLGA расчеты при эксплуатации скважин) (Schlumberger), DS explorer, 5D (Weatherford) и множество других программ.

Программные продукты отечественно производства также представлены в достаточно большом объеме: РН-Буровые расчеты, РН-Сигма (ПАО «Роснефть»); 2drill (ООО «Страта Солюшенс»), Engineering Calculator (ООО «Петровайзер»), «Цифровая платформа ЭКО» (АО «ММоторРА»), «Проектирование бурения» (ООО «Бурсофтпроект») и др.

Непосредственно авторами, апробировано ПО 2Drill и «Проектирование бурения», при этом необходимо отметить, что 2Drill активно пополняется различными расчетными модулями, что позволит в ближайшее время занять достойное место среди специализированно ПО.

На сегодняшний день ПО «Проектирование бурения», разработанное с учетом действующих нормативно-правовых актов, отечественных регламентов, инструкций по расчету обсадных и бурильных колонн, инструкции по креплению скважин отвечает требованиям по формированию ПД и позволяет выгружать расчетные данные из ПО для различных макетов рабочего проекта (РД 39-0148052-537-87 [3], СТО Газпром 7.1-008-2012 [4] и др.), что значительно сокращает время подготовки ПД.

При этом, одним из важнейших преимуществ специализированных программ является возможность проведения множества расчетов различных технико-технологических решений с целью технико-экономического сравнения проектных решений для принятия наиболее оптимальных решений при разработке ПД.

С использованием ПО «Проектирование бурения» авторами разработано более 25 комплектов ПД для бурения вертикальных, наклонно направленных скважин, скважин с горизонтальным, субгоризонтальным окончанием (в том числе, с восходящим стволом), а также многозабойных скважин (общий вид интерфейса ПО «Проектирование бурения» представлен на рисунке 1).

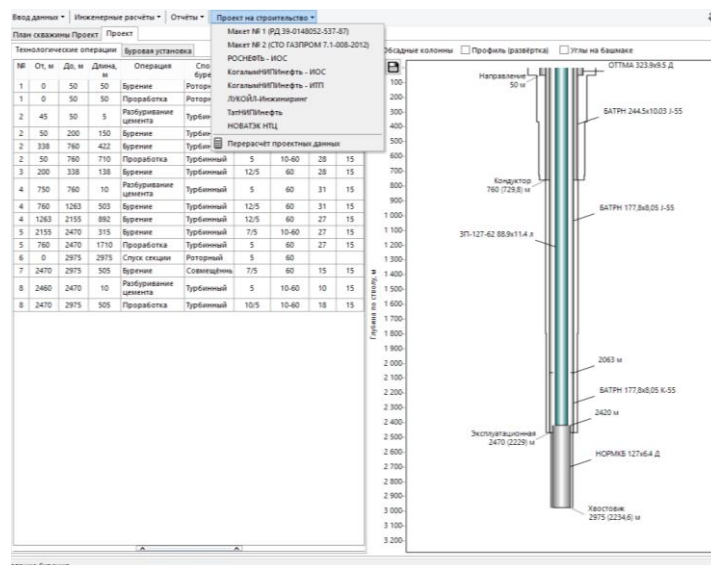


Рисунок 1. Общий вид интерфейса ПО «Проектирование бурения»

Одним из наиболее наглядных примеров успешного применения ПО «Проектирование бурения» можно считать проектирование многозабойных скважин на Нарыкско-Осташкинском месторождении, выполненное авторами (непосредственно проектной организацией), при этом проектные решения, расчетные данные по КНБК, обсадным колоннам, гидравлические расчеты при бурении и цементировании контролировались заказчиком с применением ПО Wellplan, Compass (Landmark), сходимость расчетов превышала 95,0 %. В процессе реализации проекта одна из многозабойных скважин по международной классификации скважин с большим отходом от вертикали ERD (Extended Reach Drilling) получила индекс, равный 2,48. Ведение авторского надзора за строительством скважин, научно-технического сопровождения, в том числе создание цифрового двойника скважин, необходимо проводить с использованием специализированного ПО, что позволяет предупреждать осложнения, оперативно предоставлять технико-технологические расчеты для принятия решений для оптимизации процесса проектирования и строительства скважин с целью достижения проектного уровня добычи углеводородов и его сохранения на протяжении жизненного цикла скважины с учетом снижения (минимизации) капитальных затрат [5].

Следует отметить, что зачастую внедрение специализированных ПО приводит неокрепшие умы к мысли, что профильное образование не так актуально и можно выполнять поставленные задачи при помощи Manual (руководство пользователя, справка) к ПО и прохождении курсов повышения квалификации. Наверное, для выполнения типовых задач и расчетов в узкоспециализированном направлении этого и будет достаточно, но при решении комплексных задач, профильное образование может заменить только физико-математическое с внушительным опытом работы в строительстве скважин.

Выводы

1. На сегодняшний день можно констатировать, что специализированное программное обеспечение в области проектирования, строительства и освоения скважин отечественного производства широко представлено на российском рынке, повсеместно внедрено и эксплуатируется с учетом требований действующих нормативно-правовых актов, регламентов и инструкций в области строительства скважин.

2. Внедрение в учебно-образовательный процесс МГРИ-МГРИ программных комплексов в области строительства скважин для выполнения технико-технологических

расчетов, подготовки курсовых работ, дипломных проектов как отдельной дисциплины позволит не только познакомить будущих специалистов с одним из инструментов работы, но качественно повысить уровень квалификации выпускников.

Благодарности

Выражаю благодарность своему наставнику и научному руководителю – Дмитрию Николаевичу Башкатову (1930-2014) за формирование научного мировоззрения.

Отдельно благодарю руководителя Н.В. Соловьева и коллектив кафедры бурения за предоставленную возможность обучения (2002-2007), защиты диссертационной работы (2013) и приглашение для участия в конференции.

Библиография

1. Василий Милькин, Российские нефтяники в 2024 году сократили ввод новых скважин, [Электронный ресурс], 2025. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2025/01/28/1088803-neftyaniki-sokratili>.
2. Васильев А.Н., Шишляев В.В., Филиппов К.С. Проблемы разработки единого программного комплекса на проектирование строительства нефтяных и газовых скважин // Материалы VI международной научно-практической конференции “Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых”. — МГРИ Москва: 2010. — С. 80.
3. РД 39-0148052-537-87. Руководящий документ. Макет рабочего проекта на строительство скважин на нефть и газ. М.. НПО «Бурение», 1987 г.
4. СТО ГАЗПРОМ 7.1-008-2012 Руководство по разработке проектной документации на строительство газовых, газоконденсатных и нефтяных скважин.
5. Швачко Е.В., Васильев А.Н., Шишляев В.В. Цифровой двойник скважин - инструмент оптимизации процесса проектирования и строительства // Газовая промышленность. — 2024. — № 1(860). — С. 36–41.

***Совершенствование конструкций скважин для месторождений Среднего Приобья,
оптимизация затрат при их тиражировании***

***Гиниатуллин Р.Р. * (ООО «Хайхуа-Рус», giniatullin.ramil@haihuamos.com),
Аззамов Ф.А. (Уфимский государственный нефтяной технический университет,
faritag@yandex.ru)***

Аннотация

В настоящее время все большее распространение на месторождениях Западной Сибири получают бурение горизонтальных скважин по оптимизированной конструкции скважин. Это исключение одной из секций скважин (исключают или кондуктор или этап строительства эксплуатационной колонны), за счет чего значительно сокращаются сроки строительства горизонтальных скважин, и как следует ее стоимость, что дает значительный экономический эффект при их тиражировании.

Для снижения рисков возникновения осложнений при исключении одной из секций скважин подрядчики вынуждены применять дорогостоящие буровые растворы на углеводородной основе (РУО). Себестоимость применения РУО, а также стоимость утилизации шлама с углеводородным следом доходит до 40% от стоимости строительства скважин. В данном докладе предлагается рассмотреть замену РУО на более дешевые аналоги буровых растворов (на водной основе, на основе других базовых жидкостей), которые сохраняют инертные свойства буровых растворов при бурении глинистых и продуктивных пластов.

Ключевые слова

Двухколонная конструкция скважин; сокращение сроков строительства скважин; растворы на углеводородной основе (РУО); оптимизация затрат; растворы «Литодрилл»

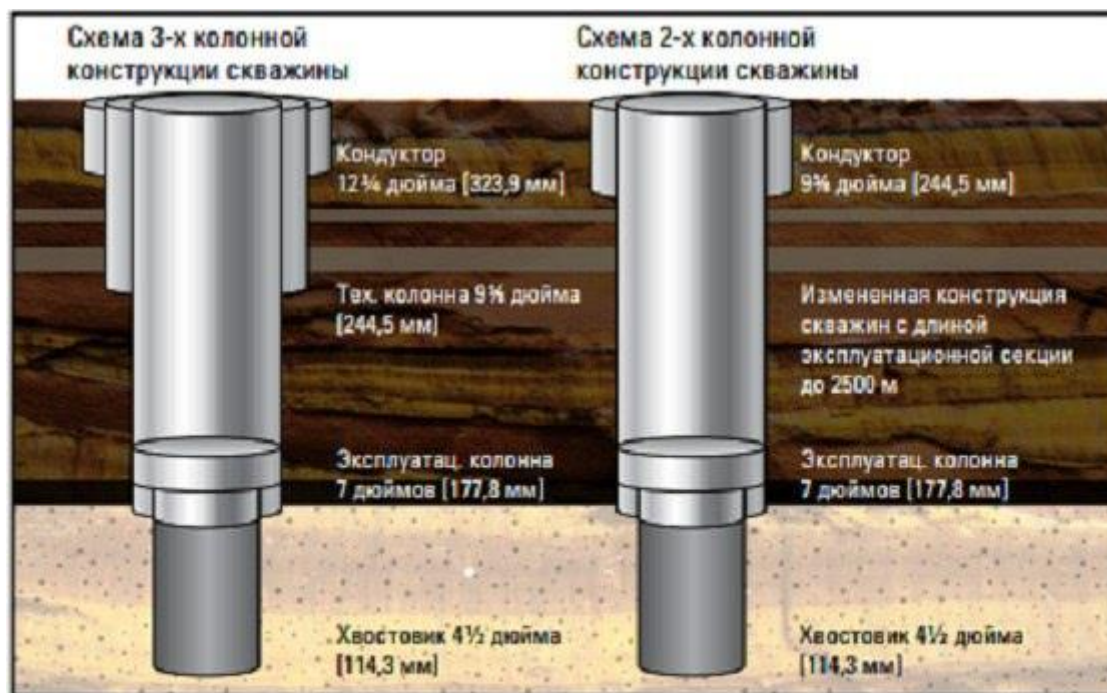
Источники финансирования

Исследования не финансируются.

Теория

При внедрении строительства скважин по 2-х колонной конструкции в Западной Сибири, для исключения осложнений скважины, вызванного исключением этапов конструкции скважин (сокращение количества обсадных колонн, перекрывающих неустойчивые породы) было предложено использование инертных растворов на углеводородной основе. Даже при высокой стоимости указанных растворов, затраты на их применение окупались значительным сокращением сроков строительства скважин. Впоследствии добавилась также проблема утилизации шлама после РУО, так как стоимость утилизации также оказалась довольно дорогостоящей. Для утилизации шлама после РУО необходимо применять дорогостоящие импортные центрифуги, далее вывозить оставшийся шлам на специальные полигоны для отходов с содержанием нефти или отжигать на специальных полигонах. Кроме того, процесс приготовления РУО в условиях буровой установки также занимает значительное время, и не оправданно экономически, так как современные буровые установки не предназначены для процессов приготовления буровых растворов (РУО). Использование буровых насосов для приготовления РУО часто приводит к преждевременному выходу их из строя ввиду неполной загруженности насосов по заявленной мощности. Все это накладывает дополнительные трудности при применении РУО при строительстве 2-х колонных скважин.

В представленном докладе предлагается рассмотреть вариант замены буровых растворов (РУО) на аналог инертных растворов на водной основе. Для внедрения данного метода была проведена работа по изучению воздействия растворов «Литодрилл» на глинистые породы, на иные породы в разрезе месторождений Среднего Приобья, воздействия этого раствора на продуктивные пласты при вскрытии нефтяных горизонтов, сохранении ствола скважин в устойчивом состоянии для обеспечения безаварийного спуска обсадных колонн с применяемыми хвостовиками различной конструкции.



В новой конструкции скважины была исключена секция под техническую колонну, при этом техническая колонна 9 дюйма [244,5 мм] вошла в секцию 11 1/2 дюйма [292,3 мм], а эксплуатационная колонна 7 дюймов [177,8 мм] – в секцию 8 дюйма [219,1 мм].

Рисунок 1. Представлен один из вариантов совершенствования конструкций скважин

Выводы

Представленный доклад подтверждает необходимость изыскания вариантов по сокращению затрат на строительство 2-х колонных скважин. После бурения достаточного количества скважин с применением растворов «Литодрилл» существует подтвержденная уверенность в обеспечении устойчивости стенок скважины в период длительного промежутка времени. Необходимо продолжать работу по дальнейшему тиражированию представленной технологии. А также рассмотреть ее применение в других аналогичных случаях при замене РУО на более эффективные растворы.

Библиография

1. Нефтяное хозяйство Ноябрь 2017 «Двухколонная конструкция строительства скважин» https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=11182&art=230846

2. Neftegaz.RU «Роснефть стремительно внедряет технологию строительства 2-х колонных скважин» <https://neftegaz.ru/news/drill/206003-rosneft-stremitelno-vnedryaet-tekhnologiyu-stroitelstva-2-kolonnykh-skvazhin-ne-bez-pomoshchi-schlum/>

3. Бурение и нефть Ноябрь 2022 «Высокоингибирующие буровые растворы на водной основе (HPWBM) для строительства сложных нефтяных скважин» https://burneft.ru/archive/authors/?ELEMENT_ID=102405

4. Особенности гидротранспорта шлама в непертикальных скважинах С.В. Васильченко 2020 https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012431302/

Производственные испытания динамически стабилизирующего породоразрушающего инструмента

***Кириков Д.В. * (Сибирский Федеральный Университет, denis.kirikov.99@bk.ru),
Нескоромных В.В. (Сибирский Федеральный Университет, sovair@bk.ru),
Петенёв П.Г. (Сибирский Федеральный Университет, pavel-whait@mail.ru)***

Аннотация

Бурение геологоразведочных скважин в анизотропных горных породах связано с естественным искривлением ствола, что вызывает существенные осложнения и экономические издержки. По этой причине аналитическое исследование механизма и факторов естественного искривления, разработка и совершенствование бурового инструмента обеспечивающего стабилизацию направления ствола скважины является актуальной научно-прикладной задачей в области геологоразведки. Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблемы эффективного бурения геологоразведочных скважин в заданном направлении в твердых анизотропных горных породах.

Ключевые слова

Анизотропия, бурение, эксцентриситет, искривление скважины, горная порода, буровой инструмент

Теория

Бурение скважин в анизотропных горных породах связано с объективными трудностями, основным из которых может быть существенное естественное искривление ствола скважины. Естественное искривление ствола скважины создает серьезные проблемы и издержки при бурении скважин по заданной траектории, усложняя процесс их строительства.

Рост промышленного производства, а также истощение активно разрабатываемых месторождений полезных ископаемых определяет необходимость постоянного увеличения объемов разведанных запасов. При этом прирост запасов осуществляется не только за счет открытия новых месторождений, но и проведением геологоразведки на больших глубинах на уже осваиваемых месторождениях. Одним из основных требований геологического задания при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых является получение наиболее достоверных и качественных образцов геологической информации при минимально возможных затратах. Одним из условий получения достоверных данных геологоразведочного бурения является требование подсечения рудных залежей в заданных проектом точках и интервалах. Таким образом, важнейшим направлением технического прогресса при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых является поиск технологий сооружения скважин малого диаметра, но значительной глубины и протяженности с сохранением достаточной степени точности исполнения геологического задания в части обеспечения проектной траектории ствола.

Для снижения искривления скважин предложены буровые алмазные инструменты с эксцентриситетом вооружения торцевой части. В направлении совершенствования данных инструментов выполнены работы [1-5], при создании которых учитываются такие аспекты, как механика работы деформированных при бурении буровых компоновок, влияние геологической среды и механика естественного искривления под воздействием дестабилизирующих силовых факторов, вызванных деформированием и разрушением анизотропных горных пород. В настоящее время создается и используется при опытном бурении инструмент с оригинальной формой торца, обеспечивающей эксцентриситет центра тяжести резцовой части коронок. Ряд испытаний показал эффективность данного инструмента

и подтвердил ряд особенностей механизма его работы. Но до настоящего времени нет методики, которая бы давала возможность определить рациональные параметры, в частности, величину эксцентриситета в зависимости от параметров анизотропии горной породы и параметров режима бурения.

Буровые инструменты, характеризующиеся эксцентриситетом режущей части, претерпевали значительные конструктивные изменения в ходе своего развития по результатам проводимых исследований. На данный момент существует ряд экспериментальных и теоретических работ в области разработки бурового инструмента данного типа, что позволяет систематизировать основные критерии и требования к разрабатываемому буровому инструменту, а также указать актуальное направление дальнейших работ в этой области. Рассмотрим результаты основных работ в отношении разработки бурового инструмента с эксцентриситетом режущей части торца.

Кривошеев В.В. в рамках собственного исследования [6] обосновал конструкцию т.н. «базированных коронок» для бурения одинарным колонковым снарядом (ОКС) (патент No 1620590). Коронка за авторством Кривошеева В.В. обеспечивает эксцентриситет за счет уникальной формы одного из секторов алмазосодержащей матрицы, отличающимся уменьшенной площадью торцевой поверхности (рис. 1, а). В рамках проведения полевых испытаний были получены удовлетворительные результаты по стабилизации направления ствола скважины.

Карпиков А.В. в своей работе [7] обосновал конструкцию алмазной коронки для бурения одинарным колонковым снарядом (ОКС) (патент No1681598), эксцентриситет которой обеспечивался полным отсутствием секторов алмазосодержащей матрицы, расположенных последовательно, друг за другом (рис. 1, б). В результате испытаний отмечалось, что предлагаемый инструмент в значительной степени уступает стандартному в отношении ресурса.

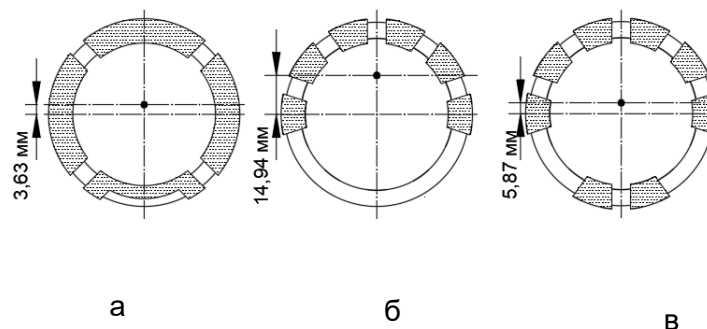


Рисунок 1. Конструкции бурового инструмента с эксцентриситетом вооружения режущей части, предлагаемые ранее и соответствующие им значения эксцентриситета

Петенёвым П.Г. в рамках собственного диссертационного исследования [8] был разработан и запатентован алмазный буровой инструмент типа КИТ с эксцентриситетом режущей части для бурения комплексом ССК (рис. 1, в). Эксцентриситет предложенного инструмента создается за счет отсутствия двух секторов алмазосодержащей матрицы, при этом, во избежание создания чрезмерного опрокидывающего момента и сохранения ресурса инструмента, удаленные сектора не располагаются последовательно друг за другом.

Вследствие простоты изготовления коронок типа КИТ, а также их эффективности в отношении стабилизации направления ствола скважины, буровой инструмент такого типа

широко применяется при выполнении геологоразведочных работ компанией АО «Красноярскгеология» на золоторудных месторождениях «Ведугинское» и «Олимпиадинское». На данный момент инструментом такого типа пробурено свыше 20 тыс. м. скважин. Однако, учитывая пониженный ресурс коронок КИТ по сравнению с буровым инструментом стандартного типа, нами была проведена работа по разработке более совершенных конструкций алмазных коронок с эксцентриситетом торца режущей части в соответствии со следующими требованиями:

- Величина эксцентриситета вооружения торца матрицы должна быть достаточной для осуществления стабилизации направления ствола скважины, но не чрезмерной;
- Должно достигаться условие равенства гидродинамических сопротивлений в призабойной части торца матрицы коронок, что предполагает, прежде всего, равенство площади поперечного сечения всех промывочных каналов.

Результаты. С учетом проведенных исследований была проведена работа по созданию алмазной коронки с эксцентриситетом режущей части торца матрицы, наиболее отвечающей оптимальным параметрам. Результатом работы стало создание новой конструкции алмазной коронки (патент № 214925).

Выбранная конструкция коронки (рис. 2) обладает высоким уровнем стабилизирующего влияния при сохранении оптимальных гидродинамических характеристик [9]. Кроме того, данная конструкция весьма технологична, для ее изготовления требуются минимальные изменения оснастки стандартных форм при изготовлении матрицы коронки.



Рисунок 2. Коронка новой конструкции

Изготовление опытной партии бурового инструмента специальной формы производилось на заводе компании «ЭЗТАБ». Параметры коронок были выбраны исходя из физико-механических свойств горных пород, слагающих разрез планируемого интервала применения инструмента. Отработка партии экспериментального бурового инструмента производилась на золоторудном месторождении (Красноярский край, АО «Красноярскгеология»). Всего было отработано 4 опытные коронки с общей проходкой 830 метров.

Таблица 1. Данные инклинометрии и их сравнительная характеристика

№ сква- жины	Тип бурового инструме нта	Интервал бурения экспери- ментальной коронкой, м	Начальный зенитный угол прой- денного интервала, град	Конечный зенитный угол пройденного интервала, град	Интенсив ность ис- кривления по зенитному углу, град/100 м	Снижение интенсивности естественного искривления по зенитному углу, %
1	Экспери- мен- тальный	0–350	30,3	24,6	1,62	76
2	Стандар- тный	0–115	21,8	13,9	6,87	
3	Экспери- мен- тальный	0–220	29,7	32,4	1,22	10
3	Стандар- тный	280–390	33,3	34,8	1,36	
4	Экспери- мен- тальный	266–467	34,4	39,7	2,63	16
4	Стандар- тный	467–630	39,7	44,8	3,13	

Выводы

1. Буровой инструмент с эксцентриситетом вооружения торцевой части является эффективным средством снижения интенсивности естественного искривления скважин в анизотропных горных породах, что подтверждено опытными работами и испытанием партии алмазных коронок типоразмера NQ при бурении скважин на золоторудном месторождении Красноярского края.

2. При создании бурового инструмента с эксцентриситетом вооружения торцевой части следует учитывать горно-геологические условия бурения, а именно степень анизотропии горных пород и угол встречи напластования (слоистости, сланцеватости) с осью скважины, а также особенности механизма разрушения анизотропной горной породы, приводящие к появлению дестабилизирующих работу бурового инструмента силовых факторов, таких как опрокидывающий момент $M_{оп}$ и дестабилизирующего усилия ΔF , возникающих в процессе разрушения анизотропной горной породы при ее разрушении буровым инструментом в режиме вращательного бурения.

3. Инклинометрия скважин № 3 и 4 показала (таблица 1) снижение интенсивности естественного искривления по зенитному углу в 10–16 % по сравнению со смежными интервалами тех же скважин.

4. Дальнейшее внедрение разработанной конструкции ПРИ позволит снизить число бракованных метров скважин, а также число постановок отклонителей и интервалы корректировки стволов скважин.

5. Твердость матрицы экспериментального ПРИ должна в известной степени соответствовать твердости матрицы ранее применяемого стандартного породоразрушающего инструмента.

Библиография

1. Steve Deveraux. Drilling Technology in Nontechnical Language // 2nd Edition-2012. P. 4–8
2. Holbert D.R. Now interest in drainhole drilling revives technology // World oil. – 1981. – № 4. – P. 7–10.
3. Holbert D.R. How rotary speed affect bits trajectory // Drilling Contractor. – July, 1986. – №7 – P. 92–94.
4. Williams G.I. Operationg experience with wiraline technique // Geodrilling. – June, 1986. – 7 № – P. 7–10.
5. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спирин В.И. Алмазный инструмент для бурения направленных и многоствольных скважин. — Тула: ЗАО «Гриф и Ко», 2007. — 176 с.
6. В.В. Кривошеев. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 240 с
7. А.В. Карпиков. Научно-методические основы управления интенсивностью естественного искривления скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.14. – Санкт-Петербург, 2002. – 20 с.
8. П.Г. Петенев. Исследование и совершенствование компоновки бурильной колонны для повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.14. – Томск, 2016. – 20 с.
9. Нескоромных В.В., Петенёв П.Г., Иванов Д.С. Основы проектирования буровых инструментов с эксцентриситетом вооружения торцевой части для бурения анизотропных горных пород // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 2(374). – С. 63–69.

О возможности применения наноглин при бурении скважин в сложных горно-геологических условиях

Сырчина А.С. * (МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)

Аннотация

Бурение скважин в условиях высоких давлений и температур (ВДВТ) заставляют применять новые технические и технологические средства для безопасного сооружения и проведения строительных работ. В связи с истощением запасов месторождений, которые для своей разработки требуют менее затратные технологии, на арену выходят скважины со сложными-горно-геологическими условиями бурения. К таким условиям относятся высокие давления и температуры.

Сложность строительства скважин в таких условиях не только в выборе составов тампонажных смесей для цементирования скважин, но и в решении другого ряда задач различного происхождения: технических, эксплуатационных проблем и экономических, а также проблем в области охраны труда.

Ключевые слова

Бурение, цементирование скважин, наноглины, ВДВТ

Теория

Этапы строительства скважины, которые включают в себя поиск, разведку и дальнейшую разработку месторождения в условиях ВДВТ в настоящее время ведутся по следующему ряду причин: сокращение запасов разведанных месторождений; наличие высокого давления на подобных месторождениях, может говорить о его вероятных больших запасов, что в свою очередь показывает перспективность его исследования и дальнейшей его эксплуатации. Исходя из ситуации на сегодняшний день, несмотря на все, казалось бы, непреодолимые трудности такие месторождения являются экономически привлекательными. [1]

Условия ВДВТ встречаются при бурении глубоких и сверхглубоких месторождений нефти и газа, в скважинах со сложным наклонно-направленным и горизонтальным профилем, при строительстве скважины в геотермальных и зонах высокого давления и/или высоких температур.

Строительство и освоение скважин такого типа сопряжено с уникальными трудностями, которые в большинстве случаев не наблюдаются при обычных операциях бурения. В результате дополнительные меры, принятые на этапе планирования, могут помочь решить некоторые ключевые проблемы, возникающие при бурении [2–4].

С увеличением температуры и давления на забое скважины кратно возрастают риски возникновения осложнений. Они не являются краткосрочным и могут возникать на протяжении всего срока строительства и эксплуатации месторождения. Однако, несмотря на серьезность этих осложнений, число скважин на месторождениях с условиями ВДВТ постоянно растёт во многих регионах мира.

На рисунке 1 представлена информация по различным мировым месторождениям с ВДВТ.



Рисунок 1. Скважины с условиями ВДВТ

Непостоянство внутрискважинных условий способно вызывать механическое и химическое разрушение цементного камня, спровоцированного разницей давлений и, как следствие, разнообразными напряжениями, возникающими в теле стенок скважины. Неконтролируемые процессы такого разрушения способны разыграть несколько дальнейших вариантов развития ситуации: нарушение адгезионных связей, проявление каналов для движения жидкости, а также появление трещин сдвига.

Рядом ученых, был отмечен тот факт, что огромное количество добавок, используемых для цементирования скважин, для применения в условия ВДВТ неприменимо [6-10]. Одним из немногих вариантов для цементирования скважин в условиях ВДВТ является применение наноглин. Особенность этого материала заключается в том, что у них большая площадь поверхности, малая проницаемость, высокая коррозионная стойкость, а кроме того они являются инертными для остальных компонентов цементного раствора, а значит, способны потенциально увеличивать надежность такого цементного камня.

Нанокompозитные материалы более стабильны в средах ВДВТ. В цементных материалах наночастицы с большей площадью поверхности обеспечивают высокую химическую активность, заполняют пустоты между зёрнами цемента, в результате чего материал получается более плотным. Эти воздействия обусловлены несколькими одновременными механизмами, способствующими влиянию наночастиц на свойства цементного раствора и камня [5].

Одним из наиболее важных применений наноматериалов при проведении тампонажных работ является использование наноглинистых материалов. Наноглина повышает жесткость, прочность, усталостное сопротивление и термическую стабильность материалов. Благодаря высокому соотношению сторон наноглина имеет большую площадь поверхности раздела, что значительно улучшает ее армирующие свойства, а кроме того, она повышает модуль упругости гибридных композитов.

Наноглина – это пущоцолановый материал, используемый для улучшения свойств цемента. Состоит из восьмислойной (октаэдрической) конструкции из оксида алюминия (AlO_6), встроенной между четырьмя (тетраэдрическими) слоями кремния (SiO_2), известной как

пластинчатая структура. Средние размеры составляют 1 нм в толщину и 70–150 нм в ширину [11].

Классифицируется в трех соотношениях: первое соотношение 1:1, один октаэдрический и один тетраэдрический слои соединяются друг с другом за счет ван-дер-ваальсовых сил притяжения и водородных связей, как в галлуазите и каолините. Вода не может проникнуть между слоями из-за прочности водородной связи; следовательно, каолинит обычно не набухает в воде. Внешняя поверхность галлуазитовых нанотрубок напоминает SiO_2 , в то время как внутренняя цилиндрическая сердцевина напоминает Al_2O_3 , что может улучшить качество цементной матрицы [12].

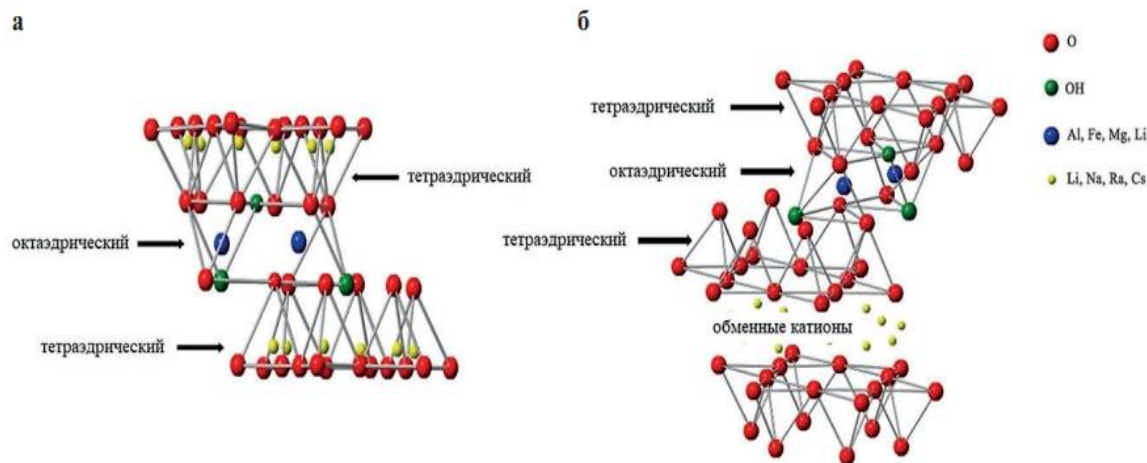


Рисунок 2. Кристаллические структуры глинистых минералов: (а) соотношение Halloysite 1:1; (б) соотношение Montmorillonite 2:1 [13]

Выводы

Проанализировав источники и изложенную информацию можно сделать следующие выводы:

1. Наночастицы, входящие в состав глины, значительно повышают их прочностные свойства, а значит благодаря им можно снизить влияние больших значений давления и температуры в скважинах с ВДВТ.

2. Строение таких наноглин позволяет им в своей структуре аккумулировать частицы воды, тем самым помогая поддерживать уровень влажности цемента.

3. Способность поддерживать наноглину в увлажненном состоянии повышает механические и реологические свойства цемента: прочность на сжатие, подвижность, пластичность, вязкость, предел текучести и т.д.

Однако применение наноглин существенно удорожает стоимость скважин, поэтому бурение в условиях ВДВТ по-прежнему представляют собой множество сложных проблем и опасностей, которые трудно решить традиционными способами. Даже при использовании наноматериалов трудно определить оптимальное количество наночастиц для использования в таких условиях, но исследователи согласны с тем, что необходимо использовать небольшие количества.

Библиография

1. Табатабаи Моради С.Ш. Результаты исследований физико-механических свойств тампонажных составов для цементирования скважин в сложных горногеологических

условиях / С.Ш. Табатабаи Моради, Н.И. Николаев, Дж.Р. Эрнандес Рекена // Инженер-нефтяник. – 2017. – №4. – С. 32-35.

2. Mohamed Al-Bagoury, Martin Urraca, Tarek Fattah, Ben Wang (2019, April). Micronized Weighting Agents for UltraHigh-Density Oil Well Cementing. American Association of Drilling Engineers (AADE) National Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado; 2009.

3. Пубуду Гамаге, Джей Девилль. Саморазлагающийся гель для применения в скважине в высокотемпературных коллекторах // Национальная техническая конференция и выставка Американской ассоциации буровых инженеров (AADE). Оклахома. 2013.

4. Ваде Висе, Гуслер Виллиам, Хансен Нелс, Теутсч Брайен, Томас Доминис. Скважины НР/НТ: Выбор жидкости, планирование и извлеченные уроки // Конференция и выставка по жидкостям Американской ассоциации буровых инженеров (AADE). Хьюстон, Техас. 2010.

5. Абусал Юсеф А.Ю., Мухмамедамин А. И., Исмаков Р.А., Муфтахова Э.Д., Яхин А.Р. Применение нанотехнологий при цементировании нефтяных скважин – обзор проблем, связанных с цементированием скважин в осложненных условиях // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 6. С. 555–566.

6. Джозеф Х., Вилларел Ф., Робертс Р. На развитие прочности цемента на сжатие сильно влияет процедура испытания // Техническая конференция и выставка жидкостей Американской ассоциации буровых инженеров (AADE)/ Хьюстон, Техас. 2014.

7. Рахман М.К., Хан В.А., Махмуд М.А. MWCNT для улучшения механических и тиксотропных свойств цемента для применения в НРНТ // Конференция по морским технологиям. Куала-Лумпур, Малайзия. 2016.

8. Кин Я., Панг Х., Ченг Г., Гу Ю., Ли Х. Влияние различных добавок на свойства цементных систем нефтяных скважин в условиях НРНТ // Эльзевир. Термические характеристики и микроструктура цементных растворов. 2021. (123).

9. Шахри М.А., Шуберт Дж.Дж., Амани М. Обнаружение и моделирование разрушения цемента в скважинах с высоким давлением и высокой температурой (НР/НТ) с помощью метода конечных элементов (МКЭ) // Международная конференция по нефтяным технологиям. Доха, Катар. 2005.

10. Фатемех К. С., Каталин Т. Механизм перемешивания и энергия перемешивания цементных растворов для нефтяных и газовых скважин: Обзор литературы и сравнительный анализ полученных результатов // Наука и техника природного газа. 2016.

11. Антонелла Д. Алессандро, Аннибале Луиджи Матерацци, Филиппо Убертини. Нанотехнологии в строительстве на основе цемента // Издательство Дженни Стэнфорд. ООО. 2020.

12. Калаби Флади М., Тенг Б.К.Г., Рейес П., Мора М.Л. Природные наноклиналы: применение и будущие тенденции – взгляд Чили // Минералогическое общество. Глинистые минералы. 2009.

13. Аликина Ю.А. Синтез и исследование пористых алюмосиликатов подгруппы каолинита с различной морфологией частиц: диссертация ... кандидата химических наук: 1.4.4. Санкт-Петербург, 2022. — 109 с.: ил.

Применение методов интенсивной пластической деформации, как способ улучшения механических свойств алюминиевых сплавов для изготовления бурильных труб

Воропаев Е.А.* (ИрНИТУ, Институт недропользования, troian_xxx@mail.ru)

Аннотация

Одна из насущных проблем бурения в процессе строительства скважин – значительная нагрузка на буровую установку, создаваемую весом стальных бурильных труб и оборудования. И, как следствие, высокий крутящий момент, высокая сила трения и др. Это приводит к необходимости применять более мощные, а значит, более дорогие установки, вызывает ускоренный износ оборудования. При бурении глубоких, сверхглубоких скважин, важно обеспечить высокую эксплуатационную надежность бурильной колонны, снизить ее напряженно-деформированное состояние и обеспечить безаварийную работу в условиях экстремальных нагрузок и высоких температур.

В работе предлагается одно из возможных решений проблем – применение облегченных бурильных труб на основе алюминиевых сплавов.

Ключевые слова

Алюминиевый сплав, бурильная колонна, коррозионная устойчивость, легкосплавные бурильные трубы

Теория

Одна из насущных проблем бурения в процессе строительства скважин – значительная нагрузка на буровую установку, создаваемую весом стальных бурильных труб и оборудования. И, как следствие, высокий крутящий момент, высокая сила трения и др. Это приводит к необходимости применять более мощные, а значит, более дорогие установки, вызывает ускоренный износ оборудования. При бурении глубоких, сверхглубоких скважин, скважин с большим отклонением от вертикали и, особенно, горизонтальных скважин чрезвычайно важно обеспечить высокую эксплуатационную надежность бурильной колонны (БК), снизить ее напряженно-деформированное состояние и обеспечить безаварийную работу в условиях экстремальных нагрузок и высоких температур.

Одним из решений проблем было бы применение облегченных бурильных труб на основе алюминиевых сплавов.

Проанализируем преимущества практической применимости легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) при строительстве скважин на основе алюминиевых сплавов такие, как:

- пути повышения коррозионной стойкости и износостойкости материалов ЛБТ;
- методы оценки влияния различных факторов на их эксплуатационные характеристики.

В работах по комплексным исследованиям упор сделан на изучение механических, коррозионных и усталостных свойств ряда алюминиевых сплавов [4].

Результаты испытаний алюминиевых сплавов подтверждают высокую коррозионную стойкость и удельную прочность. В среде с широким диапазоном pH = 2,5–10,5 наибольшую коррозионную устойчивость, предел прочности при растяжении, предел текучести при растяжении показал сплав 1953T1. Прочностные характеристики сплавов Д16Т и 1953T1 показаны в таблице 1.

Таблица 1. Прочностные параметры ЛБТ — сплав Д16Т / сплав 1953Т1

Растягивающая нагрузка, кН допустимая (0,8 σ_t)	595/ 879	691/ 1021	1222/ 1805	1423/ 2102	1617/ 2389	1646/ 2431	1253/ 1851	1411/ 2083
предельная	744/ 1099	864/ 1276	1527/ 2256	1779/ 2627	2022/ 2986	2057/ 3039	1566/ 2313	1763/ 2604
Крутящий момент, кН*м допустимый (0,8 σ_t)	10,1/ 14,9	13,7/ 20,3	35,5/ 52,4	40,2/ 59,4	44,5/ 65,8	54,4/ 80,3	30,9/ 45,7	47,7/ 70,5
предельный	12,6/ 18,6	17,2/ 25,3	44,4/ 65,5	50,3/ 74,3	55,7/ 82,2	68,0/ 79,3	38,6/ 57,1	59,6/ 88,1
Максимальное наружное давление, МПа	54,4/ 75,0	45,7/ 61,2	35,9/ 45,8	46,5/ 62,5	56,7/ 78,7	37,9/ 48,9	54,6/ 75,4	28,3/ 34,4
Максимальное внутреннее давление, МПа	56,9/ 84,0	49,7/ 73,4	42,6/ 62,9	50,3/ 74,3	58,0/ 85,7	44,0/ 65,0	56,4/ 83,4	37,2/ 55,0

Основные преимущества алюминиевых сплавов:

1. Низкий удельный вес определяет вес погонного метра труб, собственный вес бурильной колонны в целом. С учетом веса стального замка ЛБТ на воздухе почти в 2,5 раза легче стальной бурильной трубы (СБТ) аналогичного типоразмера, что обусловлено разнице плотностей – $\rho_{ал} = 2,78 \text{ г/см}^3$ по сравнению с плотностью СБТ $\rho_{ст} = 7,85 \text{ г/см}^3$. При этом снижаются прочностные свойства в 1,5 – 1,8 раза. Эта разница и определяет более низкие значения напряженного состояния.

2. Повышенное облегчение в буровом растворе. При плотности жидкости $\rho_{ж} = 1,20 \text{ г/см}^3$ вес алюминиевых труб понижается наполовину, следовательно, силы трения уменьшаются в два раза. Алюминиевые трубы по сравнению с СБТ «плавают».

3. Удельная прочность стальных БТ выше алюминиевых, но если учесть, что основной лимит прочности уходит на нагрузки, формируемые собственным весом колонны, то применение ЛБТ становится эффективнее, возможно достижение максимальной проектной длины при предельной растягивающей нагрузке, при которой в верхнем сечении колонны напряжения достигается предел текучести. Расчеты показывают [2], что даже высокопрочные стальные трубы будут уступают дюралюминиевому сплаву Д16Т.

4. Модули упругости и сдвига, характеризующие сопротивление металла действию знакопеременных изгибающих нагрузок, в два раза меньше, чем у стальных труб, это позволяет снижать напряжения, возникающие при деформации на растяжение и сжатие.

5. Преимущественным качеством алюминиевых сплавов является полное отсутствие коррозионного поражения при эксплуатации в среде полного насыщения сероводородом и углекислым газом. Стальной замок в среде сероводорода и углекислого газа, конечно, подвержен коррозии.

6. Возможность проводить все виды магнитного каротажа скважин внутри бурильной колонны благодаря немагнитным свойствам алюминиевых сплавов.

7. Виброгасящие свойства, способность поглощать продольные, поперечные и крутильные колебания. Логарифмический декремент (физическая величина, описывающая уменьшение амплитуды колебательного процесса и равная натуральному логарифму отношений амплитуд с интервалом в один период), больше, чем у стальных труб [3]. При правильном соотношении труб в бурильной колонне (БК) это дает возможность избежать эффекта резонанса в системе «долото – БК – скважина».

8. Операция освобождения бурильной колонны от прихваченного цемента довольно затратная и долговременная и квалифицируется как аварийная ситуация. Обычно ее ликвидируют путем разбуривания прихваченной части стальных труб специальными фрезами. При применении в нижней части бурильных колонн беззамковых алюминиевых бурильных труб при проведении операций цементирования значительно упрощает задачу, т. к. алюминиевые трубы легко разбуриваются обычным шарошечным долотом со скоростью 15 – 20 м/час.

Из вышесказанного следует, что значительным недостатком ЛБТ является снижение прочностных свойства по сравнению со СБТ. В этом направлении проводятся исследования российских и зарубежных ученых.

Технология изготовления ЛБТ такова: трубные заготовки из сплава Д16Т, относящегося к системе Al-Cu-Mg, подвергаются горячему прессованию, далее проходят процедуру закалки и естественного старения (литера Т в наименовании сплава).

Сплав 1953Т1 относится к системе Al-Zn-Mg и применяется в случае, если требования к прочности и коррозионной стойкости труб более высокие. Он также подвергается закалке и искусственному старению (Т1).

Для высоких температур изготавливаются трубные заготовки из сплава АК4-1Т1.

Опираясь на работу О.В. Швецова [5], приведем анализ данных по исследованиям существующих сплавов. Среди рассмотренных сплавов, применимых для изготовления БТ, наиболее стабильным является сплав Д16Т. Сплав 1953Т1 сложнее в изготовлении, так как для этого требуется жесткий контроль изменения температуры во времени, однако этот сплав принимает более высокую эксплуатационную стойкость. Он более пригоден для осложненных условий эксплуатации.

Благодаря закалке перечисленные сплавы устойчивы к высоким температурам, пригодны для изготовления из них полноразмерных конструкций БТ горячей сборкой, рекомендованы к применению в строительстве скважин нефтяных и газовых месторождений.

Но, как, впрочем, и для подавляющего большинства сплавов, агрессивная среда – аномальная кислотность, соленасыщенность и наличие соединений хлора в растворах нефтяных скважин отрицательно влияет на металл из алюминиевых сплавов 1953Т1 и Д16Т. Работы специалистов с целью улучшения материала для изготовления БТ продолжаются в различных направлениях.

Одним из направлений выявлен достаточно эффективный способ получения с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) высокопрочного состояния материала труб с использованием измельченного зерна цветных металлов и сплавов до субмикроструктурных (СМК) (0,1–1 мкм) и нанокристаллических (НК) (менее 100 нм) размеров методом динамического канально-углового прессования (ДКУП) что придает этим сплавам дополнительную термическую устойчивость.

В зависимости от режима деформирования металлов различного состава и структуры СМК-алюминия, меди и их сплавов, полученных ДКУП, в широком диапазоне скоростей деформации $3 \times 10^{-3} - 6 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ изменяются механические свойства в полезном для применения в промышленных условиях направлении. И здесь крайне важны технологические методы достижения интенсивной пластической деформации СМК- и НК- ГЦК-материалов с разной энергией дефекта упаковки – алюминия, меди, их сплавов и титана.

И здесь в определенных температурно-скоростных интервалах в сплавах с УМЗ структурой мы обнаруживаем эффект структурной сверхпластичности. Существует корреляционная зависимость высокоскоростной сверхпластичности от уменьшения размера зерен до нанокристаллических величин [1, 4]. При определенных условиях в СМК и НК материалах достигается высокопрочное состояние.

При этом в таких материалах меняется физическая константа вещества, характеризующая многие свойства твёрдых тел — теплоёмкость, электропроводность, теплопроводность, уширение линий рентгеновских спектров, упругие свойства, намагниченность насыщения и прочее.

Таким образом метод ИПД – одно из перспективных направлений в металловедении – разработка новых технологий получения структуры сплавов для изготовления ЛБТ с полезными механическими характеристиками, которые могут использоваться даже в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики.

Для совершенствования этих технологий актуально накопление и изучение достоверных данных практического применения ЛБТ и бурильного инструмента (БИ), полученных с помощью ИПД, а также усовершенствование и промышленная реализация достаточно сложной на настоящий момент методики получения мелкозернистого материала сплавов.

Выводы

1. В работе проведен анализ применимости легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) при бурении скважин, показаны их преимущества и недостатки.

2. Необходимо изучения поведения сплавов, изменение их структуры различными методами с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа, анализа электронно-колебательных спектров путем проведения электронномикроскопических аналитических исследований структуры контрольных образцов.

3. Необходимо продолжать исследования по упрочнения алюминиевого сплава, внедрять новые методики получения высокопрочного состояния материала БТ, направленные на повышение износостойкость, коррозионной стойкости и структуры материала алюминиевого сплава.

Библиография

1. Валиев, Р.З., Кайбышев, О.А., Кузнецов, Р.И., Мусалимов, Р.Ш., Ценев, Н.К. Низкотемпературная сверхпластичность металлических материалов // ДАН СССР. – 1988. – Т. 301, № 4. – С. 864–866.

2. Рудской, А.И., Коджаспиров, Г.Е. Технологические основы получения ультрамелкозернистых металлов: учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 247 с.

3. Рабинович, М.И., Трубецков, Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 1992. – 456 с.

4. Ценев, Н.К., Шаммазов, А.М., Суханов, В.Д., Козачук, Б.А. Особенности изменений структуры и механических свойств при отжиге субмикроструктурного сплава Al–3%Mg. Вестник Тамбовского университета, 2000. – Т.5. – Выпуск 2-3 – С. 315-317

5. Швецов, О.В. Повышение эксплуатационной надежности бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – Т. 23, № 1. С. 236–246.

Повышение показателей эффективности бурения скважин на основе автоматизации бурения и осцилляции буровой колонны

***Рявкин Д.А.* (ФГБУ «УГНТУ», ryavkin.den@yandex.ru),
Яхин А.Р. (БНГС ФГБУ «УГНТУ», 9406622@mail.ru)***

Аннотация

Статья посвящена решению проблемы с недостаточным доведением осевой нагрузки на долото при бурении горизонтальных скважин с протяженностью горизонтального участка более 1000 м. Рассмотрены причины этого явления и предложен эффективный способ ее решения за счет осцилляции верхнего силового привода и автоматизации процесса управления режима бурения.

Ключевые слова

Система автобурения, система осцилляции верхнего силового привода «Spin Master», осцилляция

Современная тенденция бурения характеризуется увеличением объемов скважин с протяженными горизонтальными секциями. При бурении горизонтального участка свыше 1000 м наблюдаются проблемы [1–7], связанные с доведением осевой нагрузки и, как следствие, невозможность продолжения направленного бурения с использованием стандартной КНБК (ВЗД и долото типа PDC).

Существующее решение – бурение с применением технологии РУС и использованием РУО, но у данных решений есть существенные минусы, высокая цена, зависимость от зарубежных поставок – как следствие, дефицит оборудования, а также рост затрат на строительство скважин.

С целью недопущения возможных инцидентов и аварий, а также сокращения цикла строительства скважины предлагается применить системы автобурения и осцилляции в процессе бурения.

Система автобурения определяет мгновенные изменения режимов бурения [5], подбирает оптимальные буровые параметры и передает исполнительному механизму команды на изменение режима бурения для максимального повышения МСП, что сокращает общее время цикла строительства скважин.

Система автобурения (рис. 1) применяется для управления процессом бурения на буровых установках, оборудованных буровой лебедкой с ручным управлением тормозом буровой лебедки, либо лебедкой, оборудованной электронной/гидравлической/пневматической системой управления буровой лебедкой с джойстиком бурильщика (управляемый электропривод, управляемые электромагнитные клапана в магистрали тормозной системы лебедки и т.д.



Рисунок 1. Принцип действия системы автобурения

Оборудование является системой поверхностного монтажа, переход в ручной режим бурения может быть осуществлен в любое время.

Система автобурения осуществляет в автоматическом режиме следующие функции: поддержания нагрузки на долото, поддержание механической скорости проходки, поддержание перепада давления на забое, поддержание момента на колонне бурового инструмента, мониторинг параметров бурения, контроль ограничений заданных параметров, автоматический подбор оптимальных параметров бурения, формирование аварийных сигналов по факту достижения предельных значений контролируемых параметров, а также функцию «Осцилляции» при помощи СВП при бурения в режиме «слайд» (рис. 2).



Рисунок 2. Внешний вид окна «Слайд»

Осцилляция – позволяет придавать тангенциальное движение бурильной колонне при работе в слайде, что позволяет эффективно доводить нагрузку до долота, поддерживать положение отклонителя в заданном секторе и исключает подвисание бурильной колонны, а также исключает оставление КНБК без движения, что снижает риски возникновения подлипания, возникновения дифференциального прихвата. Также позволяет снизить количество повторных выставлений отклонителя (ТФО) в требуемый сектор от наращивания до наращивания, исключает желобообразование.

Применение системы автобурения возможно с технологией поверхностной осцилляции бурильного инструмента (осцилляция верхнего силового привода) при помощи системы «Spin Master».

Совместное применение технологий позволяет поддерживать динамическое состояние всей БК при направленном бурении и обеспечивает полное доведение нагрузки до забоя.

Система Spin Master предназначена для решения проблемы с дохождением осевой нагрузки на долото при наклонно-направленном бурении в горизонтальном участке, используя ВЗД. Система полностью поверхностного монтажа, она не требует установки внутрискважинного оборудования, которое может быть утеряно в скважине. Оборудование Spin Master подключается к пульту управления ВСП. Система Spin Master взаимодействует с пультом управления ВСП для разнонаправленного вращения бурильной колонны (БК) с ограничением крутящего момента и количества оборотов, по специально разработанному и запрограммированному алгоритму. Данная техника снижает продольное сопротивление с частью БК при бурении. Вращение подвергает верхнюю часть БК к почти постоянному тангенциальному движению, создавая коэффициент динамического трения, который ниже коэффициента статического трения, создаваемого не вращающейся колонной.

При осцилляции ВСП существует три зоны с разным трением: При включении в работу системы «Spin Master» начинается осцилляция колонны бурильных труб при помощи ВСП. При этом всю колонну бурильных труб можно условно разделить на три зоны (рис. 3), характеризующиеся разными типами воздействующих на них сил трения:

1. большая часть колонны бурильных труб (подвергается вращению при осцилляции ВСП – осевое трение переводится в крутящий момент);
2. неподвижная часть колонны бурильных труб (осевое трение действует в полной мере);
3. элементы КНБК (при механическом бурении трение минимально, так как идет вибрация от ВЗД).

Основной задачей при осцилляции ВСП является минимизация зоны с неподвижной частью колонны бурильных труб (фиолетовая заливка). Это достигается за счет максимального количества совершаемых оборотов. Должен быть соблюден баланс, при котором вращение инструмента не доводится до КНБК и в то же время количество совершаемых оборотов будет достаточным для снижения сил трения и осуществления процесса наклонно-направленного бурения без складывания инструмента.

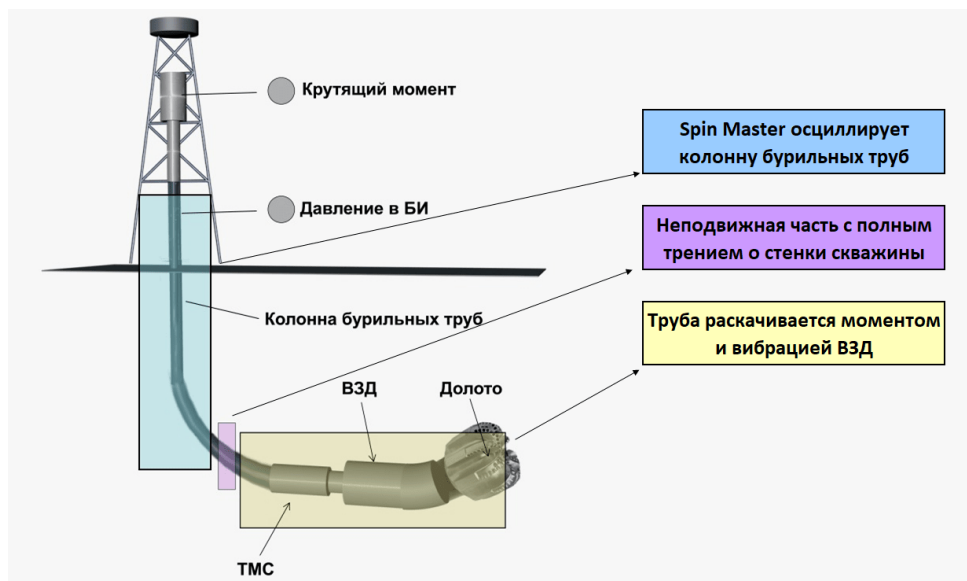


Рисунок 3. Разбивка колонны буровых труб на зоны

Выводы

При бурении горизонтальных участков скважин возникают проблемы с доведением осевой нагрузки до компоновки нижней части буровой колонны, что создает сложности в процессе дальнейшего бурения. В особенно сложных ситуациях возможны подвисания буровой колонны, подлипания и прихваты.

Для сокращения затрат, сроков строительства скважин и избегания аварий, связанных с прихватом, авариями с ОК и т.п. предлагается использовать систему автобурения и поверхностной осцилляции бурового инструмента.

Библиография

1. IADC/SPE 92558, Field Proof of the New Sliding Technology for Directional Drilling, Eric Maidla, SPE, and Marc Hacı, SPE, Slider LLC; Scott Jones, SPE, IDR Inc.; Michael Cluchey, SPE, and Michael Alexander, SPE, ChevronTexaco Corp.; and Tommy Warren, SPE, Tesco Corp.
2. Sadlier A, Laing M and Shields J: Data «Aggregation and Drilling Automation: Connecting the Interoperability Bridge between Acquisition, Monitoring, Evolution and Control», SPE 151412.
3. Система программного обеспечения WELLPLAN, Release 2000.0. Руководство для пользователя компании Landmark Graphics Corporation.
4. Sadlier A, Laing M: «Interoperability: An Enable for Drilling Automation and a Driver for Innovation», SPE/IADC 140114.
5. Гранов А.П., Бураков М.Е., Широков И.Ю., Хлебников Д.А. Способ автоматического регулирования подачи бурового инструмента в процессе бурения, патент на изобретение № 2681325, 2018.
6. Teale, R., 1965, "The Concept of Specific Energy in Rock Drilling," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2, – pp. 57–73.
7. Повалихин А.С., Калинин А.Г., Бастриков С.Н., Солодкий К.М. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин. – М.: «ЦентрЛитНефтеГаз», – 2011. – 645 с.

Уменьшение затрат времени при принятии решений в наклонно направленном бурении

**Черновол Д.В.* (Башнефтьгеофизика, shabalin_daniil@mail.ru),
Белов А.П. (МГРИ, econg3@yandex.ru)**

Аннотация

В докладе описаны некоторые современные методы, используемые на практике для навигации при наклонно направленном бурении на Самотлорском месторождении, а также описаны проблемы возникающие в процессе бурения и возможные пути решения. Также описывается оборудование, принцип работы и программное обеспечение.

Ключевые слова

Телеметрическая система, бурение, канал связи, программное обеспечение

Теория

Работы проводились на Самотлорском месторождении в 80 км от Нижневартовска с использованием двух телеметрических систем APS и АБТС. Самотлорское месторождение - крупнейшее в России и 7-е по размеру в мире нефтяное месторождение. Оно расположено на востоке Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (Нижневартовский район) под одноимённым озером, в непосредственной близости от городов Нижневартовска и Мегиона, а также посёлка Излучинска.

Направление бурилось с использованием АБТС (бескабельная телесистема), компания производитель ООО "БИТАС", г. Самара. АБТС предназначена для оперативного управления траекторией ствола наклонно направленных и горизонтальных скважин в процессе бурения гидравлическими забойными двигателями с использованием для передачи информации электромагнитного беспроводного канала связи рис.1. Данная телеметрическая система состоит из генератора; защитного кожуха для генератора; разделительной секцией, которая соединяет зонд с модулем электронным скважинным (МЭС) и сам МЭС.

МЭС представляет из себя измерительный прибор, состоящий из инклинометра и гамма-модуля.

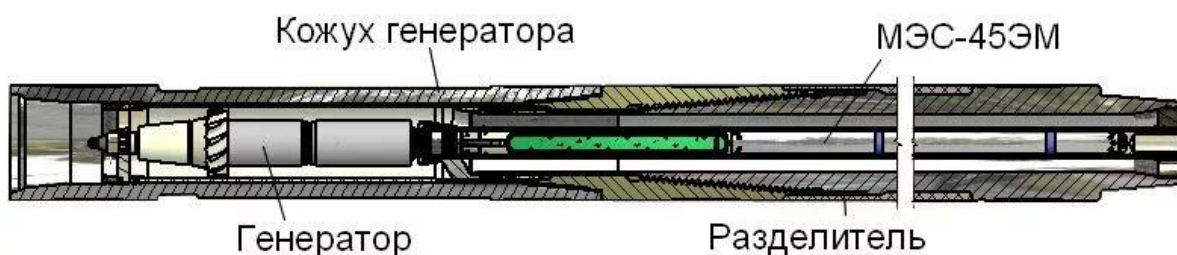


Рисунок 1. Телеметрическая система АБТС

Сигнал поступает и обрабатывается на наземном приемном устройстве УПМ с использованием программы «Стрела», в данной программе отображаются все основные рабочие данные такие как (качество сигнала, показатели гаммы, частоты сигнала, зенит, азимут и т.д.) рис.2.

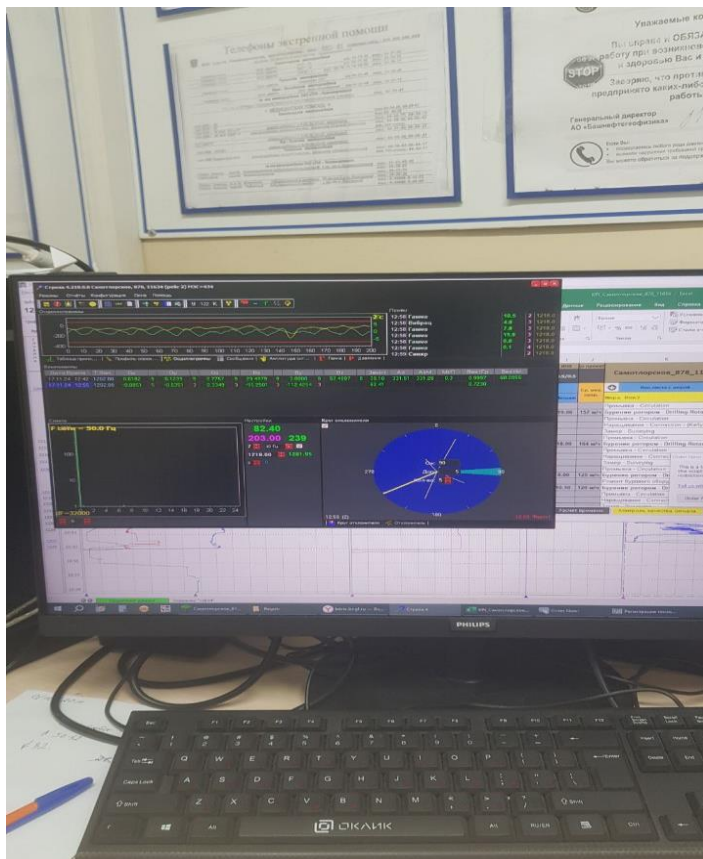


Рисунок 2. Программа «Стрела»

Для ННБ необходимо знать текущие зенит и азимут, в качестве ориентирования используются планируемые зенит и азимут для точек измерений предоставляемых заказчиком.

Кондуктор бурится с использованием телеметрической системы APS SureShot в стандартной компоновке рис. 3.

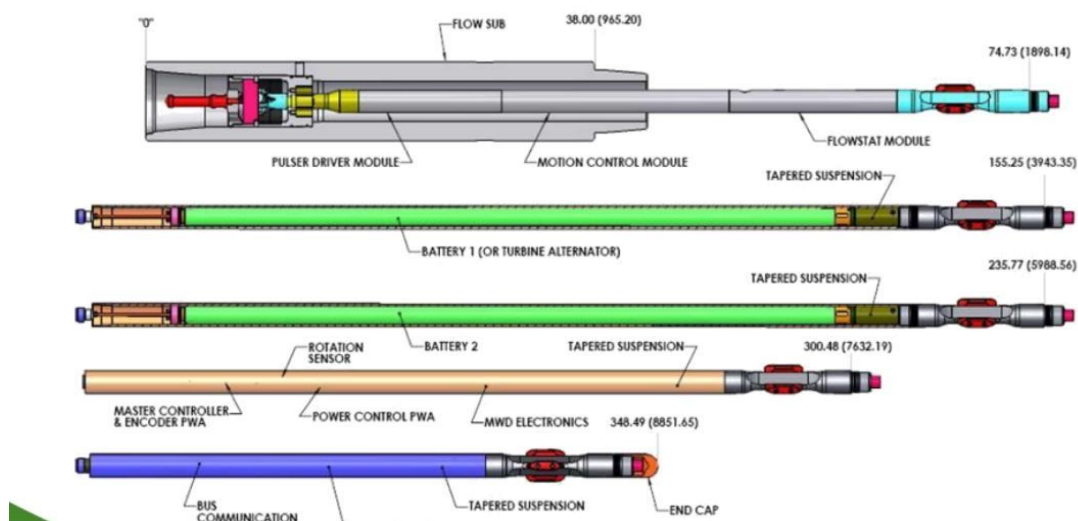


Рисунок 3 APS SureShot

Скважинная компоновка SureShot укомплектована сенсорным модулем с магнитометрами, откалиброванными в соответствии со стандартами национального института по стандартизации и технологии США, надежным роторным пульсатором и батареями либо турбинным генератором для обеспечения электропитанием.

Наземная система для регистрации и преобразования данных SIU-2. Программа для обработки получаемых данных: SureShot.

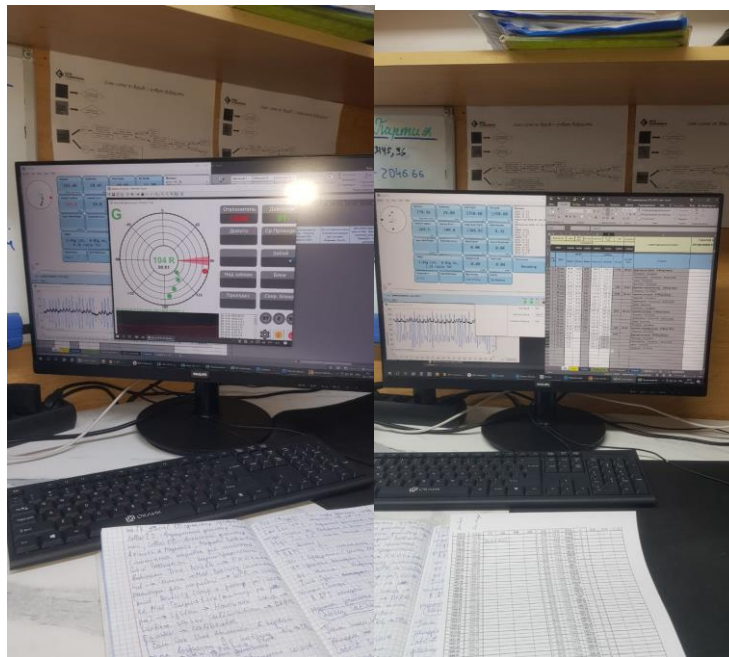


Рисунок 4. Программа для обработки получаемых данных: SureShot

Важным параметром при выборе телесистемы является тип канала связи. Так электромагнитный канал связи обладает самой высокой скоростью передачи информации, а гидроканал самой низкой, при этом гидроканал обладает большей допустимой глубиной для передачи информации, чем электромагнитный канал.

Выводы

Данные телесистемы обладают всеми необходимыми параметрами для навигации при выполнении работ наклонно направленным бурением, однако существует несколько проблем связанных как с проведением самих работ, так и с обслуживанием, диагностикой и выявлением неисправностей в работе аппаратуры и компонентов телеметрической системы. Основной проблемой является, время, необходимое для проведения замера, так и для принятия решений во время бурения. В зависимости от того, какой канал связи используется будет зависеть и то, сколько времени потребуется для получения данных.

Для того чтобы сократить время бурения и принятия решений для корректировки направления ствола скважины в режиме реального времени необходимо разработать методику получения количественных критериев на основе математической обработки данных с применением метода спектрального анализа.

Библиография

1. Каширо Константин Сергеевич // Технологические решения для строительства разведочной вертикальной скважины глубиной 2640 метров на нефтяном месторождении (Томская область) // 2020 г.
2. Бескабельная телесистема АБТС-ЭМ / Телеметрические системы / Продукция / Битас
3. Самотлорское нефтяное месторождение — Википедия
4. <http://resources.aps-tech.com/documentation/technical-data-sheets-ru/APS-TDS-SureShot-MP-MWD-ru.pdf>

Износ режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами PDC

**Черноволот С.Г.* (ФГБУ «УГНТУ», 9195508815@mail.ru),
А.Р. Яхин (ФГБУ «УГНТУ»)**

Аннотация

В статье рассмотрен износ режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC

Ключевые слова

Износ резцов PDC, основные причины износа резцов PDC, долота PDC

Теория

В первую очередь, износ резцов PDC зависит от абразивности разрушаемой породы, геометрии рабочей части долота и режима бурения, а именно частоты вращения, усилия подачи и интенсивности выноса продуктов разрушения. В связи с этим, для повышения скорости бурения необходимо корректно подобрать тип долота и технологический режим бурения, а также соблюдать порядок обработки долота. В режим обработки долот входит: оптимизация параметров режима бурения, в зависимости от свойств горной породы и износа резцов; время проработки нового долота; общая продолжительность работы долота в рейсе.

С помощью технико-экономических показателей, которые включают: механическую скорость бурения (м/ч); проходку за рейс (м); количество метров, пробуренных одним долотом (м); стоимость 1 метра бурения (руб.) оценивается уровень отработки долот, армированных пластинами PDC.

Износ вооружения долот PDC характеризуется истиранием, сколами и дроблением, что является основным недостатком – это показывают исследования последних лет [1, 2, 3]. Анализ состояния отработанных долот показывает, что аномальный износ пластин PDC имеет в основном два вида: а – сколы от сил, действующих в передней грани, б – сколы от сил, действующих в задней грани, в – отрыв пластины PDC (рис. 1). Фрагменты долота с нормальным и аномальным износом пластин PDC показаны на рисунке 2.

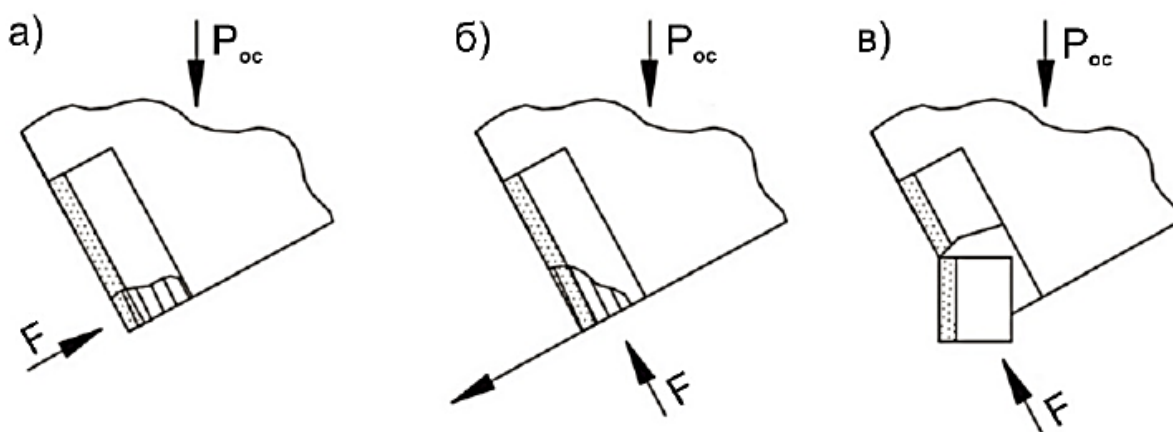


Рисунок 1. Виды аномального износа пластин PDC

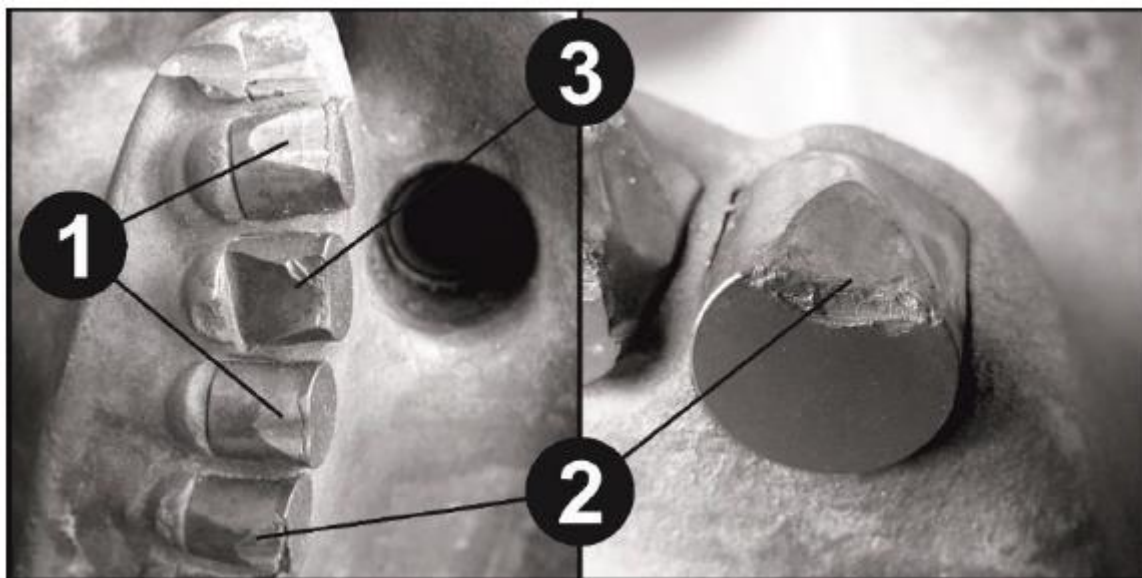


Рисунок 2. Нормально и аномально изношенные пластины PDC.

1 – нормальный износ PDC; 2 – скол PDC от действия сил по передней грани (аномальный износ); 3 – скол PDC от действия сил по задней грани (аномальный износ)

Долота, армированные пластинами PDC, изнашиваются неравномерно. Из-за наибольших удельных мощностей трения, больше изнашиваются резцы по периферийной части, а износ в центральной части лопасти чаще всего отсутствует, это приводится в работах [4, 5].

Наибольший износ буровые инструменты получают при проходке высокоабразивных пород крепких и средней крепости. Существующие методы оценки изнашиваемости PDC, основанные на изучении износа при резании блоков пород в лабораторных условиях для получения достоверных результатов, требуют значительных затрат времени и средств.

Если рассмотреть породу как изнашивающую среду, схематично можно представить себе два случая работы инструмента (рис. 3):

а) порода 1 состоит из твердых зерен с средним диаметром d_3 , связанные между собой мягким цементом и расположенные друг от друга на расстоянии $S_3 \geq d_3$.

К данным породам относятся песчаные сланцы, некоторые песчаники с базальным цементом, известняки с примесью кварцевых зерен и другие породы средней крепости.

В этом случае, при движении резца 2, твердые зерна вдавливаются в цемент, который в процессе разрушается и уплотняется. Сами твердые зерна, как правило, не разрушаются, а контактные давления на режущей кромке определяются сопротивлением цемента разрушению.

б) порода 1 состоит из твердых зерен, которые располагаются плотно друг к другу и связаны цементом.

К данным породам можно отнести песчаники, граниты, кварциты и другие крепкие породы.

В этом случае, разрушение горной породы происходит методом дробления твердых зерен. Соответственно, контактные давления обусловлены прочностью твердых зерен и характером напряженного состояния при их разрушении. Очевидно, что каждая порода при разрушении характеризуется определенным сочетанием этих двух процессов [6]. Так, при резании крупнозернистого песчаника с большим содержанием кварца образуется большое количество мелких зерен, имеющих острые грани и активно взаимодействующих с контактной

поверхностью PDC. При этом величина контактных давлений равна твердости кварцевых зерен, разрушение которых происходит в условиях объемного напряженного состояния.

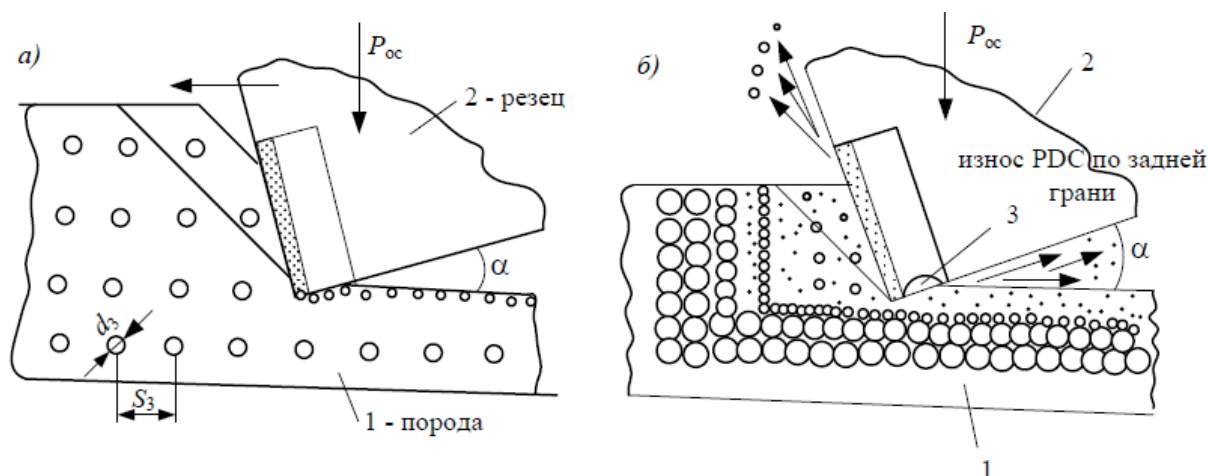


Рисунок 3. Схема взаимодействия резца с породой при его изнашивании

Одной из основных причин износа, является неоптимальная силовая нагрузка отдельных участков рабочей поверхности и возникновение разрушительных вибраций [7, 8]. В связи с этим, проектирование долот PDC требует иной подход, отличающийся от традиционного, что требует оценки влияния физико-механических свойств горных пород на условия работы породоразрушающего инструмента. Не смотря на существующие недостатки долот PDC, за счет работы над совершенствованием конструкций и их адаптации к условиям различных месторождений, удалось добиться положительных результатов. Сегодня долота, армированные пластинами PDC, стремительно завоевали популярность и вытеснили с рынка долота шарошечного типа. Вопрос как смоделировать и спрогнозировать износ резцов PDC, чтоб исключить основные недостатки на сегодняшний день является актуальным.

Библиография

1. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Исследования влияния конструктивных параметров коронки на механическую скорость бурения и интенсивность ее износа / методика и техника разведки, 1999, № 9-10 (147148).
2. Дороднов И.П. Формирование ствола скважины в процессе бурения. Краснодар: Просвещение-Юг, 2002. – 279 с/
3. Нескоромных В.В. Оптимизация при геологоразведочном производстве. М. Инфа - М, 2015. – 199с.
4. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика анализа ситуаций на забое скважины по углублению за один оборот алмазного породоразрушающего инструмента. Известия Сибирского отделения секций наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2012. – Т.40. – №1 С. 96 – 104.
5. Пригорская Т.А. «Статистический анализ отработки долот типа PDC и прогнозирование их стойкости / Т.А. Пригорская / Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 41–56.
6. Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е., Третьяк А.А. Разработка методики расчета наработки породоразрушающего инструмента с алмазно-твердосплавным вооружением. /Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2010. – №12. – С. 2–5.

7. Соловьев Н.В. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьев, В.Ф. Чихоткин, Р.К. Богданов. А.П. Загора. - М.: ВНИИОЭНГ, 1997. – 330 с, ил.

8. Третьяк А.А., Борисов К.А., Гроссу А.Н. / Влияние конструктивных особенностей коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами, на эффективность бурения горных пород / Горный журнал, 2018. - №2. – С. 85–90.

Освоение водозаборной скважины с применением эжекторного насоса на примере узла водозабора

***Шаймулин Р.М. * (МГРИ, s.rinat125@gmail.com),
Тунгусов С.А. (МГРИ, tungusovsa@gmail.com),
Сырчина А.С. (МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)***

Аннотация

Целью освоения водозаборных скважин является восстановление естественной водопроницаемости пород и очистка рабочей части фильтра, что способствует продлению срока службы скважины.

Эффективные методы освоения могут увеличивать естественную водопроницаемость пород, улучшая производительность скважины.

Гидроимпульсный метод с использованием струйных насосов создает гидроимпульсы и гидравлические удары, что помогает разглинификации и увеличивает дебит скважины.

Применение струйных насосов эффективно за счет способности удалять разрушенные частицы и оказывать гидродинамическое воздействие на пласт, что подтверждается практическими результатами.

Ключевые слова

Бурение, эжекторный насос, водозаборная скважина, гидроимпульсный метод, дебит скважины

Теория

Период развития теории струйных аппаратов насчитывает около полутора сотен лет. Струйный аппарат относительно молод по сравнению с другими гидравлическими машинами, как центробежные и поршневые насосы. Первый водоструйный насос, согласно был предложен в 1852 году английским физиком Д.Томсоном.

Освоение скважин – это ряд действий, направленных на их развитие и обеспечение постоянной продуктивной работы, которую можно ожидать в соответствии с условиями месторождения. Поскольку после вскрытия пластов и установки обсадных труб поверхности могут быть затянуты слоем глины, скважину необходимо осваивать для удаления корки. Также освоение может потребоваться, если ударные волны, которые влияют на пласты при перфорации ствола, вызвали создание области с чрезмерно низким показателем проницаемости [1].

Актуальные задачи освоения скважин — это очистка призабойной зоны от фильтратов различных растворов, используемых в период первичного и вторичного вскрытия, удаление жидкостей глушения и освоения, продуктов коагуляции, а также вызов притока нефти или газа. Скважины, показавшие в процессе бурения хорошие признаки нефтегазоносности, из-за низкой проницаемости коллекторов и отрицательного воздействия на них бурового раствора, проникающего в пласт при вскрытии, при освоении дают небольшой дебит либо совсем не дают притока.

Освоение скважин производится одним из шести ключевых методов:[2]

- Поршневание.
- Тартание.
- Обновление жидкости для скважины.
- Компрессорная обработка.
- Прокачка смеси газа и жидкости.
- Освоение с применением эжекторного(струйного) насоса.

Поршневание, который также известен как свабирование, характеризуется опусканием вниз поршня, сделанного из трубы с небольшим обхватом и клапаном, который открывается при спуске на дно. Снаружи трубы в местах примыкания сочленений находятся манжеты из резины с усилением из проволоки. В процессе опускания трубы-поршня жидкость, которая находится в стволе, перетекает на уровень выше, и когда поршень поднимается, его клапан перемещается в закрытое состояние. Таким образом, поршень выталкивает объем жидкости, равный степени его погружения (по закону Архимеда).

Чаще всего глубина, на которую опускается поршень, варьируется в пределах 70-150 метров. Поршневание отличается существенной производительностью, однако имеет и минусы: так, из-за каната устье скважины нельзя закрыть полностью. Из-за этого при работе возникает риск внезапного выброса, который нельзя будет предотвратить.

Тартание – это способ, при котором из скважины достается жидкость при помощи специальной желонки, опускаемой вниз на канате с лебедкой. Внизу желонки расположен клапан, который открывается при упоре ее в дно, а сверху есть крепления для каната или шнура. Диаметр изделия обязательно должен быть меньше параметров трубы, иначе желонка застрянет в обсадной колонне, что создаст трудности при дальнейшей эксплуатации скважины.

Задача любой технологии освоения водозаборной скважины сводится к восстановлению естественной водопроницаемости пород, слагающих водоносный пласт в прифильтровой зоне, а также к очистке рабочей части фильтра. Высокоэффективные способы освоения могут способствовать некоторому увеличению естественной водопроницаемости пород в прифильтровой зоне [3].

Технологические операции по освоению водоносных пластов включают: работы по опусканию в скважину фильтра или креплению водоприемной части скважины другими способами; работы по восстановлению естественной водопроницаемости пласта или искусственному ее увеличению; устройство гравийной обсыпки фильтров; откачки воды из скважины с целью формирования водоприемной части скважины и осветлению воды.

Освоение скважины путем использования струйного насоса, относится к гидроимпульсному методу, или же гидромеханическому способу возбуждения ударных волн в интервале водоносного пласта [4].

Существуют и широко применяются в производстве и другие схемы для освоения водоносных пластов в гидроимпульсном режиме. Так, в трестах "Промбурвод" и "Востокбурвод" нашли широкое применение способы гидроимпульсного освоения с применением при откачке высоконапорных струйных аппаратов. Технологическая схема монтажа струйного насоса при освоении скважины приведена на рис. 1.

Струйный насос спускают в скважину на бурильных трубах. Под действием давления нагнетаемой воды (для привода струйного аппарата) гидромеханический пакер, перекрывающий кольцевое пространство между струйным аппаратом и эксплуатационной колонной, разжимается. Струйные аппараты имеют сменные пакеры двух размеров для работы в обсадных трубах диаметрами 168 — 219 и 219 — 273 мм.

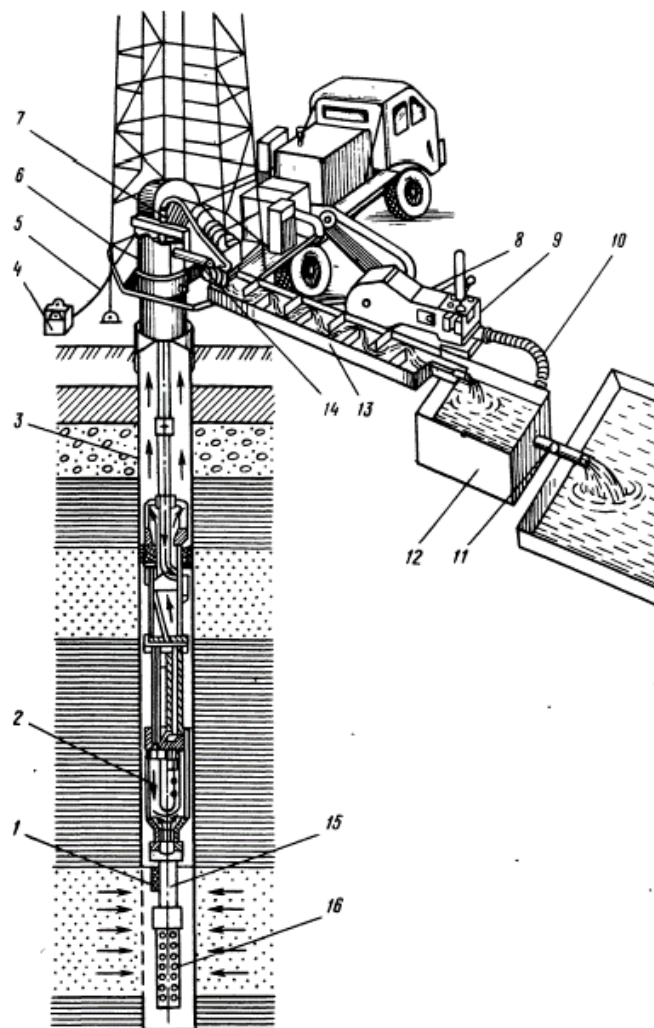


Рисунок 1. Схема гидроимпульсного освоения скважин при использовании струйного (эжекторного) аппарата с пакером: 1 — датчик давления; 2 — струйный аппарат; 3 — обсадная труба; 4 — регистратор; 5 — кабель; 6 — оголовок; 7 — переводник; 8 — напорный шланг; 9 — буровой насос; 10 — всасывающий шланг; 11 — сливной патрубок; Г2 — мерная емкость; 13 — желобная система; 14 — отводной патрубок; 15 — хвостовик; 16 — фильтр

При кратковременных остановках бурового насоса на забой передается гидравлический удар, определяемый весом столба жидкости, заполняющего скважину. До выключения бурового насоса давление жидкости на забой определяется величиной статического уровня и интенсивностью откачки. После выключения бурового насоса и струйного аппарата забойное давление увеличивается вследствие передачи давления столба жидкости, заполняющего скважину от динамического уровня до устья. Отсюда следует, что скачок забойного давления тем выше, чем ниже статический и динамический уровни. Таким образом, при остановке струйного аппарата происходит гидравлический удар.

Сочетание импульсной откачки с гидравлическими ударами создает благоприятные условия для разглинзации и освоения скважин с увеличением их дебита на 30 — 40 %, что подтверждается графиком, приведенным на рис. 2.

Возможности струйных аппаратов удалять продукты разрушения с одновременным гидродинамическим воздействием на пласт, а также промывать скважины при доливе воды в

нее с одновременной откачкой позволяют сделать вывод о большой эффективности этого способа при освоении водоносных пластов.

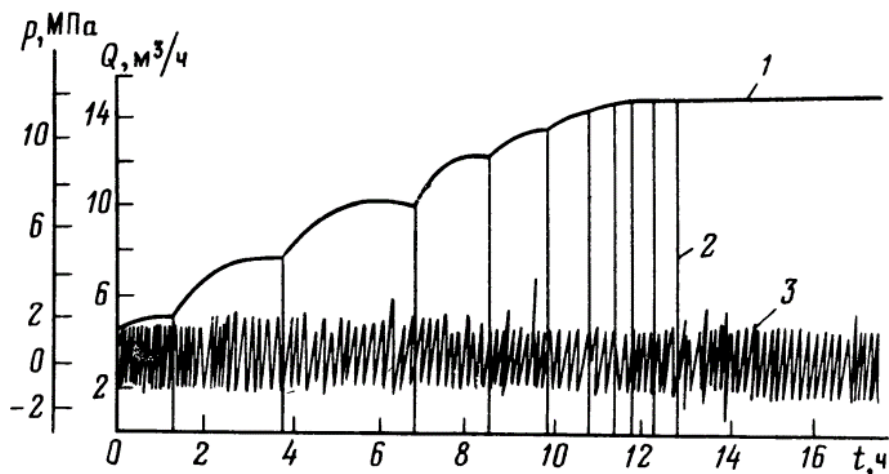


Рисунок 2. График освоения скважины: 1 — производительность скважины; 2 — гидродинамическое давление при гидравлическом ударе; 3 — гидродинамическое давление при работе поршневого насоса

Выводы

На основе изложенного материала можно сделать вывод, что эффективность и долговечность работы водозаборной скважины зависят от правильного выбора технологии её освоения. Применение высокоэффективных методов, таких как гидроимпульсное воздействие с использованием струйных насосов, способствует значительному улучшению притока воды и увеличивает срок службы скважины. Комбинированное воздействие откачек и гидравлических ударов помогает удалить загрязнения и повысить производительность системы, что делает этот подход одним из наиболее перспективных для повышения дебита и стабильности работы водозаборов.

Библиография

1. Крепление, испытание и освоение нефтяных и газовых скважин: Учебное пособие /Л.Н.Долгих; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2007, - 189 с.
2. Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов: учеб. пособие: в 3 ч. / А.А. Рыбин, Д.И. Шишлянников, С.В. Воробель. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. Ч. III: Оборудование для эксплуатации и ремонта нефтяных и газовых скважин. – 208 с.
3. Водозаборные сооружения: учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» / О. С. Софинская. – Новополюк: ПГУ, 2014. – 264 с.
4. Основы расчета и конструирования насосно-эжекторных установок. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. – 300 с.: ил.

Влияние анизотропии на изменения интенсивности искривления скважины

***Попов В.О.* (МГРИ, popovvo@mgri.ru),
Соловьев Н.В. (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru),
Курамшина Э.Р. (МГРИ, kuramshinaer@mgri.ru)***

Аннотация

Важнейшее влияние на искривление скважин оказывает анизотропия горных пород. Анизотропия - неодинаковость свойств некоторой среды в разных направлениях.

Анизотропией обладают многие металлы, которые приобретают ее в процессековки, штамповки, прокатки и т.д. Неодинаковость свойств в разных направлениях присуща и целым массивам горных пород, причем эти массивы могут быть сложены из упорядоченных определенным образом анизотропных кристаллов, а могут представлять собой тонкослоистую массу, состоящую из мелких и мельчайших частиц анизотропных и изотропных кристаллов и их обломков.

С позиций направленного бурения наибольший интерес представляет анизотропия механических и некоторых физико-технических свойств, в частности анизотропия буримости горных пород.

Анизотропными могут быть любые породы, и именно: магматические, осадочные и метаморфические. При этом анизотропия может быть присуща породам с момента их образования, а может появиться в процессе изменения, чаще всего при динамометаморфизме.

Ключевые слова

Бурение скважин малыми диаметрами, анизотропия, траектория бурения скважин

Теория

Механизмы и причины бурения скважин в анизотропных породах – сложная задача, часто приводящая к отклонению ствола от заданного проектного направления. Это явление, называется искривлением скважин, обусловлено специфическими свойствами анизотропных пород, характеризующихся неравномерностью физико-механических свойств в разных направлениях.

В основе большинства теорий, объясняющих этот процесс, лежат два основных принципа, которые могут действовать как совместно, так и по отдельности.

Принцип 1: Асимметрия разрушения породы.

Этот принцип базируется на неравномерности процесса разрушения породы под воздействием породоразрушающего элемента (буровой коронки). При взаимодействии коронки с анизотропной породой, например, сланцами, скол породы приобретает асимметричную форму. Это связано с различной сопротивляемостью породы разрушению в разных направлениях. Если плоскости сланцеватости ориентированы под углом к оси скважины, скол будет происходить преимущественно вдоль этих плоскостей, создавая неравномерное воздействие на коронку. В результате, коронке передается боковая сила, вызывающая отклонение скважины.

Принцип 2: Неравномерность скорости продольного перемещения коронки.

В анизотропных породах скорость разрушения горной породы и скорость продольного перемещения коронки, зависит от ориентации плоскостей анизотропии относительно оси скважины. В направлениях с меньшим сопротивлением коронке легче продвигаться, что приводит к ее вращению и, как следствие, к искривлению скважины. Например, если коронке легче продвигаться вдоль плоскости сланцеватости, скважина будет отклоняться в этом направлении. Этот принцип также объясняет, почему скважина может отклоняться даже при

симметричном разрушении породы, если скорости разрушения в разных направлениях существенно отличаются.

Механизм искривления на примере:

Рассмотрим более детально процесс внедрения породоразрушающего элемента в породу. При приложении вертикальной силы F_v (сила, направленная вдоль оси скважины), коронки внедряется в породу, сжимая её в определенном объёме. После достижения предела прочности породы, происходит её объемное разрушение. Образуется зона измельченной породы и осколки, отслаивающиеся вдоль плоскостей сланцеватости. Взаимодействие коронки с ненарушенной стенкой лунки при продольном перемещении коронки генерирует поперечную силу F_n . Эта сила, возникающая из-за асимметричного разрушения или разницы скоростей резания в различных направлениях, отклоняет скважину от первоначального направления. В случае наклонного залегания плоскостей сланцеватости, скважина, как правило, отклоняется в сторону восстания пласта.

Искривление скважин в анизотропных породах – комплексный процесс, зависящий от взаимодействия различных факторов. Понимание принципов асимметричного разрушения и неравномерности скорости продольного перемещения коронки позволяет лучше прогнозировать и корректировать траекторию скважины, что критически важно для успешного проведения геологоразведочных и добычных работ. Дальнейшие исследования в этой области направлены на более точное моделирование процесса искривления и разработку эффективных методов управления траекторией бурения.

Традиционные модели прогнозирования траектории бурения не всегда адекватно отражают реальную картину, особенно в случае анизотропии.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на установке УМГП-3 по методике Л.А. Шрейнера, выявили закономерности, радикально расходящиеся с общепринятыми представлениями.

Эксперименты проводились с использованием цилиндрического пуансона диаметром 1,5 мм для разрушения образцов горных пород, представляющих собой лавобрекчии, слабо рассланцованные известково-глинистые алевролиты и сланцы различного состава. Образцы выпиливались из кернов под различными углами к плоскости сланцеватости, что позволило изучить влияние анизотропии на процесс разрушения и, как следствие, на траекторию бурения.

После каждого акта разрушения лунка очищалась, и ее форма и размеры тщательно фиксировались с помощью измерительного микроскопа (рис.1). Полученные данные демонстрируют парадоксальное поведение: при угле падения слоев менее 45° , скважина отклонялась в сторону восстания пластов. Однако, при углах падения свыше 45° , наблюдалось отклонение в сторону падения. Это явление резко контрастирует с общепринятыми представлениями о естественном искривлении скважин, где обычно предполагается преобладание отклонения в сторону падения пластов независимо от угла их наклона.

Такое аномальное поведение, вероятно, объясняется специфическими механизмами разрушения анизотропных пород. При малых углах падения, возможно, преобладает разрушение по плоскостям сланцеватости, что приводит к отклонению в сторону восстания. С увеличением угла падения, влияние сланцеватости ослабевает, и механизмы разрушения становятся более сложными, что может объяснять отклонение в сторону падения.

Однако, для точного объяснения необходимы дальнейшие исследования, включающие детальный анализ микроструктуры пород и моделирование процесса разрушения на основе полученных экспериментальных данных. На рис. 2 указано типизированные профили и планы лунок разрушения, что позволило наглядно продемонстрировать полученные результаты и подтвердить описанные выше аномалии.

Анализ этих графиков помог дать более глубокое понимание механизмов, ответственных за наблюдаемое аномальное искривление скважин.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для прогнозирования траектории бурения скважин в анизотропных породах. Необходимо разработать новые модели, учитывающие выявленные аномалии, что позволит повысить точность прогнозирования и эффективность буровых работ, сократив затраты и предотвратив нежелательные отклонения ствола скважины. Дальнейшие исследования в этом направлении крайне необходимы для совершенствования технологий бурения и повышения эффективности добычи полезных ископаемых.

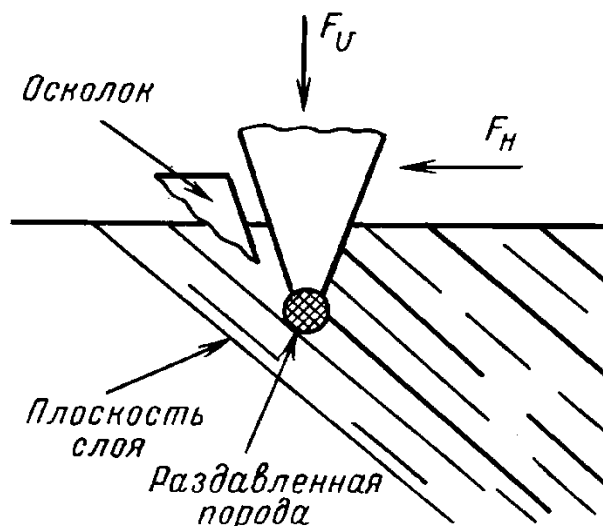


Рисунок 9. Схема предпочтительного образования осколков в анизотропной породе (по Р.Т. Макламуру)

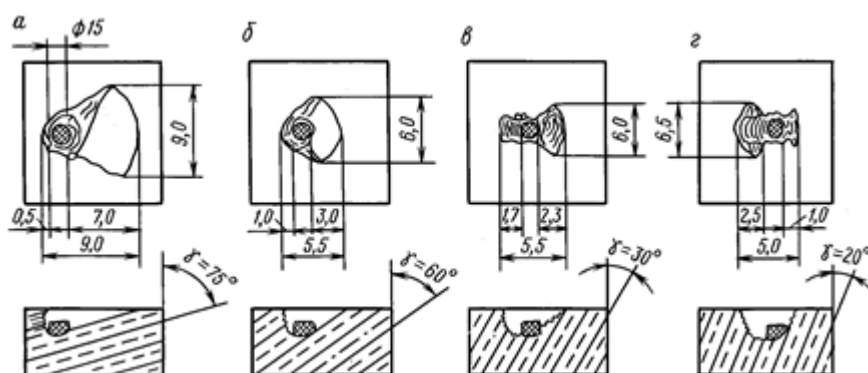


Рисунок 10. Типизированные формы и размеры лунок разрушения в анизотропных горных породах при различных углах встречи γ плоскости сланцеватости

Наиболее крупной по площади является лунка разрушения, полученная при больших значениях угла γ , равных 75° (рис. 2,а). Наибольшая часть породы скалывается по восстанию плоскости сланцеватости, причем плоскость скола очень чистая и ровная. По падению плоскости сланцеватости скалывания почти не происходит. Необходимо акцентировать внимание на том, что осколок породы отделяется именно по плоскости делимости

(сланцеватость в данном случае) от основания зоны смятия до выхода плоскости делимости на поверхность.

С уменьшением угла встречи до 60° (рис.2,б) картина скалывания породы принципиально не изменяется. Осколок породы отделяется по плоскости сланцеватости, имеет ровную нижнюю поверхность. Однако имеются и различия. Горизонтальные размеры лунки разрушения существенно меньше, чем при угле встречи 75° , а зона смятия породы находится несколько ближе к центру лунки.

Эти тенденции развиваются с уменьшением угла встречи плоскости сланцеватости до 30° и 20° (рис.2, в,г). При таких углах встречи зона смятия приближается к передней стороне лунки. Большая часть породы скалывается в тыльной части лунки в направлении падения плоскости сланцеватости. Передняя часть скола проработана плохо и не обладает ровной плоскостной формой.

Приведенные наблюдения позволяют понять, что искривление в сторону восстания пласта при углах встречи плоскости сланцеватости более 45° и в сторону падения плоскости сланцеватости при углах встречи менее 45° . Однако в анизотропных породах искривление скважин по падению плоскости сланцеватости происходит весьма редко и только при малых углах встречи $10-20^\circ$.

Выводы

Интенсивность искривления зависит от степени анизотропии пород. Чем больше степень анизотропии, тем выше интенсивность искривления. Показатель анизотропии по буримости зависит от параметров режима бурения. Он возрастает с увеличением осевой нагрузки и снижается с ростом частоты вращения. Причем при частотах вращения свыше тысячи оборотов в минуту, он, в ряде случаев, снижается до единицы. То есть, такой фактор как анизотропия пород, перестает оказывать влияние на искривление скважин.

Таким образом, знание закономерностей изменения показателя анизотропии пород по буримости позволяет управлять процессом искривления технологическими методами.

Скважина должна отклоняться всегда в направлении восстания плоскости сланцеватости, но с несколько меньшей интенсивностью, чем это происходило бы, будь образец полностью анизотропен. Однако, как свидетельствуют приведенные выше результаты, этого не происходит.

Библиография

1. Костин Ю.С., Современные методы направленного бурения скважин. Недра, Москва, 1981;
2. Кривошеев В.В., Теория и практика управления искривлением скважин в анизотропных породах, Вестник Югорского государственного университета, 2005;
3. Нескоромных В.В. Механика разрушения анизотропных горных пород при бурении скважин заданного направления. – М.: МГП «Геоинформмарк», 1997;
4. Н. В. Соловьев, В. В. Кривошеев, Д. Н. Башкатов и др., Бурение разведочных скважин, М.: Высш. шк., 2007.

Современные технологии повышения качества цементирования скважин

П.В. Овчинников* (МГРИ, ovchinnikovpv@mgri.ru)

Аннотация

Рассмотрены современные применяемые технологии и тампонажные материалы, результаты лабораторных исследований, эффективных решений и промысловых испытаний в области цементирования скважин. Проведена оценка качества цементирования скважин на нефтяных и газовых месторождениях Российской Федерации. Рассмотрены актуальные направления и задачи совершенствования технологий цементирования, которые могут быть потенциальными темами прикладных исследовательских и проектных работ, выпускных квалификационных работ студентов.

Ключевые слова

Цементирование, крепление, тампонажный материал, цементный раствор, герметичность, контакт цементного камня, качество цементирования

Теория

Проектирование и производство работ по цементированию скважин, производится с учетом результатов исследований и внедрения современных технологических решений в области крепления скважин, изучение, анализ и постоянный мониторинг которых выполняется коллективом специалистов проектных и научно-исследовательских организаций, организаций-недропользователей и организаций, осуществляющих производство буровых работ и оказание сервисных услуг по цементированию скважин.

В последние годы геолого-технические условия строительства скважин на месторождениях РФ значительно осложнились. Во многом это обусловлено переходом основных объектов эксплуатации в позднюю стадию разработки, повышающимися требованиями к качеству строительства скважин, применением новых технологий. В отдельных случаях, задачу обеспечения качества цементирования осложняет наличие аномально-высокого пластового давления (АВПД), а на газовых месторождениях наличие газоносных пластов (пластов с высоким газовым фактором), в том числе содержащих агрессивные компоненты (сероводород, углекислый газ). С 2000-х годов, широко применяется технологии реконструкции скважин методом резки боковых стволов и углубления существующих скважин на нижележащие объекты (в настоящее время ежегодно реконструируют более 1000 скважин).

В Западной Сибири увеличиваются объемы работ по строительству скважин на юрские горизонты (глубиной залегания по вертикали 2800-2900 м и более к северу региона), в настоящее время они становятся основным целевым объектом бурения. Широко распространяется с 1990-х годов строительство скважин с горизонтальным окончанием. Освоено строительство многозабойных скважин, а также скважин с горизонтальным окончанием оснащенных оборудованием для проведения многозонного гидроразрыва пласта (ГРП) в коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами.

В соответствии с геолого-техническими условиями крепления скважин на месторождениях Российской Федерации, можно выделить следующую классификацию условий сложности цементирования (Таблица 1).

Таблица 1. Классификация условий сложности цементировании скважин на месторождениях Российской Федерации

Условия цементирования	Регион / объект буровых работ					
	Западная Сибирь, Ямал	Пермский край	Республика Коми	Месторождения Южного ФО (Поволжье, Волгоградская область, Саратовская область и др.)	Астраханская область (АГКМ, Оренбургская область и др.)	Объекты бурения на шельфе
Наличие ММП	+		+			
АВПД	+		+		+	
АНПД	+	+	+	+		
Поглощения		+	+	+	+	+
Газ, высокий газовый фактор	+		+		+	+
Высокие температуры, последующий высокотемпературный нагрев			+	+		
Горизонтальные скважины с большим отходом от вертикали	+				+	+
Присутствие H_2S и CO_2			+	+	+	+

Применяемые технологии цементирования, с целью обеспечения качества разобщения пластов с учетом региональных геолого-технических условий строительства скважин конкретного месторождения, предусматривают [1-4]:

1) использование буферных жидкостей с повышенной моющей способностью и очищающе-разделительных составов. При работе с РУО применение буферных жидкостей двойного действия (разрушающих углеводородную пленку и обладающих повышенной абразивностью);

2) использование тампонажных растворов с высокими изоляционными свойствами и низкой фильтрацией для крепления продуктивных пластов;

3) применение облегченных микросферами тампонажных растворов (в том числе плотностью менее 1250 кг/м^3). Различные типы микросфер, выбираются применительно к конкретным условиям. Стекланные микросферы (МС) изготавливаются из натриево-боросиликатного стекла заводами стекловолокна (г. Андреевка, г. Новгород, зарубежные производители), представляют собой легкий сыпучий порошок белого цвета, состоящий из отдельных полых частиц сферической формы размером в пределах 15-200 мкм, (рис. 1а), плотностью $120-320 \text{ кг/м}^3$. Прочность оболочки на гидростатическое сжатие составляет от 6

до 20 МПа. Химико-минералогический состав: SiO_2 –60-80%; Na_2O –5-16%; CaO –5-25%; K_2O – 5-16%; Na_2O –5-16%. Микросферы характеризуются хорошей теплоизолирующей способностью. Результаты микроструктурных исследований (рис. 1б) показывают равномерное распределение микросфер в объеме цементной матрицы. Высокопрочные стеклянные микросферы (ВМС) – одна из марок стеклянных микросфер, плотностью от 200 кг/м³ имеют прочность оболочки на гидростатическое сжатие 50-56 МПа (до 80 МПа).

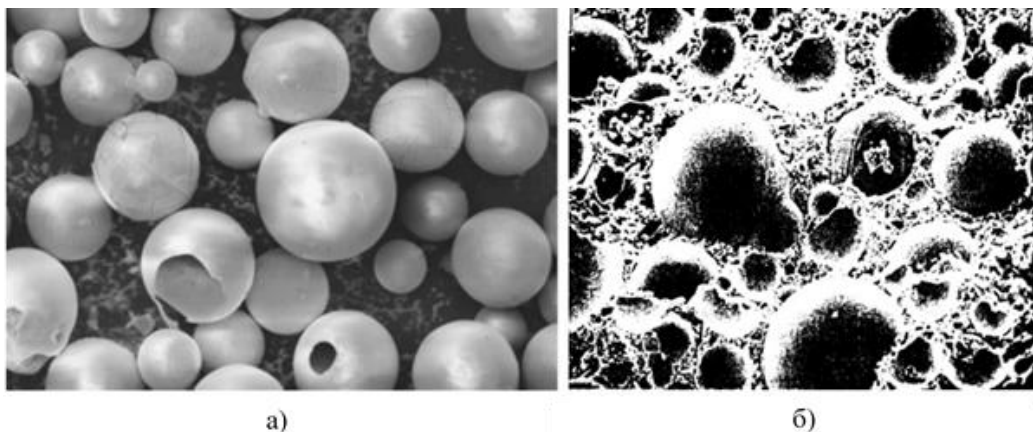


Рисунок 1. Полые стеклянные микросферы ПСМС (фото):

а) полые стеклянные микросферы ПСМС (увеличение $\times 400$);

б) микроструктура цементного камня с добавкой микросфер ПСМС (увеличение $\times 400$)

4) применение в условиях отсутствия или малой перемычки между водо- и нефтенасыщенной частью пласта цементно-полимерных композиций с минимальным (около 0,3) водоцементным отношением;

5) использование ударостойкого тампонажного цемента, армированного полипропиленовыми волокнами, для скважин, запланированных под ГРП;

6) технологии предупреждения межколонных давлений в газовых и газоконденсатных скважинах, предусматривающие закачку в межтрубное пространство гелиевого пакера, поддержание противодавления на пласты в течении ОЗЦ, введение в цемент газоблокирующих добавок (в том числе совместное применение технологий);

7) применение самовосстанавливающихся («самозалечивающихся») тампонажных составов, способных восстанавливать (за счет роста в цементе кристаллов) герметичность затрубного пространства в случае образования микрозазоров.

8) разработка тампонажных систем для цементирования паронагнетательных скважин с учетом моделирования циклически изменяющихся температурных нагрузок при эксплуатации [3-4];

В качестве основных факторов, оказывающих негативное влияние на качество крепления скважин, отмечены следующие:

- утолщение фильтрационной корки промывочной жидкости на стенках скважины и обсадной колонны при длительных (свыше 4 часов) промывках ствола скважины перед цементированием;

- «прошивание» цементного камня пластовым флюидом в период ОЗЦ, из-за превышения пластового давления над гидростатическим давлением столба тампонажного раствора;

- неудовлетворительные характеристики тампонажного раствора (большой период между началом и концом сроков его схватывания, низкие адгезионные и прочностные характеристики цементного камня);

- разрушение цементного кольца от нагрузок, возникающих при бурении, освоении и эксплуатации скважин (при перфорации, разбуривании мостов, опрессовке обсадных колонн и ГРП);

- на отдельных месторождениях при выполнении работ по креплению скважин отмечается низкий показатель надежности заколонных пакеров;

- поглощения при цементировании хвостовиков («оголение» головы хвостовика приводит к негерметичности крепи).

Основные виды выявляемых нарушений технологии производства работ:

- отклонения параметров бурового раствора от проектных данных (превышение плотности и водоотдачи, несоответствие СНС и ДНС) приводят к осложнению состояния ствола скважины (каверны, сужения, поглощения, глинистая корка на стенках скважины), не обеспечивается полное вытеснение бурового раствора;

- отклонения от проектной оснастки колонн (несоблюдение центрации);

- неудовлетворительная подготовка ствола скважины;

- при цементировании обсадных колонн с антикоррозийным покрытием характерно низкое качество контакта цементного камня с колонной.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует единая методика оценки качества цементирования, в различных регионах деятельности организаций-недропользователей применяются различные подходы и методики оценки качества. Необходима унификация подходов к оценке качества цементирования обсадных колонн и критериев оценки.

Выводы

Анализ применяемых технологий показывает, что в целом, качество цементирования обсадных колонн находится на приемлемом уровне. При цементировании используются современные технологии, эффективные буферные жидкости и тампонажные составы (облегченные, расширяющиеся, полимерцементные, утяжеленные и другие), расширение объектов применения которых актуально.

Разработку решений по повышению качества цементирования необходимо проводить с учетом региональных геолого-технических условий строительства скважин конкретного месторождения, а также нагрузок, ожидаемых в течении всего цикла эксплуатации скважины.

Библиография

1. Направления повышения качества цементирования скважин: учебное пособие / В.П. Овчинников, П.В. Овчинников, А.С. Сырчина [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет ТИУ, 2024. – 89 с. – Текст: непосредственный. ISBN 978-5-9961-3313-0.

2. Направления совершенствовании конструкций, технологий бурения и заканчивания скважин / П.В. Овчинников, А.С. Сырчина. - Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. № 5. С. 22-32.

3. Разработка термостойких тампонажных материалов для крепления скважин при тепловых методах добычи / А.В. Мелехов, В.П. Овчинников, О.В. Рожкова [и др.]. - Текст: непосредственный // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2023. №2. С.2-6.

4. Технологические решения по строительству скважин для добычи высоковязких нефтей: учебник / В. П. Овчинников, О. В. Рожкова, П. В. Овчинников [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет ТИУ, 2024.– 285 с. – Текст: непосредственный. ISBN 978-5-9961-3354-3.

Бурение и отбор керна в сложных горно-геологических условиях: анализ и выбор эффективного способа бурения

***Румянцев А.Д.* (МГРИ, alexeirumyantsew@gmail.com),
Тунгусов С.А. (МГРИ, tungusovsa@mgri.com)***

Аннотация

В работе рассматриваются технологии бурения и отбора керна, применяемые в сложных горно-геологических условиях, в частности, на Лаптапайском и Егартинском участках, характеризующихся наличием устойчивых многолетнемерзлых пород и породами высокой прочности. Проведен анализ существующих способов бурения, включая вращательное алмазное бурение с применением снарядов со съемным керноприемниками (ССК), ударно-вращательное бурение пневмоударниками и бурение гидроударниками с ССК. Сделан вывод о целесообразности использования комплекса снарядов со съемным керноприемником (КССК) с гидроударником для повышения эффективности бурения скважин.

Результатом работы является обоснование выбора оптимального способа бурения скважин для конкретных горно-геологических условий.

Ключевые слова

Отбор керна, съемный керноприемник, гидроударник, ударно-вращательное бурение

Теория

Войкаро-Сыньинский массив (рисунок 1) расположен в основании офиолитовой серии островодужной коры Войкарской зоны, надвинутой по зоне ГУГР (зона надвига восточного падения под углами 40-45°) на шельфовые и глубоководные осадочные палеозойские комплексы (Лемвинская и Елецкая структурно-формационные зоны) пассивной окраины Восточно-Европейского континента (ВЕК). Строение ГУГР в Войкарской зоне очень сложное и характеризуется крупными структурно-тектоническими мегаблоками ультрабазитов, габброидов и пород «полосчатого» комплекса.

Дунит-гарцбургитовый структурно-вещественный комплекс занимает на массиве около 20-30 % площади ультрабазитов, значительно уступая гарцбургитовому структурно-вещественному комплексу.

Поисковое бурение на Лаптапайском и Егартинском проводилось в два этапа с целью локализации рудных тел. Все скважины бурились в условиях характеризующихся наличием устойчивых многолетнемерзлых пород. Выход керна по вмещающим породам и полезному ископаемому при использовании снаряда со съемным керноприемником, составил 95 %. Для обеспечения качественного выхода керна по полезному ископаемому применялся специальный технологический режим бурения с ограничением длины рейса и режима промывки. После окончания бурения во всех поисковых скважинах выполнены геофизические исследования.

Бурение скважин в основном осуществлялось с использованием двух диаметров, реже — одного. Поскольку разрез был сложен преимущественно дунитами, для эффективного бурения было принято решение использовать алмазные коронки двух типоразмеров: диаметром 95 мм (ССК) 23А3 (НQ) d.95,6/63,5 мм и 76 мм (ССК) 23А3 (NQ) d.75,3/47,6 мм соответственно. Получаемый диаметр керна, равный 47,6 мм полностью удовлетворял требованиям геологической службы.



Рисунок 1. Геологическое положение Войкаро-Сыньинского массива

В сложных горно-геологических условиях применяются различные методы бурения и породоразрушающие инструменты, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Рассмотрим основные из них.

Вращательное алмазное бурение с использованием снаряда со съемным керноприемником (ССК) – это технология, сочетающая вращательное бурение и возможность получения керна без подъема буровой колонны.

Преимуществами данной технологии являются: высокое качество керна, высокая рейсовая скорость, сокращение времени бурения, широкий диапазон пород, возможность применения при значительной глубине скважины, возможность организации эффективного удаления шлама [1].

К недостаткам данной технологии стоит отнести высокую стоимость оборудования и инструмента, необходимость применения алмазных коронок с повышенной износостойкостью, риск заклинивания керноприемника при подъеме и спуске его внутри колонны труб, ограничения по диаметру получаемого керна, высокие требования к квалификации персонала.

Ударно-вращательное бурение с продувкой воздухом или пневмоударное бурение – метод, основанный на разрушении породы за счет ударного воздействия.

Преимуществами данного метода являются: высокая скорость проходки в твердых породах, простота конструкции пневмоударника, возможность бурения в мерзлых породах с охлажденным воздухом, метод позволяет производить более точное опробывание по шламу.

Недостатками данного метода являются: невозможность использования с ССК, неэффективность применения в пластичных породах, необходимость использования высокопроизводительных компрессоров, ограничения по глубине, риск осыпей и обвалов из-за практически полного отсутствия гидростатического давления на стенки скважин, значительные динамические нагрузки, приводящие к разрушению керна [2].

Наибольший интерес на рассматриваемом месторождении представлял бы способ бурения, совмещающий в себе оба рассмотренных ранее варианта. Таким способом бурения может являться бурение с гидроударником. Само по себе бурение с гидроударником известно достаточно давно [3] и имеет ряд преимуществ и недостатков.

К преимуществам гидроударного способа бурения зачастую относят повышенную скорость проходки, сохранение качества керна (более мягкое воздействие по сравнению с

пневмоударником), уменьшение износа алмазной коронки, уменьшение риска заклинивания керна, лучшее удаление шлама вследствие наличия пульсаций [4].

К недостаткам следует отнести: высокую стоимость изготовления гидроударника, повышенные требования к буровому раствору, в частности, к системе их очистки от шлама, требования к квалификации персонала, риск повреждения керна (хоть и меньше, чем при пневмоударном), невозможность применения в пластичных породах, высокую стоимость обслуживания оборудования, невозможность применения ССК, при стандартных реализациях бурового инструмента.

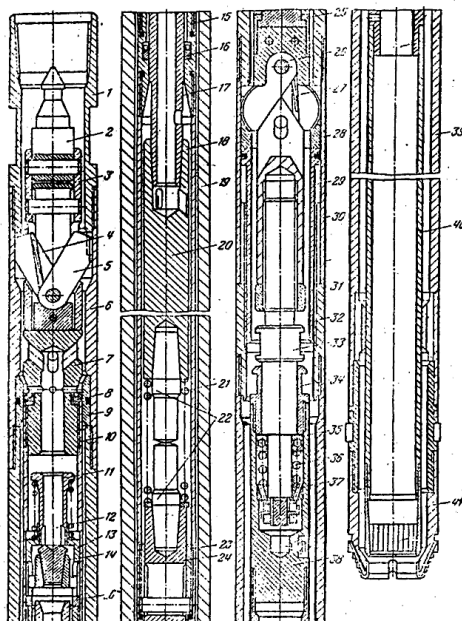


Рисунок 2. Снаряд со съемным гидроударником ССГ-76: 1 - центратор; 2 - головка; 3 - гильза; 4 - пружина; 5 - защелки; 6 - переходник; 7 - шток; 8 - манжета; 9 - цилиндр; 10 - патрубок; 11 - клапан; 12 - пружина клапана; 13 - втулка; 14 - насадка; 15 - цилиндр; 16 - манжета; 17 - поршень; 18 - горячая насадка; 19 - корпус; 20 - утяжелитель; 21 - возвратная пружина; 22 - вставки (боек и наковальня); 23 - стакан; 24 - переходник; 25 - обойма; 26 - упор; 27 - пружина; 28 - опора; 29 - шток шлицевого разъема; 30 - стакан шлицевого разъема; 31 - гайка; 32 - переходник; 33 - валик; 34 - опора подвески; 35 - подшипник; 36 - пружина; 37 - шайба; 38 - корпус подвески; 39 - колонковая труба; 40 - керноприемная труба; 41 - коронка

Исключить недостаток, связанный с применением ССК позволил разработанный специально для бурения с гидроударниками узел подвески внутренней колонковой трубы с включенным в состав гидроударником. Этот комплекс получил название ССГ-76, основные элементы конструкции представлены на рисунке.

За рубежом гидроударные машины практически не применяются, наиболее ярким представителем продвигающим гидроударное бурение зарубежном является компания Wassara. Технические решения этой компании направлены в основном на бурение сплошным забоем, и скорее могут рассматриваться, как конкуренты пневмоударникам.

Выводы

На разрезе данного участка буровых работ преобладали дуниты и гарцбургиты, которые относятся к категории горных пород с высокой прочностью и соответственно, имеют высокую категорию по буримости (VII-IX по шкале буримости горных пород).

Исходя из геологического строения и описанных выше разновидностей способов бурения и типов породоразрушающих инструментов, в данных сложных геологических условиях предлагается использовать комплекс снарядов со съемным керноприемником со съемным гидроударником.

Снаряд со съемным гидроударником ССГ-76, предназначенный для вращательно-ударного бурения геологоразведочных скважин алмазными коронками диаметром 76 мм в породах VII—X категорий по буримости в составе комплекса снарядов со съемными керноприемниками КССК-76 до глубины 1000 м.

Применение снаряда со съемным гидроударником ССГ-76, предположительно должен позволить повысить производительность бурения на 30%.

Снаряд со съемным гидроударником ССГ-76 включает съемную часть и детали, формирующие наружный корпус. Наличие внутренней не вращающейся колонковой трубы позволит, во-первых, изолировать керн от негативного воздействия промывочной жидкости, во-вторых, избежать его избирательного истирания. Следует отметить, что данное месторождение далеко не единственное, где возможно применение снарядов типа ССК с включенными в их состав гидроударниками. Учитывая отсутствия зарубежных аналогов данных технических решений и почти полувековую давность разработки комплекса ССГ-76, следует обратить внимание на возможность разработки аналогичных систем отечественными производителями, как под свои типоразмеры ССК, так и под стандарты, разработанные, например, фирмой Atlas Copco.

Благодарности

Хочу выразить благодарность моему научному руководителю Тунгусову Сергею Александровичу за помощь в поиске информации по данной теме и написании работы. Отдельная благодарность Сырчиной Анастасии Сергеевне.

Библиография

1. Нескоромных В.В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: учеб. пособие. – Красноярск: СФУ, 2012. – 294 с.
2. Липин А. А., Танайно А. С., Тимонин В. В. Современные погружные ударные машины для бурения скважин. «Стройка Санкт-Петербург», 30.04.2008, <http://stroit.ru/stati/sovremennye-pogruzhnye-udarnye-mashiny-dlya-bureniya-skvazhin/>.
3. Hartrusion. "History of Hydraulic Down-The-Hole Hammer Drilling." Hartrusion, <https://hartrusion.com/en/hydrdthhammer/history/>.
4. Тунгусов С.А. Повышение производительности бурения скважин за счет применения пульсирующей промывки Разведка и охрана недр. - 2009, №8. - с.42-47.

Научные основы высокооборотного алмазного бурения на больших глубинах разведочных скважин малого диаметра с применением скважинных преобразователей механической энергии

Склянов В.И. * (МГРИ, sklianovvi@mgri.ru)

Аннотация

Автореферат посвящен научному обоснованию параметров конструкций скважинных устройств – преобразователей частоты вращения и крутящего момента вращения, обеспечивающих интенсификацию процесса высокооборотного алмазного бурения и соответствие требованиям показателей назначения и надежности при бурении на больших глубинах разведочных скважин.

В работе изложены результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, направленных на создание цифровой технологии высокочастотного алмазного бурения разведочных скважин на больших глубинах с применением специальных забойных устройств для преобразования механической энергии при передачи её от поверхностного генератора к забою скважины и при ремонте скважин, связанных с ликвидацией прихватов буровой колонны.

Ключевые слова

Высокооборотное алмазное бурение, механическая энергия

Теория

Производительность алмазного бурения геологоразведочных скважин по мере роста глубин все в большей степени снижается в связи с недостаточной энергией, передаваемой на забой скважины. Такой важный при бурении алмазными коронками параметр режима бурения как высокая частота вращения буровой колонны [1] приходится снижать из-за увеличения износа буровых труб и расхода энергии на преодоление трения буровых труб о стенки скважины, что приводит к снижению скорости бурения и, соответственно, удорожанию метра бурения скважины.

При бурении на высоких частотах вращения бурового инструмента глубоких скважин чаще происходят аварии с буровыми колоннами. Так, например, в ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» аварии происходят преимущественно из-за прихватов и поломки буровых труб и занимают до 3% от всего баланса времени бурения глубоких геологоразведочных скважин, свыше 1000 м. Ликвидация таких аварий нередко затягивается на продолжительное время и не всегда заканчивается успешно. Все это существенно сдерживает развитие эффективной технологии бурения, приводит к значительному увеличению временных и денежных затрат на разведку месторождений и снижает качество геологической информации о полезных ископаемых.

Проведенный анализ, и конструкторская проработка скважинных устройств показали перспективность использования механической синусошариковой передачи как в забойном ускорителе (мультипликаторе) для высокочастотного алмазного бурения [1, 2], так и в устройстве для развинчивания не прихваченной части всех типоразмеров, существующих буровых, обсадных и насосно-компрессорных трубных колонн [3].

Научная новизна диссертации

1. Установлена зависимость дополнительной мощности, затрачиваемой на вращение сжатой части колонны буровых труб КССК-76, которой создается осевая нагрузка на ПРИ, от величины гидростатического давления при бурении скважин с КССК-76, для расчёта общей мощности, затрачиваемой в процессе углубки скважины.

2. Получена зависимость КПД синусошарикового цилиндрического мультипликатора от передаваемого крутящего момента для определения соответствия требованиям показателей назначения и надежности.

3. Получена зависимость глубины эффективного применения роторно-мультипликаторного бура РМБ от затрат мощности на вращение бурильной колонны с учетом конкретных геологотехнических условий буримой скважины, что позволит в процессе бурения скважины по разработанному вычислительному алгоритму определять глубину перехода на бурение с РМБ до проектной глубины на высоких частотах вращения алмазного бурового инструмента.

4. Установлена зависимость силы, необходимой для надежного распора башмаков УРТ о стенки открытого ствола скважины от величины крутящего момента, направленного на отвинчивание в резьбовом соединении извлекаемой колонны труб, которая позволила обосновать выбор конструктивных параметров УРТ.

По результатам экспериментальной оценки КПД макетного образца цилиндрического синусошарикового мультипликатора РМБ диаметром 73 мм в стендовых условиях (рис. 1) получена зависимость КПД мультипликатора от величины передаваемого крутящего момента (рис. 2), из которой следует, что с увеличением значений передаваемого крутящего момента повышается КПД мультипликатора. Это объясняется тем, что если в начальный период испытаний при минимальном крутящем моменте на ведущем валу РМБ шарик соприкасается с беговыми дорожками в точках из-за погрешностей изготовления деталей, то при повышении крутящего момента эти контакты становятся более линейными (по дугам окружностей). Это происходит вследствие упругой деформации металла в нагруженных точках и явления прирабатываемости.

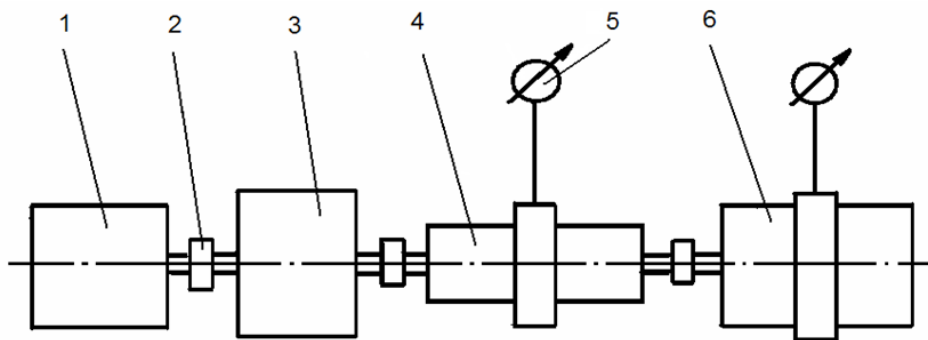


Рисунок 1. 1 - Приводной двигатель; 2 - полужесткая муфта; 3 - коробка передач; 4 - синусошариковый мультипликатор; 5 - динамометр с рычагом и деталями крепления к корпусам мультипликатора и двигателя-нагружателя; 6 - двигатель-нагружатель

Коэффициент полезного действия мультипликатора вычислялся по формуле:

$$\eta = M_1 / (M_1 + M_3) \cdot u,$$

где: u – передаточное отношение мультипликатора. ($u = 2,33$);

M_1 – крутящий момент на корпусе двигателя-нагружателя, M_3

M_2 – крутящий момент на корпусе мультипликатора, Н·м

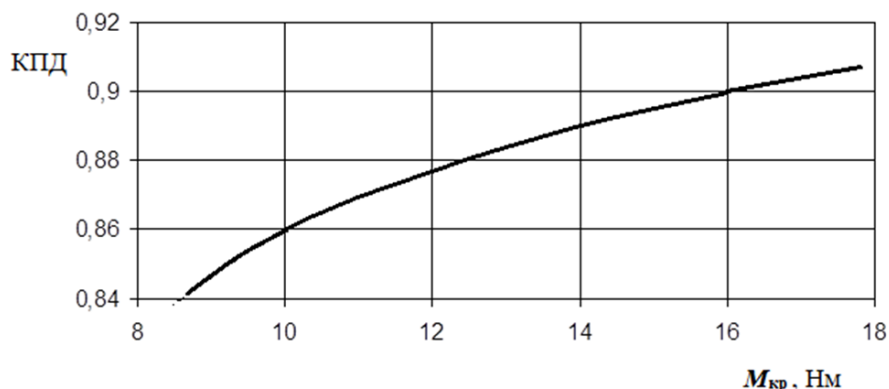


Рисунок 2. Зависимость КПД синусошарикового мультипликатора от передаваемого крутящего момента

На основании проведенных экспериментально-теоретических исследований [4] получены графики зависимости потребляемой мощности $N_{б.}$, затрачиваемой на бурение комплексом КССК-76 от частоты вращения n на глубинах 500 м, 1000 м, 1500 м и 2000 м традиционным способом и с применением РМБ (рис. 3).

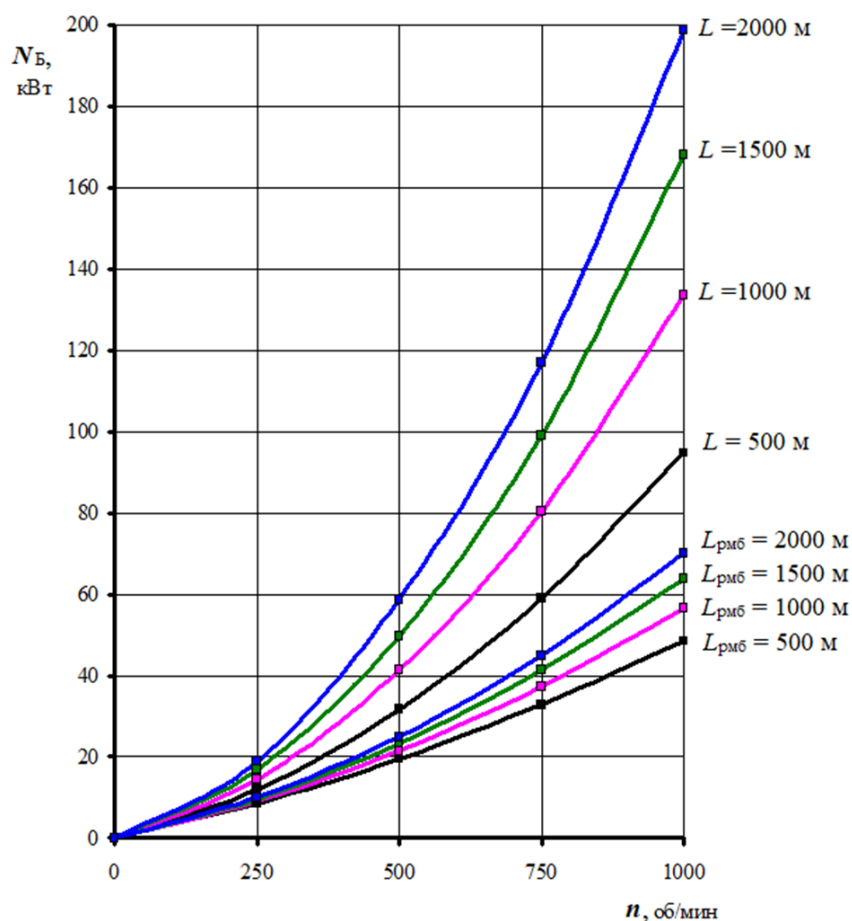


Рисунок 3. Графики зависимости потребляемой мощности $N_{б.}$, затрачиваемой на бурение комплексом КССК-76 от частоты вращения n

Технико-экономические данные, подтверждающие эффективность практического применения результатов проведенных автором исследований, получены после проведения исследований по оптимизации режимов работы бурильной колонны с учетом показателей ее надежности и предлагаемого автором преобразователя механической энергии РМБ по предложенному Козловским Е.А. и исследованному Лачиняном Л.А. для бурильной колонны второй вариант расчета – обеспечение минимально возможных сроков бурения. В этом варианте показатель эффективности – производительность бурения (механическая скорость бурения) увеличивается за счет кратного повышения оптимальной частоты вращения бурильной колонны в РМБ и передачи ее колонковой трубе с буровой коронкой. Тем самым повышается окружная скорость перемещения алмазных резцов коронки по забою, достигая или приближаясь к оптимальному режиму работы коронки.

Выводы

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке метода передачи механической энергии с поверхности на забой скважины и преобразования её с помощью специальных устройств, позволяющих реализовать высокооборотное алмазное бурение на больших глубинах геологоразведочных скважин до проектной глубины.

Библиография

1. Склянов В. И. Анализ затрат мощности на вращение бурильной колонны, оснащенной роторно-мультипликаторным буром. Разведка и охрана недр. -2016. -№ 6. - С. 36-38.
2. Склянов В.И. Забойный мультипликатор для высокочастотного алмазного бурения глубоких разведочных скважин. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2019. Т. 6. № 2. С. 239-243.
3. Склянов В.И., Тунгусов С.А., Соловьев Н.В. Исследования и конструкторско-технологические проработки устройства для извлечения из скважины трубных колонн методом развинчивания по частям Склянов В.И., Тунгусов С.А., Соловьев Н.В. Разведка и охрана недр. 2022. № 7. С. 36-41.
4. Склянов В.И. Научный подход к передаче и преобразованию механической энергии для повышения эффективности высокооборотного алмазного бурения на больших глубинах геологоразведочных скважин. Инженер-нефтяник. 2024. № 4. С. 65-69.
5. Sklyanov V. I. Analysis of power costs for the rotation of the drill string, equipped with a rotary-multiplier drill, Exploration and protection of the subsoil, 2016, no. 6, pp. 36 – 38.
6. Sklyanov V.I. Downhole multiplier for high-frequency diamond drilling of deep exploration wells. Fundamental and applied issues of mining sciences. 2019. Vol. 6. No. 2. pp. 239-243.
7. Sklyanov V.I., Tungusov S.A., Soloviev N.V. Research and design and technological development of a device for extracting pipe columns from a well by unscrewing in parts Sklyanov V.I., Tungusov S.A., Soloviev N.V. Exploration and protection of subsoil. 2022. No. 7. P. 36-41.
8. Sklyanov V.I. Scientific approach to the transmission and transformation of mechanical energy to improve the efficiency of high-speed diamond drilling at great depths of exploration wells. Petroleum Engineer. 2024. No. 4. P. 65-69.

Применение забойного мультипликатора для интенсификации процесса разрушения горных пород долотами PDC при проведении ЗБС

***Талалаев Р.С.* (ФГБОУ ВО МГРИ, tlvrms@gmail.com),
Склянов В.И. (ФГБОУ ВО МГРИ, sklianovvi@mgri.ru)***

Аннотация

Предлагается способ интенсификации разрушения горных пород при строительстве сверхглубоких, горизонтальных скважин с применением долот PDC.

Изложенная технология, предлагает использование запатентованного оборудования при алмазном бурении глубоких горизонтальных скважин. Технический результат достигается тем, что с применением роторно-мультипликаторном буром (РМБ), колонна бурильных труб связана с ведущим валом мультипликатора поступательной парой, а с заякоривающим устройством - вращательной парой, при этом заякоривающее устройство жёстко связано с корпусом мультипликатора.

Ключевые слова

Зарезка бокового ствола, скважина, скорость проходки, частота вращения, мультипликатор

Теория

Исследования в области разрушения твёрдых горных пород алмазным инструментом, опыт и технологии буровых работ и камнеобработки указывают, что резервы роста механической скорости бурения связаны, прежде всего, с повышением скорости перемещения алмазных резцов. В то же время рост скорости перемещения алмазных резцов, соответственно повышение частоты вращения бурильных колонн ограничивается реальными условиями бурового процесса. Например, при бурении глубоких скважин (до 1000 м и более) диаметром 142,9 и 126 мм алмазным породоразрушающим инструментом частота вращения колонны бурильных труб не превышает 40-60 мин⁻¹ для прямолинейного (роторного бурения) и 30-40 в направленном бурении (слайд), (при больших значениях этой величины увеличивается количество обрывов бурильной колонны, наблюдается большой износ бурильных труб и бурение происходит при существенно повышенных расходах мощности на преодоление сопротивлений при трении труб о стенки скважины). При этом, линейная скорость резания алмазами не превышает 1,7 м/с, что, как известно, недостаточно для алмазного инструмента (рекомендуемая скорость резания для импрегнированных алмазных коронок 2-5 м/сек). Используемые на практике частоты вращения алмазного вооружения бурильной колонны существенно ниже оптимальных.

Снижение механической скорости бурения, по мере углубления, определяется значительными затратами на придание вращения бурильной колонне, отработка вибраций и колебаний, обрывов работающих часто на пределе возможностей бурильных труб. Из всего выше сказанного можно понять, что для передачи необходимой нам энергии (осевая нагрузка, момент вращения) к забою – несовершенна.

Интенсификацию процесса разрушения горных пород при бурении решается переносом генератора энергии, осуществляется путем перенесения последнего в скважину. В настоящее время с этой целью применяют гидродвигатели, электробуры. Однако они имеют свои существенные недостатки.

Совершенствование долбления горных пород при использовании долот PDC заключается в следующем:

1) передача большей полезной энергии на забой, в следствии которой будет происходить его разрушение;

2) существенное повышение КПД передачи энергии к породоразрушающему инструменту с использованием РМБ, по сравнению с традиционным роторным с одинаковой частотой вращения всего инструмента.

Исходя из анализа устройств для увеличения частоты вращения породоразрушающего инструмента, была предложена новая кинематическая схема синусошарикового роторно-мультипликаторного бура (рис. 1), которую можно использовать как основу для проведения НИОКР по созданию экспериментальных образцов названного устройства.

Технический результат достигается тем, что в роторно-мультипликаторном буре, содержащем установленный на поверхности привод, колонну бурильных труб, заякоривающее устройство, установленное с возможностью взаимодействия со стенками скважины, синусошариковый мультипликатор, и породоразрушающий инструмент, жёстко скреплённый с концом ведомого вала мультипликатора, колонна бурильных труб связана с ведущим валом мультипликатора поступательной парой, а с заякоривающим устройством – вращательной парой, при этом заякоривающее устройство жёстко связано с корпусом мультипликатора.

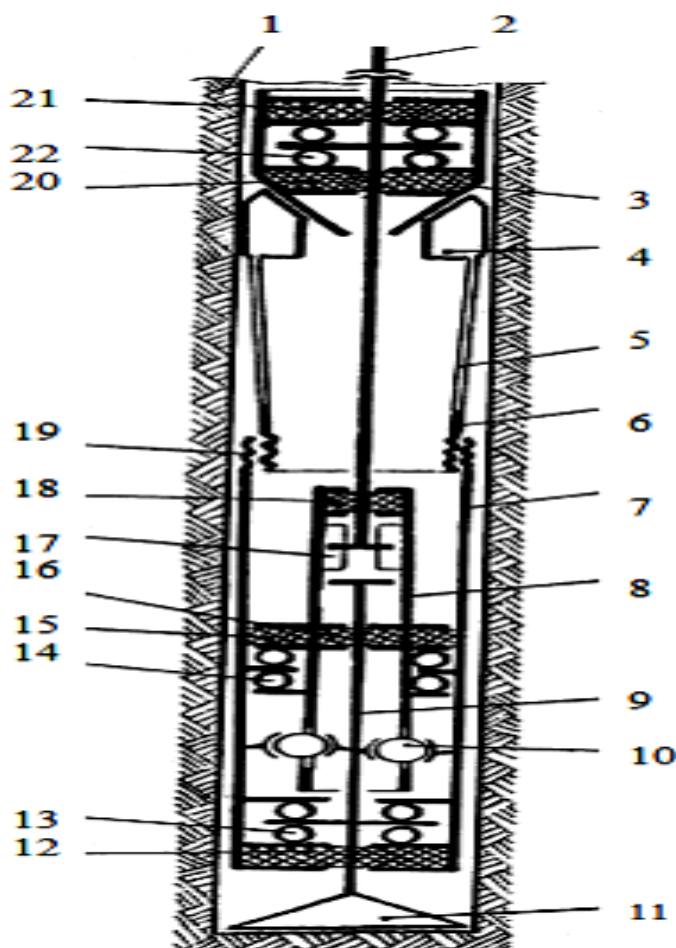


Рисунок 1. Роторно-мультипликаторный бур:

1 - ствол скважины; 2- бурильный инструмент; 3;4;5;6- детали тормозного механизма; 7;8;9;10- детали синусошарикового механизма; 11- долото PDC; 12;15;16;18;20;21- уплотнительные элементы; 13;14;22- подшипники; 17- шлицевое соединение;19- резьбовое соединение

Устройство работает следующим образом.

Осевая нагрузка от колонны бурильных труб 2 через подшипник 22 передаётся на башмаки 4 и уравнивается двумя группами сил: первая группа сил действует на башмаки со стороны породоразрушающего инструмента 11, то есть передаётся от алмазного породоразрушающего инструмента к башмакам через подшипник 13, корпус 7, резьбу 19, трубу-основание 6 и пружины 5; вторая группа сил приложена к башмакам 4 со стороны стенок скважины 1.

Из условий равновесия исходит, что увеличении осевой нагрузке, передаваемой башмакам 4 от колонны бурильных труб, будут и большими силы, направленные на внедрение элементов башмаков 4 в стенки скважины 1. Это и позволяет передать через силы сцепления или силы сопротивления резанию возникающий при бурении реактивный момент на стенки скважины 1, что, в свою очередь, обуславливает кратное увеличение частоты вращения ведомого вала 9 с породоразрушающим инструментом 11 с одновременным более интенсивным движением по оси скважины 1.

Связь колонны бурильных труб с ведущим валом мультипликатора поступательной парой обеспечивает работу синусошариковой передачи для повышения частоты вращения ведомого вала с породоразрушающим инструментом. Связь колонны бурильных труб с заякоривающим устройством вращательной парой позволяет посредством башмаков заякоривающего устройства, взаимодействующих со стенками скважины, удерживать обратный (реактивный) момент, передавая одну часть осевого усилия от бурильной колонны на стенки скважины, а другую через корпус мультипликатора - на породоразрушающий инструмент.

На (рис. 2) показаны силы, действующие в роторно-мультипликаторном буре, где: F_1 - осевая нагрузка от бурильной колонны; F_2 - радиальное усилие на прижатие тормозных башмаков к стенкам скважины; F_3 - результирующая сила, направленная вдоль поверхности клина; F_4 - осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент; φ - угол клина; φ' - угол трения; M_1 - крутящий момент в колонне бурильных труб; M_2 - крутящий момент на ведомом валу мультипликатора; i - передаточное число; η - КПД синусошариковой передачи; N_3 - мощность на забое; n_2 - частота вращения ведомого вала мультипликатора.

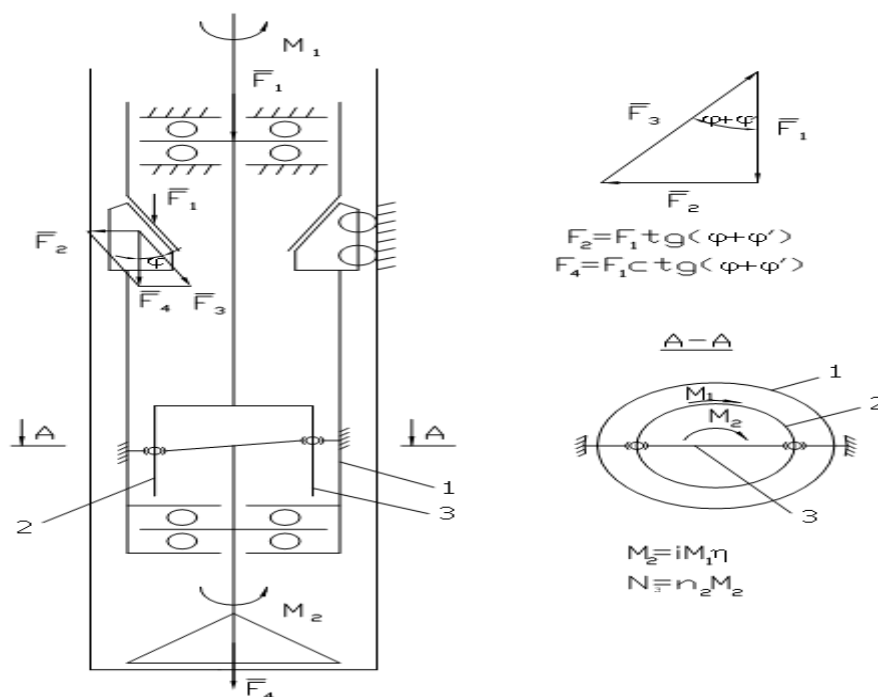


Рисунок 2. Силы, действующие в роторно-мультипликаторном буре: 1 - корпус; 2 - водило синусошарикового мультипликатора; 3 - ведомый вал

Выводы

Использование данной технологии в значительной степени ускорит процесс разрушения горных пород и как следствие уменьшит сроки строительства скважины, снизит затраты на производстве. Согласно испытаниям, проведенным на техническом стенде кафедры теоретической механики Могилёвского машиностроительного института, была проверена работоспособность, а также приемлемость синусошариковой передачи в конструкции мультипликаторного бура. Введение в конструкцию КНБК позволит вести бурение на режимах, близких к программным, снизить искривленность скважины, относительно плановым значениям, а также увеличить механическую скорость бурения в 1,5-2 раза.

Библиография

1. Исследования и конструкторско-технологические проработки синусошариковой передачи для использования в забойных устройствах / Игнатищев Р.М., Николаев Л.А., Крез А.И., Склянов В.И. и др. // Отчёт ВТК «Синус-3» на базе Могилёвского машиностроительного института, Могилёв, 1989, 27с.
2. Склянов В. И., Бибик С.Д. Роторно-мультипликаторный бур для повышения эффективности высокооборотного бурения скважин. Научный вестник Норильского индустриального института. - 2016 г., № 16.- С.17-19.
3. Соловьев Н.В., В.Ф. Бейкель. Состояние и пути повышения эффективности техники и технологии бурения скважин при выполнении геологоразведочных работ Известия вузов, геология и разведка, 2013. № 1.
4. Склянов В. И. Перепелкин М. А. Влияние частоты вращения алмазного породоразрушающего инструмента на технические показатели бурения разведочных скважин Горная промышленность. -2017. -№ 5. - С. 96-97.

Проектирование профиля наклонно-направленной скважины на Пильтун-Астохском месторождении (шельф о. Сахалин)

**Цыганков М.А.* (МГРИ, max3ds1@mail.ru),
Вайнерман Б.П. (МГРИ, bwinerman@yandex.ru)**

Аннотация

Разработка месторождений углеводородов на морском шельфе требует специальных технологий по бурению скважин. Эксплуатационные скважины бурятся с морских платформ. При этом большинство из этих скважин являются наклонно-направленными. То есть осуществляется кустовой метод бурения скважин при котором устья скважин находятся на небольшом расстоянии друг от друга (5 – 10 м), а забои располагаются в зависимости от геологических задач, возложенных на конкретные скважины.

На примере одного из участков Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения описана технология проектирования бурения добывающей наклонно-направленной скважины с горизонтальным окончанием.

Ключевые слова

Скважина, проектирование ствола скважины, разработка месторождения

Источники финансирования

Нет источников финансирования

Теория

Пильтун-Астохское нефтегазоконденсатное месторождение расположено на северо-восточном шельфе о. Сахалин, на широте южного окончания Пильтунского залива, на расстоянии 15-20 км от береговой линии.

В административном отношении участок шельфа месторождения входит в состав Сахалинской области (РФ), на сопредельной суше граничит с Охинским и Ногликским районами. Ближайшим населенным пунктом на суше является г. Оха, расположенный в 90 км к северо-западу.

Пильтун-Астохское месторождение открыто в 1986 г.

Южная часть месторождения (Астохский участок) введена в эксплуатацию в 1999 г. с установкой морской стационарной платформы "Пильтун-Астохская-А" (ПА-А).

Северная часть месторождения (Пильтунский участок) введена в эксплуатацию в 2008 г. с установкой морской стационарной платформы "Пильтун-Астохская-Б" (ПА-Б).

Данное месторождение относится к крупным по категории запасов и очень сложным по геологическому строению [3].

Общество с ограниченной ответственностью «Сахалинская Энергия» (Общество) (дочка Газпрома) является оператором проекта «Сахалин-2» и ведет разработку Пильтун-Астохского и Лунского шельфовых месторождений.

Залежи нефти, газа и конденсата на площади Пильтун-Астохского месторождения залегают в песчаных пластах и песчано-алевритовых пластах-коллекторах нижненутовского подгоризонта (верхний миоцен) на глубинах 1400–2400 м.

Для добычи нефти из неохваченной дренированием части месторождения предполагается пробурить наклонно-направленную добывающую скважину № 1 с горизонтальным окончанием с морской платформы ПА-Б (рис. 1) [4].

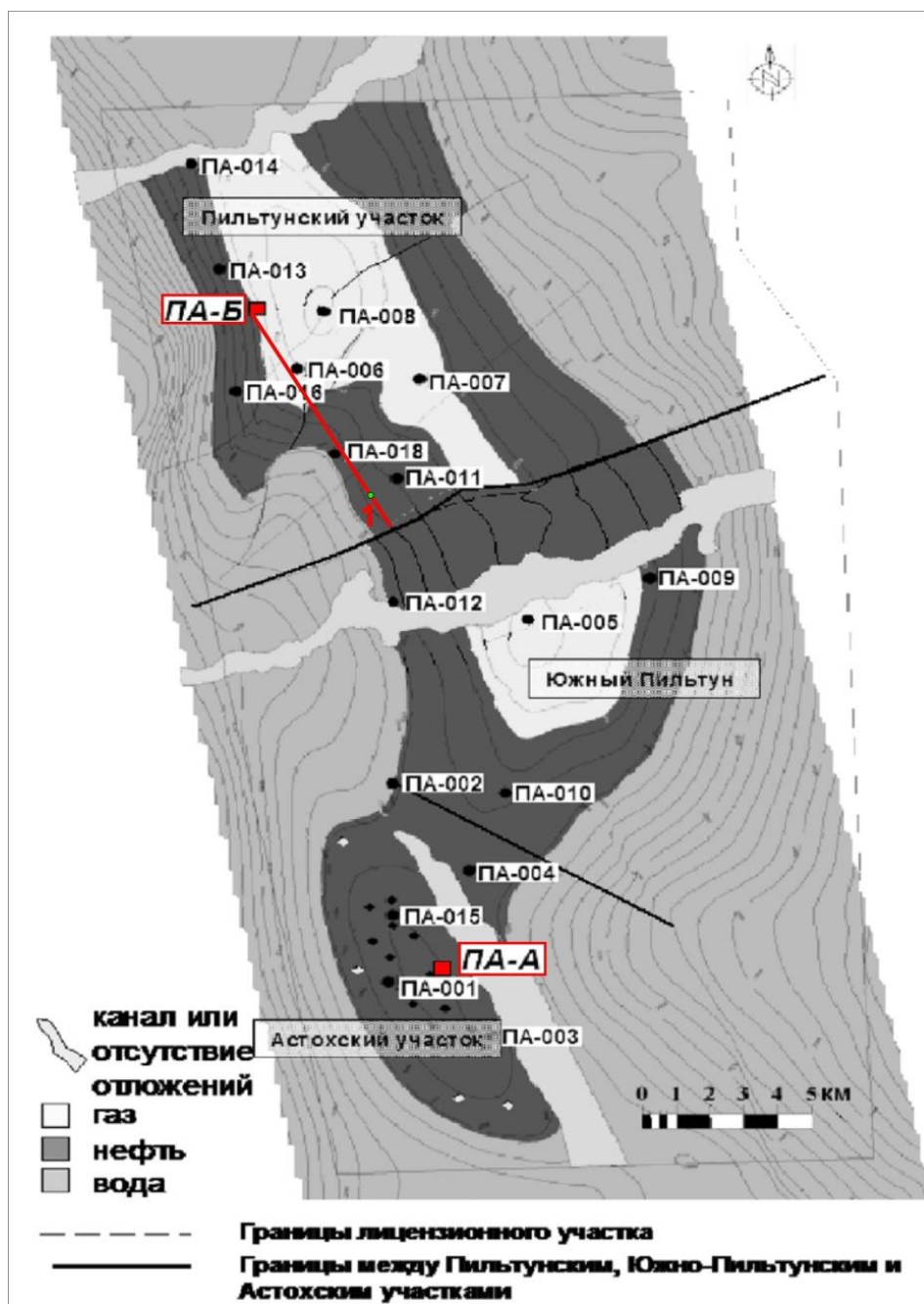


Рисунок 1. Структурная карта по кровле пласта XXI_s со скважины 1

Шельф Северо-Восточного Сахалина явился своеобразным полигоном среди остальных акваторий для отработки методики поисково-разведочных работ в условиях замерзающих морей (с довольно кратковременным периодом полевых работ 4–4,5 месяцев).

При анализе геологоразведочного процесса в разных регионах можно выделить три основных подхода к заложению скважин, которые сменяли последовательно друг друга. При первом заложение скважин происходило по методике «от известного», т.е. на границе залежи, достоверно установленной предшествующей скважиной. При применении второго подхода учитываются возможные границы залежей по предполагаемому коэффициенту заполнения ловушек углеводородами.

Развитие техники и технологии геофизических исследований позволяет в ряде случаев прогнозировать по прямым признакам положения межфазовых контактов, а, учитывая данные о региональных гидростатических делениях, рассчитывать положение контактов по результатам бурения первых поисковых скважин. Это дало возможность для применения третьего подхода – заложения скважин с учётом возможных границ залежей [6].

Разведочные скважины закладываются в участках, имеющих максимальную величину признака по всей совокупности продуктивных пластов с учётом зон резкого изменения градиента эффективной толщины. Кроме учёта зон резкого изменения градиента эффективной толщины, должна учитываться необходимость изучения строения залежи на Астохской площади.

Предполагается, что направление ствола по горизонтали (азимут) составит 147° .

Проектный горизонт – пласт XXI_s.

Расстояние от устья скважины до входа в пласт (по горизонтали) – 6000 м.

Альтитуда ротора – 63,7 м.

Абсолютная отметка кровли пласта в точке входа ствола скважины -1890 м.

По продуктивному пласту ствол пройдет по горизонтали – 1000 м, по вертикали – 10 м.

Общая длина ствола проектной скв. 1 составит 8021,1 м [1, 2, 5].

На рис. 2 представлена вертикальная проекция проектной скв. 1

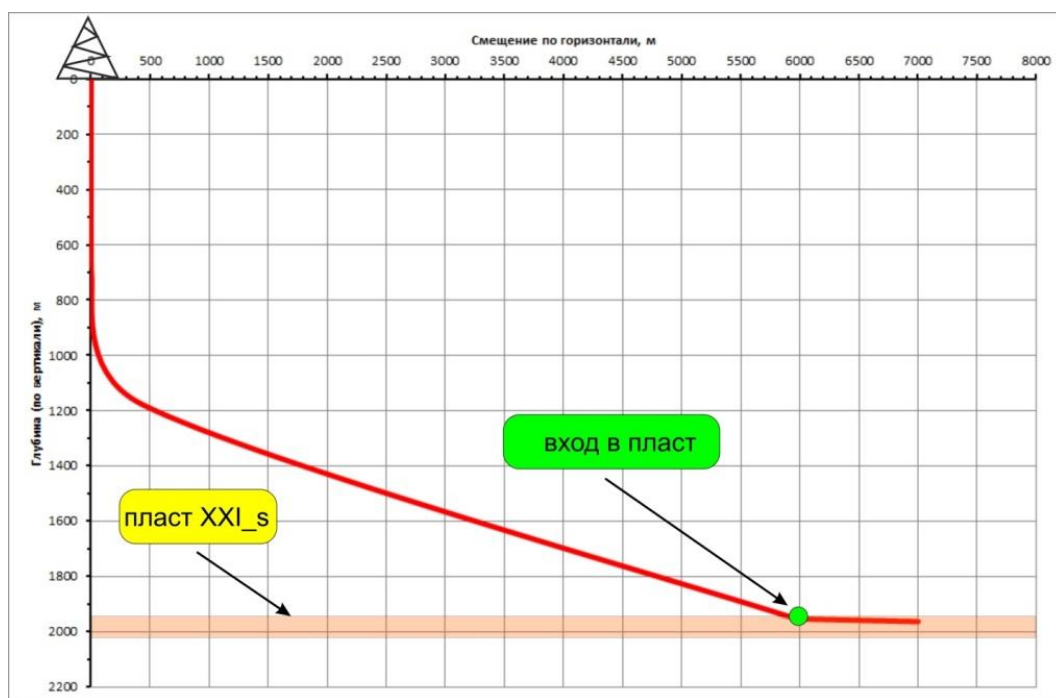


Рисунок 2. Вертикальная проекция добывающей скв. 1

Горизонтальная проекция ствола скв. 1 показана на рис. 3.

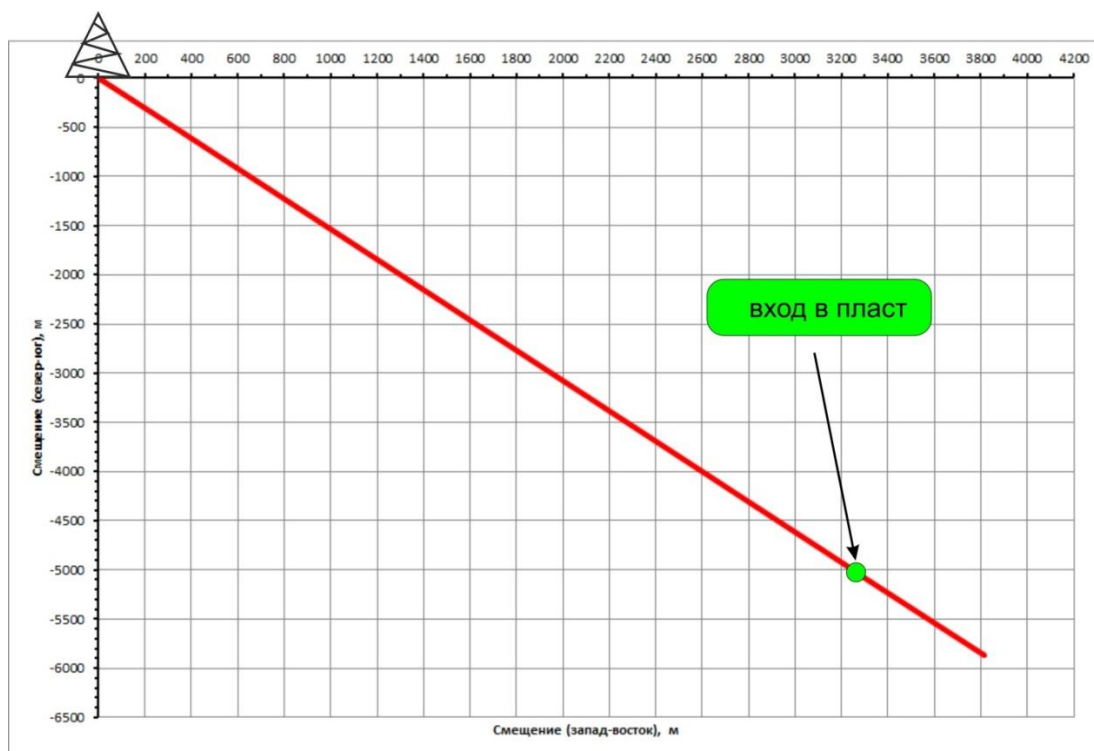


Рисунок 3. Горизонтальная проекция скв. 1

Выводы

1. Для интенсификации разработки нефтяных месторождений необходимо проектировать бурение наклонно-направленных скважин.
2. Бурение наклонно-направленных скважин с горизонтальным окончанием позволяет увеличить нефтеотдачу нефтяного пласта и интенсифицировать разработку данной нефтяной залежи.

Библиография

1. Близнюков В.Ю., Повалихин А.С., Кейн С.А. Расчёт проектного профиля наклонных и горизонтальных скважин./ Метод. указания / УГТУ, Ухта, 2014. – 40 с.
2. Вайнерман Б.П. Практическое руководство по проектированию профилей наклонно-направленных и горизонтальных скважин. - М.: МГРИ, 2022. - 44 с.
3. Марченко А.В., Моисеенков А.В., Парфенов А.М., Хабаров А.В. Особенности программы исследований морских месторождений на примере Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения проекта "Сахалин-2". Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 2 (41). г. Южно-Сахалинск, 2023 г.
4. Павлинова Н.В., Шахова А.Ю. Роль грязевого вулканизма при формировании нефтегазовых залежей Южно-Пильтунского участка Пильтун-Астохского месторождения на шельфе о. Сахалин. Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, № 2, 2016 г. с 74-81.
5. Повалихин А.С., Калинин А.Г., Бастриков С.Н., Солодкий К.М. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. – 645 с.
6. Лапотников А.Г., Котельников А.С., Аппо Й.К. Геологическое строение, перспективы нефтегазоносности и проект разведочного бурения на месторождении Пильтун-Астохское. - Булатовские чтения – сборник статей 2018. Том №3. с.153 – 165.

Обоснование выбора рациональной рецептуры бурового раствора в условиях потери деформационной устойчивости горных пород на примере месторождения X

***Данилова К.С.* (МГРИ, danilowakarina@mail.ru),
Сырчина А.С. (МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)***

Аннотация

Деформационная устойчивость горных пород оказывает влияние на все технико-технологические решения при строительстве нефтяных и газовых скважин, поэтому так важно поддерживать состояние стенок скважины в удовлетворительном состоянии. Одним из способов такого поддержания является выбор рациональной рецептуры бурового раствора для бурения в неустойчивых интервалах.

Наиболее опасными разновидностями потерь деформационной устойчивости горных пород являются обвалы, их набухание, вытекание пластичных глин. Для предупреждения и борьбы с ними важно учитывать геомеханические процессы, которые происходят в околоскважинном пространстве

Ключевые слова

Бурение, устойчивость стенок скважин, глинистые породы, осложнения, буровой раствор

Теория

Обеспечение устойчивости стенок скважин является одной из сложных технологических задач, возникающих в процессе бурения, так как большинство основных видов осложнений связано с внешним механическим и гидродинамическим воздействием на стенки скважин, что может являться причиной обрушения, осыпания, образования обвалов, каверн и других осложнений. Понимание причин неустойчивости и закономерностей разрушения стенок скважин должно базироваться на подробном теоретическом анализе геолого-технологических факторов, оказывающих непосредственное влияние на горную породу стенок в процессе формирования стволов скважин в сложных геологических условиях.

Глинистые породы составляют 80–90 % всего осадочного комплекса пород. Обрушения или пластические деформации стенок скважины после их вскрытия приводят к осложнениям, на ликвидацию которых затрачивается до 20 % производительного времени, а также дополнительный расход материалов. В ряде случаев из-за подобных осложнений не удастся произвести спуск эксплуатационной колонны до проектной глубины. Именно поэтому при бурении глубоких скважин с большими отходами от вертикали одной из основных задач является сохранение устойчивости стенок скважины.

Потеря стабильности глинистых отложений при бурении скважин происходит в основном из-за проникновения фильтрата бурового раствора между плоскостями напластования и в микротрещины породы, приводя к механическому разрушению стенок скважины (расклинивающий эффект) и значительному кавернообразованию. Длительный контакт пресной воды с глинами приводит к их избыточному увлажнению, снижению вязкости породы и началу течения глин под действием горного давления. Интенсивность этого течения зависит от количества воды, физико-механических свойств глин, величины вязкости, длительности воздействия бурового раствора на глины, а также толщины глинистых пропластков.

По мнению многих специалистов [1], для каждой площади и геолого-технических условий необходимо подбирать свой тип бурового раствора, обеспечивающий максимальную устойчивость ствола. Несмотря на проводимые исследования, проблема сохранения

устойчивости глинистых пород не решена, а эффективность рекомендуемых растворов зачастую низка.

Глины стенок скважины при взаимодействии с буровым раствором пластифицируются, становятся мягче, текут, набухают, сужая ствол (вязкопластическое течение глин). Аргиллиты при взаимодействии с буровым раствором не пластифицируются, остаются хрупкими, не набухают [2].

Аргиллиты теряют устойчивость и осыпаются из-за трещиноватости: фильтрат и/или раствор проникает в микротрещины и расклинивает (раздвигает) частицы породы, которые теряют имевшиеся контакты и осыпаются в ствол скважины. Разделение глинистых пород по характеру разрушения на пластичные глины и хрупкие сланцы (или аргиллиты) значительно упрощает и облегчает решение задачи по обеспечению устойчивости стенок скважины. Решение поставленной задачи достигается за счет выбора рабочей жидкости, соответственно, для стабилизации пластичных глин, для стабилизации хрупких сланцев, а также с учетом всех их свойств для стабилизации глин и сланцев.

Для получения и стабилизации необходимых параметров бурового раствора естественно наработанная глинистая суспензия обрабатывается химическими реагентами. В зависимости от типа применяемых для обработки глинистой суспензии химических реагентов буровые растворы делятся на:

- глинистые растворы на основе акриловых полимеров;
- утяжеленные полимерные растворы;
- глинистые биополимерные растворы;
- бинарный утяжеленный раствор (МЕГАБУР) [3].

Приготовление буровых растворов производится по специально разработанным рецептурам. Каждая рецептура отличается областью применения и, соответственно, вводимыми химреагентами. При необходимости в зависимости от осложнений производится корректировка параметров бурового раствора введением утяжелителя, кольматантов, ингибиторов глин и других реагентов. Для бурения глинистых пород, склонных к растрескиванию и осыпям, вскрытия продуктивных пластов с АВПД в условиях неустойчивых ачимовских и юрских отложений применяют бинарный утяжеленный буровой раствор МЕГАБУР.

Рецептура данного раствора включает в себя водный раствор хлористого натрия и хлористого калия, обработанный модифицированным крахмалом и ксантановым биополимером. Наличие в растворе двух видов солей взаимно усиливают ингибирующие свойства растворов. Применение МЕГАБУРа ограничено из-за сложностей при утилизации данного бурового раствора, затрачиваемого времени на его приготовление, а также высокой стоимостью. Данные ограничения приводят к широкому использованию неингибирующих глинистых буровых растворов на основе акриловых полимеров. Глинистые буровые растворы на основе акриловых полимеров способны обеспечить устойчивость ствола скважины, но при этом выбуренный шлам не ингибируется, набухает, диспергируется и приводит к дестабилизации системы со всеми вытекающими последствиями. Проникающий фильтрат взаимодействует со структурными элементами глины и разупрочняет структурные связи, что приводит к потере устойчивости глинистой породы. Поэтому буровому раствору придают «крепящие» свойства введением консолидирующих добавок, обеспечивающих сохранение прочных связей между частицами глины и устойчивость стенок [4].

Однако накопленный опыт бурения скважин свидетельствует о существенных недостатках анионно-ионных буровых растворов. Ниже приведены некоторые недостатки анионно-ионных буровых растворов. Низкие ингибирующие свойства: глины, особенно набухающие и диспергирующие, легко переходят в буровой раствор, увеличивают содержание

коллоидной и твердой фазы, повышают структурнореологические показатели, ухудшают смазывающие свойства, что в итоге снижает технико-экономические показатели.

Механизм ингибирования глин катионными полимерами существенно отличается от ингибирования анионными полимерами. Природа глин такова, что на поверхности частиц существуют положительные и отрицательные дефектные участки, которые активно взаимодействуют с молекулами воды и являются наиболее уязвимыми для проникновения водной фазы в глинистые породы. На активных участках адсорбируются катионы и/или анионы. Это приводит к нейтрализации заряда и минимизации взаимодействия глины с молекулами воды.

Катионные полимеры сильнее и необратимо закрепляются на отрицательных участках глинистых пород. Из-за преобладания отрицательно заряженных участков на поверхности глины происходит более равномерное распределение и закрепление катионного полимера и обеспечивается формирование устойчивой структурированной водной фазы в приповерхностном слое. Закрепление катионного полимера нейтрализует заряд породы, ослабляя ее электростатическое взаимодействие с водой, а формирование устойчивой структурированной прослойки воды создает экран, препятствующий проникновению водной фазы в глинистую породу. Ввод различных электролитов не разрушает структурированную прослойку воды, а, наоборот, достраивает, поэтому наблюдается усиление ингибирующего эффекта [5,6].

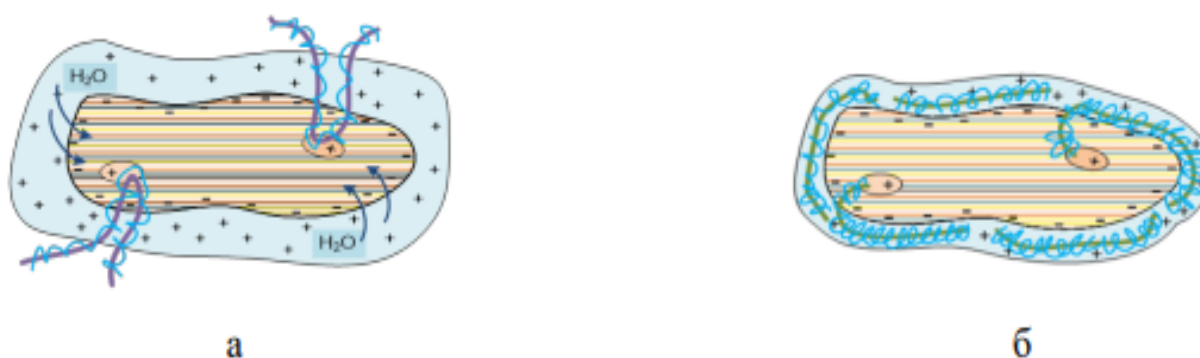


Рисунок 1. Взаимодействие глинистых частиц с полимерами:

а – взаимодействие анионных и неионных полимеров с глинистыми частицами;

б – взаимодействие катионных полимеров с глинистыми частицами

Все известные анионно-неионные полимеры, стабилизирующие буровые растворы, по своей природе проявляют невысокую соле- и термоустойчивость. Акриловые реагенты наиболее устойчивы к температурной агрессии, но теряют свои стабилизирующие свойства в минерализованной среде, а в присутствии катионов кальция и магния выпадают в осадок. Буровые растворы на основе катионных полимеров проявляют устойчивость к воздействию высоких температур до 220 °С и полисолевой агрессии в любых концентрациях. Кроме того, в катионных буровых растворах полимеры, проявляющие неустойчивость к полисолевой и температурной агрессии, «реанимируются» и приобретают повышенную устойчивость.

Оптимальное значение для всех анионно-неионных полимеров находится в диапазоне от 8 до 9, что отрицательно сказывается на устойчивости глинистых пород. Поддержание pH среды бурового раствора при высоких температурах и солевой агрессии – задача сложная. Изменение pH среды в диапазоне от 3 до 10 не оказывает влияния на свойства катионных буровых растворов, т.е. отпадает необходимость в регулировании pH среды катионных

буровых растворов. В данном случае катионный полимер в составе раствора выполняет функцию стабилизатора и к температурной агрессии.

Все используемые в настоящее время буровые растворы многокомпонентные, что создает определенные сложности при управлении свойствами и показателями раствора. Выше оговоренные ограничения на применение ингибирующих растворов и недостатки в применении растворов на основе акриловых полимеров указывают на необходимость разработки новых рецептур буровых промывочных жидкостей, обеспечивающих ингибирование глинистых пород и возможность экологически безопасной утилизации.

Выводы

1. Необходимо разделение глинистых пород по характеру разрушения на пластичные глины и хрупкие сланцы (аргиллиты).
2. Проводить исследования образцов глинистых пород инструментальными методами с целью определения химического и минералогического состава, строения, структуры и текстуры, обменной емкости и влажности, плотности и пористости.
3. Исследовать и изучать взаимодействия раствора с образцами глинистых пород на набухание, диспергирование, изменение прочности и деформации и др. Определять ингибирующие свойства раствора, капиллярную пропитку, осмос, состав и технологические показатели раствора, режим течения раствора в затрубье.
4. Осуществить выбор состава и технологических показателей бурового раствора для сохранения устойчивости стенок скважины с учетом пп. 1, 2, 3, 4.

Библиография

1. Городнов В.Д. Физико-химические методы предупреждения осложнений в бурении: учебное пособие. – М.: Недра, 1984. – 229 с.
2. Каменских, С. В. Современные способы предупреждения и ликвидации осложнений и аварий при строительстве и восстановлении нефтяных и газовых скважин: учебное пособие / С. В. Каменских. — Ухта: УГТУ, 2023. — 272 с.
3. Норов А.Д., Гайдаров А.М., Хуббатов А.А. Выбор буровых растворов для стабилизации стенок скважин // Газовая промышленность. – 2015. – № 3. – С. 85–88
4. Паршукова Л.А. Комплексный подход к проблеме устойчивости глинистых пород при бурении скважин. // Булатовские чтения. – 2017. – Том №3. – С. 222 – 230.
5. Норов А.Д., Гайдаров А.М., Хуббатов А.А. Выбор буровых растворов для стабилизации стенок скважин // Газовая промышленность. – 2015. – № 3. – С. 85–88.
6. Новиков В.С. Устойчивость глинистых пород при бурении скважин: учебное пособие. – М.: Недра, 2000. – 270 с.

Опыт использования горизонтальных скважин на месторождении Кенкияк

Башкуров А.Ю.* (МГРИ, Bashkurov_A@inbox.ru)

Аннотация

Мировой и отечественный опыт горизонтальных скважин свидетельствует о том, что их использование позволяет намного больше улучшить текущие технологические показатели разработки низко проницаемых коллекторов, а в ряде случаев перевести забалансовые запасы нефти в балансовые.

Ключевые слова

Скважина, бурение, горизонтальные скважины

Теория

Мировой и отечественный опыт горизонтальных скважин свидетельствует о том, что их использование позволяет намного больше улучшить текущие технологические показатели разработки низко проницаемых коллекторов, а в ряде случаев перевести забалансовые запасы нефти в балансовые: в частности, темпы отбора нефти из систем горизонтальных скважин (ГС) по сравнению с системами вертикальными скважинами (ВС) повышаются в 3–5 раз, увеличиваются дебиты скважин, сокращаются сроки разработки. Можно предположить, что применение ГС в этих условиях позволит обеспечить темпы выработки запасов на уровне рентабельности. Годовой темп отбора может быть не менее 2–3%, в то время как при применении ВС этот показатель не превышает 1–1,5% [1]. При этом необходимо отметить, что удельные извлекаемые запасы в расчете на одну ГС раза выше, чем для ВС.

Горизонтальные скважины имеют ряд преимуществ. Такие скважины не зависят от рельефа местности, обладают большей контактной поверхностью с нефтяными пластами, можно с точностью определить направление бурения. Наклонно-направленные скважины обладают большой способностью пропускать приток, к тому же предполагается, что по сравнению с вертикальными горизонтальные скважины с большой длиной наклонного ствола вскрывают больше трещин, поэтому в залежах с низкой проницаемостью имеют преимущества по продуктивности.

ГС имеют повышенную поверхность вскрытия пласта, снижают фильтрационное сопротивление в призабойных зонах и являются перспективным методом не только повышения производительности скважин, но и величины нефтеотдачи продуктивных пластов.

Горизонтальные скважины особенно эффективны при разработке трещиноватых коллекторов с горизонтальной проницаемостью; при освоении залежей углеводородного сырья ограниченной площадью для установки бурового оборудования; для повышения нефтеотдачи пластов при до разработке месторождений на поздней стадии эксплуатации; при разработке продуктивных коллекторов в условиях интенсивного образования газового и водного конусов; локальных залежей углеводородного вещества и др. Следовательно, повышается степень охвата пласта дренированием, возникает возможность увеличить воздействие рабочим агентом.

При применении технологии разработки нефтяных месторождений с использованием ГС можно достичь стабильного коэффициента нефтеизвлечения, равного 60–80%, за счет следующих факторов:

– ГС могут использоваться для разработки на любой стадии различных по типу и условиям залегания коллекторов;

– при проводке ГС можно обеспечить пересечение естественных вертикальных трещин в пласте, что позволит до максимума увеличить проницаемость пласта и отборы пластовых флюидов;

– для дренирования нефтяного коллектора нужно бурить в 4–5 раз меньше горизонтальных скважин, чем вертикальных. С помощью подобных скважин можно обеспечить разработку продуктивных пластов, залегающими под руслами рек, озерами, горами, городскими сооружениями и др.

Использование ГС требует за счет сокращения их общего числа на объектах значительно меньших (в 1,5–2 раза) капитальных вложений на бурение скважин при относительном росте (до 70%) стоимости каждой ГС за счет усложнения их конструкций [3]. Однако, при массовом бурении ГС стоимость одного метра проходки, как показывает мировой опыт, может быть доведена до стоимости проходки ВС. Это создает еще более благоприятные предпосылки для повышения эффективности использования ГС.

Использование горизонтальных скважин на месторождении Кенкияк позволяет значительно увеличить производительность скважин и уменьшить их количество.

В настоящее время нами рассчитано производительность горизонтальной скважины при постоянном и переменном забойном давлении. Погрешность в определении дебита скважины при принятии забойного давления постоянным составила 70 кг/сут или 0,02% [2].

Такая небольшая погрешность связана с тем, что коллектор месторождения Кенкияк является малопроницаемым, нефть маловязкой, а длина горизонтального ствола составляет всего 450 м (рис.1), что приводит к небольшому изменению интенсивности притока по стволу скважины [4].

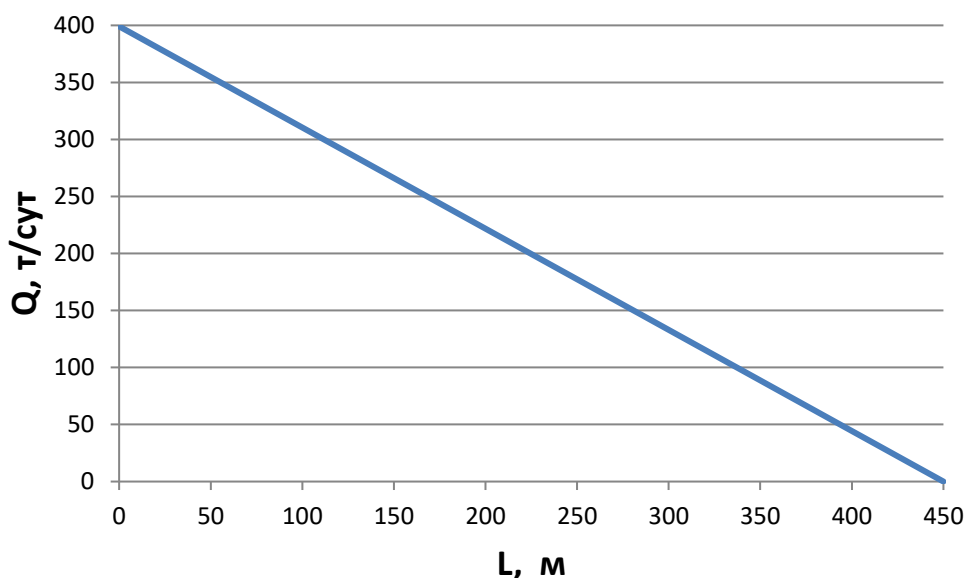


Рисунок 1. Изменение дебита нефти по длине горизонтального участка ствола

Вместе с тем, необходимо отметить, что не учет влияния потерь давления в горизонтальном стволе может привести к значительным погрешностям при больших длинах горизонтального участка ствола, в высокопроницаемых горизонтах, а также при извлечении высоковязкой нефти.

Таким образом, в последние годы новые технологии, основанные на горизонтальном бурении, произвели настоящую революцию в практике и теории нефтедобычи. Дебиты скважин, имеющих горизонтальные окончания большой протяженности, значительно

возросли. В результате разрядились сетки скважин, снизились депрессии, значительно увеличилось время безводной эксплуатации, изменились категории запасов, считавшиеся ранее не извлекаемыми, которые в настоящее время могут эффективно извлекаться в промышленных масштабах, повысилась эффективность многих старых методов воздействия на пласт при их реализации с помощью горизонтальных скважин. По многим показателям достигнуты впечатляющие результаты.

Библиография

1. Вахрушева И.А., Ручкин А.А., В.И. Саунин, В.З. Сухер, А.Н. Леванов, Ю.В. Масалкин, М.А. Романчев Результаты строительства и эксплуатации горизонтальных скважин на месторождениях нефти Западной Сибири, Нефтяное хозяйство. №2, 2010, С -35-39
2. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности / Междунар.энергет. агентство. – М.: ОЭСР/МЭА, 2004. – 120 с.
3. Григорян А.М., «Вскрытие пластов многозабойными и горизонтальными скважинами», изд-во «Недра», М.,1969 г.
4. Удалов С.Н. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013 – 459 с.+ цв. вкл. –(Серия «Учебники НГТУ).

Машинное обучение и численное моделирование: новый подход к предотвращению аварий в бурении

**Фатьянов А.А.* (ООО «Тетрасофт», a.fatyanov@tetra-soft.ru),
Джумаев Э.М. (ООО «Тетрасофт», e.dzhumaev@tetra-soft.ru),
Свечников Д.Ю. (ООО «Тетрасофт», d.svechnikov@tetra-soft.ru)**

Аннотация

Был проведен анализ существующих численных методов, а также в рамках проведения ОПР была проведена проверка интегрированных моделей с использованием численных методов и методов машинного обучения для анализа и оценки вероятности возникновения осложнений и аварий(прихваты, поглощения и проявления).

Ключевые слова

Бурение в осложненных условиях, машинное обучение, численные методы, цифровизация

Теория

Цифровизация нефтегазовой отрасли в последние годы становится стратегически важным направлением, позволяющим повысить эффективность и безопасность буровых работ. Современные технологии дают возможность интегрировать данные с буровых датчиков в режиме реального времени и анализировать их как с помощью классических численных методов, так и методов машинного обучения. Целью является создание универсального алгоритма прогнозирования риска прихвата, способного учитывать динамику изменения ключевых параметров и предупреждать о потенциальных осложнениях более чем за два часа до фактического события.[1]

1. Классические статистические методы

Расчёт отклонения и скорости изменения для каждого параметра (вес на крюке, давление и момент на роторе) с использованием скользящего окна . Это позволяет зафиксировать мгновенные скачки и при этом сгладить шум.

Определение индикаторов риска на основе заданных пороговых значений для каждого показателя. При превышении порога система назначает параметру повышенный уровень тревоги.[2]

Детерминированный алгоритм оценки риска.

Итоговый риск вычисляется как нормированная сумма индикаторов риска где превышение 50% служит сигналом для оперативного вмешательства.

2. Монте-Карло симуляция

Для учёта неопределённостей в исходных данных и уточнения диапазонов возможных сценариев проводится повторная симуляция с добавлением случайного шума к временным рядам. В результате вычисляются:

Среднее значение риска.

Стандартное отклонение, указывающее на вариацию прогноза.

Подобный подход даёт возможность оценить вероятностное распределение риска и повысить точность итоговых рекомендаций.

3.Методы глубокого обучения (LSTM)

Для прогноза риска прихвата используется модель Long Short-Term Memory

(LSTM), которая способна учитывать историческую динамику параметров и сложные временные зависимости:

Формируется обучающая выборка на основе ранее рассчитанных отклонений и скорости изменения.[3]

Данные нормализуются, и нейронная сеть обучается с использованием алгоритма Adam.

Adam представляет собой метод эффективной стохастической оптимизации, требующий только градиентов первого порядка и не требующий большого объема памяти. Метод вычисляет индивидуальные адаптивные скорости обучения для различных параметров из оценок первых и вторых моментов градиентов. Результаты прогнозирования при этом сравниваются с детерминированным расчётом риска, что позволяет скорректировать пороговые значения в автоматическом режиме.[4]

Основной алгоритм и результаты

В основе предлагаемого подхода лежит сравнение фактических показателей, получаемых с датчиков, с расчётными значениями гидравлических моделей и моделей крутящего момента. Такие параметры, как вес на крюке, давление и момент на роторе, служат индикаторами нормального режима бурения. Отклонение и скорость изменения помогают выделять начало потенциально опасного тренда, а суммирование индикаторов риска формирует детерминированную оценку риска. Если риск превышает 50%, система рекомендует принять предупредительные меры для снижения вероятности прихвата.

Использование Монте-Карло симуляции позволяет учесть разные сценарии изменения технологических параметров и оценить доверительный интервал прогнозируемого риска. Наконец, внедрение LSTM обеспечивает более точное прогнозирование, учитывающее скрытые взаимосвязи между параметрами и их исторической динамикой. При реальной работе алгоритм выявлял риск прихвата более чем за два часа до фактического осложнения и при этом не требует ручного вмешательства для калибровки под конкретные скважины.

Выводы

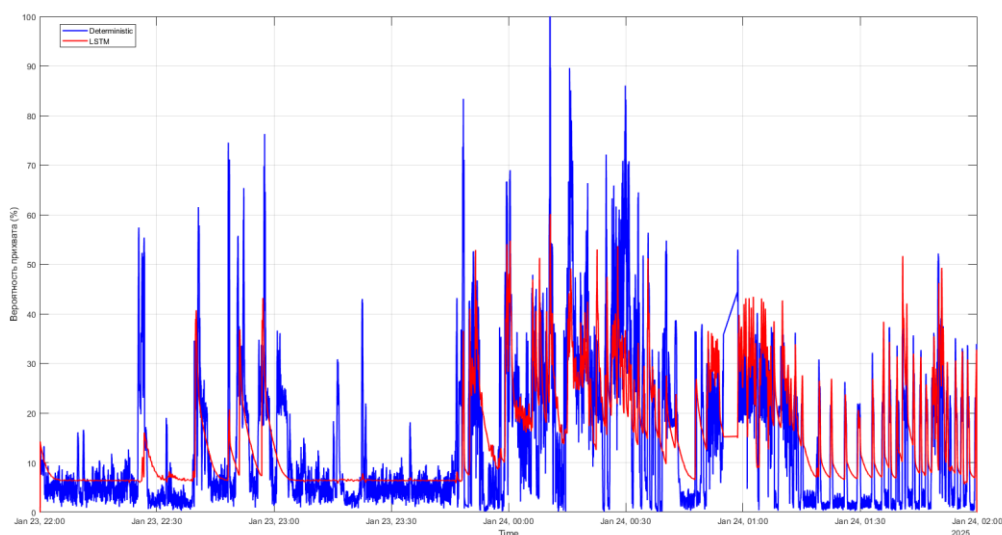


Рисунок 1. Сравнение детерминированного алгоритма оценки риска и прогнозирование методом LSTM в прогнозировании вероятности возникновения прихвата

На графике(рис.1) наглядно показано как детерминированный алгоритм оценки рисков прихвата основанный на физических моделях и математических формулах, демонстрирует высокую точность в идеальных условиях (например, при полных входных данных). Однако

его предсказания становятся менее надежными при наличии шума, неполных данных или сложных нелинейных зависимостей.

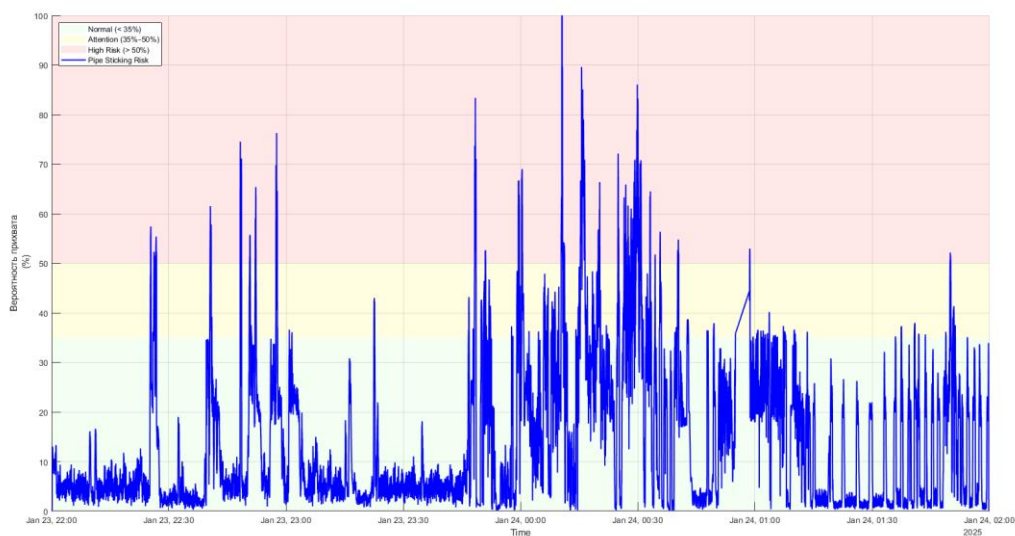


Рисунок 2. График детерминированного алгоритма оценки риска в прогнозировании вероятности возникновения прихвата

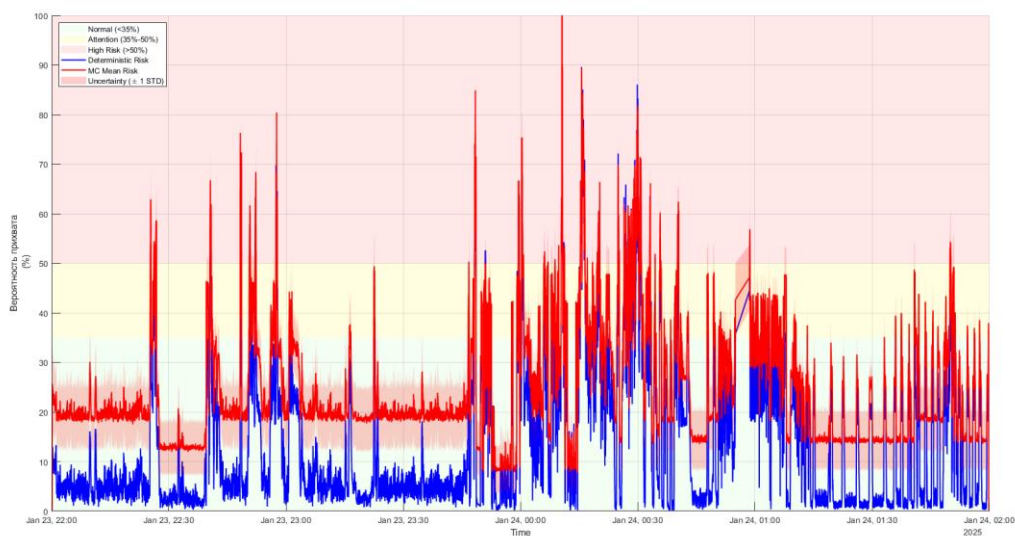


Рисунок 3. График сравнения метода Монте-Карло с детерминированным алгоритмом оценки риска в прогнозировании возникновения прихвата

На графике(рис.3) метод Монте-Карло, учитывающий неопределённость даже при малом числе итераций, точнее прогнозирует прихваты в реальных условиях, чем детерминированный подход, требующий идеальных входных данных.

Разработанный алгоритм показывает универсальность, так как не привязан к определённому типу геологических условий и может интегрироваться в существующие цифровые платформы. Такой подход уже показал эффективность на тестовых данных и может быть масштабирован для использования на промышленных объектах. (см. рис.1) В дальнейшем планируется расширить его применение на другие осложнения (например, ГНВП и поглощения) и дополнить входные данные параметрами бурового раствора и эквивалентной циркуляционной плотностью (ECD), что позволит ещё точнее и надёжнее прогнозировать аварийные ситуации.

Таким образом, сочетание классического статистического анализа, Монте-Карло симуляции и глубокого обучения (LSTM) даёт комплексную систему прогнозирования прихвата. Она обеспечивает раннее предупреждение инженерной службы и способствует повышению безопасности и эффективности буровых работ, при этом открывая путь к дальнейшей цифровизации и автоматизации нефтегазовой отрасли

Библиография

1. Montes A.C., Ashok P., van Oort E. Review of Stuck Pipe Prediction Methods and Future Directions // : Материалы SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Новый Орлеан, США, сентябрь 2024. – SPE-220725-MS. – URL: <https://doi.org/10.2118/220725-MS>
2. Montes A.C., Sudyodprasert K., Wu Y., Ashok P., van Oort E. *Automated Drilling and Production Event Detection Using Advanced Time-Series Pattern Recognition Techniques* // : Материалы SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. – Ставангер, Норвегия, март 2025. – SPE-223795-MS. – URL: <https://doi.org/10.2118/223795-MS>
3. Curina F., Abdo E., Rouhi A., Mitu V. Rig State Identification and Equipment Optimization Using Machine Learning Models // : Материалы OMC Med Energy Conference and Exhibition. – Равенна, Италия, сентябрь 2021. – OMC-2021-063. – URL: <https://onepetro.org/OMCONF/proceedings-abstract/OMC21/All-OMC21/OMC-2021-063/473153>.
4. Diederik P. Kingma, Jimmy Ba *Adam: A Method for Stochastic Optimization* // : Материалы 3rd International Conference for Learning Representations. – Сан-Диего, США, 2015. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

Опыт использования телеметрического оборудования при бурении наклонно-направленной скважины на месторождении X

***Ионов Е.О. * (ФГБОУ ВО «МГРИ, egorionov12345@gmail.com),
Сырчина А.С. (ФГБОУ ВО «МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)***

Аннотация

Наклонно-направленное бурение является одной из наиболее перспективных направлений. Это связано с тем, что большинство доступных месторождений уже давно прекратили свою деятельность. В данной статье я хочу предоставить вам возможность узнать об основных тонкостях наклонно-направленного бурения.

Нефтяная скважина глубиной 2941 м была пробурена благодаря уникальной компоновки, которая включала в себя винтовой забойный двигатель, резистивиметр, немагнитные утяжелённые трубы и якорь статического сдвига. Благодаря такому компоненту технологий мы смогли наиболее качественно и быстро пробурить скважину до продуктивного пласта.

Ключевые слова

Телеметрическое оборудование, углеродистая смесь, гидравлический способ бурения, наклонно-направленное бурение, резистивиметр, роторно-управляемая система, якорь статического сдвига, немагнитная труба

Теория

Из-за того, что месторождение X является одной из самых разведанных на площади, в процессе работ использовали следующее оборудование для проводки наклонно-направленной скважины.

Винтовой забойный двигатель 98 — это объёмный роторный гидравлический механизм, преобразующий давление нагнетаемой в полость статора буровой раствор во вращательное движение выходного вала. Состоит из силовой и шпиндельной секции. Вырабатываемый на роторе силовой секции крутящий момент посредством гибкого вала передаётся на вал шпиндельной секции и на долото ВЗД.



Рисунок 1. Винтовой забойный двигатель ДР-98

Резистивиметр - предназначен для геонавигации, корреляции положения скважины, определения пластового давления и давления в затрубном пространстве. Суть заключается в измерении удельного электрического сопротивления бурового раствора или жидкости, заполняющей скважину.

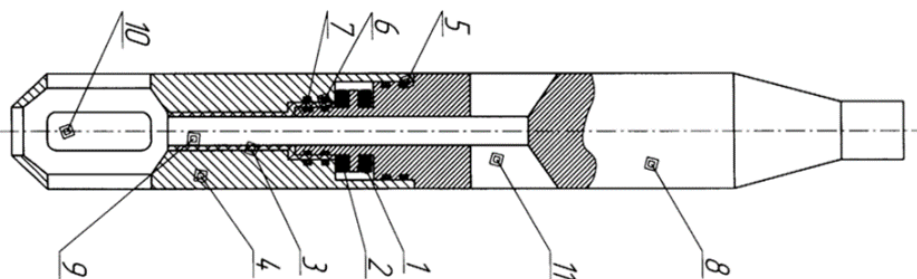


Рисунок 2. Резистивиметр, где 1 – генераторная катушка; 2 – измерительная катушка; 3 – диэлектрической втулки; 4 – корпус 5, 6, 7, 8 - уплотнительных элементов (герметизирующих резиновых колец); 9 – отверстие для свободно заполняющей жидкости; 10 – заборник; 11 - полость для выхода скважинной жидкости

Немагнитные утяжелённые трубы - предназначены для создания осевой нагрузки на долото и увеличения жёсткости бурильной колонны в условиях ориентированного бурения с использованием забойной телеметрической системы.

Якорь статического сдвига - предназначен для создания мощного ударного импульса в точке прихвата.

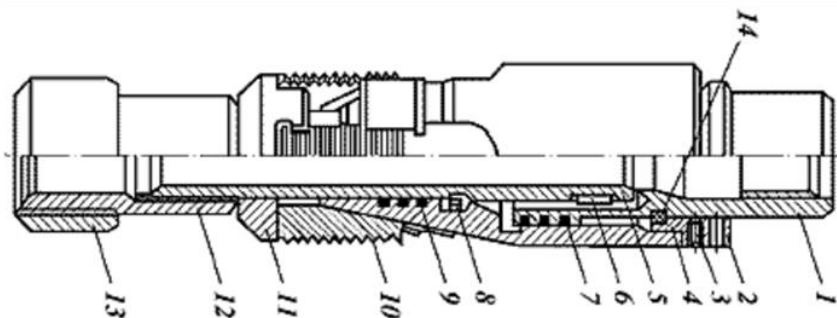


Рисунок 3. Якорь гидромеханический типа ЯГМ: 1 — головка; 2 — упор; 3 — винт; 4 — конус; 5 — шток; 6 — шпонка; 7,9 — уплотнительные кольца; 8 — пружинное кольцо; 10 — шплин; 11 — шплинсодержатель; 12 — переводник; 13 — кольцо предохранительное; 14 — проволока

В таблице 1 приведены размеры и технологические параметры оборудования.

Таблица 1. Габаритные размеры и технологические параметры технических средств

Винтовой забойный двигатель ДР-98	Наружный диаметр: 106 мм Длина двигателя: 4234 мм Диаметр применяемых долот: 120.6-151.0 Осевая нагрузка: 60 кН Заходность рабочих органов: 6/7 Расход рабочей жидкости: 6-12 л/с Мощность: 17-48 кВт
Резистивиметр РИС–42	Диапазон измерения 0,01...10 Ом-метр Диапазон измерения +10...+40°C Основная приведенная погрешность измерений не более ±5%, Электропитание прибора 9 В

	Габаритные размеры 275×220×95 мм
Немагнитные утяжелённые трубы	Наружный диаметр: 105 мм Внутренний диаметр: 56 мм Длина: 9.5 м Вес: 34.5 кг/м
Якорь статического сдвига (гидромеханический).	Наружный диаметр: 114 мм Внутренний диаметр: 51 мм Длина: 5 м Вес: 25 кг/м

При проектировании наклонно-направленной скважины мы должны учесть все технологические ограничения и порядок расчёта профиля.

Порядок расчёта профиля состоит из несколько этапов:

1. Определение закономерности искривления по раннее пробуренным скважинам.
2. Определение проектного азимута скважины с помощью структурной карты.
3. Определение конечной глубины верхнего вертикального участка
4. Выбор КНБК, которая должна обеспечивать необходимую интенсивность искусственного искривления

Технологические ограничения, которые могут препятствовать проектированию:

1. Обеспечение проходимости геофизических приборов, бурильных и обсадных колонн;
2. Обеспечение максимального выноса шлама при бурении скважины;
3. Минимизация нагрузок, действующих на бурильную колонну.

Беря во внимание вышеизложенную информацию, а также данные, полученные в результате инклинометрии были построены вертикальный и горизонтальный профили скважины, изображенные на рисунках 4 и 5 [4, 5].

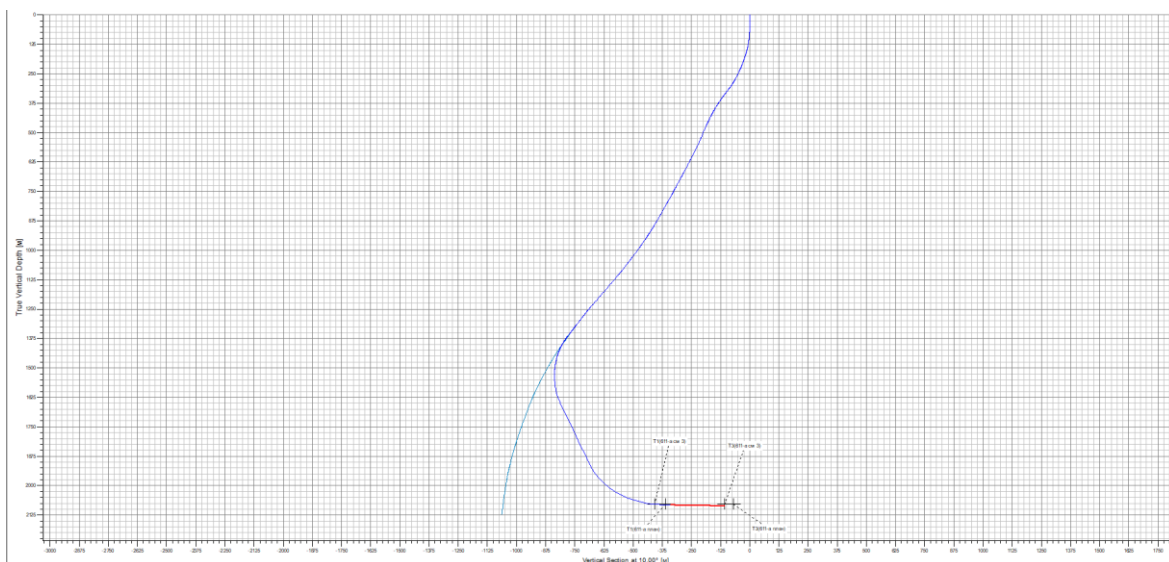


Рисунок 4. Вертикальный профиль скважины

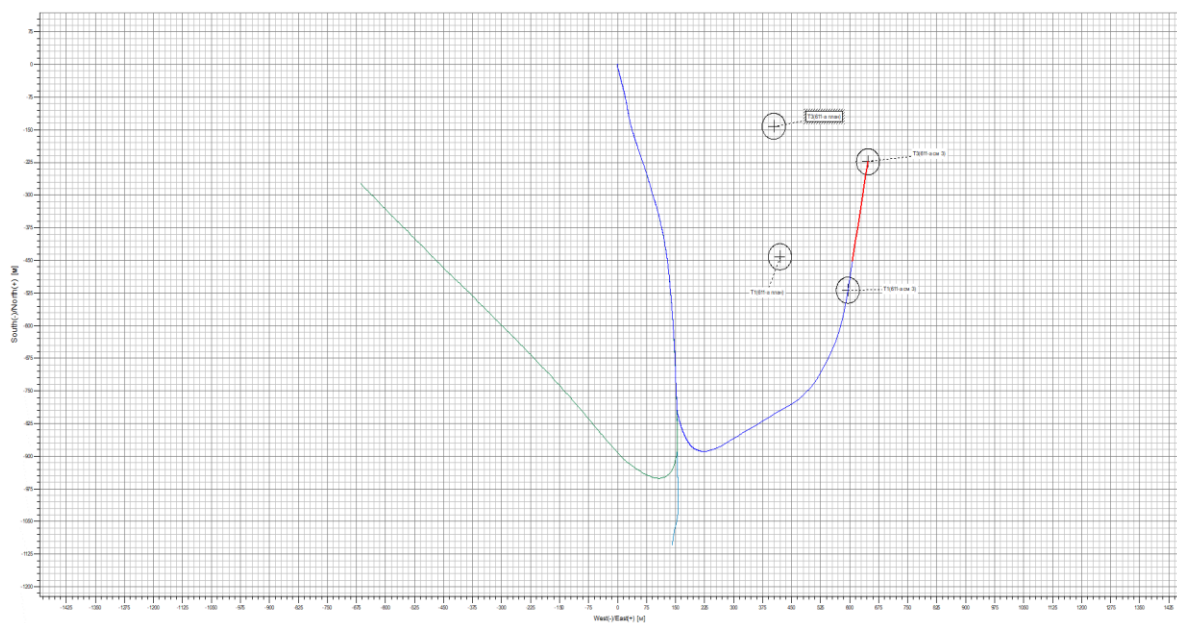


Рисунок 5. Вертикальный профиль скважины

Выводы

Среди различных методов геологоразведки особое место занимает кустовое бурение скважин, которое демонстрирует высокую эффективность в реализации поставленных задач. Данный метод существенно оптимизирует процесс обустройства и обслуживания скважин, сокращая при этом необходимые финансовые и временные затраты.

Важным преимуществом данного метода является способность проводить детальное и глубокое исследование геологических структур. Современное специализированное оборудование и комплексный инструментарий позволяют бурильщикам достигать значительных глубин и получать точные данные о характеристиках и составе грунта.

Библиография

1. Григорян, А. М. Вскрытие пластов многозабойными и горизонтальными скважинами / А. М. Григорян – М.: Недра, 1968. – 187 с.
2. Студенский, М. Н. Разработка и внедрение технологии строительства горизонтальных скважин на битумные отложения с выводом забоя надневную поверхность : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.15 / М. Н.Студенский. – Альметьевск: ООО «Татнефть-Бурение», 2006. – 162 с.
3. Кульчицкий, В. В. Геонавигация скважин : учеб. пособие / В. В. Кульчицкий [и др.]. – М.: МАКС Пресс 2008. – 312 с.
4. Вайнерман Б.П. Практическое руководство по проектированию профилей наклонно-направленных и горизонтальных скважин. - М.: МГРИ, 2022. - 44 с.
5. Повалихин А.С., Калинин А.Г., Бастриков С.Н., Солодкий К.М. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. – 645 с.

**Обоснование параметров технологии бурения с применением долот PDC при бурении
водозаборных скважин**

Каминский Я.П. (МГРИ, jankaminski1802@gmail.com),

Склянов В.И. (МГРИ, sklyanovvi@mgri.ru),

Сырчина А.С. (МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)

Аннотация

В Московской области активно работает от **200 до 500** компаний и бригад, предлагающих услуги по бурению скважин на воду, поэтому такое количество буровых компаний порождает конкуренцию: каждая из них стремится заполучить большое количество клиентов/заказчиков. Компании в таком случае стремятся найти методики повышения производительности и эффективности буровых работ. Повысить данные показатели возможно за счет изменений в конструкции отдельных деталей и (или) узлов оборудования, либо в изменении инструментов или оборудования в целом. Изменить широко используемое трехшарошечное долото на более эффективный и надежный породоразрушающий инструмент, который подходит под геологические условия всего Центрального федерального округа. Таковым является долото PDC.

Ключевые слова

Долото, PDC, обратная промывка, породоразрушающий инструмент

Теория

Преимущества применения долот PDC (рис. 1) при строительстве водозаборных скважин много. Например, одним из них является высокая скорость бурения. Долота PDC обеспечивают более высокую скорость бурения по сравнению с традиционными шарошечными долотами, особенно в однородных и слабоабразивных породах (например, глинах, мергелях, песчаниках, известняках, что является типичной геологической обстановкой для центральной России). Это позволяет сократить сроки строительства скважины и снизить затраты на буровые работы [1].

Преимущества применения долот PDC при строительстве водозаборных скважин много. Например, одним из них является высокая скорость бурения. Долота PDC обеспечивают более высокую скорость бурения по сравнению с традиционными шарошечными долотами, особенно в однородных и слабоабразивных породах (например, глинах, мергелях, песчаниках, известняках, что является типичной геологической обстановкой для центральной России). Это позволяет сократить сроки строительства скважины и снизить затраты на буровые работы [3].

Неоспоримым преимуществом долот PDC является их ресурс. Они обладают значительно большей износостойкостью по сравнению с шарошечными долотами, связано это в том числе с отсутствием движущихся элементов, что позволяет ими бурить на большие расстояния без замены. Это сокращает время простоя оборудования и затраты на замену долот.

При бурении долотами PDC получается достичь большей ровности скважины. Они обеспечивают более плавное и стабильное бурение, что приводит к формированию более ровного ствола скважины с минимальными отклонениями от заданного направления. Это облегчает спуск обсадных труб и насосного оборудования, а также повышает надежность конструкции скважины.

Таблица 1. Геологический разрез местности

№ п/п	Геологический индекс	Описание пород	Глубина залегания слоя, м		Мощность слоя, м	Категория пород
			от	до		
1	Q	Суглинок, песок разномерный с включением гравия	0	10	10	III
2	J _{3v} -K _{1al}	Песок	10	18	8	III
3	J _{3k} -km	Глина черная, плотная	18	30	12	III
4	C _{3ksm}	Известняк	30	34	4	V
5	C _{3kr}	Глина красноватая, с прослоями мергеля, плотная	34	44	10	III
6	C _{2pd} -mč	Известняки трещиноватые, с прослоями глины, известняка глинистого	44	114	70	V

Долота PDC создают меньше вибрации и шума при бурении по сравнению с шарошечными долотами, что улучшает условия труда буровой бригады и снижает негативное воздействие на окружающую среду.

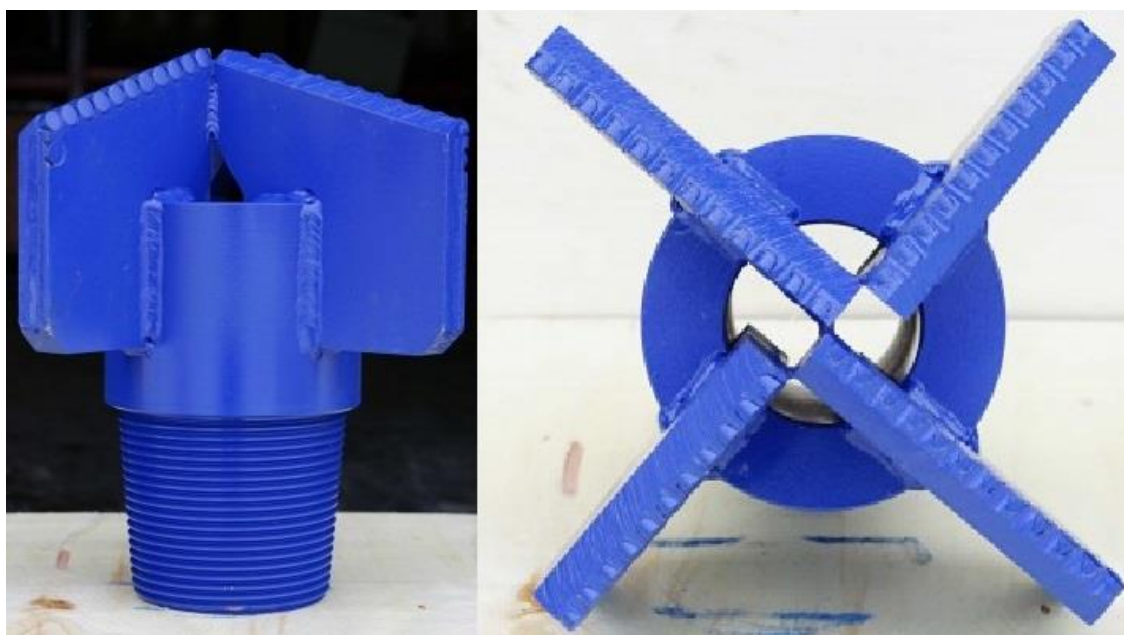


Рисунок 1. Лопастное долото PDC для бурения скважин с обратной промывкой

Еще одним преимуществом является снижение риска прихвата инструмента, так как более ровный ствол скважины, формируемый долотами PDC, снижает риск прихвата бурового инструмента, что позволяет избежать аварийных ситуаций и связанных с ними затрат.

Долота PDC по праву можно назвать универсальными, поскольку они могут эффективно бурить породы с различными характеристиками, включая чередующиеся слои

твердых и мягких пород, а также трещиноватые и кавернозные породы. Это делает их универсальным решением для строительства водозаборных скважин в различных геологических регионах.

Более плавное бурение (в том числе за счет того, что данное долото требует меньшую осевую нагрузку, чем трехшарошечное) и меньшая вибрация, обеспечиваемые долотами PDC, снижают нагрузку на буровое оборудование и затраты на его обслуживание и ремонт.

Условия, при которых применение долот PDC наиболее перспективно при строительстве водозаборных скважин:

- Бурение в однородных и слабоабразивных породах (глины, мергели, песчаники, известняки).
- Строительство глубоких скважин, где важна высокая скорость бурения и увеличенный срок службы долота.
- Строительство скважин в экологически чувствительных районах, где необходимо минимизировать вибрацию и шум при бурении.
- Бурение в сложных геологических условиях, где требуется универсальное решение для бурения различных типов пород [2].



Рисунок 2. Буровая установка М20 (МОЗБТ)

Как и другие типы ПРИ, имеет различные классификации, размеры, формы и многое другое. При бурении скважин на воду в геологических условиях Московской области (табл. 1) и соседних регионов оптимальным решением могут стать долота PDC лопастного строения (рис. 1). Тип промывки для этого будет использоваться обратная. Промывочная жидкость

подаётся в скважину по затрубному пространству и выходит через центральное отверстие в долоте, унося с собой выбуренную породу, эффективно справляется с крупной выбуренной породы. Уменьшение нагрузки на насосное оборудование. Идеально подходит под бурение водозаборных скважин, так как с такой промывкой происходит минимизация загрязнения водоносного горизонта [4,5].

Московским опытным заводом буровой техники (МОЗБТ) разработана буровая установка М20 (рис. 2), которая разработана для бурения скважин для водозаборных, нефтяных и газовых, геотехнических, скважин для добычи рассолов и взрывных скважин. Особой «изюминкой» данной буровой установки является ее универсальность в вопросе технологии бурения: данная установка дает возможность бурить скважины с шнековым бурением, бурением скважин с прямой или обратной промывкой, а также возможность бурить скважины с использованием пневмоударников. Также основным преимуществом данной установки является наличие подвижного вращателя, что облегчает регулирование осевой нагрузки на ПРИ и наличие гидравлических зажимов в районе «стола», что облегчает труд помощника бурильщика (за счет отсутствия хомутов) спуск/подъем обсадных труб и облегчает труд, связанный со свинчиванием/развинчиванием бурильных труб.

Выводы

На сегодняшний день основными ресурсами использования долот PDC являются применение износостойких резцов, улучшение конструкции лопастей и корпуса долота, рациональные величины и ориентация режущих элементов, а также их размещение, балансировка инструмента и оптимизация бурового раствора для резания – скалывания разнообразных горных пород. Благодаря своим особенностям, долота PDC обладают своей универсальностью, повышенной скоростью проходки и большому ресурсу.

Библиография

1. Башкатов Д.Н., Коломиец А.М. Бурение скважин на воду. Справочник, Москва, Недра 2021.
2. Новиков А.С. «Строительство нефтяных и газовых скважин», г. Москва, 2021 г.
3. Подунов С. «Как выбрать подрядчика для бурения скважины на воду» Книга-путеводитель, Ridero, 2018 г.
4. Нескоромных В.В. «Разрушение горных пород при бурении скважин» Учебное пособие, Сибирский федеральный университет, 2019 г.
5. Зайцев, В.И. Эффективность использования долот PDC / В.И. Зайцев, А.В. Карпиков, В.В. Че // Карпиков А.В., // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиск и разведка рудных месторождений. – 2014. -№5. – С.58-66.

Снижение вибрационных нагрузок при бурении наклонно-направленной добывающей скважины (на примере Ярудейского месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции)

***Крюков Н.А. * (МГРИ, nikita.kryukov354@mail.ru),
Вайнерман Б.П. (МГРИ, bwinerman@yandex.ru)***

Аннотация

В процессе разведки и освоения нефтяных месторождений необходимо бурение как вертикальных, так и наклонно-направленных скважин. В ряде случаев целесообразно бурить наклонно-направленные скважины с горизонтальным окончанием.

Геологические разрезы нефтяных месторождений представляют собой чередование пластов горных пород с разными физико-механическими свойствами (плотность, твердость). Во время бурения скважин возникают различные вибрационные нагрузки, обусловленные как свойствами горных пород, так и особенностями технологических процессов бурения.

В данной работе рассматриваются некоторые аспекты снижения вибрационных нагрузок при бурении наклонно-направленной скважины на одном из нефтяных месторождений, расположенном в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова

Месторождение, скважина, наклонно-направленное бурение, вибрационные нагрузки при бурении

Теория

В административном отношении Ярудейский лицензионный участок расположен в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. Областной центр – г. Тюмень, административный центр – г. Надым (рис. 1).

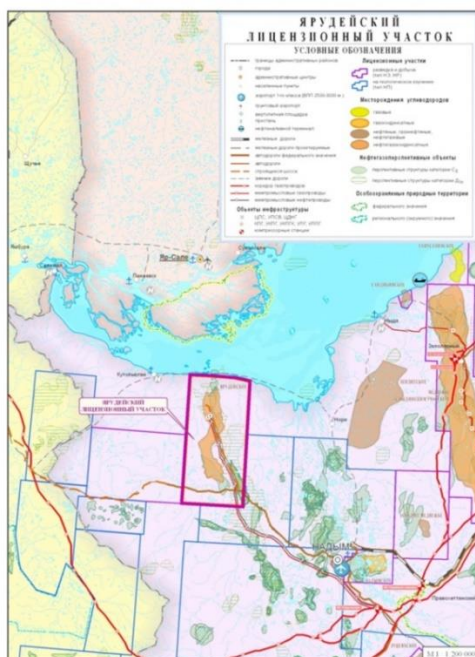


Рисунок 1. Обзорная карта района работ

Ярудейское месторождение расположено на Ярудейском лицензионном участке.

Данное месторождение открыто в 2007 году как газоконденсатное, а в 2009 году на нем были получены промышленные притоки нефти и это месторождение стало нефтегазоконденсатным.

На примере разведки и освоения нефтяного пласта Ю₁₁¹ рассмотрены некоторые аспекты, связанные с возникновением вибрационных нагрузок при бурении наклонно-направленной скважины с горизонтальным окончанием.

На структурной карте по кровле коллекторов пласта Ю₁₁¹ видно, что купольная часть нефтяной залежи не опосредована бурением.

Предполагается пробурить вертикальный пилотный ствол разведочной скв. 1а, а после уточнения геологического строения этой части залежи пробурить наклонно-направленную скважину №1 с горизонтальным окончанием. При этом вход ствола скв. 1 в пласт Ю₁₁¹ предусматривается на расстоянии 500 м от вертикальной скв. 1а, а по телу пласта ствол пройдет 500 м.

Такое расположение стволов скважин позволит использовать их в дальнейшем в процессе добычи нефти из пласта Ю₁₁¹ (сетка добывающих скважин при разработке нефтяного месторождения с средним составляет 500*500м).

На рис. 2 и рис. 3 показано расположение стволов скв. 1а и скв. 1 в плане и в разрезе.

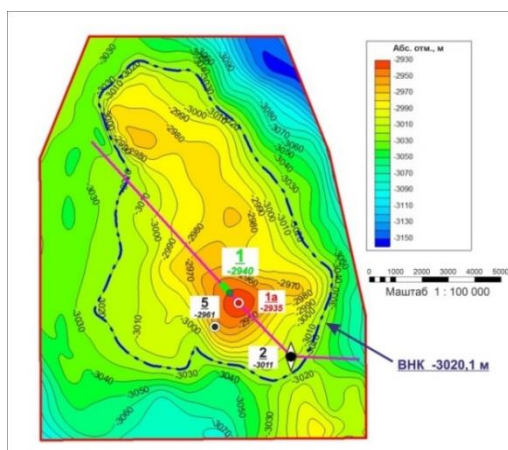


Рисунок 2. Структурная карта по кровле коллекторов пласта Ю₁₁¹
На рис. 3 показаны вертикальные профили скв. 1а и скв. 1 в разрезе пласта Ю₁₁¹

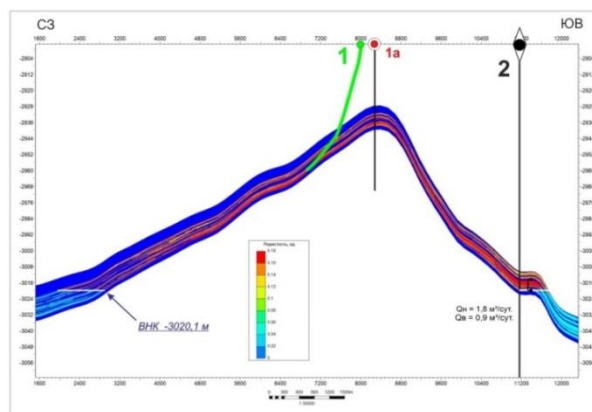


Рисунок 3. Геологический разрез по линии скв. 1-1а-2 (пласт Ю₁₁¹)

В настоящее время существует широкий круг работ, посвященных вибрациям бурильной колонны. Вибрации бурильной колонны делятся на осевые, крутильные и поперечные.

Осевая вибрация и осевые вибрационные нагрузки на КНБК возникают в основном при смене горных пород с различными свойствами или при прохождении пропластков твердых пород. Осевые нагрузки имеют направление, совпадающее с осью вращения КНБК.

Крутильная вибрация возникает из-за неравномерного вращения, вызванного резкими изменениями скорости вращения. Долото периодически приостанавливается на короткое время, что приводит к увеличению крутящего момента и скручиванию колонны.

Поперечная вибрация представляет собой маятниковое движение в направлении, перпендикулярном оси скважины. Высокие переменные изгибные напряжения являются причиной примерно 75% отказов и аварий скважинного оборудования. Поперечное движение возникает одновременно с вращением бурильной колонны и может привести к завихрению.

В процессе бурения производится постоянный контроль вибраций.

Если этот показатель соответствует «зеленому уровню», то можно продолжить процесс бурения.

При «желтом уровне» показателя вибраций нужно оценить и оптимизировать режим бурения. Следует продолжать наблюдение и рассчитать накопленное время действия вибраций по каждому уровню и, если лимиты не превышены, то можно продолжить бурение.

При «красном уровне» боковых вибраций рассматривают два варианта: зенитный угол больше или меньше 45 градусов.

При значении зенитного угла больше 45 градусов следует оставаться на забое и уменьшить скорость вращения ротора (далее СВР) на 10-50 об/мин.

Если же зенитный угол меньше 45 градусов нужно оторваться от забоя и остановить вращение. Запустить вращение в режиме 40-70 об/мин, встать на забой, плавно увеличивая нагрузку на долото до рабочей, избегая появления неравномерного вращения и складывания инструмента. Увеличить СВР до рабочей. Далее следует наблюдать 5 минут или до получения трех обновлений данных по вибрациям. Если уровни вибраций не снижены до приемлемых, то определяется не осложненный участок ствола скважины с маленькой интенсивностью искривления, проводится спуско-подъемная операция в этот участок. Если СВР соответствует программе на бурение, то возвращаемся на забой и начинаем бурение, применяя определенную ранее СВР. Алгоритм этих действий наглядно представлен на рис. 4.

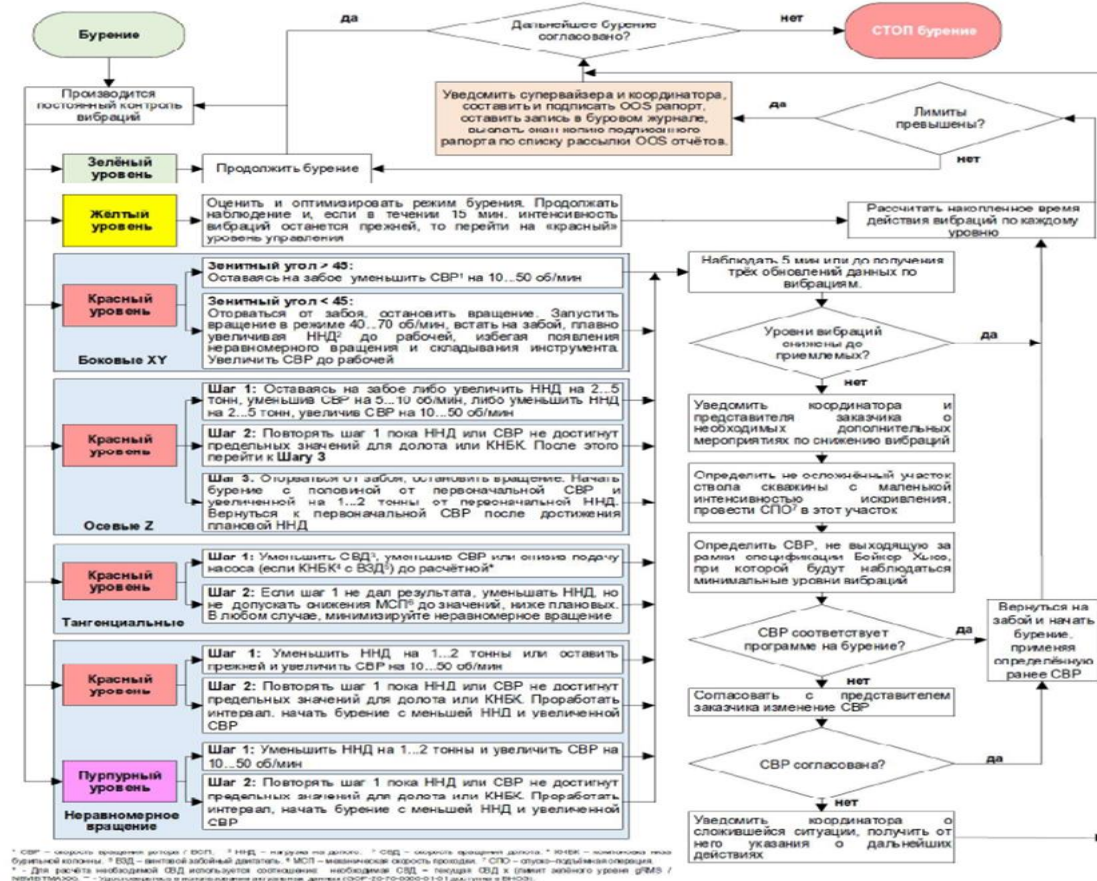


Рисунок 4. Алгоритм управления вибрациями в процессе бурения

Выводы

В ходе данного исследования были изучены основные виды вибрационных нагрузок, которые возникают при работе с нижней частью бурильной колонны. Были проанализированы последствия повышенного воздействия каждого из этих видов вибрационных нагрузок и разработаны методы их смягчения.

Также были исследованы различные алгоритмы управления вибрациями в процессе бурения, методы регистрации и измерения вибрационных нагрузок. На основе полученных выводов был составлен набор рекомендаций относительно оптимальных значений параметров бурения. Эти рекомендации позволят существенно снизить уровень вибрационных нагрузок на компоновку нижней части бурильной колонны.

Библиография

1. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: Учебник для вузов. - М.: Недра. - Бизнесцентр. – 2006 г.
2. Отчет "Проект разведки Ярудейского месторождения Ярудейского лицензионного участка". ОАО "СибНАЦ", г. Тюмень, 2010.
3. Федорцов В. К., Пешков В. Е., Салманов Ф. К. и др. Освоение и исследование разведочных скважин (на примере Западной Сибири), М., Недра, 1976 г. (Труды ЗапСибНИГНИ, вып.94).
4. Сароян А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. М., Недра, 1990 г.

***Влияние химического состава глин и вида реагента на фильтрационную
характеристику бурового раствора***

***Курамшина Э.Р.* (МГРИ, kuramshinaer@mgri.ru),
Соловьев Н.В. (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru)***

Аннотация

В процессе строительства скважин нередко встречаются осложнения, вызванные нарушением целостности скважины: неустойчивостью, обрушением и деформацией стенок, повышенным кавернообразованием.

При бурении скважин в сложных горно-геологических условиях одной из основных задач является сохранение устойчивости стенок. Особенности строительства обусловлены чередованием терригенных и хемогенных отложений, значительной протяженностью неустойчивых глинистых пород, а также наличием зон аномально высоких и низких пластовых давлений и температур. Глинистые породы составляют до 90 % всего осадочного комплекса пород.

Разнообразие сложных геолого-технических условий образования и залегания глинистых пород предполагает возможности различного подхода к стабилизации ствола скважины в каждом конкретном случае.

Ключевые слова

Глины, глиносодержащие породы, устойчивость ствола скважины, катионные полимеры

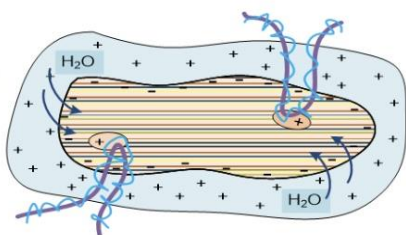
Теория

Состав, строение и прочность структурных связей определяют свойства и поведение глинистых пород в условиях скважины при внешних воздействиях. Влияние катионных высокомолекулярных соединений на свойства и показатели технологических жидкостей недостаточно изучено [1].

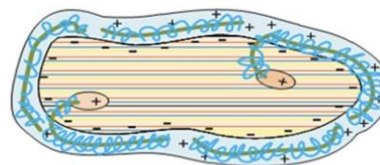
Выделяются прогнозируемые достоинства полимеркатионных буровых растворов, зависящие от химического состава и строения катионных полимеров: высокая устойчивость к агрессии глины, солей и температуры.

Механизм ингибирования глин катионными полимерами существенно отличается от ингибирования анионными полимерами. Пакет глинистой частицы или минерала можно рассматривать как набухающий неорганический полимер анионного типа, в связи с чем их поверхность занята обменными катионами.

На активных участках адсорбируются катионы и анионы. Это приводит к нейтрализации заряда и минимизации взаимодействия глины с молекулами воды. При контакте глинистых пород с рабочей жидкостью на основе анионных полимеров происходит взаимодействие отрицательно заряженных глинистых частиц или структурных элементов глинистых пород с отрицательно заряженным полимером. На поверхности глинистых пород преобладают отрицательные заряды, через эти участки продолжается активное поступление водной фазы в породу. При вводе различных электролитов происходит частичное разрушение структурированной прослойки воды и увеличение проникновения водной фазы. Усиление ингибирующего эффекта вводом электролитов можно достичь за счет сохранения структурированной прослойки воды путем увеличения содержания анионных полимеров (рис. 1).



анионные и неанионные полимеры



катионные полимеры

Рисунок 1. Взаимодействие глинистых частиц с полимерами

Катионные полимеры сильнее и необратимо закрепляются на отрицательных участках глинистых пород. Из-за преобладания отрицательно заряженных участков на поверхности глины происходит более равномерное распределение и закрепление катионного полимера и обеспечивается формирование устойчивой структурированной водной фазы в приповерхностном слое [2].

В катионных буровых растворах полимеры приобретают повышенную устойчивость. Все используемые в настоящее время анионно-неионные полимеры-стабилизаторы зависят от pH среды бурового раствора. Оптимальное значение для всех анионно-неионных полимеров от 8 до 9, что отрицательно сказывается на устойчивости глинистых пород. Изменение pH среды в диапазоне от 3 до 10 не оказывает влияния на свойства катионных буровых растворов, т.е. отпадает необходимость в регулировании pH среды катионных буровых растворов. В данном случае катионный полимер в составе раствора выполняет функцию стабилизатора и к температурной агрессии.

Благодаря устойчивости катионного полимера к агрессии температуры полимеркатионный буровой раствор приобретает высокую термостойкость до 200°С.

В качестве катионных полимеров для приготовления поликатионных буровых растворов используются полидадмах, его сополимеры, полидиаллилдиметиламмоний, полиамины (полиэпихлоргидриндиметиламин) и катионный низкомолекулярный полиакриламид.

Ингибирующий эффект катионного полимера объясняется двумя механизмами:

1. Химическое адсорбция катионного полимера на поверхности глины и нейтрализация заряда, что ослабляет ее электростатическое взаимодействие с водой.

2. Формирование устойчивой прослойки структурированной воды создающий экран, препятствующий проникновению водной фазы в глинистую породу.

Наибольшую термостойкость буровым растворам обеспечивают акриловые реагенты – гипан, метас.

Катионный полимер полидадмах имеет весьма интересный состав и строение с точки зрения получения термостойких буровых растворов. Состав полидадмаха представлен прочными углеродными связями, а циклическое строение катионного полимера обеспечивает упрочнение связей.

Полидадмах (полидиаллилдиметиламмоний хлорид) синтезируется из аллилхлорида и диметиламина. Полиамины (полиэпихлоргидриндиметиламин, ПЭХГДМА) синтезируются путем реакции конденсации первичных или вторичных аминов с эпихлоргидрином. Катионизированный полиакриламид представлен с функциональными группами линейной структуры.

Состав мономеров приведен на рисунках 2-6.

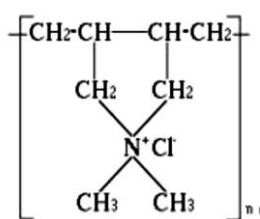


Рисунок 2. Полидадмах

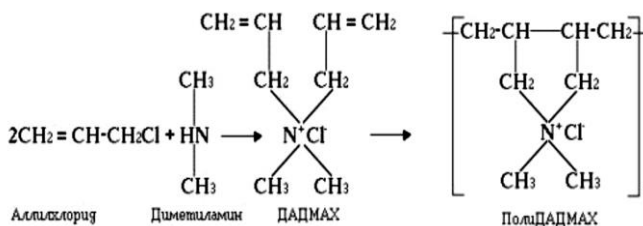


Рисунок 3. Полидиаллилдиметиламмоний

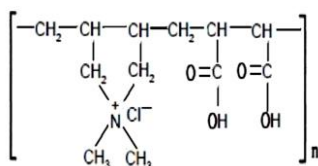


Рисунок 4. Сополимер

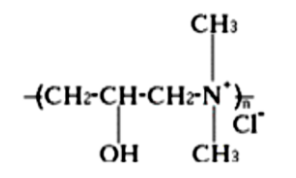


Рисунок 5. Полиамины

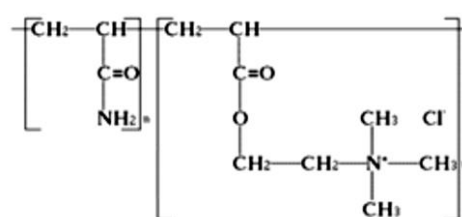


Рисунок 6. Полиакриламид

В процессе проведения лабораторных исследований катионных полимеров были изучены четыре модификации полимеркатионных буровых растворов: пресный, ингибирующий, соленасыщенный и термостойкий.

Пресные ингибирующие модификации могут быть получены сочетанием катионных и неионных полимеров. В качестве неионных полимеров используются полисахариды (крахмал, декстрин, оксиэтилцеллюлоза) и поливинилпироллидон, включают воду, глинопорошок, мел, многоатомный спирт, неионный и катионный полимеры. Ингибирующие полимеркатионные растворы на основе неионного крахмала и анионного ПАЦ, могут быть получены на основе крахмала и водорастворимых эфиров целлюлозы в сочетании с биополимером [4].

Дальнейшее совершенствование традиционных растворов на водной основе практически исчерпано. Необходимо сочетать положительные качества, заимствованные из разных систем буровых растворов (рис. 7).



Рисунок 7. Схема создания полимеркатионных систем

Преимущества полимеркатионной системы [3]:

1. Простота управления технологическими параметрами.
2. Наличие совершенствованных ингибирующих и крепящих свойств; высокая стабильность показателей.
3. Высокая устойчивость к температурной, полисолевой, углекислотной и сероводородной агрессиям.
4. Высокая совместимость пресной и соленой систем, независимость показателей раствора от pH среды, отсутствие биодеструкции полимеров, загнивания и дестабилизации системы.

5. Многоразовое использование, экологическая безопасность, высокое качество вскрытия продуктивных пластов.

Исследуя составы растворов, отмечаем неустойчивость безглинистого раствора при добавлении катионного полимера, происходит расслаивание бурового раствора, его применение не рекомендуется.

В ходе исследований было выявлено, что использование в биополимерном глинистом растворе катионного полимера ВПК-402 повышает восстановление коэффициента проницаемости за счет увеличения ингибирующих свойств раствора и повышения устойчивости глинистых пород

Состав бурового раствора подобран согласно таблице 1.

Таблица 1. Компонентный состав катионного раствора

Компонент БР	Функция компонента	Концентрация компонента, %	Концентрация компонента, кг/м ³
Бентонитовый глинопорошок	структурообразователь, кольматант	2-3	20-30
Мел	кольматант	10-20	100-200
Биополимер	структурообразователь	0,1-0,3	1-3
Целлюлоза	загуститель	0,1-0,3	1-3
Крахмал	понижитель фильтрации	2-3	20-30
ВПК-402	стабилизатор	2,5-3,5	25-35
KCl	ингибитор набухания глин	2	20
Глицерин	деэмульгатор эмульсий	5-15	50-150
H ₂ O	дисперсионная среда	остальное	до 800

Выводы

Выяснен механизм ингибирования глинистых пород катионными полимерами, катионный полимер химически адсорбируется на поверхности глинистой частицы, в следствии чего происходит нейтрализация заряда глины. Использование в растворе катионного полимера повышает восстановление коэффициента проницаемости за счет увеличения ингибирующих свойств раствора и повышения устойчивости глинистых пород.

Библиография

1. Булатовские чтения: сборник статей / Комплексный подход к проблеме устойчивости глинистых пород при бурении скважин/ под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар: Издательский Дом Юг – 2018.
2. Гайдаров А.М. Исследования ингибирующих и крепящих свойств поликатионных буровых растворов Катбурр / Гайдаров А.М., Соловьев Н.В., Хуббатов А.А., Курбанов Х.Н. // Инженер-нефтяник. – 2020. № 2. с. 25-31.
3. Рязанов Я.А. Справочник по буровым растворам. – М.: Недра, 1979. – 215 с.
4. Шарафутдинов З.З. Буровые и тампонажные растворы. Теория и практика: Справ. / З.З. Шарафутдинов, Ф.А. Чегодаев, Р.З. Шарафутдинова. – СПб.: НПО “Профессионал”, 2007. – 416 с.

Опыт отбора проб грунтов и определения их параметров при инженерно- геологических изысканиях в Московской области

***Лукашук Д.Р. * (МГРИ, lukashukdaria@icloud.com),
Сырчина А.С. (МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)***

Аннотация

Для проведения анализа методов отбора проб грунтов и определения их параметров при инженерно-геологических изысканиях был выполнен комплекс буровых, опытных, лабораторных и камеральных работ.

Целью изысканий являлось получение материалов и исходных данных в объеме, необходимом и достаточном для анализа проб грунтов.

Ключевые слова

Бурение, проба, зондирование, прессиометрия

Теория

В 2024 г. компанией ООО "ПРОИНЖГРУПП" были выполнены инженерно-геологические изыскания на объекте для изучения геологического строения, гидрогеологических условий участка, определение физико-механических свойств грунтов, а также выявление опасных инженерно-геологических процессов и явлений на территории изысканий.

Бурение инженерно-геологических выработок проводилось ударно-канатным способом диаметром 168 мм станком ПБУ-2.

Преимущества данной установки:

- быстрый отбор проб. Ударно-канатное бурение в 5 раз быстрее, чем колонковое «всухую» в грунтах до IV категории по буримости;
- эксплуатационные расходы меньшие, по сравнению с УРБ-2А2;
- статическое зондирование;
- отбор грунта грунтоносами через полые шнеки;
- бурение полыми шнеками с отбором проб грунта в керноприемник.

При данном виде бурения пробой служит выбуренная горная порода - шлам. Для предотвращения обогащения или разубоживания проб в результате соскабливания породы со стенок скважины канатом скважину крепят обсадными трубами. Большая масса начальных проб и относительно сильное измельчение породы долотом обуславливают необходимость и возможность сокращения проб непосредственно у скважины. Для этого используют шламоприемные ящики, из которых проба берется ручными пробоотборниками.

Бурение инженерно-геологических выработок так же производилось колонковым способом диаметром до 160 мм станками УРБ-2А2.

Основным материалом, из которого отбираются пробы при колонковом бурении, является керн. При недостаточном выходе керна или при его отсутствии в пробу включают соответственно керн и шлам или только шлам.

Образцы ненарушенной структуры отобраны грунтоносом марки ГЗ-1 диаметром 125 мм методом задавливания.

В процессе буровых работ выполняется отбор проб грунтов ненарушенной (монолиты) и нарушенной структуры для лабораторных определений физико-механических свойств и определения степени агрессивного воздействия грунтов к стали и бетону. Также проведен отбор проб подземных вод для химического анализа и оценки степени их агрессивности к металлам и бетону [1-4].

Статическое зондирование выполнено комплектом ПИКА-19 (Рис.1) конструкции НИИОСП им. Н.М. Герсевича, зондом II типа, в режиме непрерывного вдавливания с целью оценки однородности строения изучаемой толщи в целом, определения состояния глинистых грунтов в естественном массиве, определения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Испытания статическим зондированием проведены вблизи пробуренных скважин до проектной глубины или до отказа оборудования.

Метод статического зондирования заключается в том, что цилиндрический конус с площадью сечения 10 см² и углом при вершине 60° задавливается вертикально в грунт с постоянной скоростью около 1...2 метра в минуту. Во время зондирования производились измерения удельного сопротивления грунта под наконечником (конусом) зонда q_3 , МПа, удельного сопротивления грунта на участке боковой поверхности (муфте трения) зонда f_3 , кПа, расположенной непосредственно за конусом. Статическое зондирование грунтов производилось в соответствии с ГОСТ 19912- 2012 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием»

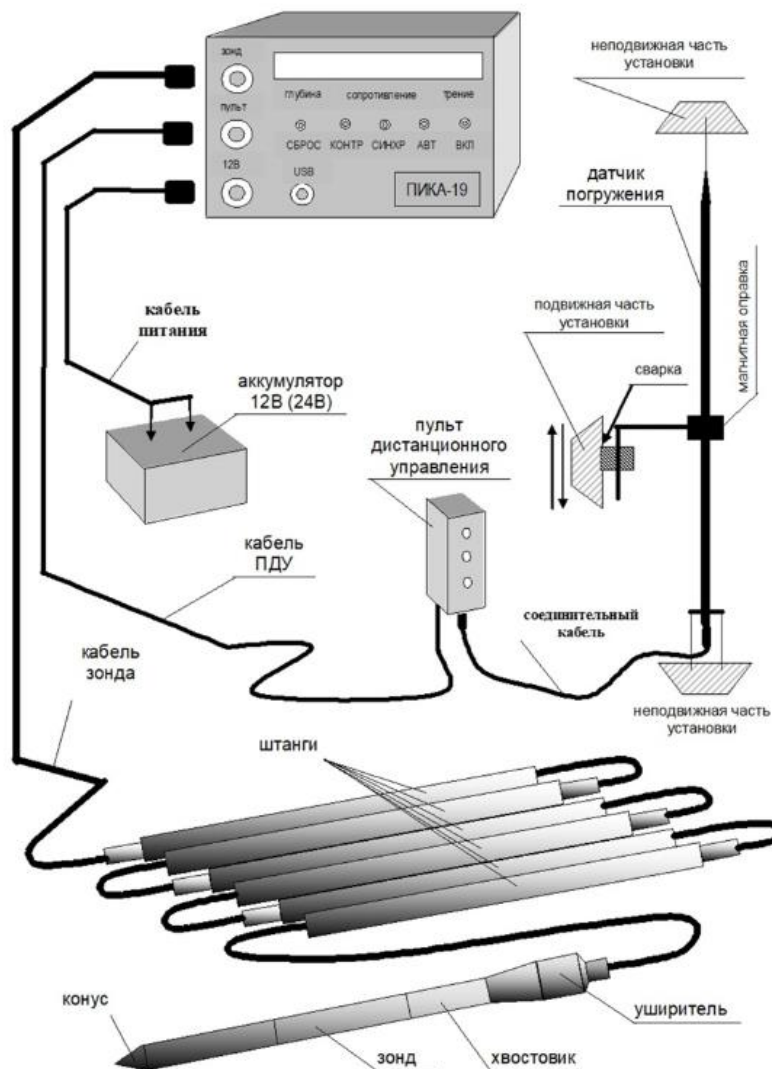


Рисунок 1. Способ подсоединения устройств, входящих в комплект аппаратуры

Результаты статического зондирования с показателями удельного сопротивления грунтов под наконечником q_z (МПа) и по боковой поверхности зонда f_z (кПа) представлены в виде графиков и частных значений на колонках скважин (Рис. 2)

Статическое зондирование в сравнении с динамическим предоставляет точные данные о стойкости и деформация грунта, что способствует более обоснованному проектированию и строительству.

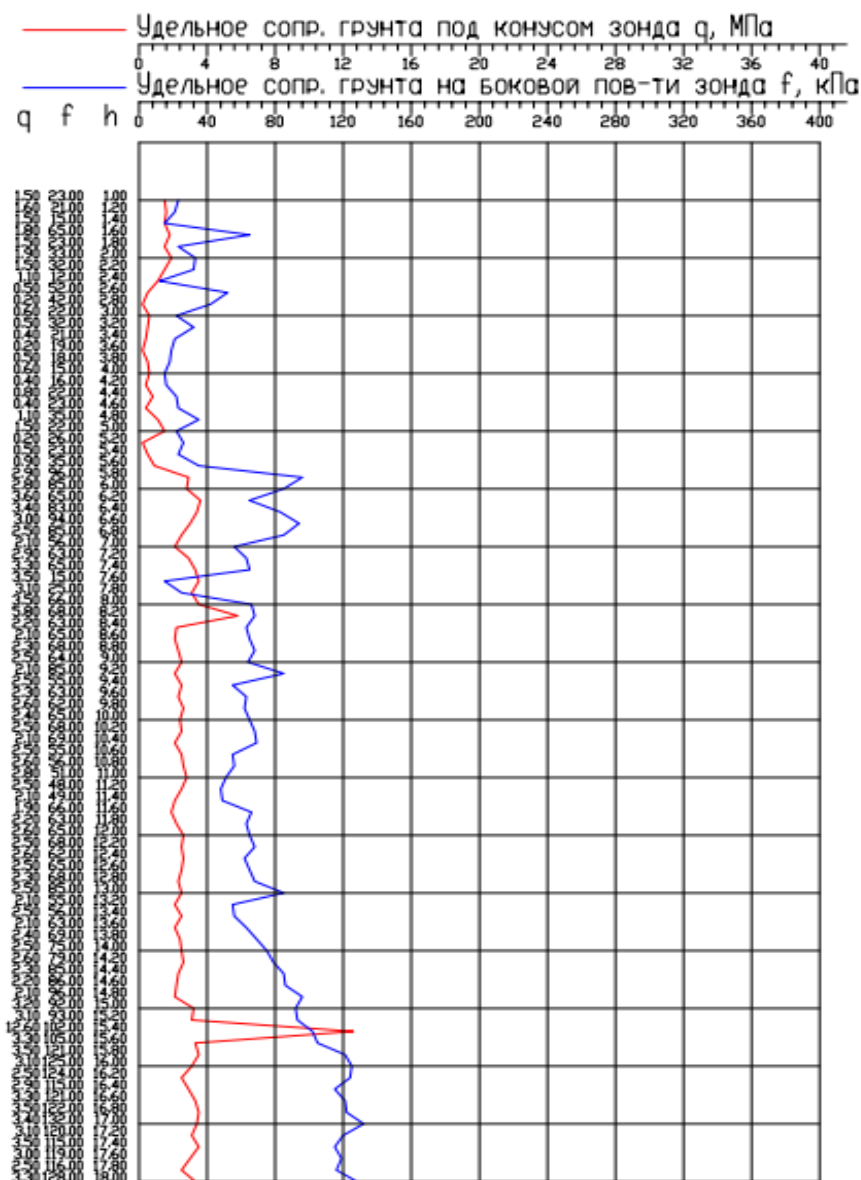


Рисунок 2. Точка статического зондирования

Испытания грунтов статическими нагрузками штампом выполнены в пределах активной зоны сжимаемой толщи грунтов основания исследуемой области, применительно к проектируемым типам фундаментов.

Модуль деформации грунтов в условиях естественного залегания определялся путем нагружения жесткого штампа вертикальной статической нагрузкой и замера возникающих деформаций.

Монолиты отбирались диаметром не менее 108 мм и высотой не менее 20 см для дисперсных грунтов. В ходе исследований решались следующие задачи:

- определение состава грунтов;
- определение физических, прочностных и деформационных свойств грунтов.

В результате анализа пространственной изменчивости частных показателей физико-механических свойств грунтов, определенных лабораторными и полевыми методами на площадке изысканий выделено 12 инженерно-геологических элементов (ИГЭ).

Нормативные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов выделенных ИГЭ определялись лабораторными и полевыми методами, с использованием методов трехосного сжатия, статического зондирования и вертикальной статической нагрузкой штампом в скважинах

Выводы

Качество и точность проведения инженерных изысканий и их результатов напрямую влияют на безопасность и долговечность сооружений. Ключевым этапом инженерно-геологических изысканий является отбор проб грунтов и определение их физических и механических характеристик.

Отмечаются улучшения показателей бурения для отбора проб с применением станка ПБУ-2, за счет многофункциональности, увеличения скорости проходки, уменьшения затрат на обслуживание.

Библиография

1. "СП 45.13330.2017. Свод правил. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87" (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 27.02.2017 N 125/пр) (ред. от 16.12.2021).
2. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов (ГОСТ 120-71) – 2015г.
3. Отбор проб грунта путем бурения (непрерывный отбор проб) "ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Геотехнические исследования и испытания. Методы отбора проб и измерения подземных вод. Часть 1. Технические принципы для выполнения" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 16.11.2017 N 1754-ст).
4. ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017 Геотехнические исследования и испытания. Методы отбора проб и измерения подземных вод. Часть 1. Технические принципы для выполнения.

**Обеспечение надежности конструкции скважины в интервалах пластичных
соленосных отложений**

**Мартюшин С.А. * (МГРИ, martushin92@mail.ru),
Овчинников П.В. (МГРИ, ovchinnikovpv@mgri.ru)**

Аннотация

Задача обеспечения надежности конструкции скважин в сложных геологических условиях, в разрезе которых встречаются пластичные текучие соленосные отложения является актуальной. Серьезные осложнения, вызванные течением солей приводящие к смятию обсадных колонн встречаются на месторождениях Оренбургской, Астраханской, Волгоградской и Саратовской областей.

Проводка скважин в соленосных отложениях во многих регионах, в том числе и в Оренбургской области сопровождается сужением ствола, кавернообразованием, многочисленными и длительными по времени проработками, затяжками, посадками, не- редко прихватами инструмента и забуриванием нового ствола, деформациями уже спущенных обсадных колонн.

Ключевые слова

Бурение скважины, осложнения, крепление скважины, соленосные отложения, деформация обсадных колонн

Теория

На основании геологического материала по ранее пробуренным параметрическим скважинам (рисунок 1) Южно-Линевская №1, Каинсайская №1, Буранная №1, Нагумановская №1, Каинсайская №2, Песчаная №20, Чиликсайская №35, обобщенный геологический разрез в Соль-Илецком и Прикаспийском районах работ можно представить в виде трех комплексов.

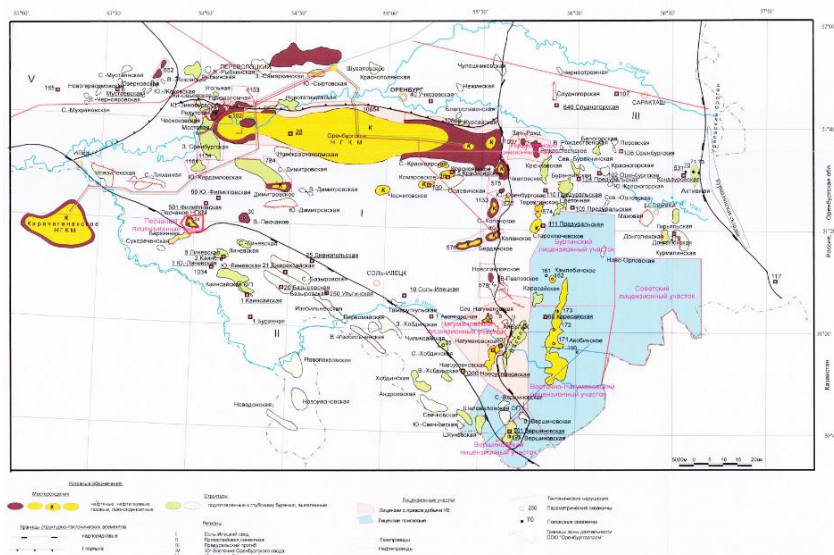


Рисунок 1. Схема расположения исследуемых месторождений

Нижний комплекс – терригенно – карбонатный ордовикско-артинский сложен в основном известняками трещиноватыми с прослоями доломитов, реже аргиллитов с пористостью 0,4-14 % и переменной проницаемостью.

Средний кунгурский соленосный комплекс представлен большой толщей пластичных каменных солей, переслаивающихся терригенными породами, способных к текучести с глубин 2000 м и ниже. Контактные зоны характеризуются обильной трещиноватостью, разуплотненностью терригенных пород и текучестью внедрившихся в них каменных солей. Здесь имеет место крутое падение пластов до 60-90°, образование опрокинутых складок, карнизов и козырьков. Максимальная мощность соленосного комплекса была вскрыта скважиной Буранная №1 и составила 5834 м. В процессе бурения, при нарушении равновесного состояния соленасыщенной толщи, возникают неординарные условия, которые приводят к тяжелым осложнениям: длительные проработки, прихваты бурильного инструмента, смятие технических колонн.

Верхний комплекс – уфимско-четвертичный терригенный представлен мощными терригенными образованиями, сложенными конгломератами, глинами, песчаниками, алевролитами. Мощность верхнего комплекса колеблется от 260 до 6200 м.

В литологическом плане разрез солевых отложений юга Оренбургской области представлен каменной, калийной солью, солями сложного состава, полигалитами в сочетании с сопутствующими породами (ангидриты, глины, аргиллиты, глинистокарбонатные породы, песчаники, сульфатные породы) различной мощности. Галит как преобладающая в разрезе соль представляется в виде от мелкозернистой до крупнозернистой, сцементированной «слабым материалом». Поэтому и плотность солей варьируется в пределах 2050 – 2150 кг/м³ [1].

Гипотезы возникновения осложнений при бурении

Существуют две основные гипотезы возникновения участков смятия обсадных колонн в условиях карбонатно-галогенной формации.

Пластическое течение солей обусловлено механическими и физико-химическими свойствами соляных пород, которые обладают высокой вязкопластической деформацией. Этот процесс усугубляется, если в разрезе присутствуют калийные соли. При вскрытии и нарушении естественного состояния соляного массива, недостаточной плотности бурового раствора, воздействии повышенных температур происходит необратимое течение солей в сторону ствола скважины, вызывая давление на обсадную колонну [3].

Наличие зон высоких горных давлений в пластичных отложениях, возможное наличие зон аномально высоких пластовых давлений в трещинных резервуарах и межсолевых рапоносных пластах, расположенных в карбонатных и галогенных толщах, приводит к увеличению напряжений на стенки ствола и обсадную колонну. При этом традиционно принятый метод обеспечения превышения гидростатического давления столба бурового раствора над горным в пластичном массиве недостаточен, присутствуют дополнительные напряжения, не учитываемые этим методом, возможны и также деформации колонны. Дополнительным фактором является взаимодействие пластового флюида с обсадными трубами, что может способствовать развитию коррозионных процессов и последующему разрушению конструкции [4].

Анализ осложнений

При строительстве скважины №35 Чиликсайской площади на глубине 3967 м отмечены посадки инструмента и деформация колонны через 12 суток после спуска. Причина – пластическое течение солей. Колонна имела эллипсоидальную форму в следующих интервалах солей: 3762,1-3763,9 м, 3854,5-3866,5 м, 3886-3897 м, 3936,5-3957 м, 3966-4001,8 м. Наиболее значительные изменения внутреннего диаметра наблюдалось в интервале 3985 - 3986,5 м: минимальный диаметр составил 206,8 мм, а максимальный – 246,9 мм (рисунок 2).

Из-за продолжающегося движения солей колонна была повторно деформирована. Анализ выявил необходимость увеличения плотности бурового раствора, райбирования колонны с периодическим размывом солей за технической колонной.

Масштаб 1 : 2,5 Диаметр колонны внешний : 250,80мм
Н : 3985,90м Dmin : 206,8мм Dmax : 246,9мм Ke : 0,18

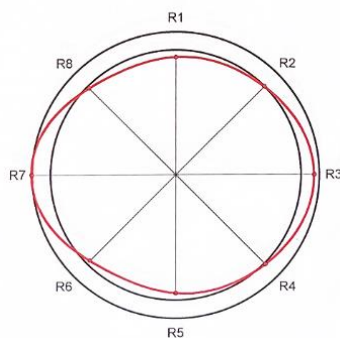


Рисунок 2. Поперечный профиль скважины на глубине 3985 м.

Вследствие затяжки бурильного инструмента и невозможности ликвидации осложнения при проходке скважины №20 Песчаной площади, возникла необходимость в бурении нового ствола. В ходе аварийно-восстановительных работ использовались кольцевые фрезы и механические райберы. Причиной осложнения стало недостаточное гидростатическое давление раствора, что привело к неконтролируемому течению солей. Было рекомендовано применение многокомпонентных ингибиторных растворов с добавлением калиевых и магниевых солей.

Основной причиной деформации потайной колонны $\varnothing 193,7$ мм в интервале 4856-5058 м в скважине №1 Южно-Линевской площади Основной причиной смятия послужило снижение внутреннего давления в колонне после ее спуска в результате уменьшения плотности бурового раствора. Восстановление внутреннего давления позволило выправить колонну и продолжить дальнейшее углубление скважины. Правка колонны осуществлялась по принятой технологии: перфорация колонны местах нарушения, прокачка пресной воды с целью размыва соли за колонной, восстановление проходимости по колонне путем применения различного рода оправок.

Через 14 месяцев после спуска обсадной колонны в скважину №1 Буранной площади произошло смятие колонны $\varnothing 244,5/250,8$ мм на глубине 2592 м в результате снижения внутреннего давления. Восстановление проходимости проводилось комбинированными методами – термогидродинамическим воздействием и локальной обработкой раствором повышенной плотности. Для предотвращения повторных деформаций была разработана программа по оптимизации траектории бурения с минимизацией риска вскрытия высокопластичных интервалов.

В скважине №2 Каинской площади на глубине 5800 м возникли затяжки и посадки инструмента. Утяжеление промывочной жидкости и проработка ствола не дали результата. После заклинивания компоновки бурильной колонны на глубине 5914-5968 м и безуспешных попыток ее освобождения приняли решение о забурировании второго ствола. Во втором стволе на 6209 м снова произошла посадка инструмента. Попытки освобождения (нефтяные и кислотные ванны, расхаживание) не увенчались успехом. ГИС выявил место прихвата на 2620

м. Освобождение удалось с натяжкой. Обнаружено сужение и нарушение колонны, проведена её правка и размыв солей.

Выводы

Осложнения при бурении в соленосных отложениях связаны с пластической текучестью солей и аномально высокими пластовыми давлениями. В таких сложных геологических условиях крайне необходим комплексный подход к проектированию скважин. Среди мер для предотвращения осложнений можно выделить:

- применение толстостенных обсадных труб с критическим давлением на смятие таких как: 250,8 x 15,88 110 SS (или: 125 SS, 110 HC, 125 HC) VAM (или: NK-3SB, Tenaris Blue, BDS и др.)
- двойная крепь скважины в интервале, сложенном текучими солями – крепление скважины двумя обсадными колоннами: интервал солей перекрывается обсадной колонной 250,8x15,88 мм 110 HSS, имеющей прочность на смятие 84 МПа, в котором в последствии устанавливается безмуфтовый хвостовик диаметром 193,7x12,7 110 HSS 193,7;
- цементирование внутреннего пространства обсадных колонн в интервале интервала текучих солей и консервация скважины на месяц до окончания течения солей, равномерного заполнения текучей породой каверн за колоннами, релаксации наружного давления за колоннами;
- подбор растворов с ингибиторами растворения солей, использование солестойких химических реагентов-стабилизаторов, применение утяжеленных соленасыщенных буровых растворов или переход на бурение с применением буровых растворов РУО.
- мониторинг состояния (диаметра) ствола скважины в процессе бурения методами ГИС.

Предложенный комплекс мероприятий позволит повысить надежность конструкции скважин и минимизировать риски осложнений.

Библиография

1. Айсин Г. А., Никонов Н. Г. Особенности горно-геологических условий при бурении соленосной толщи и определение необходимой плотности бурового раствора для обеспечения устойчивости ствола поисково-параметрических скважин //Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – №. 9. – С. 40-45.
2. Горонович С. Н. и др. Природа сужения ствола скважин при вскрытии солевых отложений большой толщины //Нефтяное хозяйство. – 2014. – №. 1. – С. 41-43.
3. Сверкунов С. А. и др. Рассолонаторные системы с аномально высоким пластовым давлением как главный фактор смятия обсадных колонн //Подземные воды востока России. – 2018. – С. 423-428.
4. Якубовский Ю. Е., Дорофеев Е. В., Горонович С. Н. Прочность обсадных колонн поисковых скважин в условиях образования каверн //Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – №. 2. – С. 107-111.

Супрамолекулярные системы полимерных буровых растворов для эффективного сооружения скважин

***Мартюшина Е.Е. * (МГРИ, martushinaee@mgri.ru),
Соловьев Н.В. (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru)***

Аннотация

Буровые растворы являются неотъемлемой частью процесса строительства скважин, и их свойства во многом определяются сложными взаимодействиями между различными компонентами, которые можно рассматривать как супрамолекулярные структуры в жидком состоянии. Эти структуры формируются благодаря нековалентным межмолекулярным взаимодействиям, что позволяет буровым растворам действовать как единое целое. Эффективная работа буровых растворов зависит от оптимального сочетания различных реагентов, таких как загустители и разжижители, что влияет на характеристики их супрамолекулярных структур. Гибкость и прочность этих систем, вызываемые водородными связями в молекулах воды, позволяют быстро разрушать и восстанавливать полиэдрические каркасы, что способствует стабильности и адаптивности буровых растворов к внешним воздействиям.

Ключевые слова

буровые растворы, супрамолекулярные структуры, гидрогели, химическая сшивка

Теория

Буровые растворы можно рассматривать как супрамолекулярные структуры в жидком состоянии, где взаимодействия между частицами дисперсионной среды и другими компонентами определяют их свойства. Эти супрамолекулярные структуры формируются за счет нековалентных межмолекулярных взаимодействий и действуют как единое целое. Все реагенты в растворе по-разному влияют на характеристики этих структур. Оптимальные эксплуатационные свойства рабочей жидкости достигаются при сочетании различных реагентов: загустителей, создающих новые полиэдры, и разжижителей, которые разрушают эти полиэдры. Это взаимодействие способствует гибкости водородных связей в молекулах воды, что, в свою очередь, обеспечивает быстрое разрушение и восстановление полиэдрических каркасов [1].

Супрамолекулярная модель объясняет влияние химических реагентов и агрессивных факторов на буровые растворы, а также способы управления их свойствами через регулирование полиэдрического каркаса. Водные супраструктуры отличаются от неводных своей способностью адаптироваться и быстро восстанавливаться после разрушений под воздействием различных факторов. Прочность и подвижность водородных связей в основном зависят от типа и концентрации твердых фаз в растворе. В общем случае размеры и количество полостей каркаса определяются полярностью водородных связей, свойствами и формой гостевых молекул, а также концентрацией твердых частиц. С увеличением концентрации твердой фазы управление гибкостью и прочностью связей становится более сложным.

Одним из определений супрамолекулярной химии является ее определение как химии соединений «хозяин – гость». В таком контексте обычно рассматривают молекулу («хозяина»), связывающую другую молекулу («гостя»). Хозяином выступает большая молекула или агрегат с полостью, способной заключать в себя небольшую молекулу или ион. Хозяева буровых растворов делятся на четыре типа:

1. С фиксированными размерами: их каркас имеет жесткие связи, что делает самовосстановление после разрушения невозможным. В буровых растворах такими хозяевами

являются глинистые породы (минералы), при этом другие процессы вносят свой вклад (например, набухание, гидратация), тем самым искажая картину происходящего [2].

2. С гибкими связями: эти структуры восстанавливаются самостоятельно и имеют фиксированные размеры полостей, сохраняя селективные свойства. К ним относятся триэтаноламин и флотореагент «Оксаль».

3. С гибкими связями из дифильных молекул: самовосстанавливаясь под воздействием определенных гостей, эти хозяева, как поверхностно-активные вещества (ПАВ), быстро собираются без внешних энергозатрат.

4. С гибкими связями между маленькими блоками: Формируют поры в зависимости от гостей и быстро восстанавливаются, благодаря гибкости и физико-химическим свойствам. В буровых растворах такими блоками выступают молекулы воды, соединенные водородными связями. Процесс самосборки эффективнее в жидкой среде и регулируется изменением полярности связей строительных блоков [1].

В настоящий момент учеными изучаются супраструктуры в буровых растворах двух видов: на основе глинистых частиц и на основе гидрогелей.

Повышение устойчивости ствола скважины определяется химической активностью элементарных глинистых пластинок при взаимодействии с проникающим фильтратом бурового раствора, обеспечивающим увеличение объема связанной кристаллической решёткой глин воды. Объем поглощенной элементарными глинистыми пластинками воды зависит от величины скорости электроосмотического перетока, а значит и величины электрического потенциала их поверхности, сформированного обменным комплексом катионов и привнесёнными зарядами супрамолекулярных систем буровых растворов и растворенных в них электролитами [3].

В исследовании ученых из Казахстана [7] супергидрофобная органическая глина была получена в виде порошка, который не мог поддерживать каплю воды; Следовательно, угол контакта с водой был больше 170° . Такая глина была введена в жидкость с очень низкой полярностью и показала высокую долговременную стабильность. Поэтому в данной работе предложена оптимальная органоглина для получения стабильных тиксотропных буровых растворов. Этот тип монтмориллонита обладает высоким потенциалом для супергидрофобизации и супрамолекулярной интеркаляции любыми молекулами-модификаторами.

Гидрогель - это вид материала, который может образовывать трехмерную сетевую структуру с помощью свободной полимеризации полимеров. Он содержит большое количество воды внутри и представляет собой мягкую субстанцию между жидкостью и твердым телом. Гидрогели могут быть получены из различных видов сырья, включая полимерные мономерные материалы, полимерные материалы или смесь полимерных мономеров и полимеров. Изменяя режим сшивки гидрогеля, можно регулировать степень сшивки и влиять на равновесную скорость набухания гидрогеля. Хотя гидрогели могут поглощать большое количество воды в растворах с разным pH, они могут сохранять определенную форму, не растворяясь [5].

Гидрогели обычно образуют сетевую структуру посредством химической сшивки, физической сшивки и химико-физической сшивки [5]. Физически сшитые гидрогели в основном образуют физические сшивающие сети за счет водородных связей между молекулярными цепями, статического электричества, взаимодействия «хозяин-гость», гидрофобного взаимодействия и запутывания молекулярных цепей. Физическая сшивка гидрогеля обратима при определенных условиях, что расширяет спектр его применения. Химически сшитые гидрогели образуют химическую сшивающую сеть через точки химической сшивки [5]. Сеть химических сшивок обладает высокой прочностью и

жесткостью; после разрушения химической сети она не может быть самовосстановлена ни при каких условиях.

Считается, что взаимопроникающая сетевая структура является полезным приемом для улучшения механических характеристик гидрогелей. В гидрогеле присутствует одна сшитая полимерная сеть, а другая остается линейной. Линейные полимеры связаны со сшитыми полимерными сетями силами Ван-дер-Ваальса, электростатическими взаимодействиями, водородными связями, гидрофобной ассоциацией или комбинацией этих взаимодействий.

Традиционный гидрогель, используемый для водоизоляции скважин, показал хорошие результаты в борьбе с мелкими и средними трещинами и поглощениями бурового раствора. Однако для крупных трещин или катастрофических поглощений бурового раствора из трещиноватых скважин приспособленность обычного геля относительно низка. Супрамолекулярные гели - это физически сшитые гидрогели, образованные за счет нековалентных взаимодействий. Синтез, оптимизация структуры, регулирование свойств и расширение сферы применения супрамолекулярных гелей постепенно становятся актуальными исследованиями в области гелевых материалов [5]. Ученые из Китая разработали супрамолекулярную гелевую систему широкого спектра действия с высокой прочностью и эластичностью в соответствии с теорией и методом супрамолекулярной химии [6]. За контролируемое время в пласте потерь могут образовываться гели с определенной прочностью, которые проникают в пластовые поры или трещины и закупоривают пласт потерь.

Как правило, гидрофобные ассоциативные гели получают методом мицеллярной сополимеризации и состоят из большого количества гидрофильных мономеров и малого количества гидрофобных мономеров в зависимости от их гидрофобной связи с гидрофильными элементами, гидрофобными элементами, поверхностно-активными веществами и электролитами. Гидрофобные мономеры соединяются, образуя мицеллу, которая служит физически точкой сшивки для гидрофобных ассоциативных гелей [5].

В лаборатории «БУРИНТЕХ» был создан буровой раствор для бурения горизонтальных участков скважин и получены его оптимальные реологические параметры (рис. 1).

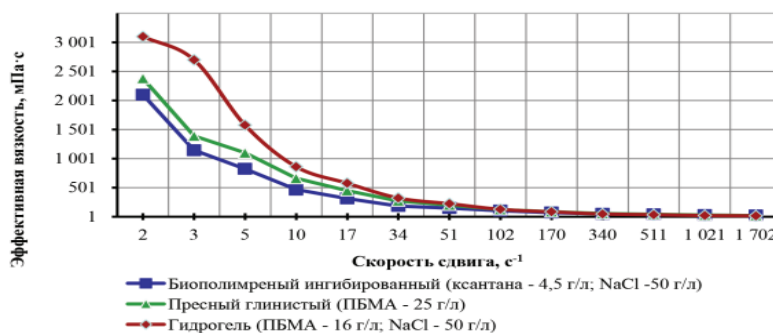


Рисунок 1. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига

Образование кристаллогидратов происходит при минимальных концентрациях поливалентных солей в присутствии мицелл бентонита, которые выступают центрами кристаллизации. Получившиеся оксихлориды поливалентных солей могут существовать без высокой общей минерализации раствора, благодаря адсорбции на мицеллах бентонита. Взаимодействие оксихлоридов с поверхностью бентонита приводит к образованию основного компонента системы, включающего в себя комплексные олигомерные и полимерные частицы, которые обеспечивают достаточные тиксотропные свойства системы. Механизм структурирования является комбинацией координационного и кристаллизационно-

коагуляционного. Это позволяет добиться солестойкости, термостойкости (пока доказано до 100 °С) и минимальной концентрации активной твердой фазы.

Выводы

Современные исследования буровых растворов акцентируют внимание на их супрамолекулярных аспектах, что позволяет глубже понять механизмы, влияющие на их характеристики и работу в условиях бурения. Разработка высокоэффективных буровых растворов с использованием органоглин и супрамолекулярных гелей открывает новые горизонты для повышения устойчивости и гибкости этих систем. Супрамолекулярные гели - это физически сшитые гидрогели, образованные за счет нековалентных взаимодействий. Синтез, оптимизация структуры, регулирование свойств и расширение сферы применения супрамолекулярных гелей постепенно становятся актуальными исследованиями в области гелевых материалов. Перспективные подходы могут существенно улучшить эксплуатационные характеристики буровых растворов, способствуя повышению эффективности и безопасности процессов бурения.

Библиография

1. Гайдаров М. М. Р. и др. Особенности формирования супраструктур в буровых растворах // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – №. 6. – С. 38-42.
2. Джонатан В., Джерри Л. Этвуд. Супрамолекулярная химия Супрамолекулярная химия в 2 т. /пер. с англ. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. — Т. 1. — 480 с.
3. Соловьев Н. В. Обоснование основных параметров механизма мембранообразования в глиносодержащих горных породах при бурении с использованием полимерных растворов / Н. В. Соловьев // Инженер-нефтяник. – 2018. – № 1. – С. 20-24.
4. Фатхутдинов Л.Р. и др. ГИДРОГЕЛЬ - буровой раствор для бурения горизонтов без ксантановой камеди // Бурение и нефть. – 2022. – № 9. – С. 22-24.
5. Du X. et al. Evaluation of Supramolecular Gel Properties and Its Application in Drilling Fluid Plugging //Processes. – 2023. – Т. 11. – №. 9. – С. 2749.
6. Jiang Q. et al. The influence of fiber on the rheological properties, microstructure and suspension behavior of the supramolecular viscoelastic fracturing fluid //Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Т. 35. – С. 1207-1215.
7. Ibraimova D. M. K. et al. Preparation of drilling fluids from Tagan superhydrophobic clay: Superhydrophobic clay testing //Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. – 2024. – Т. 10. – С. 100889.

Термостойкие вязкоупругие смеси на основе сшитых полимерных гелей

***Мартюшина Е.Е.* (МГРИ, martushinaee@mgri.ru),
Сырчина А.С. (МГРИ, syrchinaas@mgri.ru)***

Аннотация

Традиционным методом изоляции зон поглощений является намыв в зону глинистого раствора с волокнистыми наполнителями с последующим тампонирующим раствором. У указанного метода имеются следующие недостатки. Волокнистый наполнитель засоряет рабочие органы забойных двигателей, что ведет к преждевременным их ремонтам, приводит к увеличению непроизводительного времени в бурении. Цементноглинистая корка, остающаяся на внутренней стенке бурильной колонны, со временем осыпается и засоряет рабочие органы забойных двигателей. Бурение прочного цементного камня в интервале кавернозных, слабосцементированных пород приводит к отклонению долота от ствола.

Применение изолирующих и вязкоупругих смесей без использования цемента помогает сократить затраты на изоляцию зон поглощений бурового раствора и снизить вероятность возникновения вышеуказанных рисков. Преимуществом вязкоупругих составов является их высокая адгезия, быстрота и легкость приготовления, регулирования, применения и реагирования [1].

Ключевые слова

Полимер; изоляция; гель; тампонаж; вязкоупругая смесь

Теория

В основу получения вязкоупругих смесей положен принцип сшивки водорастворимых линейных полимеров с карбоксидными и амидными функциональными группами синтетических смол, ПАА, гипана, КМЦ в водной среде полуфункциональными соединениями (формалином, уротропином) [2].

«Умные» полимерные системы реагируют на изменения во внешней среде. Взаимодействия, такие как гидрофобные и гидрофильные взаимодействия, силы Ван дер Ваальса и электростатические силы между ионами, конкурируют друг с другом, вызывая конформационные изменения в сегментах полимерной цепи, что в конечном итоге приводит к фазовым изменениям.

В настоящее время большинство полимеров с памятью формы имеют много ограничений для устранения поглощений в сложных условиях, таких как объемные трещины и поры, высокие температуры, высокий уровень pH и другие жесткие условия. Поэтому был создан «умный» полимерный гель, представляющий собой многофункциональную систему, состоящую из низкомолекулярного носителя и полимера с трехмерной сшитой сетчатой структурой. В качестве основы выступает натуральная макромолекулярная целлюлоза. При добавлении сшивающего агента и катализатора – вступает в реакцию с кополимеризованным водорастворимым акриламидным гелем и позволяет контролировать время гелеобразования. Состав активируется при определенной температуре и давлении, и молекулы взаимодействуют друг с другом, что приводит к накоплению, удержанию и образованию мостиков. Это позволяет заполнить и укрепить трещины.

В последние годы количество глубоких скважин увеличилось, и агент для ликвидации поглощений бурового раствора должен обладать отличной термостойкостью. Молекулярная цепь сшитого полимерного геля легко разрушается при высоких температурах, что приводит к изменению свойств, разрушению структуры и, следовательно, нарушению изоляционного слоя. Чтобы решить такие проблемы, исследователи проводили эксперименты, вводя

термостойкие группы, разрабатывая молекулярную структуру и добавляя наноматериалы или сшивающие агенты.

Для улучшения термостойкости продукта была использована натриевая соль стиролсульфоната и 2-акриламид-2-метилпропансульфоокислоты в качестве сырья, введена сульфогруппа ($-\text{HSO}_3$) и разработан термостойкий водопоглощающий раствор. Исследования показывают, что гель хорошо расширяется, и его скорость расширения увеличивается с повышением температуры (рисунок 1). После нагревания при 180°C в течение 12 часов скорость расширения может увеличиваться до 2,5 раз. После 20 дней непрерывного нагрева гель все еще сохраняет хорошую стабильность. Это связано с тем, что сетчатая структура герметизирующего агента становится плотнее с добавлением акриламид-2-метилпропансульфоокислоты.

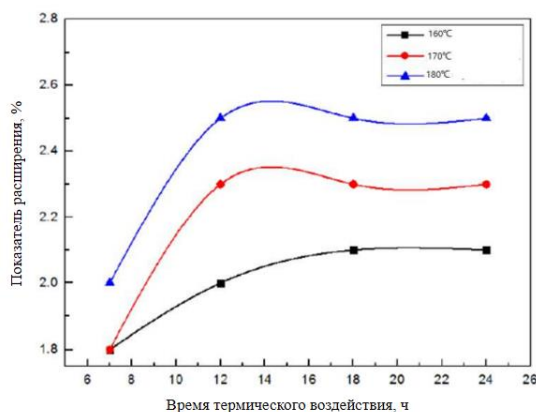


Рисунок 1. График изменения показателя расширения

Существует также термостойкая вязкоупругая смесь [5], армированная волокнами с помощью специального подхода к молекулярной структуре. Использован акриламид, бутилметакриламид и 2-акриламид-2-метилпропансульфоокислоты в качестве мономеров, гибкие волокна для армирования, персульфат аммония в качестве инициатора и макромолекулярный связывающий агент BWL.

Микрогель BWL используется как сшивающий агент. Он способен сам полимеризоваться и образовывать частично полимеризованные микрогели. Эти микрогели содержат реактивные окончания (например, амидные и карбоксильные группы), которые связываются с органическими сшивающими агентами. Реактивные окончания — это функциональные группы на концах полимерных цепей, которые активно участвуют в химических реакциях. В данном случае, это амидные группы ($-\text{CONH}_2$), карбоксильные группы ($-\text{COOH}$) и ацильные группы ($-\text{CO}-$), которые могут вступать в реакции с другими молекулами, обеспечивая образование прочных химических связей между полимерными цепями.

Благодаря множеству реактивных двойных связей ($\text{C}=\text{C}$), содержащихся в BWL, обеспечивается более высокая плотность сшивки по сравнению с обычными сшивающими агентами. Это способствует образованию плотной трехмерной сетчатой структуры, обладающей хорошей термостабильностью. В результате, без гибких волокон гель имеет модуль упругости около 5500 Па, а с добавлением гибких волокон — увеличивается до примерно 7200 Па. Вязкоупругая смесь блокирует поглощения на 98% при 100°C и сохраняет стабильность при температуре до 250°C .

Были разработаны гидрогели, модифицированные наночастицами диатомовой земли в качестве армирующей добавки [3]. На графике анализа термостойкости до и после добавления диатомовой земли (рисунок 2) видно, что температура разрушения основной полимерной цепи геля увеличивается до 517,0 °С при концентрации диатомовой земли 0,09% (массовая доля). Температура стеклования также повышается до 135,2 °С. Это означает, что наночастицы диатомовой земли действуют как термическая изоляция и барьер для переноса массы, что предотвращает термическое разрушение геля при высокой температуре.

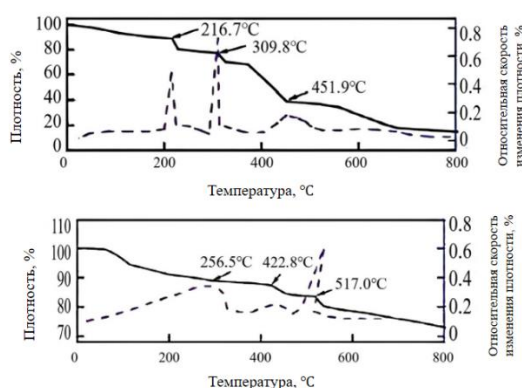


Рисунок 2. Анализ термостойкости до и после добавления диатомовой земли

Наночастицы диатомовой земли образуют водородные связи с амидными и карбоксильными группами гидролизованного полиакриламида через гидроксильные группы на поверхности диоксида кремния. Затем они встраиваются в гель и взаимодействуют с полимерными цепями, увеличивая сопротивление молекулярному движению, что приводит к повышению температуры стеклования. Таким образом, термическая стабильность вязкоупругой смеси значительно улучшается.

Была изучена термостабильность при сверхвысоких температурах системы, образованной терполимером (L-1) и новой системой сшивки (НВ-1) [4]. Эксперименты показали, что имеющая такой состав вязкоупругая смесь может формировать стабильную непрерывную трехмерную сетчатую структуру при температуре 120-200 °С, что свидетельствует о её хорошей долгосрочной термостабильности. По сравнению с обычными термостойкими гелями, система сшивки НВ-1 содержит четыре гидроксильные группы (-CH₂OH). Сшивка с четырьмя амидными группами (-CONH₂) на терполимере может сформировать трехмерную сетчатую структуру с меньшим размером ячеек (менее 5 мкм), что усиливает термостабильность. При температуре 200 °С размер ячеек сетчатой структуры составляет около 10 мкм, но прочность гелевой системы все еще может поддерживаться на достаточном уровне. По изображениям, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа (рисунок 3), видно, что гелевая система очень прочно прикрепляется к пористой среде.

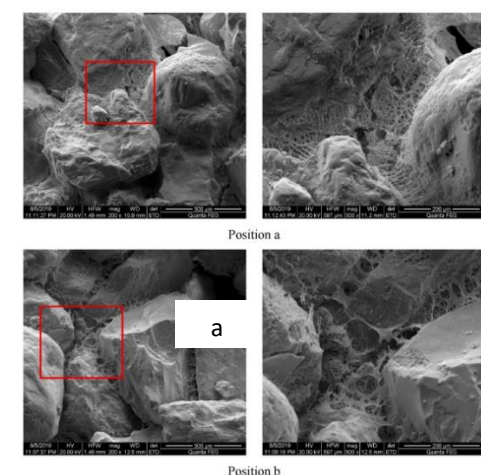


Рисунок 3. Песчаник. Изображение с микроскопа (а – до воздействия гелевой системы, б – после)

Выводы

Подводя итоги, можно сказать, что гелевая система на основе «умных» полимеров имеет большой потенциал для применения в качестве вязкоупругих смесей на высокотемпературных нефтегазовых месторождениях. В целом, исследования и применение «умных» материалов в бурении пока на начальном этапе, и их характеристики требуют дальнейшего совершенствования. Необходимо расширять сферу их использования, развивать научные и интеллектуальные методы, ускорять внедрение в промышленность для практического, инновационного и интеллектуального развития технологий предотвращения и ликвидации поглощений бурового раствора.

Библиография

1. Григорьева А.И. и др. Применение вязкоупругих смесей при изоляции зон поглощения// Труды молодых учёных института "ТатНИПИнефть"- 2014/
2. Зварыгин, В.И. Тампонажные смеси: учеб. пособие Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 216 с.
3. He S. et al. Strength and temperature resistance of nano-diatomaceous earth enhanced polyacrylamide gel plugging agent //Sci. Technol. Eng. – 2018. – Т. 18. – С. 65-71.
4. Liu J. et al. Investigation of a high temperature gel system for application in saline oil and gas reservoirs for profile modification //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Т. 195. – С. 107852.
5. Zhang W. et al. High temperature resistant fiber reinforced gel particle plugging agent //Drill. Complet. Fluids. – 2020. – Т. 37. – С. 269-274.

Особенности бурения добывающей нефтяной скважины на Киньяменском месторождении

***Маслак С.В.* (МГРИ, maslak.s99@gmail.com),
Сырчина А.С (МГРИ, syrchinaas@mgri.com)***

Аннотация

Добывающая скважина Киньяменская 206 куст 266 расположена в Нижневартовской нефтегазодобывающей провинции ХМАО. На скважине пробурен боковой наклонно-направленный ствол с целью эксплуатации нефтеносного пласта Юрского периода. Бурение сопровождалось авариями и осложнениями. Геология представляла собой чередования осадочных отложений. Для бурения данной скважины применялся комплекс систем телеметрии и геонавигации отечественного производства.

Ключевые слова

Телеметрия, геонавигация, наклонно-направленная скважина, боковой ствол, зарезка бокового ствола

Теория

Киньяменское нефтяное месторождение расположено между Нижневартовском и Нефтьюганском в Ханты-Мансийском Автономном округе. Нефтеносные пласты залегают на глубине трех тысяч метров и приурочены к юрскому периоду, Тюменской свите. Данный запас относится к трисам (трудодобываемым запасам) [1].

На данной скважине был пробурен боковой ствол на глубине 2064 м, доходящий до глубины 2877 м по вертикали и 3900 м по стволу скважины.

Геология состоит из чередования алевролитов, сланцев, песков и песчаников.

Для бурения была использована самопередвижная буровая установка МБУ-140. Данная установка предназначена для капитального ремонта. Максимальная нагрузка на крюке 140 тон. Мачта телескопическая и имеет высоту 35.5 метров от поверхности земли.



Рисунок 1. МБУ-140 зарезки бокового ствола был создан цементный мост, затем с помощью клина и райзер было забурено окно. Частицы металла, попавшие в скважину, вызвали поломки долота. Бурение производилось пятилопастным долотом PDC диаметром 126 мм.

Для обеспечения связи телеметрической системы с поверхностью использовался гидравлический канал связи. Связь осуществляется путем кратковременного перекрытия трубы страйкером и ловлей скачка давления на манифольде манометром. Система шестнадцатибитная.

Для бурения данной скважины использовался ВЗД ДПР-98 с заходностью 7/8 от компании ООО Герс-Инжиниринг.

Резистивиметр ЭКЗ-102 GT. Помимо измерения сопротивления пород данный резистивиметр так же имеет возможность измерять давление, температуру, отклонение от вертикали, магнитный азимут и гамма-излучение пород.

Питание к данной системе подводилось с помощью литий-ионных батарей, собранные в стезйвы. Литий-ионные батареи являются угрозой воспламенения на поверхности. Стоит заметить, то, что литиевый огонь особенно опасен при воспламенении и сложен в тушении, так как литий активно и экзотермически реагирует при контакте с водой.

Применяемый ясс-SJ-100. Предназначен для борьбы с прихватами. Так же изготовлен ООО Герс-Инжиниринг.

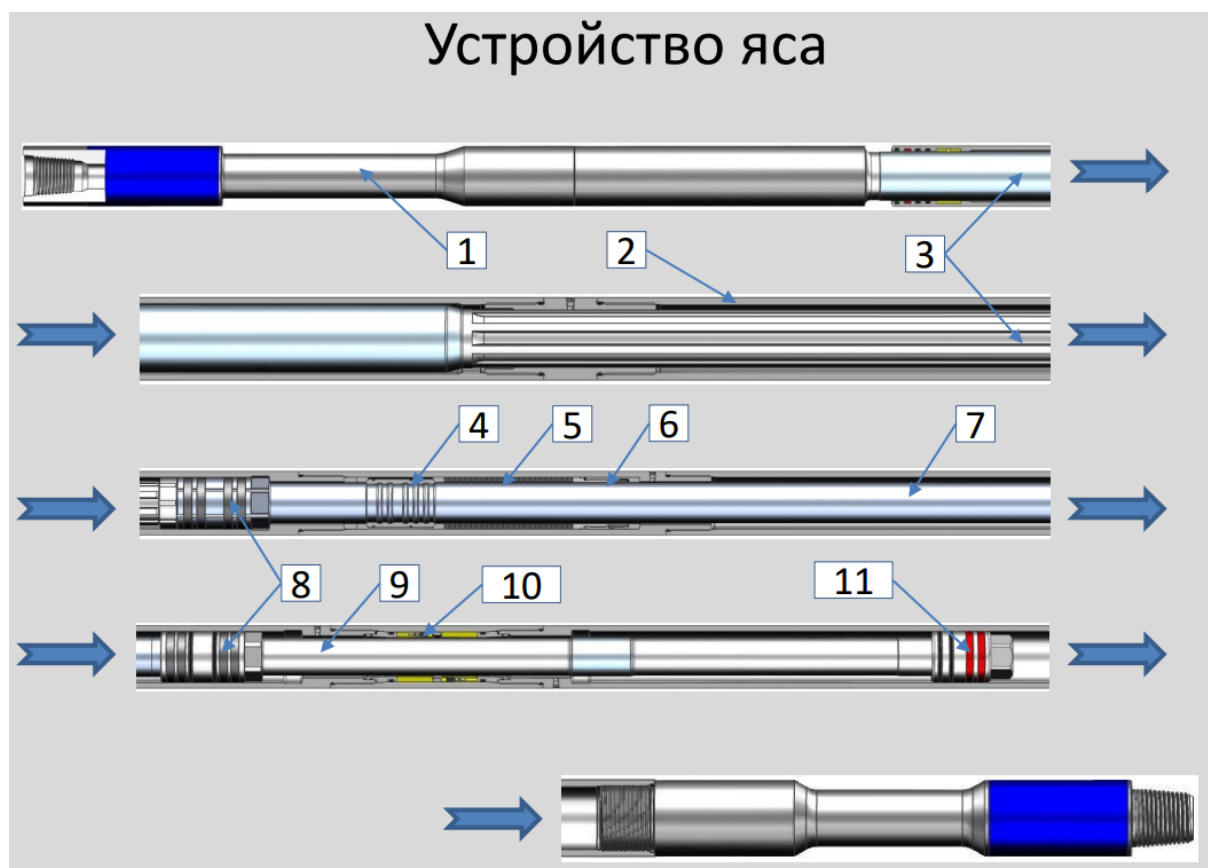


Рисунок 2. Яс гидромеханический, двустороннего действия: 1. Элеваторный переводник; 2. Корпуса; 3. Шток шлицевый; 4. Защелка; 5. Блок тарельчатых пружин; 6. Регулятор усилия защелки; 7. Шток защелки; 8. Блок уплотнительных колец; 9. Шток клапанный; 10. Блок клапанов; 11. Поршень

Раствор на водной основе. Имеет плотность 1,24 г/см³, условную вязкость 45 с, статическое и динамическое напряжение сдвига составляет 6 Па, пескосодержание 2%, твердая фаза и смазка 6 и 5 процентов соответственно и pH 11. Содержание карбоната кальция составляет 125 кг/м³.

Стоит заметить, что повышенная вязкость бурового раствора благоприятно влияет на качество сигнала при промывке скважины водой в сигнале, присутствуют чрезмерные шумы.

Необходимо отметить, что наибольшее затруднение при выделении сигнала на фоне помех от работающих насосов, вносит помеха, возникающая в процессе одновременной работы двух насосов различных типов, имеющих рассогласование по времени τ [2].

Построенные характеристики [2] показывают, что при наиболее неблагоприятных условиях работы телеметрической системы передачу информации с забоя необходимо осуществлять на частотах не превышающих 0.5 Гц, но даже в этом случае выделение сигнала на фоне помех является достаточно сложной задачей, требующей применения специальных конструктивных и программных решений.

Данная скважина оборудована подвешенным не зацементированным хвостовиком диаметром 102 мм. Данный хвостовик подвешивается на муфтах на глубинах 2082 м и 2092 м.

Пластовый флюид представлен нефтегазоводяной смесью. Пластовое давление 270 атмосфер. Газовый фактор 55, содержание сероводорода и углекислого газа 2 и 5 процентов соответственно. Следовательно, парциальное давление составляет 5,4 и 13,5 атмосфер соответственно [3].

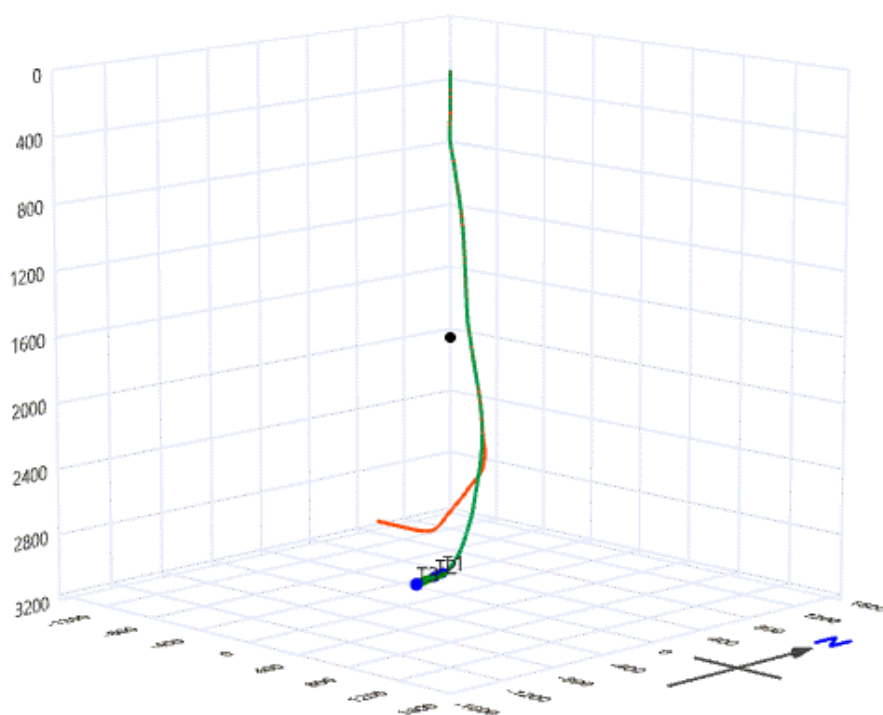


Рисунок 3. Профиль скважины

На рисунке 2 изображен профиль скважины в трехмерной проекции. Стоит заметить, что боковой наклонно-направленный ствол направлен на юг.

В данном районе магнитное склонение равно 15, 58 градусам. Его точное значение важно для получения точных данных геонавигации [4].

Выводы

1. При бурении наклонно-направленных скважин в сложных горно-геологических условиях важно учитывать не только геологические параметры, но и технологические, которые могут оказывать негативное влияние на процесс проводки скважины.
2. В современных реалиях отечественный рынок бурового инструмента справляется на достаточном уровне при строительстве наклонно-направленных скважин.

Библиография

1. Севастьянов А.А., Коровин К.В., Зотова О.П., Зубарев Д.И. Перспективы разработки отложений тюменской свиты на территории ХМАО-Югры // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 12-2. – 444 – 448.
2. Греков С.В. Исследование помех в гидравлическом канале связи телеметрической системы контроля забойных параметров в процессе бурения // Электронный научный журнал нефтегазовое дело. – 2005. – № 5.
3. Грищенко А.И., Островская Т.Д., Юшкин В.В. Углеводородные конденсатные месторождения природного газа. Издательство Недр 1983г.
4. Стищенко А. Н. Геонавигация в Пять Кликов Геомодель 2018.

Разработка и применение роторно-управляемой системы РУС-120-ГТ

Мезенцев Д.Ю.* (МГРИ, mezencevdu@mgri.ru),

Соловьев Н.В. (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru),

Денисов О.В. (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, denisov8428@gmail.com)

Аннотация

Роторно-управляемая система РУС-120-ГТ осуществила множественные этапы в разработке, производстве и в практическом применении. Российская система разработана и создана компанией ООО «ГЕРС Технолоджи». Опыт применения показан на основании 43 опытно-промысловых испытаний, выполненных в период с 18.09.2021 по 22.02.2025. Целью данной работы является передача накопленного опыта практического использования с применением сравнительного анализа.

Ключевые слова

Роторно-управляемая система, опытно-промысловые испытания, многозабойная скважина, траектория, горизонтальное бурение

Источники финансирования

Разработка, проведение опытно-промысловых испытаний и внедрение в производство проводится группой компаний «ГЕРС», ООО «ГЕРС Технолоджи».

Теория

На сегодняшний день, наиболее актуальными в развитии наклонно-направленного бурения являются горизонтальные скважины и скважины с большим отходом от вертикали. Роторно-управляемые системы широко применяют благодаря возможности бурения прямолинейных скважин, качественной промывки ствола и точного контроля параметров бурения [7].

Роторно-управляемая система — это результат развития технологии направленного бурения, устраняющий недостатки управляемых забойных двигателей и традиционных роторных компоновок [5].

Цели разработки отечественного РУС-120-ГТ:

1. Технологический суверенитет;
2. Научно-технологическое развитие в нефтегазовой отрасли;
3. Разработка морских шельфовых проектов;
4. Снижение стоимости и следовательно повышение рентабельности проектов;
5. Бурение горизонтальных многозабойных скважин с большим отходом от вертикали;
6. Проводка ствола скважины при вскрытии сложных и нетрадиционных залежей (ТРИЗ);
7. Улучшение технологии конструкции скважины за счет выдержанного номинального диаметра и геометрии ствола [1];
8. Оптимизация сроков строительства скважин с исключением дополнительных технологических операций в процессе строительства скважин;
9. Исключение риска зашламованности ствола скважины за счет постоянного вращения всей бурильной колонны;
10. Уменьшение влияния субъективного фактора на процесс направленного бурения скважины [4].

11. Уменьшение динамических скачков давления, в следствии чего происходит снижение вероятности гидроразрыва пород [6];

12. Сокращение риска механического и дифференциального прихватов, поскольку нет неподвижных элементов, контактирующих с обсадной колонной, отклонителем или стенкой ствола скважины [1].

РУС-120-ГТ является конкурентоспособной разработкой отечественного производства, не уступая иностранным производителям по функциональным возможностям и значительно превосходя их по экономически-логистическим показателям, что достигается высокой локализацией производства.

Разработка РУС-120-ГТ основана на принципе толкания боковых лопат – система типа «push-the-bit». Отклонение от стенки скважины осуществляется за счет боковой лопаты, которая выдвигается во время вращения роторно-управляемой системы совместно с буровым инструментом и КНБК (общий вид представлен на рисунке 1). Величина отклоняющей силы зависит от гидравлической энергии потока бурового раствора и перепада давления на долоте.

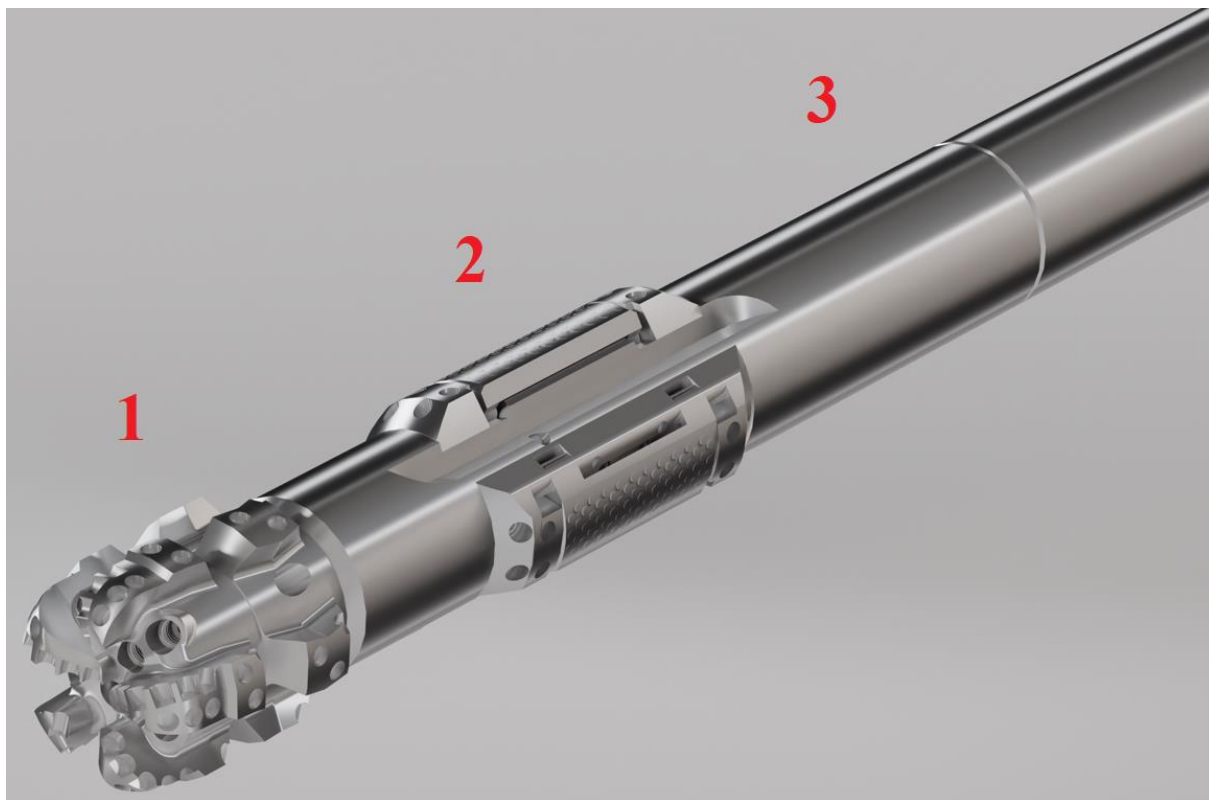


Рисунок 1. Общий вид РУС-120-ГТ
1 – долото; 2 – узел лопаток; 3 – корпус прибора

Система включает в себя следующие элементы: силовой блок с узлом лопаток, узел клапанов с приводами, модуль управления электроники с акустическим каналом связи и блоком гамма-каротажа, модуль инклинометра и модуль питания. Все элементы, располагаются коаксиально в немагнитных трубах и переходных переводниках, кроме силового блока. В составе прибора присутствует стабилизирующий калибратор, который обеспечивает третью точку контактной опоры при работе силового блока. [1]

Применяемая российская роторно-управляемая система РУС-120-ГТ не уступает техническим характеристикам западным аналогам, о чем свидетельствуют результаты проведенных опытно-промысловых испытаний.

Таблица 1– Конкурентный технический анализ РУС

Наименование	ГЕРС Технолоджи	Schlumberger	Baker Hughes	Halliburton	Weatherford
Название прибора	РУС-12Г- ГТ	PowerDrive X6 475	AutoTrack	Geo-Pilot	Revolution
Номинальный наружный диаметр (мм)	120	121	121	133	121
Диаметр долота (мм)	139-175	142.9-171	152-171	149-171	149-171
Тип	Push-the-bit	Push-the-bit	Push-the- bit	Point-the- bit	Point-the-bit
Максимальная интенсивность (град/м)	2.3/10	2.7/10	3/10	2.7/10	3/10
Максимальная скорость вращения (об/мин)	250	220	400	250	250
Максимальный расход промывочной жидкости (л/сек)	22	23.8	22.1	22.1	22.1
Способ передачи команд	Изменение вращения	Изменение расхода	Изменение расхода	Изменение расхода	Изменение расхода

В период с 18.09.2021 по 22.02.2025 было проведено 43 опытно-промысловых испытания (ОПИ) РУС-120-ГТ. В общей сложности было пробурено 27921 м, наработка на РУС-120-ГТ составила 5120 часов циркуляции.

Опытно-промысловые испытание №43 выполнялось на Ковыктинском газоконденсатном месторождении. Применяемое долото соответствовало диаметру 146.1мм. Горизонтальный ствол скважины успешно пробурен за 1 рейс. Механическая скорость проходки увеличена в 2 раза, по сравнению с плановой. При подъеме оборудования на устье скважины, ревизия не выявила отклонений работы прибора вне спецификации.

По результатам ОПИ полностью подтверждена возможность управления траекторией РУС-120-ГТ и, как следствие, успешность технологии и дизайна.

Выводы

Современный процесс бурения скважин является сложным технико-технологическим процессом, состоящим из цепи звеньев, разрыв, одного из которых может привести к различным осложнениям, авариям или даже к потере скважины. Поэтому бурение скважин требует постоянного совершенствования технологий [3].

Исследование, разработка и внедрение в производство современной российской техники и технологии разных габаритов в бурении, является высоко актуальной в нашей стране.

Библиография

1. Мезенцев Д.Ю. Технология бурения с использованием роторно-управляемых систем предельно малых диаметров и систем искусственного интеллекта / Мезенцев Д.Ю., Соловьев Н.В. // Молодые – Научкам о Земле: в 5 т. Т.2 Материалы XI Международной научной конференции «Молодые – Научкам о Земле» - М.: Издательство МГРИ, 2024. – с. 224-227 – ISBN 978-5-907594-30-2
2. Нескоромных В.В. Направленное бурение. Бурение горизонтальных и многозабойных скважин: учебник / В.В. Нескоромных. – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2020. – 410 с., ISBN: 978-5-7638-4100-8
3. Олейников Н. Г. Технологические инновации как основа снижения затрат бурового предприятия в современных условиях / Н. Г. Олейников, К. А. Снегирева, О. В. Ямова. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2019. – № 51 (289). – С. 251-254. – URL: <https://moluch.ru/archive/289/65444/> (дата обращения: 04.03.2024).
4. Повалихин, А. С. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин / А. С. Повалихин, А. Г. Калинин, С. Н. Бастриков, К. М. Солодкий; под ред. А. Г. Калинина. — Москва: ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. — 647 с. 4
5. Справочник инженера-нефтяника. Том II. Инжиниринг бурения. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 1064 с. – ISBN 978-5-4344-0141-8.
6. Технология бурения нефтяных и газовых скважин: в 5 т. Т. 3.: учеб. для студентов вузов / Под общ. ред. В. П. Овчинникова. — Тюмень: ТИУ, 2017. — 342 с. — ISBN 978-5-9961-1328-6, ISBN 978-5-9961-1331-6
7. Фелцак Э. Гибридная роторная управляемая система бурения - сочетание лучшего / Фелцак Э., Торре А., Нил Д. Годвин [и др.] // Нефтегазовое обозрение, зима 2011-012. – 2013. – Т. 23, № 4. – с. 50-62.

Способ промывки песчаной пробки и крепления ПЗП в газодобывающей скважине с применением колтюбинга

Николаенко В.В.* (ФГБОУ ВО ТИУ)

Аннотация

Известно, что процесс образования песчаных пробок происходит практически во всех нефтяных и газовых скважинах.

Их интенсивность обусловлена свойствами продуктивного пласта и технологией эксплуатации скважин.

В работе предлагается способ промывки песчаной пробки и крепления ПЗП в газодобывающей скважине с применением колтюбинга.

Ключевые слова

Призабойная зона пласта, газодобывающая скважина, колтюбинг, песчаная пробка

Теория

Колтюбинговые технологии – одни из перспективных и прогрессивно развивающихся направлений специализированного оборудования для нефтяной и газовой промышленности в Море. Такие технологии основаны на использовании гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ (НТ)), которые заменяют традиционные буровые трубы в процессе бурения или НКТ при проведении капитального и текущего ремонтов нефтяных и газовых скважин [1, 5].

Причины возникновения песчаных пробок. Известно, что процесс образования песчаных пробок происходит практически во всех нефтяных и газовых скважинах.

Их интенсивность обусловлена свойствами продуктивного пласта и технологией эксплуатации скважин. Образование песчаной пробки на забое скважин обусловлено следующими факторами: оседанием частиц пласта, выносимых через перфорационные отверстия в эксплуатационной колонне во внутреннюю полость скважины; оседанием частиц после проведения операций с использованием гидropескоструйных перфораторов; оседанием частиц после проведения операций по гидроразрыву пласта; наличием песка, намытого в полость скважины при создании искусственного забоя и т.п. [2].

Краткое описание технологии промывки песчаной пробки. Осуществляют спуск гибкой трубы, поддерживая при этом непрерывную циркуляцию технологической жидкости, начиная с глубины 100-150 м. Как правило, скорость спуска выбирается исходя из информации о расположении песчаной пробки и достигает 0,5 м/с. Не доходя порядка 100 м до предполагаемой пробки, скорость снижают до 0,1-0,2 м/с и тщательно контролируют давление на насосе. После входа промывочной насадки в пробку скорость перемещения трубы уменьшают до 0,0-0,03 м/с, а подачу промывочного насоса доводят до максимума [3].

Основные положения, описывающие процесс промывки, соответствуют традиционной технологии удаления песчаных пробок, но особенности колтюбинговой технологии позволяют выполнять его в большем диапазоне давлений в полости скважины. Основной задачей выполнения процесса является обеспечение выноса песка по кольцевому пространству.

Для исключения поглощения жидкости продуктивным пластом и коагуляции его пор необходимо тщательно подбирать плотность жидкости, исключая превышение гидростатического давления по сравнению с пластовым. В случае возникновения поглощения технологической жидкости непрерывная труба должна быть поднята выше верхнего уровня пробки при обеспечении циркуляции с максимально возможным расходом технологической жидкости. максимально возможным расходом технологической жидкости.

При разрушении плотных песчаных пробок следует использовать гидромониторные насадки, обеспечивающие разрушение пробки в сочетании с подогревом технологической жидкости. Скорость перемещения непрерывной трубы в этом случае уменьшают до минимума. Все это позволяет исключить соприкосновение насадки с поверхностью пробки. Об этом свидетельствуют показания индикатора веса трубы и манометра, регистрирующего давление, развиваемое насосом – показания первого прибора уменьшаются, а второго увеличатся.

Промывку проводят до момента выхода на заданную глубину. Для обеспечения удаления всех твердых частиц объем циркуляции должен составлять не менее одного объема скважины. Скорость восходящего потока при работе с непрерывной трубой, как и при любой промывке, должна превосходить скорость оседания в ней твердых частиц. Это условие справедливо для вертикальных скважин и наклонных участков в последних с отклонением от вертикали до 45°. Для более пологих и, тем более, горизонтальных участков скважины необходимо обеспечивать достаточную турбулентность потока восходящей жидкости.

Так для промывки песчаных отложений известна технология «Струйный бластер» (Система «Jet Blaster»), позволяющая удалять плотные песчаные пробки с забоя скважин, а также отложений на стенках НКТ и обсадной колонны.

При реализации технологии промывочная жидкость содержит пузырьки, когда выходит из сопла. Пузырьки при ударе диспергируются с большим разрушающим эффектом. Создаются высокие гидроструйные характеристики (до 200 атм.– перепад давления через сопла), осуществляется контролируемое вращение (медленное вращение (максимально 200 об/мин), оказывающее сильное воздействие на поверхность.

Группой авторов патента на изобретение № 2188304 [4] предлагается способ промывки песчаной пробки в условиях ремонта скважин, согласно которому производят монтаж колтюбинговой установки, установку противовыбросового и насосного оборудования. Затем приступают к приготовлению промывочной пенообразующей жидкости и промывке скважины в зоне образования песчаной пробки. Приготовление промывочной пенообразующей жидкости ведут в два этапа. Первоначально смешивают техническую воду в количестве 70-75 об.% с одноатомным спиртом в количестве 25-30 об.%. Затем в полученный раствор добавляют неонол водорастворимый в количестве 1,0-1,5%. При проведении операции промывки первоначально осуществляют подачу гидромониторной насадки со скоростью до 0,1 м/с вплоть до достижения расстояния в 9-10 м между песчаной пробкой и гидромониторной насадкой. Затем скорость подачи снижают до 0,001 м/с и подают пенообразующую жидкость в став БДТ. Дальнейшую подачу гидромониторной насадки для промывки пробки ведут с усилием подачи 300-500 кг до достижения установленного интервала. Увеличивается производительность работ по ремонту скважин и снижается стоимость этих работ.

Однако недостатком такого технического решения является то, что способ не предусматривает последующие работы по креплению скелета пласта-коллектора после проведения работ по промывке скважины.

Решение. Предлагаемый способ реализуется следующим образом.

Способ включает установку поверхностного оборудования для проведения ремонтных работ с применением колтюбинга (сверху-вниз): инжектор, стриппер, верхний лубрикатор, блок превенторов (к примеру, четырехплащечный превентор или комбинированный превентор), дроссель, нижний лубрикатор.

Через имеющуюся колонну НКТ в скважину спускается ГНКТ с коннектором, двумя обратными клапанами, аварийным разъединителем и гидромониторной насадкой до верхнего интервала перфорации. После закрывают клиновые и трубные плашки на блоке превенторов (или трубные/клиновые плашки на комбинированном превенторе), прокачивается

технологическая жидкость через ГНКТ для осуществления промывки забоя скважины, при этом штуцер дросселя должен быть открытым. Это позволит технологической жидкости прокачиваться по малому затрубю и через дроссель выходить на дневную поверхность с частицами песка, осевшего на забое скважины и образовавшего песчаную пробку (рисунок 1).

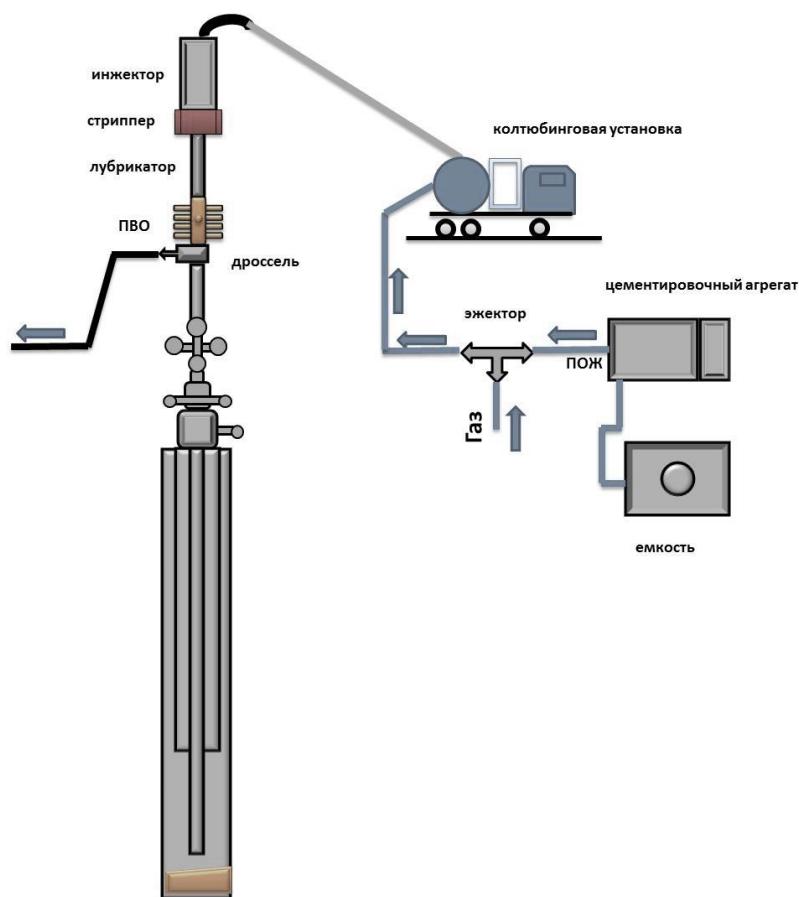


Рисунок 1. Схема реализации предлагаемой технологии

После осуществления работ открывают клиновые и трубные плашки блока ПВО (или трубные/клиновые плашки на комбинированном превенторе), осуществляют подъем ГНКТ, после извлечения которой закрывают лубрикаторную задвижку фонтанной арматуры. Далее в скважину через НКТ при открытой лубрикаторной задвижке спускают компоновку на ГНКТ, состоящей из коннектора, двух обратных клапанов, аварийного разъединителя и «пера» до продуктивного пласта. Проводят закачивание закрепляющей композиции с продавкой ее в пласт для закрепления коллектора, с целью последующего предотвращения пескообразования на забое скважины.

В качестве отверждающей композиции можно рекомендовать композицию «Геотерм – 01» включающей в себя смолу «Геотерм – 001» и отвердитель «Геотерм – 101». Такая композиция хорошо зарекомендовала себя на месторождениях Западной Сибири и применяется для крепления слабосцементированных (пескоизоляционные работы) коллекторов и пропантов (после проведения операций по ГРП).

После проведения работ из скважины извлекают колонну ГНКТ. Далее скважину оставляют на ожидание затвердевание композиции, после скважину осваивают и выводят на режим.

Выводы

1. Колтюбинговые технологии основаны на использовании гибких насосно-компрессорных труб, которые заменяют традиционные бурильные трубы в процессе бурения или НКТ при проведении капитального и текущего ремонтов нефтяных и газовых скважин

2. Образование песчаной пробки на забое скважин обусловлено следующими факторами: оседанием частиц пласта, выносимых через перфорационные отверстия в эксплуатационной колонне во внутреннюю полость скважины; оседанием частиц после проведения операций с использованием гидropескоструйных перфораторов; оседанием частиц после проведения операций по гидроразрыву пласта; наличием песка, намытого в полость скважины при создании искусственного забоя и т.п.

3. Предлагается новый способ промывки песчаной пробки и крепления ПЗП в газодобывающей скважине с применением колтюбинга.

Библиография

1. Вайншток С.М., Молчанов А.Г., Некрасов В.И., Чернобровкин В.И. Подземный ремонт и бурение скважин с применением непрерывных труб. – М.: Издательство Академии горных наук, 1999. – 224 с.

2. Кустышев, А.В., Ваганов Ю.В. Изоляция притока пластовых вод с помощью колтюбинговой установки на газовых месторождениях Западной Сибири / // Время колтюбинга. – 2013. – № 2. – С. 30–36.

3. Нифонтов Ю.А. «Ремонт нефтяных и газовых скважин» / И.И. Клещенко, Г.П.Зозуля, М.Г. Гейхман, А.В. Кустышев и др. – С.–Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2005. Т1 – 314 с., Т2 – 548 с.

4. Патент на изобретение № 2188304 «Способ промывки песчаной пробки в условиях ремонта скважин», 2002 г.

Способ изоляции зон интенсивного поглощения

Заливин В.Г. (ИРНИТУ, ZalivinVG@yandex.ru),
Соловьёв Н.В. * (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru)

Аннотация

Актуальной задачей эффективности процесса сооружения скважин является повышение качества крепления скважин на месторождениях с низкими градиентами гидроразрыва и преодоление зон поглощений при работе на удаленных и труднодоступных объектах, где существуют сложности с обеспечением достаточного снабжения водой. Наиболее эффективным методом решения этих проблем является применение специальных облегченных тампонажных материалов [1].

Ключевые слова

Поглощения, расширяемая тампонажная смесь

Теория

Для ликвидации катастрофических поглощений и заколонных перетоков, обвалов в трещиноватых коллекторах нами была исследована вспенивающаяся тампонажная смесь (РТС) на основе фенолформальдегидной смолы ФРВ-1А и отвердителя ВАГ-3. Состав: резол (осн. вещество) – 75–77 %, вода – 12–15 %, св. фенол – 4–10 %, св. формальдегид – 1,0–3 %, ПАВ – 3 %, алюминиевая пудра – 0.8 %. Продукт ВАГ-3 – это продукт конденсации сульфобензилмочевины с формальдегидом и ортофосфорной кислотой, применяется в качестве вспенивающего и отверждающего агента в процессе формирования фенолоформальдегидных пенопластов. Для определения подвижности компонентов были проведены измерения динамической вязкости ФРВ-1А и отвердителя ВАГ-3 от температуры окружающей среды (рис. 1). Смесь обладает хорошей текучестью, улучшающейся при нагревании компонентов, и сохраняет это свойство в течение времени, необходимо для закачки и продавливания ее в тампонирующий пласт с минимальным давлением.

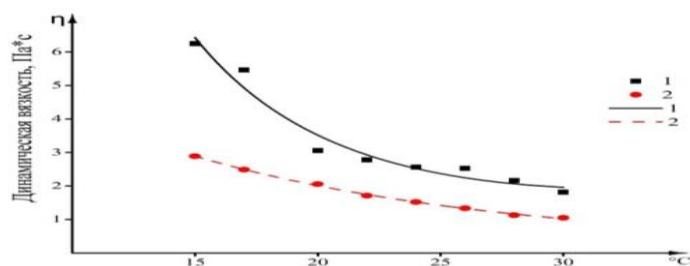


Рисунок 11. Зависимость динамической вязкости ФРВ -1А (1) и ВАГ-3 (2) от температуры ОС

Исследована зависимость параметров РТС (кратность, сроки твердения пенопласта) от изменения температуры внешней среды. (табл. 1.). Отмечается увеличение кратности и уменьшение начала твердения пенопласта с ростом температуры. Увеличение объема пенопласта фенолформальдегидной смолы, содержащей порошок алюминия, происходит за счет выделения водорода, который образуется при взаимодействии алюминия с водой.

Таблица 1. Зависимость времени отверждения смолы ФРВ-1 от температуры

Температура среды °C	Кратность пенопласта	Время отверждения, мин

12	8,1	9 :20
18	11,4	4: 45
20	13,1	2 :30
27	13,9	1 :40
30	15	1 :10

Тампонажная композиция, имеющей вязкость приближенную к вязкости воды и пониженное давление нагнетания раствора эффективна при использовании снарядов со съёмными керноприемниками в которых зазоры как внутри бурильной колонны, так и в затрубном пространстве весьма незначительны. С целью выявления изменений плотности кратности и прочности в зависимости от давления приготовления пенопласта были проведены исследования в специально изготовленном приборе (рис. 2), объемом – 578 см³, имеющем нижнюю и верхнюю пробки (2). Верхнюю пробку закрепляли грузом, препятствующему выходу смеси из цилиндра (3). Чтобы реакционная смесь не попадала в манометр (1) в верху устанавливалась резиновая прокладка. При свободном вспенивании верхняя крышка снималась с цилиндра. В остальных случаях крышка плотно прижималась к нему.

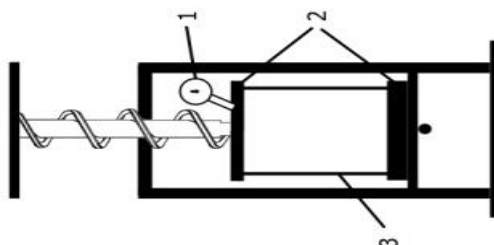


Рисунок 2. Прибор для исследования РТС1-манометр, 2-верхняя и нижняя крышки, 3-полый металлический цилиндр

Использовалась реакционная смесь, состоящая: (масс. %), ФРВ-1А – 80, ВАГ-3 – 20 при температуре окружающей среды 16–18 оС (табл. 2.). При свободном вспенивании объем пенопласта значительно превышает объем формы (60 г ФРВ-1А и 15 г ВАГ-3).

Таблица 2. Условия получения и параметры пенопласта

№ п/п	m ФРВ -1А, г	m ВАГ-3, г	m смеси, г	V ФРВ - 1А, см ³	V ВАГ-3, см ³	V смеси , см ³	P, кг. см ²	ρ, кг/м ³	σ, кг/см ²
1	60	15	75	48	11	59	2	140	6,5
2	90	23	113	72	16	88	3,6	220	14,1
3	120	30	150	96	21	117	5,75	270	18,6
4	150	38	188	120	27	147	7,5	340	15,5
5	180	50	230	145	35	180	11,8	410	29,4
6	240	60	300	193	43	236	15	510	52,7
7	270	68	338	217	48	265	>20	-	-
8	300	75	375	241	53	294	>22,5	-	-

Проведенные исследования свидетельствуют, что смеси на основе ФРВ-1А, отверждаемые ВАГ-3 при затворении увеличиваются в объеме более чем в пять раз с

увеличением давления вспенивания до 22,5 кг/см², что обеспечивает лучшую адгезию и проникновение композиции в поглощающие горизонты. Химическая структура продуктов поликонденсации во многом зависит от продолжительности и температуры отверждения, поэтому температурный показатель необходимо учитывать при проведении тампонажных работ в скважинах. Их применение наиболее эффективно в интервалах глубин скважин, где температура горных пород более 12 °С. Использование РТС позволяет компенсировать контракцию тампонажного раствора, создать плотный контакт между цементным кольцом и стенками скважины, т.е. снизить проницаемость пенопласта; обеспечивает дополнительное давление проникновения в каналы трещиноватых пород и, в зависимости от степени аэрации, снижают расход материалов на создание изоляционной перемычки [2]. Низкая вязкость тампонажной композиции, ее газонаполненность и создание избыточного давления при расширении смеси в процессе твердения, и способностью фильтрата отверждаться совместно с глинистой коркой обеспечит высокую проникающую способность в поры и трещины породы что позволит закреплять водоносные пески и другие слабосвязанные породы [3]. В интервалах глубин менее 1000 м для получения расширяемого пенопласта можно оперировать увеличением температуры воздушной фазы за счет сжатия пузырьков газа под избыточным давлением при продавливании газожидкостной смеси (ГЖС) в интервал тампонирующей, которую можно определить по кинетике отверждения при повышении температуры в процессе сжатия газовой фазы [4]. Так как теплопроводность отверждаемой ГЖС очень мала при незначительном времени теплообмена, то потери тепла на теплообмен с окружающей средой практически равны 0 и процесс рассматривается как адиабатический, Прирост температуры ГЖС при этом определяется по формуле:

$$\Delta t_c = \frac{C_{\beta} \cdot \rho_{\beta}^0 \cdot K_a \cdot T_1}{C_{ж.ф} \cdot \rho_{ж.ф}} \cdot \left[\frac{P_2}{P_1} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/K} \right]$$

где: C_{β} – теплоемкость воздуха при давлении продавливания, Дж/ кг °С; ρ_{β}^0 – плотность воздушной фазы в нормальных условиях, (кг/ м³); K_a – газожидкостное соотношение;

T_1 – начальная температура воздуха в тампонирующей смеси, Дж/кг °С, $C_{ж.ф}$ – теплоемкость жидкой фазы тампонажной смеси, Дж/ кг °С $\rho_{ж.ф}$ – плотность жидкой фазы тампонирующей смеси, кг/м³ P_1 – атмосферное давление; P_2 – конечное давление продавливания смеси; K – показатель адиабаты сжатия воздуха.

Конечная температура тампонирующей смеси с учетом ее прироста от сжатия воздушной фазы:

$$t_{т.с} = T_1 + \Delta t_{т.с}$$

Имея исходные данные: глубина тампонируемого горизонта, его мощность, необходимое давление нагнетания смеси (зависит от времени начала интенсивного отверждения смеси, т.е. времени доставки ее в зону тампонирующей и производительности бурового насоса) можно определить прирост температуры тампонирующей смеси от ее адиабатического сжатия (рис. 3.). Если прирост температуры будет более 12 °С, то в случае применения ФРВ-1А и ВАГ-3 возможно получение расширяемого пенопласта независимо от температуры горных пород.

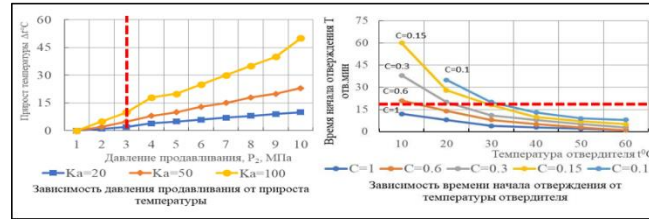


Рисунок. 3. Зависимость температуры смеси от параметров пенопласта

Схема пригодная для нагнетания РТС под давлением представлена на рисунке 4.

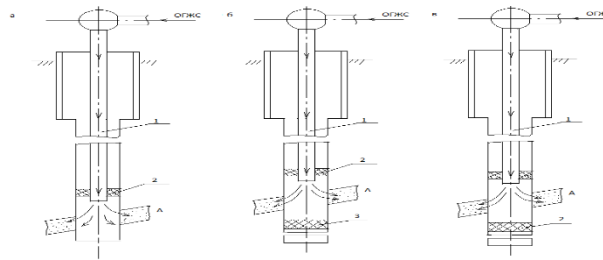


Рисунок. 4. Схема нагнетания РТС под давлением

Выводы

Избыточное давлением проникновения РТС, в пустоты породы, обеспечивает надежное сцепление и закрепление неустойчивых пропластков пород и обеспечивает плотный контакт между пенопластом и стенками скважины. РТС обладает дополнительным сопротивлением при движении в пористой среде и в зонах тампонирувания с большим эффективным сечением, что приводит к уменьшению глубины проникновения в эти каналы и более равномерному заполнению трещин и каверн в пристволенной зоне ствола с сохранением устойчивости к минерализованной воде, и повышенной пластовой температуре.

Библиография

1. Калинин А.Г., Ошкордин О.В., Питерский В.М., Соловьев Н.В. Разведочное бурение. ООО "Недра-Бизнесцентр", Москва, 2000 г., 748 стр.
2. Николаев Н.И., Терещенко Л.А., Горшков Л.К., Яковлев А.М. Оценка эффективности метода ускоренного тампонирувания скважин // Записки Горного института. 1982. Т. 93. С. 35.
3. Зыбинский, П. В. Об опыте применения пены для бурения скважин дегазационных скважин [Текст] / П. В. Зыбинский, Ю. Т. Горшков // Научный вестник ДОННТУ. - 2011. - Вып. 14 (181). - С. 54-58.
4. Авторское свидетельство № 1402661, МПК E21B39/13. Способ тампонирувания скважин отверждающимися газожидкостными смесями : заявл. 21.05.1986 : опубл. 17.09.1987 / А. А. Фигурак, М. А. Хромых, В. Г. Заливин, С. В. Корчагин. – 4 с.
5. Соловьев Н. В., Курбанов Х. Н. Методика расчета параметров тампонажных растворов с регулируемой плотностью. НТЖ Инженер нефтяник, 2014 г., № 4 стр 23-27.

Эффективные технологии применения пены при бурении геологоразведочных скважин

Заливин В.Г. (ИРНИТУ, ZalivinVG@yandex.ru),
Соловьёв Н.В.* (МГРИ, solovyevnv@mgri.ru)

Аннотация

В цикле строительства скважины этап бурения и сооружения скважин является наиболее затратным и характеризуется большими материально-техническими издержками. Обеспечение высоких технико-экономических показателей процесса бурения способствует сокращению сроков сооружения скважин и снижению их себестоимости. Применение газожидкостных очистных агентов позволяют значительно повысить механическую скорость бурения и снизить затраты времени на ликвидацию геологических осложнений [1].

Ключевые слова

Мерзлота, пена, пенопласты, карбамидные олигомеры

Теория

Для бурения скважин с использованием пенного очистного агента можно применять обычные буровые установки доукомплектованные специальными техническими средствами: компрессорными установками, насосом для дозирования раствора ПАВ, насосом для подачи водного раствора ПАВ, пеногенератором (аэраторы дожимными устройствами, смесителями), герметизатором устья, обратными клапанами, устанавливаемыми в бурильных трубах, чтобы осуществлять наращивание очередной трубы, не допуская расширения столба пены в бурильном инструменте, а также КИП для замера объемных расходов, давления и температуры потока газа и жидкости, количества и контроля пены. Для геологоразведочного бурения скважин с очисткой забоя пеной используются компрессоры низкого давления и специальные дожимные устройства, смонтированные на базе серийных буровых насосов [2]. Пена выносит с забоя частицы выбуренной породы при низкой скорости восходящего потока в затрубном пространстве, что значительно уменьшает эрозию и размывание стенок скважины. Высокоструктурированную пену можно получить, используя в качестве стабилизаторов полимеры [3], в частности – карбамидные смолы (рис. 1.а).

В табл. 1–3 приведены параметры пен, в которых в качестве структурообразователя использованы карбамидные олигомеры.

Таблица 1. Пены, полученные с использованием различных карбамидных смол

№ рецептуры	Содержание компонентов, г/л					Параметры пены		
	Сульфанол	Карбамидная смола марки			CaCl ₂	Кратность	Период полураспада, с	Время истечения 50 % пенообразующей жидкости, с
		КФ-17	КФ-Ж	КФМТ				
1	2,5	5,0	-	-	-	7,0	2700	360
2	2,5	5,0	-	-	0,2	4,5	420	330
3	2,5	10,0	-	-	-	11,0	2460	420
4	2,5	10,0	-	-	0,2	5,0	360	300
5	2,5	-	5,0	-	0,2	4,0	165	150
6	2,5	-	10,0	-	0,2	5,0	900	900
7	2,5	-	-	5,0	0,1	6,1	540	510

Таблица 2. Параметры пен, с использованием композиции на основе пенообразователя Е-30

№ рецептур	Содержание компонентов, г/л			Параметры пены		
	Эмульгатор Е-30	Карбамидная смола КФЖ	CaCl ₂	Кратность	Период полураспада, с	Время истечения 50 % пенообразующей жидкости, с
1	0,5	2,5	-	4,0	420	330
2	0,5	2,5	0,2	3,0	240	90
3	1,0	5,0	0,2	4,2	420	210
4	1,5	10,0	-	8,0	1500	360
5	1,5	10,0	0,2	7,0	720	150

Таблица 3. Параметры пен, с использованием композиции на основе сульфоната

Содержание компонентов, г/л			Параметры пены		
Сульфонат	Карбамидная смола КФ-Ж	CaCl ₂	Кратность	Период полураспада, с	Время истечения 50 % пенообразующей жидкости, с
0,8	1,6	0,07	2,3	540	30
1,6	3,2	0,14	3,3	240	50
2,4	4,8	0,21	3,5	180	60
3,2	6,4	0,28	4,2	330	180

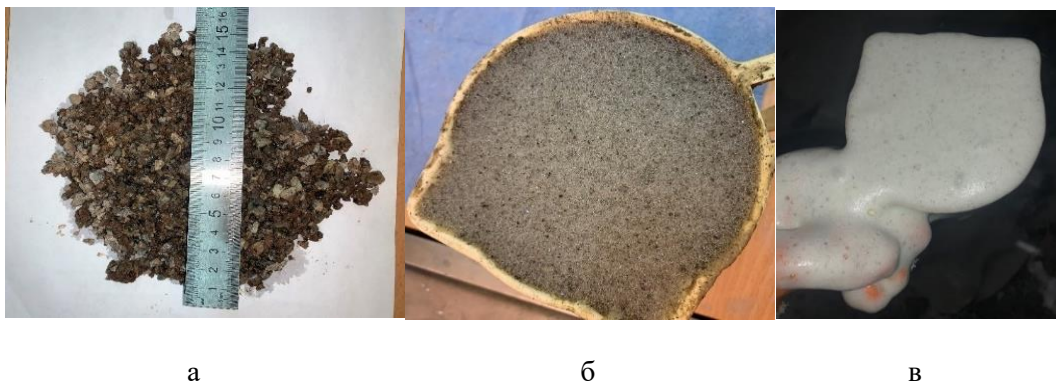


Рисунок 1. а – Пенораствор; б - Пена, обогащенная шламом; в - шлам, поднятый пеной

Использование в качестве промывочного агента стабильной пены позволит: увеличить механическую скорость бурения; уменьшить переувлажнения пород; обеспечить качественную очистку забоя от шлама выбуренных пород (рис. 1.б, 1.в); улучшить сохранность керна, что существенно при бурении скважин на золоторудных месторождениях. Весьма значимо при геологоразведочном бурении повторное использование пенообразующего раствора при его выходе из скважины, исключающее загрязнение пространства вокруг буровой. Результаты исследований показывают, что обработка пен на основе карбамидных смол солями хлористого кальция позволяет уменьшить их период полураспада (табл. 1–3).

Все более широкое распространение находит практика бурения скважин и увеличение объемов буровых работ в зонах распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Сохранение теплового режима мерзлых окружающих пород и керна – важное условие качества работ и безаварийного бурения. В интервале распространения ММП трудно

обеспечить цементирование и крепление ствола вследствие создания застойных зон бурового раствора в больших кавернах, откуда его невозможно вытеснить тампонажным раствором. Цементирование зачастую одностороннее, а цементное кольцо не сплошное. Это порождает благоприятные условия, для смятия колонн при обратном промерзании пород в случае длительных «простоев» скважины. Основным способом вскрытия ММП при промывке скважины является сохранение отрицательной температуры ее стенок. В практике геологоразведочного бурения, в основном используют высоковязкие растворы или солевые раствор, не замерзающие при температуре до -15°C . Пены, имеющие низкую удельную теплоемкость – наиболее эффективный вид промывочных жидкостей для вскрытия ММП, а твердые пены продуктивны при установке различных перемычек и закрепления обсадных колонн в интервалах мерзлых пород. Они обладают низкой плотностью и теплопроводностью (в 10 и более раз меньшую, чем обычные растворы) и высоким кольматационным эффектом. Полимерные твердеющие пены получают из нескольких компонентов: синтетической смолы, пенообразователя, отвердителя и воды [4]. В качестве пенообразователя используют ПАВ, применяемые для образования обычной пены. Особое место среди полимерных растворов занимают водонаполненные полимерные тампонажные смеси. Особенностью водонаполненных полимерных растворов является и то, что тампонажный камень может быть сформирован из промывочной жидкости. Небольшой срок твердения, малая плотность, способность твердеть в мерзлых породах и другие достоинства делают синтетические смолы незаменимыми материалами в разведочном бурении. Для тампонирувания зон поглощения целесообразно применять материалы, не растворимые в воде либо водорастворимые, но малочувствительные к разбавлению [4]. В этом отношении карбамидные смолы выгодно отличаются от других водорастворимых полимерных материалов. Проведенные исследования смолы М-19-62 показали, что добавление до 50 % воды мало изменяет время начала схватывания.

Повышении эффективности крепления обсадных колонн в зонах ММП возможно разработкой составов пенопластов с низкими значениями водопоглощения. Наличие свободной, химически не связанной воды в образцах отвержденной пены, при воздействии отрицательной температуры приведет к ее замерзанию, соответственно к увеличению объема, то есть созданию избыточного давления и как результат – образованию трещин. Улучшение пластических свойства пенопласта, устранение его усадки и растрескивания при креплении кондуктора в мерзлых породах повысит функциональное назначение термоизолирующего перекрытия. В практике буровых работ нашли применения пенопласты на основе: эпоксидных смол, кремнеорганических соединений, полиэфирных смол, полиуретанов, смол на основе суммарных сланцевых фенолов, фенолоформальдегидных смол и карбамидных смол. Согласно технико-экономической оценке, в России карбамидные олигомеры являются наиболее экономичным исходным материалом для производства пенопластов вследствие их широкого производства, опирающегося на неограниченные запасы доступного и дешевого исходного сырья и высокоразвитую производственную базу. Поэтому практический интерес представляет использование отверждающихся ГЖС на основе карбамидных смол для тампонирувания скважин и разработка технологии и технических средств, для их реализации. Улучшение физико-механических свойств тампонирующего пенопласта возможно его модифицированием с целью снижения водопоглощения, например резорцином ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ – двухатомный фенол). Водопоглощение образцов пенопласта с увеличением содержания резорцина непрерывно уменьшается, а прочность максимально увеличивается при малой добавке резорцина (0,5 %), а при дальнейшем его увеличении начинает снижаться. Вопрос об оптимальном содержании резорцина следует решать в зависимости от требований, предъявленных к пенопласту (табл. 4.).

Таблица 4. Влияние резорцина на свойства карбамидного пенопласта

Содержание резорцина %, вес	Кратность К	Объемный вес (сухой) кг/м ³	Водопоглощение кг/м ³	Прочность на сжатие кг/м ²	Примечание
0	21	6,0	530	98	Состав пенопласта
0,5	20	6,3	485	344	Смола М-19-62 – 20%
1,0	21	6,2	249	234	Пенообразователь сульфанол – 0,4%
1,5	18	7,2	218	160	
2,0	16	8,3	177	141	Кислота Н ₃ РО ₄ – 1,5%
3,0	17	9,5	88	184	

Выводы

Применение рекомендуемых составов пен и пенопластов (полученных из доступных, не дефицитных продуктов отечественной промышленности) позволит повысить производительность буровых работ за счет увеличения механической скорости проходки (сравнимой с пневмоударным бурением); исключить липкость водоносных пород; изолировать зоны поглощения большой интенсивности; обеспечить сохранность керна; значительно снизить потребление воды; сохранить устойчивость стенок скважин при вскрытии ММП и повысить качество крепления обсадных колонн в этих интервалах.

Библиография

1. Кирсанов А. И., Крылов Г. А., Нефедов В. П. Пены и их использование в бурении. М., ВИЭМС, 1980. 60 с.
2. Соловьев Н.В, Бейкель В.А. Состояние и пути повышения эффективности техники и технологии бурения скважин при выполнении геолого-разведочных работ. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2013. – № 1, С. 50-56.
3. Тагиров К.М., Нифантов В.И. Бурение скважин и вскрытие нефтегазовых пластов на депрессии. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. –160 с.: ил
4. Заливин В. Г. Применение пен и пенопластов для повышения крепи скважин / В. Г. Заливин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2022. – Т. 333, № 4. – С. 105-114.
5. Соловьев Н. В ,Чихоткин В Ф ,Богданов Р К и др. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях.ОАО «ВНИИОЭНГ»,М.,1997 г(монография стр.332).
6. Соловьев Н. В., Кудрявцева Д.К.Исследование влияния параметров полимерной оболочки микропузырьков на свойства облегченных буровых растворов. В книге: Новые идеи в науках о Земле Мате-риалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2019. С. 263-266.

Подсекция 3.3. Горное дело и общинженерные методы решения общегеологических задач

Selection of fluids and proppants for hydraulic fracturing in Vietnam

Truong Van Tu (Hanoi University of Mining and Geology, truongvantu@humg.edu.vn),
Nguyen Tien Hung (Hanoi University of Mining and Geology, truongvantu@humg.edu.vn),
Nguyen The Vinh (Hanoi University of Mining and Geology, truongvantu@humg.edu.vn)*

Abstract

Hydraulic fracturing is a critical process in enhancing oil and gas production by creating fractures in the reservoir rock. The choice of fracturing fluids plays a crucial role in successfully forming and sustaining these fractures. An ideal fracturing fluid should balance cost, ease of use, low frictional pressure loss, and high viscosity to keep proppants suspended, while also being compatible with reservoir fluids and formations. However, achieving all these characteristics in a single fluid is challenging. This study explores different types of fracturing fluids and proppants used in Vietnam and provides recommendations based on geological conditions.

Keywords

Hydraulic Fracturing; Fracturing Fluids; Proppants; Reservoir Conductivity; Well Stimulation

Theory

Hydraulic fracturing involves injecting high-pressure fluids into the reservoir to create fractures, followed by injecting proppants to keep these fractures open. The selected fluid should optimize fracture propagation, minimize fluid loss, and be compatible with reservoir conditions. In Vietnam, selecting the appropriate fracturing fluid and proppants is critical for maximizing oil and gas recovery [1,2,3].

Types of Hydraulic Fracturing Fluids

Fracturing fluids can be categorized based on their base fluids:

- Water-based fluids: These are cost-effective, easy to handle, and environmentally friendly. However, they may not be compatible with formations containing swelling clays [4].

- Oil-based fluids: These have superior compatibility with reservoir rocks but are expensive, toxic, and pose fire hazards [5].

- Multi-phase fluids: These include foam-based and polymer-based emulsions. They are useful in low-pressure formations and for minimizing fluid loss [6].

Additives Used in Fracturing Fluids: Fracturing fluids often include additives such as:

- Viscosity enhancers to improve proppant transport.

- Biocides to prevent bacterial growth.

- Surfactants to reduce interfacial tension.

- Crosslinkers to enhance fluid viscosity.

- Breakers to reduce viscosity after fracturing.

Proppant Selection

Proppants play a crucial role in maintaining fracture conductivity. The two main types of proppants used are:

- Natural sand: Inexpensive but has lower strength [5].

- Synthetic proppants (ceramic, bauxite, or sintered bauxite): These offer higher mechanical strength and better resistance to closure stress [6].

Factors Affecting Proppant Performance:

- Size and shape: Larger proppants improve conductivity but may be difficult to transport [4].
- Crush resistance: Proppants must withstand high closure pressures [3].
- Density: Lower-density proppants are easier to suspend in the fluid [2].

Selection of Fracturing Fluid and Proppant for Well X in Bach Ho Field

Case Study: Application to Well X

The study applies its methodology to well X, analyzing:

- Reservoir Properties: Formation permeability, porosity, pressure, and temperature.
- Simulation Results: Evaluating different fracturing fluid and proppant combinations.
- Production Enhancement: Forecasting improvements in well productivity post-fracturing.

The selected combination of YF140HTD fracturing fluid and ISP 20/40 resin-coated sand is expected to enhance hydrocarbon extraction while minimizing operational risks and environmental impact.

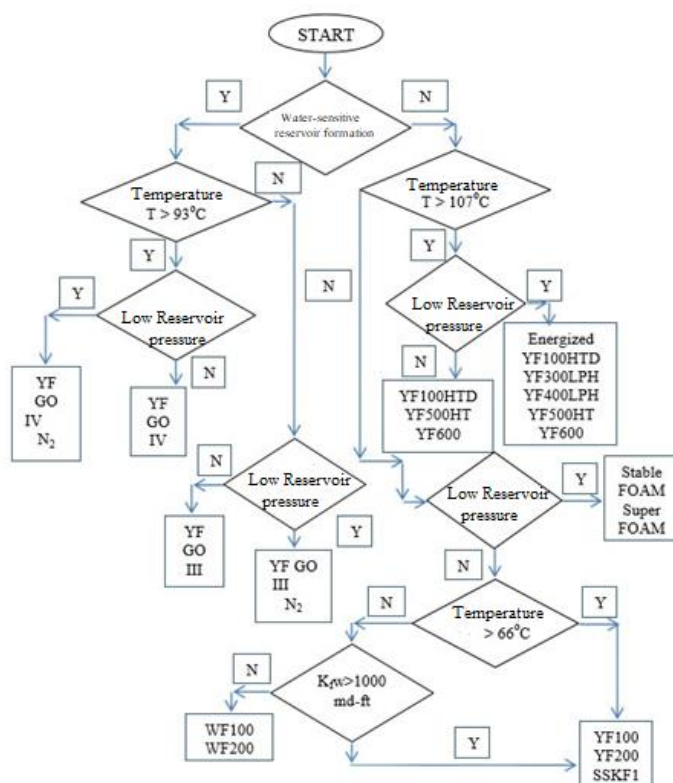


Figure 1. Fracturing Fluid Selection Diagram

Advanced Considerations in Fracturing Fluid and Proppant Selection

Fluid Additives and Optimization

Fracturing fluid performance can be enhanced by adding specialized chemicals:

- 1.Viscosity Modifiers: Improve proppant suspension and transport.
- 2.Biocides: Prevent bacterial contamination in the reservoir.
- 3.Surfactants: Reduce interfacial tension and improve fluid recovery.
- 4.Crosslinkers and Breakers: Enhance gel strength and facilitate cleanup.

The selected YF140HTD fluid incorporates these additives, ensuring stability under high-temperature conditions and optimizing fracture propagation.

Proppant Conductivity and Durability

Proppant conductivity depends on its size, shape, and strength. ISP 20/40 resin-coated sand was selected for well X due to the following advantages:

- Its ability to withstand high closure stresses while minimizing deformation.
- Its resistance to crushing, ensuring long-term permeability maintenance.
- Its compatibility with YF140HTD fluid, providing stable suspension and effective placement in fractures.

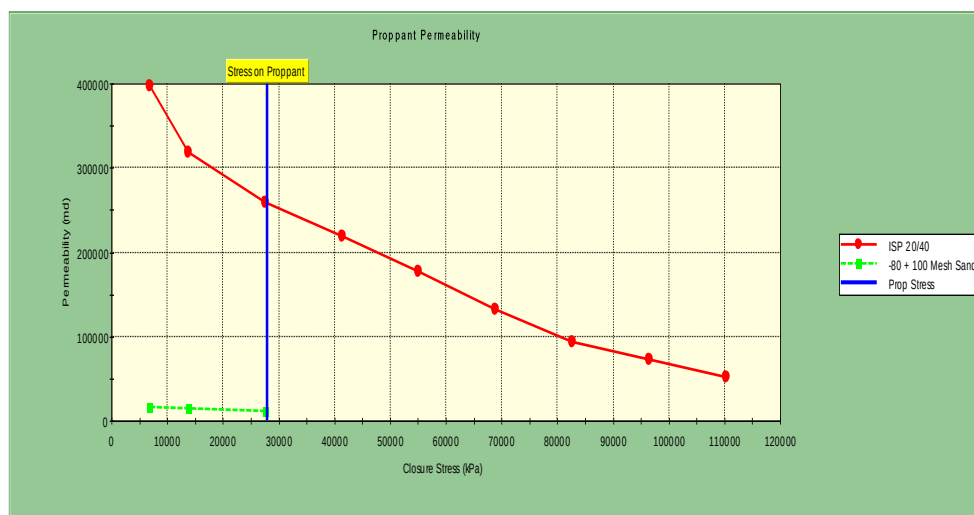


Figure 2. Proppant Permeability Chart

Environmental and Economic Considerations

- Environmental Safety: YF140HTD fluid and ISP 20/40 sand meet environmental safety standards, minimizing impact on surrounding ecosystems.
- Cost Efficiency: The selected materials provide an optimal balance of performance and affordability, ensuring long-term economic viability.

Conclusion

This research provides a detailed analysis of fracturing fluid and proppant selection for hydraulic fracturing in Vietnam, particularly at well X in the Bach Ho field. The findings emphasize the need for a tailored approach, balancing reservoir characteristics, operational feasibility, and environmental considerations. Future work should focus on real-world implementation and continuous optimization for enhanced reservoir performance.

Bibliography

1. Michael J. Economides, Tony Martin, BJ Services Company, 2007. Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production_CD for computer. Houston, TX: ET Publishing.
2. Jennifer L. Miskimins, Editor-in-Chief, 2019. Hydraulic Fracturing: Fundamentals and Advancements. Society of Petroleum Engineers.
3. Tu Thanh Nghia, Duong Danh Lam, Nguyen Quoc Dung et al., 2017. Technology for Near-Wellbore Treatment in Oil and Gas Fields on the Southern Vietnam Continental Shelf. Ho Chi Minh City National University Publishing House.
4. Vietnam - Russia Joint Venture Vietsovpetro. Fraccade Stimulation Proposal, well X-MSP10.
5. Nguyen Tien Hung, Hoang Dung, Truong Van Tu et al., 2022. Principles of Destruction. Science and Technology Publishing House.

6 Truong V.T., Nguyen T.V., Nguyen V.T. và nnk, 2022. Oil and Gas Well Stimulation by Hydraulic Fracturing in the Oligocene of Bach Ho Field. Case study: Hydraulic fracturing for well X–MSP10. Integrated Petroleum Engineering (IPE3), Ha Noi, Transport Publishing House..

Тонкое измельчение минерального сырья: влияние и перспективы

*Адамова Л.С. * (ИПКОН РАН, adamovamila16@yandex.ru),
Дмитрак Ю.В. (ИПКОН РАН, dmitrak@yandex.ru)*

Аннотация

Тонкое и сверхтонкое измельчение играет ключевую роль в обогащении полезных ископаемых, способствуя освобождению ценных минералов и повышая эффективность процессов разделения. Основное внимание уделяется энергоэффективности, снижению износа оборудования и оптимизации процессов измельчения, особенно в условиях истощения запасов высококачественных руд. Современные исследования подчеркивают необходимость детального изучения механизмов разрушения частиц, а также влияние формы и текстуры измельченного материала на последующие этапы переработки [2].

Ключевые слова

Тонкое измельчение, сверхтонкое измельчение, обогащение полезных ископаемых, шаровые мельницы, мельницы с перемешиванием, технологическая минералогия

Теория

Целью исследования является анализ влияния тонкого измельчения в шаровых и стержневых мельницах на процесс освобождения ценных минералов, а также на характеристики формы частиц. В работе рассматриваются механизмы разрушения в мельницах с перемешиванием и традиционных мельницах, уделяя внимание их энергоэффективности и технологической минералогии [9].

Тонкое измельчение представляет собой процесс, при котором размер частиц уменьшается до микронного уровня, что требует значительных энергозатрат. Основные механизмы разрушения включают истирание, сдвиговое разрушение и ударное воздействие. В шаровых мельницах преобладает ударный механизм разрушения, что приводит к образованию частиц с высокой степенью дефектности. В мельницах с перемешиванием, таких как IsaMill, Stirred Media Detritor (SMD) и Vertimill, преобладает сдвиговое разрушение, обеспечивающее более равномерное распределение частиц по размерам [6].

Энергоэффективность процесса измельчения является важным фактором при выборе оборудования. Мельницы с перемешиванием потребляют меньше энергии по сравнению с традиционными шаровыми мельницами за счет более эффективной передачи энергии частицам. Кроме того, современные технологии, такие как метод дискретных элементов (DEM) и вычислительная гидродинамика (CFD), позволяют моделировать и оптимизировать процессы измельчения с высокой точностью [2].

Механизмы разрушения в мельницах с перемешиванием, независимо от их ориентации, традиционно описываются как процессы истирания и истощения, которые в упрощенном виде могут быть охарактеризованы как «сдвиговое» разрушение. В шаровых мельницах преобладающим механизмом разрушения считается ударное воздействие, особенно в передней части мельницы. Однако недавние исследования, основанные на численном моделировании методом дискретных элементов (DEM), показали, что ключевую роль играют низкоэнергетические повторяющиеся контакты в основной массе загрузки, которые способствуют накоплению микроповреждений и постепенному разрушению материала [10].

На рисунке 1 представлены механизмы разрушения и соответствующая терминология, подчеркивающие влияние этих процессов на степень высвобождения минералов. Учет механизмов разрушения, зависящих от физических и минералогических характеристик руды, является важным аспектом при моделировании и численном моделировании процессов

измельчения. Это особенно актуально для проектирования и оптимизации технологических схем, где требуется прогнозирование влияния разрушения на процессы высвобождения полезных компонентов.

Исследование механизмов разрушения осуществляется с помощью вычислительных методов, таких как DEM и CFD [8], а также с использованием экспериментальных подходов. В последнем случае анализируется распределение частиц по размерам, их морфологические особенности и характеристики высвобождения, что позволяет установить взаимосвязь между процессами разрушения и эффективностью измельчения [7]. Большинство проведенных исследований сосредоточено на грубом измельчении (с размером частиц >150 мкм), тогда как механизмы разрушения в условиях тонкого измельчения, имеющие решающее значение для переработки платиновых металлов.

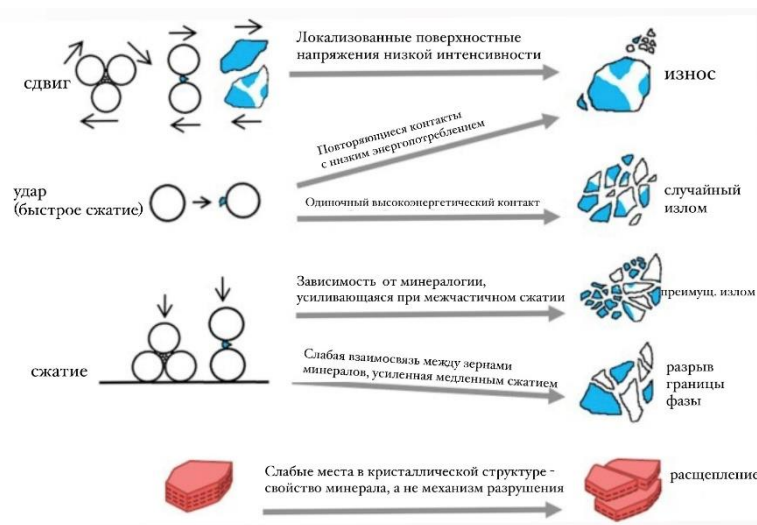


Рисунок 1. Механизмы разрушения - определения и терминология, подчеркивающие предполагаемые связи между событиями при контакте (приложении силы) и результатом разрушения

Использование Auto-SEM-EDS позволило детально исследовать распределение частиц по размерам и их текстуру. Было выявлено, что механизм разрушения напрямую влияет на степень освобождения минералов, что играет ключевую роль в повышении эффективности процессов переработки [6]. Более раннее освобождение частиц позволяет снизить эксплуатационные расходы и оптимизировать работу обогатительных фабрик.

Кроме того, исследования показали, что интенсивность измельчения и форма частиц оказывают влияние на последующие стадии переработки, включая флотацию и гидрометаллургию. Например, частицы неправильной формы могут ухудшать процесс флотации, снижая выход ценных минералов. Поэтому оптимизация процессов измельчения должна учитывать не только энергоэффективность, но и влияние на последующие этапы переработки [7].

Процесс измельчения также оказывает влияние на свойства конечного продукта. Например, при переработке редких и драгоценных металлов качество измельченного материала играет определяющую роль в эффективности последующих стадий обогащения. Экспериментальные исследования показывают, что мельницы с перемешиванием более эффективны для извлечения ультрадисперсных минералов за счет высокой однородности и меньшего количества крупных фракций [3].

Дополнительно были исследованы механизмы взаимодействия мельничных тел и измельчаемого материала. В шаровых мельницах механизмы разрушения более хаотичны, что приводит к значительному нагреву среды и снижению энергоэффективности. В отличие от них, мельницы с перемешиванием характеризуются более направленным воздействием, что позволяет повысить выход целевых минералов при меньших затратах энергии [5].

Перспективы исследований включают дальнейшее совершенствование конструкций мельниц, применение новых типов мельничных тел и использование альтернативных энергетических источников. В частности, разработки в области лазерного измельчения и высокочастотных вибрационных установок демонстрируют перспективные результаты в повышении селективности процесса дробления [1].

Проведенное исследование позволило оценить эффективность процессов тонкого измельчения в шаровых и стержневых мельницах с акцентом на степень высвобождения ценных минералов и морфологические характеристики частиц руды. Установлено, что различия в энергозатратах между этими типами мельниц не оказывают существенного влияния на форму конечного продукта, за исключением лабораторной шаровой мельницы, в которой при увеличении времени измельчения наблюдается вытягивание частиц в крупных размерных фракциях. Однако в мелкодисперсных фракциях такая закономерность не прослеживается. Полученные продукты характеризуются преимущественно угловатой формой, аналогичной исходному материалу или более выраженной, что противоречит традиционной гипотезе о постепенном округлении частиц при истирании, особенно в случае разрушения под воздействием сдвиговых нагрузок.

Применение автоматизированной сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (Auto-SEM-EDS) подтвердило важность анализа текстуры, морфологии и степени высвобождения частиц для оптимизации процессов флотации и переработки рудного сырья. Установлено, что механизмы разрушения, такие как истирание и сдвиговое разрушение, по-разному влияют на морфологические характеристики частиц, что необходимо учитывать при проектировании и модернизации схем измельчения. В шаровых мельницах преобладает ударный механизм разрушения, однако внутри загрузки чаще наблюдаются низкоэнергетические повторяющиеся контакты, способствующие постепенному разрушению частиц.

Выводы

Результаты исследования подтверждают необходимость учета механики разрушения частиц при проектировании схем измельчения. Оптимальное сочетание различных типов мельниц и механизмов разрушения позволяет повысить энергоэффективность процессов и минимизировать потери ценных минералов [8]. Применение комбинированных систем измельчения может стать перспективным направлением в развитии горно-металлургической промышленности, позволяя сократить объемы отходов и снизить экологическое воздействие.

Современные технологии, такие как DEM (метод дискретных элементов) и CFD (метод вычислительной гидродинамики), позволяют более точно прогнозировать поведение частиц в мельницах, что способствует разработке более эффективных стратегий измельчения.

Библиография

1. Dmitrak Yuri Vitalievich Combining mills for fine grinding of rocks // News of TulSU. Earth Sciences. 2021. №2.
2. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills Miner. Eng., 16 (2003), pp. 337-345.
3. King R.P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Butterworth-Heinemann, Oxford (2001).

4. Little L., Mainza A.N., Becker M., Wiese J. Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation, Minerals Engineering, Volume 111, 2017, Pages 148-157.
5. Rahimi M., Dehghani F., Rezai B., Aslani M.R. Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics Int. J. Miner. Metall. Mater., 19 (2012), pp. 284-289.
6. Vizcarra T.G., Wightman E.M., Johnson N.W., Manlapig E.V. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores Miner. Eng., 23 (2010), pp. 374-382.
7. Cleary P.W., Sinnott M., Morrison R. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1—Media motion, energy consumption and collisional environment Miner. Eng., 19 (2006), pp. 1537-1550.
8. Gao M., Forssberg E. Prediction of product size distributions for a stirred ball mill Powder Technol., 84 (1995), pp. 101-106.
9. Ye X., Gredelj S., Skinner W., Grano S.R. Regrinding sulphide minerals—breakage mechanisms in milling and their influence on surface properties and flotation behavior Powder Technol., 203 (2010), pp. 133-147, 10.1016/j.powtec.2010.05.002

Акустическая диагностика очагов пожаров в угольных пластах

Борисенко Д.И. (НИЦ «Курчатовский институт», dima-luxinzhi@mail.ru)*

Аннотация

Для диагностики очагов пожара в угольных пластах предлагается регистрировать акустическое излучение, генерируемое процессом трещинообразования, возникающим при горении угля.

Приводится обоснование обязательности существования информационных признаков горения и самонагрева угля и описание механизмов разрушения угля при горении, приводящих к возникновению акустического излучения.

Ключевые слова

Акустическая диагностика очагов пожара, КПД, разрушение угля

Теория

Для подведения теоретической базы следует опираться на фундаментальные законы. Наиболее фундаментальными законами естествознания являются два начала термодинамики. Первое начало термодинамики гласит, что энергия сохраняется (не исчезает), переходя из одной формы в другую (химическую, тепловую, механическую и т.п.) [Кириллин, 2016]. Второе начало термодинамики гласит, что энергия не может полностью перейти из одной формы в другую – обязательно имеют место «потери» в техническом смысле [Кириллин, 2016].

Одним из наиболее часто используемых в технике понятий является коэффициент полезного действия (КПД):

$$\eta = (E_{\text{пол}} / E_{\text{затр}}) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где η – КПД, %; $E_{\text{пол}}$ – полезная энергия, Дж; $E_{\text{затр}}$ – затраченная энергия, Дж.

Природа устроена так, что всегда

$$E_{\text{пол}} < E_{\text{затр}}, \text{ соответственно } \eta < 1. \quad (2)$$

Здесь проявляется терминологический нюанс: что считать «полезным» при явно вредном процессе неконтролируемого саморазогревания? Если подходить чисто формально, то с термодинамических позиций можно назначить, что $E_{\text{пол}}$ – выделившаяся в процессе саморазогревания теплота (соответственно $E_{\text{затр}}$ – изменение теплоты сгорания участвующего в этом процессе вещества).

Величину « $E_{\text{затр}} - E_{\text{пол}}$ » (в относительном виде « $1 - \eta$ ») принято называть «потерями», в силу (2) всегда $1 - \eta > 0$ и в задачи инженеров входит её минимизация. Происхождение термина «потери» вопросов не вызывает, всё достаточно очевидно и логично: энергия, которая могла бы принести пользу, эту пользу не приносит, «теряется». Но ведь в природе ничего не теряется, и тем более в природе понятие «полезы» (полезности) если вообще и применимо, то его смысл не совпадёт с тем, что подразумевается в технике.

Обязательность существования информационных признаков горения и самонагрева угля

При любом процессе, даже при выделении теплоты (будь то горение или саморазогревание), не вся выделяющаяся (подводимая) энергия переходит в теплоту – по базовым фундаментальным законам обязаны иметь место «потери»: различные явления, на

которые тратится исходная энергия¹. Применительно к рассматриваемой ситуации – поведению угля при горении, должны иметь место явления нетеплового характера, на которые затрачивается тепловая энергия. Уголь является многокомпонентной средой, содержащей различные структурные элементы, в том числе и с сегнетоэлектрическими свойствами [Ржевский, 1984]. При нагреве угля его структурные элементы расширяются и давят друг на друга, реализуется пьезоэффект, возникает электрическое поле. Это значит, что не вся химическая энергия угля переходит в теплоту. Отметим также, что возникающее в результате пьезоэффекта электрическое поле порождает магнитное поле – возникает электромагнитное излучение, которое распространяется в окружающую среду, и его можно зарегистрировать (такие работы есть [Вострецов, 2017]), а значит, можно получить информацию о порождающих его причинах.

То есть при формальном рассмотрении процесса саморазогревания угля с термодинамической точки зрения получается, что часть химической энергии угля, в технике относящаяся к «потерям» (являющаяся не теплотой, а работой расширения), порождает явление, сопровождающееся излучением, по регистрации которого можно получить информацию о процессе нагрева угля. Иными словами пользу из «потерь» извлечь всё-таки можно – они несут информацию. Как эту информацию зарегистрировать и интерпретировать – вопрос следующий. Каких-либо ограничений относительно информационных признаков, строго говоря, нет, и можно опираться на те виды излучения и изменение соответствующих полей, которые удобнее регистрировать в каждой конкретной ситуации. Известны способы диагностики пожаров в угле (и соответственно его самонагревания) по регистрации индикаторных газов [Игишев, 2015], температуры [Yi, 2021], влажности [Mishra, 2013], электромагнитного [Шлапаков, 2014] и радиоактивного [Ерастов, 2012] излучений. Однако, в рамках настоящей работы мы рассматриваем акустическую диагностику.

Если ситуацию с нагреваемым (разогревающимся) углём рассмотреть подробнее, то увидим, что нетепловых явлений, но обусловленных нагревом, в нём происходит гораздо больше.

В результате нагрева и вызванного этим удаления влаги изменяются адгезия (связь структурных элементов с водой) и когезия (связь структурных элементов между собой) – происходит рассыхание угольного вещества. При определённых значениях температуры некоторые компоненты угольного вещества меняют агрегатное состояние: плавятся и сублимируются [Колесниченко, 2020], в результате чего связь между структурными элементами также ослабевает. Заметим, что при невысоких средних значениях температуры, в локальных зонах интенсивность колебаний молекул может соответствовать значениям температуры, на порядки превышающим средние значения [Борисенко, 2012]. Высыхая, влага изменяет положение в поровом пространстве угля – в зоне контакта мениска капельной фазы и стенки возникают капиллярные силы, значение которых тем выше, чем меньше диаметр канала [Остриков, 1966], данное явление также приводит к дезинтеграции угольного вещества. Уголь является многокомпонентной средой, и его структурные элементы характеризуются различными значениями зависящих от температуры теплофизических свойств, главным образом теплоёмкости, теплопроводности и термического расширения. Поэтому при нагреве они

Но это не означает, что в конечном счёте, в результате цепи преобразований из одной формы в другую, вся начальная энергия не перейдёт в теплоту. Деформируются неравномерно, из-за чего на их границах возникают механические напряжения, которые при продолжении нагрева превышают критические значения и образуются микроразрывы [Ржевский, 1984]. В свою очередь коэффициенты термического расширения твёрдого угольного вещества и воды также различаются и при нагреве вода, зажатая в замкнутых порах разрывает уголь. Если в замкнутой поре, где содержится влага, достаточно пространства для расширения воды, то

вследствие замкнутости объёма давление в нём повышается и испаряющаяся вода разрывает свой «сосуд». Такая же ситуация наблюдается и при наполнении пор выходящими летучими компонентами [Borisenko, 2020]. На образующихся свободных поверхностях скапливаются высвобождающиеся при разрыве химических связей заряженные частицы, из-за чего между этими поверхностями возникают кулоновские силы [Колесниченко, 2020], также способствующие дезинтеграции угольного вещества. Кроме этого при нагреве интенсифицируются химические реакции (главным образом, окисление), в результате которых атомы углерода покидают угольную матрицу, что тоже её ослабляет.

Все эти эффекты накладываются друг на друга, и при продолжении нагрева это приводит к образованию в угле трещин, берега которых совершают колебательные движения [Борисенко, 2012]. А поскольку колебания в конденсированной среде сопровождаются появлением упругих (акустических) волн, то при нагреве угля возникает акустическое поле. Регистрируя это поле, можно диагностировать порождающую его причину – нагрев угля (рисунок 1).

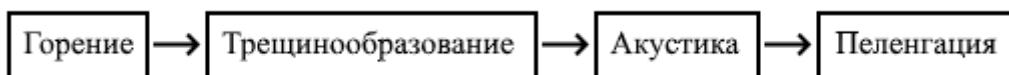


Рисунок 1. Принципиальная схема акустической диагностики очагов пожаров в угольных пластах

Таким образом, возникновение акустического поля обусловлено характерными событиями – образованием трещин. Принципиально, что по регистрируемому излучению можно запеленговать и источник возникающего поля – «характерную зону» – локальную, маленькую по размерам по сравнению с областью протекания процесса, часть пространства, непосредственно в которой реализуется характерное событие. Отметим, что характерными зонами на мезо- (и микромасштабе) можно принимать непосредственно отдельные трещины и микротрещины, а на макромасштабе – весь очаг пожара (очаг самонагрева) – его окисляющуюся кромку.

Выводы

Изложено обоснование обязательности существования информационных признаков горения и самонагрева угля, вытекающее из фундаментальных законов. Приведены явления, способствующие протеканию процесса трещинообразования в угле при его горении и самонагревании.

Библиография

1. Борисенко Д.И./ Роль локальной неоднородности энергопередачи в самоподдержании процесса горения угля применительно к подземным пожарам// Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. Випуск 87 (2012). – С.60–62.
2. Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е./ Измерительная система синхронной регистрации сигналов ЭМИ и механических параметров деформирования образцов горных пород в лабораторных экспериментах// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых 2017 год, номер 6, Страницы: 204-210 DOI: 10.15372/FTPRPI20170622.
3. Ерастов А.Ю., Потапов П.В., Шлапаков П.А., Щенев А.В., Ли К.Х., Титов Е.Н., Чупин А.Н./ Опыт применения геофизической съёмки и тепловизионного контроля для выявления очагов самонагрева на угольных складах и выбора способа их тушения//

Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, 2012, №2, С. 152–156.

4. Игишев В.Г., Шлапаков П.А., Хаймин С.А., Син С.А./ Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагревания и беспламенного горения// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, 2015, №4, С. 55–59.

5. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. /Техническая термодинамика учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 494 стр.

6. Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И./ Квантово-электронные закономерности формирования метаморфических процессов и механизма внезапных выбросов метана в угольных пластах// Уголь. 2020. № 7. С. 42-48. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-7-42-48.

7. Остриков М.С., Дибров Г.Д./ О деформациях и разрушении селикагеля под влиянием капиллярных сил, развивающихся в процессах увлажнения и высыхания// В кн.: Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. С.32–38.

8. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

9. Шлапаков П.А., Ерастов А.Ю., Сороковых С.В., Рыков А.М./ Способ оценки эндогенной пожароопасности при подземной разработке угольных пластов// Патент РФ RU2514017C1 (Опубликовано: 27.04.2014 Бюл. № 12, Заявка: 2013102323/03, 17.01.2013).

10. Borisenko D.I./ Cracking on the surface of coal under the influence of laser radiation// AIP Conference Proceedings International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments (ComPhysChem'20-21). 020036 AIP Conference Proceedings 2304, 020036 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0033929>

11. Mishra P. K., Kumar Subhash, Mandal Prabhat Kumar/ Application of sensors for detection of underground coal mine fire: a review// (International Conference) CETAFC BESU Shibpur, Kolkata. Serial No.-19, pp.-201-213. December 2013.

12. Yi Xu, Hongdong Fana, Libo Dang/ Monitoring coal seam fires in Xinjiang using comprehensive thermal infrared and time series InSAR detection// International Journal of Remote Sensing. Volume 42, 2021. Стр 2220-2245 <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1823045>.

Выбор и формирование из техногенного сырья покрытий в почве горных выработок

***Боровков Ю.А. (МГРИ, bua_51@mail.ru),
Кадыргулов Р.Р. (АО «Серебро-Магадан», krr22@mail.ru),
Вильмис А.Л. (МГРИ, vilmisal@mgri.ru),
Шалаева А.А.* (МГРИ, anastasiashalaeva@yandex.ru)***

Аннотация

Покрытия (настилы) бетонные и из техногенного сырья с добавлением различных вяжущих исключают потери руды в почве очистных выработок, улучшают условия работы самоходных машин, сокращают приток вредных газов из выработанного пространства и потери свежего воздуха, служат частично крепью, что повышает производительность труда на 10 — 15%.

Ключевые слова

Настил, бетон, техногенное сырьё, очистная выработка

Введение

Прочность настилов из техногенного сырья в виде обрушенных и дробленных пород устанавливаются с учетом массы груженой самоходной погрузо-доставочной машины, усилиями черпания ковшем и площадью соприкосновения шин с почвой горной выработки. Удельное давление самоходных машин тяжелого типа на настил не должна превышать 1,5 — 1,8 МПа/м², а область применения настилов устанавливается технико-экономическим расчетом.

Актуальность

Поэтому возникла идея формирования покрытий почвы выработок из техногенного сырья с добавлением различных вяжущих, позволяющая улучшить условия работы самоходных машин, сократить приток вредных газов из выработанного пространства и потери свежего воздуха, частично служить крепью, что может повысить производительность труда на 10 — 15%.

Теория

Для снижения потерь руды в почве слоя верхняя часть закладочного материала упрочняется. Прочность покрытия зависит от типа и веса машин, размеров колес, давления воздуха в шинах, формы и вида протектора, а также усилия черпания при разгрузке [1]:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\sqrt{F^2 + q^2}}{S_{\text{вк}}}, \quad (1)$$

где F — усилие, приходящееся на одно колесо, Н; q — нагрузка на колесо машины, Н; $S_{\text{вк}}$ — площадь вдавливания колеса, м²:

$$q = 0,7 Q_{\text{гр}}; S_{\text{вк}} = 0,5 S_{\text{сл}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{гр}}$ — вес машины в нагруженном состоянии, Н; $S_{\text{сл}}$ — площадь следа колеса (принимается равной площади круга с диаметром, равным диаметру шины), м².

Минимально допустимая толщина покрытия:

$$h_{\Pi} = \sqrt{\frac{6M}{b \cdot m \cdot \eta \cdot \sigma_{\text{из}}}}, \quad (3)$$

где **M** — максимальный изгибающий момент, Н-м; **b** — ширина упругого основания, соответствующая ширине следа колеса, м; **m** — коэффициент, характеризующий условия работы покрытия (принимается 0,8—1,0); **η** — коэффициент однородности закладочного массива (**η** = 0,6—0,8); **σ_{из}** - предел прочности материала покрытия на растяжение при изгибе (**σ_{из}** = 0,06— 0,11-**σ_{сж}**; **σ_{сж}** - предел прочности материала покрытия на сжатие), МПа. При толщине покрытия 0,5 м необходимая прочность закладки для применяемых типов ПДМ на момент заезда составляет (МПа): ПД-5 - 0,7; ПД-8 - 1,0; ПД-12 - 1,5 [2]. Зависимость толщины упрочняющего слоя закладки (**h_п**) от её прочности (**σ_п**) имеет по нашим исследованиям с коэффициентом корреляции 0,95 следующий вид:

$$\sigma_{\Pi} = \sigma_{\text{сл}} \cdot \exp\left(\frac{h_m}{h_{\Pi}}\right), \quad (4)$$

где **σ_{сл}** - прочность остальной части заложенного слоя составляет 0,3—0,6 МПа.; **h_m** — максимальная толщина упрочненного слоя при **σ_п** = 1 МПа и колеблется от 0,65 до 0,8 м. На рис. 1. приведен график зависимости толщины упрочненного слоя закладки от её нормативной прочности.

Если закладочный массив имеет предел прочности на сжатие 0,2 - 0,4 МПа, то верхнюю его часть (бетонное покрытие) возводят из материала толщиной 35 - 50 см, предел прочности которого около 1 МПа, что обеспечивает нормальные условия для работы тяжелого самоходного оборудования.

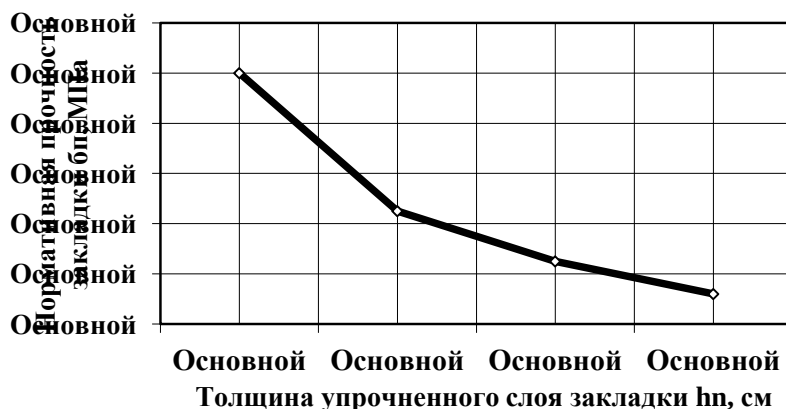


Рисунок 1. График зависимости толщины упрочненного слоя закладки (**h_п**) от её нормативной прочности (**σ_п**)

На рудниках, где применяют взрывную отбойку руды на бетонный настил и скреперную доставку, предел прочности материала настила равен 1 - 1,5 МПа, который он приобретает в течение двух смен. Состав смесей для возведения бетонного настила принимают в зависимости от предъявляемых требований по прочности, технологии возведения, срокам твердения и применения ускорителей твердения (табл.1). Ускорители твердения — хлористый кальций и фтористый натрий — оказывают положительное влияние на прочность смеси лишь в течение первых 2 - 3 суток. Интенсивное нарастание

прочности наблюдается в течение первых двух смен, когда образцы с ускорителями на 15 - 20% прочнее контрольных работ [3]. Дальнейшее твердение смесей с ускорителями протекает с меньшей интенсивностью, и через двое суток исследуемые и контрольные пробы имеют примерно одинаковую прочность. В более поздние сроки бетон с ускорителями твердеет медленнее, чем без них, и через 28 суток оказывается на 20 - 30% слабее контрольных образцов.

Таблица 1. Предел прочности на сжатие песчано-цементных смесей

Соотношение цемент/песок (по объему)	Марка цемента	Водоцементное отношение В/Ц	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте, суток	
			2	14
1:4	ПЦ М 300	0,5	2	—
1:5	ПЦ М 300	0,5	1,3	2,5
1:4	ШПЦ М 300	0,5	1,5	—

Оптимальный расход хлористого кальция составляет 2 - 3%. По эффективности влияния на прочность бетона добавка 5% хлористого кальция эквивалентна 2% фтористого натрия. Ускорители целесообразно применять при необходимости сокращения времени твердения бетонного настила до одной - двух смен [4].

Организация работ по возведению бетонного или из техногенного образования настила осуществляется двумя способами: набрызгиванием (торкретированием) и разливом смеси. При первом способе сухой цемент и песок перемешивают в бетономешалке. Сухую смесь загружают в торкрет-машину, сжатым воздухом подают в очистной забой к соплу, где смачивают и наносят на поверхность породной закладки. Перед бетонированием поверхностный слой породы разравнивают, толщину наносимого бетонного покрытия контролируют по установленным реперам. Для удобства извлечения с настила богатой по содержанию полезного компонента рудной мелочи (например, смыванием струей воды) целесообразно придавать поверхности закладочного массива уклон к рудоспуску. Сухая смесь может транспортироваться от торкрет-машины к месту бетонирования на расстояние 40—50 м по вертикали, 200 м и более по горизонтали. Для доставки на большее расстояние целесообразно применять металлический трубопровод и в целях снижения сопротивления движению смеси. Производительность торкрет-машины 7,5 м²/ч при толщине покрытия 8 - 10 см. На ее обслуживании заняты 4 чел.: двое рабочих готовят смесь, один управляет торкрет-машиной и один - сопловщик. Недостаток этой стационарной установки - и в небольшом радиусе действия. Торкрет-машину целесообразно применять в комплексе с пневмонагнетателями. Все механизмы монтируют на передвижных каретках, соединенных в поезд. Верхнюю камеру торкрет-машины снимают. Поезд загружают сухой смесью на центральном смесительном узле и электровозом доставляют к месту бетонных работ. Сухая смесь из пневмонагнетателей сжатым воздухом подается в рабочую камеру торкрет-машины, откуда по шлангу поступает к соплу в очистной забой, смешивается с водой и наносится на поверхность породной закладки слоем толщиной 8—10 см.

Сухая смесь из пневмонагнетателя легко выгружается сжатым воздухом, если влажность песка не превышает 2—3%, Максимальное время разгрузки пневмонагнетателя не превышает 30 мин. За 6 ч работы передвижная установка подаст 7,2 м³ смеси, достаточной для бетонирования 70 м² поверхности закладки. На ее обслуживании заняты: машинист и

сопловщик. Недостаток метода набрызгивания — трудность сохранения близкого к установленной величине (0,5) водоцементного отношения, которое колеблется в пределах 0,3 - 0,8. Избыток воды снижает прочностные свойства бетонного покрытия.

Второй способ бетонирования заключается в разливе бетонотвердеющей смеси. В бетономешалке готовится жидкая смесь и перегружается в пневмонагнетатель, из которого сжатым воздухом по трубопроводу диаметром 100 - 150 мм раствор подается в рабочие блоки и из шланга разливается по поверхности закладки. Для транспортирования по трубопроводу смесь должна обладать более высокой подвижностью, чем при набрызг-бетонировании, что достигается увеличением водовяжущего отношения до 0,8—1. В результате предел прочности на сжатие материала снижается на 20—25%. Недостаток технологии — расслоение смеси в пневмонагнетателе при ее транспортировании.

Выводы

В результате перехода на бетонные покрытия из техногенного сырья с добавлением различных вяжущих исключают потери руды в почве очистных выработок при этом были исключены затраты на зачистку поверхности закладки и возведение деревянных настилов, на транспортирование, обогащение и металлургический предел бедной руды, полученной от зачистки поверхности породной закладки.

Экономический эффект от внедрения в производство бетонных настилов из техногенного сырья с добавлением различных вяжущих исключают потери руды в почве очистных выработок и при этом изменяется от 10 до 20% себестоимость руды в зависимости от ее ценности.

Библиография

1. Справочник по горнорудному делу /Под ред. В. А. Гребенюка, Я. С. Пыжьянова, И. Е. Ерофеева, М., Недра, 1983.
2. Байконуров О.А., Крупник Л. А., Петухов В. Н. и др. Технология добычи руд с твердеющей закладкой - М.: Недра, 1979.
3. Боровков Ю.А., Гареев А.М., Никитин С.Е. Геоэкологический подход к определению несущей способности закладочных массивов из отвалов техногенного минерального сырья для покрытия почвы горных выработок //Материалы V Международной научно-практической конференции «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых».- М.: МГРИ, 2006, с. 294
4. Боровков Ю.А., Гареев А.М., Тофайл А. Выбор состава материала из отвалов техногенного минерального сырья для покрытия почвы горных выработок //Материалы V Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр», Москва - Кызыл-Кия, 18-22 сентября, 2006, с. 188-190

Совершенствование технологии отбойки горных пород скважинным методом с применением невзрывчатых расширяющих смесей.

**Бочаров И.А. * (МГРИ, ilya.bocharov.19@mail.ru),
Иляхин С.В. (МГРИ, isv11@mail.ru)**

Аннотация

Цель исследования – совершенствование технологии разрушения горных пород скважинным методом с применением НРС.

Научная новизна заключается в теоретическом, лабораторном и полевом исследованиях применения НРС и «твердой» вставки при разрушении горных пород.

В результате исследования были подтверждены лабораторными и полевыми испытаниями теоретические расчёты работоспособности НРС в скважинах диаметром 75 - 150 мм

Ключевые слова

Невзрывчатые расширяющие смеси, скважина, вставка, разрушение

Теория

Сущность способа разрушения горных пород скважинным методом заключается в том, что в пробуренную скважину помещается невзрывчатая расширяющая смесь (далее – НРС) и твердая вставка (рис. 1) [1]. В процессе работы НРС расширяет имеющиеся в горной породе трещины, тем самым разрушая ее.

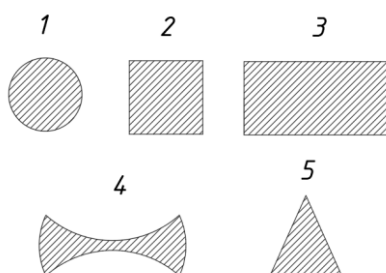


Рисунок 1. Формы «твердых» вставок: 1 – круглая, 2 – квадрат; 3 – прямоугольная; 4 – 2 дуги, соединенные в один цельный элемент; 5 – треугольная

Основной особенностью предлагаемой технологии является возможность увеличения диаметра скважины и расстояния между ними в ряду.

На сегодняшний день высокую популярность получили следующие невзрывные методы разрушения горных пород: клиновой (простые, сложные и гидроклинья); термический; гидравлические раскалывающие устройства; газогенераторы; бутобои; применение НРС.

Однако перечисленные выше способы отбойки горных пород имеют ряд существенных недостатков: высота добычного уступа 0,5-2 м; диаметр шпуров до 56 мм; высокая стоимость оборудования и материалов; частые поломки.

Один из широко применяемых химических способов разрушения горной породы является НРС (невзрывная разрушающая смесь). К преимуществам данного способа относятся: относительная беззвучность раскалывания, отсутствие сейсмического эффекта и разлёта осколков породы, экологическая безопасность и безопасность ведения работ, не

требуется специальное разрешение на ведение работ по разрушению горных пород. К недостаткам метода можно отнести невозможность его использования в зарядных камерах более 56 мм [3].

Поэтому были проведены исследования, доказывающие использование разрушение горной породы в зарядных камерах более 56 мм.

Данная статья посвящена – изучению возможности использовать НРС в скважинах диаметром более 50 мм при помощи вставок, например, из металла.

Методика проведения эксперимента на металлической модели конструкции Христолюбова В.Д. по расширению НРС в зарядной камере подробное описание которой изложено в работе [4].

В зарядную камеру диаметром 100 мм (рис.2) помещались металлические вставки диаметром 26,32,38,44 мм (рис.3).



Рисунок 2. Модель для изучения работы НРС в зарядной камере



Рисунок 3. Металлические вставки

Собранную зарядную камеру устанавливают на подставку строго по оси прибора, прижимают динамометр с помощью винта. После этого, подготавливают рабочую смесь.

Путём вращения винта устанавливают нагрузку на рабочую камеру, равную 1/4 максимального усилия, развиваемого смесью. Величину нагрузки контролируют по показаниям динамометра.

По началу роста показаний динамометра фиксируют время достижения усилия, развиваемого смесью при заданной величине нагрузки. Далее увеличивают нагрузку на зарядную камеру путем вращения винта и продолжают измерение. Шаг увеличения нагрузки определяется требуемой точностью измерений и рекомендуется равным 1/10 максимального развиваемого смесью усилия. Измерения заканчивают после прекращения интенсивного роста, развиваемого смесью.

Результаты измерений рабочего усилия НРС представлен на графике (рис.4).

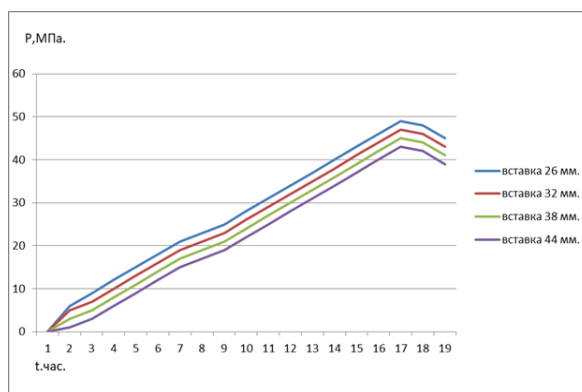


Рисунок 4. Усилие НРС в зависимости от времени и диаметра вставки

На основании анализа результатов проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что увеличении диаметра вставки с 26 мм до 44 мм уменьшает развиваемое смесью давление на 15-25 %. Причем выброса смеси из зарядной камеры не наблюдается.

Методика проведения полигонного эксперимента на бетонных моделях.

Для подтверждения отсутствия выброса НРС из зарядной камеры 100 мм со вставками и одновременного разрушения были подготовлены бетонные модели высотой 1300 мм, диаметром 300 мм с зарядной камерой диаметром 100 мм по центру цилиндрической модели. Для изготовления бетонных моделей использовался цемент марки 500 (соотношение 1:3). Для набора максимальной прочности бетона модели сушились в течение 28 дней.

В центр бетонной модели помещали вставку и заполняли зарядную камеру смесью НРС. В результате реакции гидратации невзрывная разрушающая смесь твердеет и расширяется, создавая давление на стенки бетонных моделей до 40-50 МПа. Результаты разрушений представлены на рис.5.



Рисунок 5. Результаты разрушений бетонных моделей при полигонных испытаниях

С учетом полученных результатов предлагается осуществлять отбойку горных пород блоками высотой 5 и более метров с использованием скважин заполненных НРС со специальными вставками. Для снижения стоимости сырья рекомендуется применением

«твердых» вставок различной формы, позволяющих регулировать напряжение по периметру скважины, а значит и степень дробления. Использование вставок позволит снизить расход НРС на 5-20% без потери общей работоспособности.

Выводы

Получено авторское свидетельство на предлагаемый способ, выполнены теоретические расчёты, обосновывающие практичность использования метода, проведены лабораторные исследования на моделях с изменяемым диаметром от 40 до 150 мм, доказывающие эффективность данного метода, проведены полевые испытания на бетонных блоках $d=0,3-0,4$ м, подтверждающие выводы лабораторных исследований.

На сегодняшний день продолжены лабораторные и полевые исследования, осуществляется подготовка к проведению промышленных испытаний на карьерах России.

Библиография

1. Емельянов Р.В., Иляхин С.В. «Изучение влияния формы вставки в шпуре с НРС на перераспределения напряжений по периметру» ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 9. с. 209–213
2. Иляхин С.В. Авторское свидетельство № 1828164. Способ направленного разрушения горных пород. 1991.
3. Христюков В. Д. «Невзрывные способы разрушения горных пород» Московский горный институт . – М.: МГИ, 1991. – 118 с.
4. Христюков В.Д. «Разработка ресурсосберегающего способа добычи минерального сырья невзрывчатыми разрушающими смесями»: дис... к.т.н., спец. 05.15.11 - "Физические процессы горного производства" / В. Д. Христюков . – М.: МГИ, 1988 . – 148 с.

Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа геофизических данных буровых скважин для угольной промышленности

***Ву Хонг Зуонг* (Ханойский горно-геологический университет,
vuhongduong@humg.edu.vn),***

***Нгуен Тьен Хунг (Ханойский горно-геологический университет,
nguyentienhung.dk@humg.edu.vn),***

***Нгуен Те Винь (Ханойский горно-геологический университет,
nguyenthevinh@humg.edu.vn),***

Арсентьев Ю.А. (МГРИ, arsentev1956@yandex.ru)

Аннотация

Энергетическая стратегия страны предусматривает существенное наращивание темпов развития угольной промышленности. При выборе инструментария, предназначенного для обработки значительного объема геологических и геофизических сведений, накапливаемых в процессе бурения скважин на угольных месторождениях, специалисты отдают свое предпочтение методам машинного обучения (МО) и искусственного интеллекта (ИИ) для максимально эффективного использования полученных результатов с целью обнаружения угольных пластов [1,2]. Многочисленные исследования сосредоточены на разработке новых алгоритмов обработки обширного информационного ресурса и создании автоматизированных моделей для определения характеристик угольных пластов: глубины залегания, мощности, угла падения, устойчивости пород и других. В представленном сообщении авторы демонстрируют значительные преимущества данного подхода в приложении к обработке и интерпретации данных ГИС для конкретных горно-геологических условий залегания угольных пластов.

Ключевые слова

Машинное обучение, искусственный интеллект, угольный пласт, прогнозирование распределения литологических слоев

Теория

Сбор и анализ геологических и геофизических данных, получаемых при бурении скважин, рассматривается как важнейший этап оптимизации процесса разведки угольных пластов. Эта информация играет ключевую роль в идентификации угольных месторождений и оценке их запасов, благодаря уникальным физическим свойствам угля, включая низкую естественную радиоактивность, низкую плотность и высокое электрическое сопротивление, которые значительно отличаются от большинства окружающих пород [4].

Геофизические исследования скважин предоставляют важнейшую информацию о наличии, протяженности, мощности и корреляции угольных пластов как мелкого, так и глубокого залегания, даже в ранее считавшихся неугленосными районах [3]. Применение прогрессивных способов измерения и оборудования для проведения геофизических исследований в скважинах потребовало использования современных методов машинного обучения и искусственного интеллекта для сокращения затрат времени на обработку и интерпретацию данных ГИС.

Базу данных в обозначенном исследовании составляют сведения, полученные в результате каротажа, проведенного для двух скважин, GK288 и GK269, сооруженных на угольной шахте X, по четырем параметрам, включая естественный гамма-каротаж (GR), плотностной гамма-каротаж (HRD), удельное сопротивление (RES), плотность (DENS),

значения которых представлены в таблице 1 и на рисунке 1 в виде гистограммы частот и коробчатой диаграммы, построенной для четырех параметров каротажа скважины.

Таблица 1. Подробная статистика набора данных каротажа скважин: естественный гамма-каротаж (GR); плотностной гамма-каротаж (HRD); удельное сопротивление (RES); плотность (DENS)

	Mean	Max	Mode	P10	P50	P90
GR	71,417	222,97	100	25,94	68,81	121,62
Log10(RES)	0,84637	5,9972	-0,16115	-0,18046	0,5412	2,1639
HRD	1137,1	7531	517,65	537,54	913,09	1872,3
DENS	2,2954	3,64	2,27	2,013	2,29	2,58

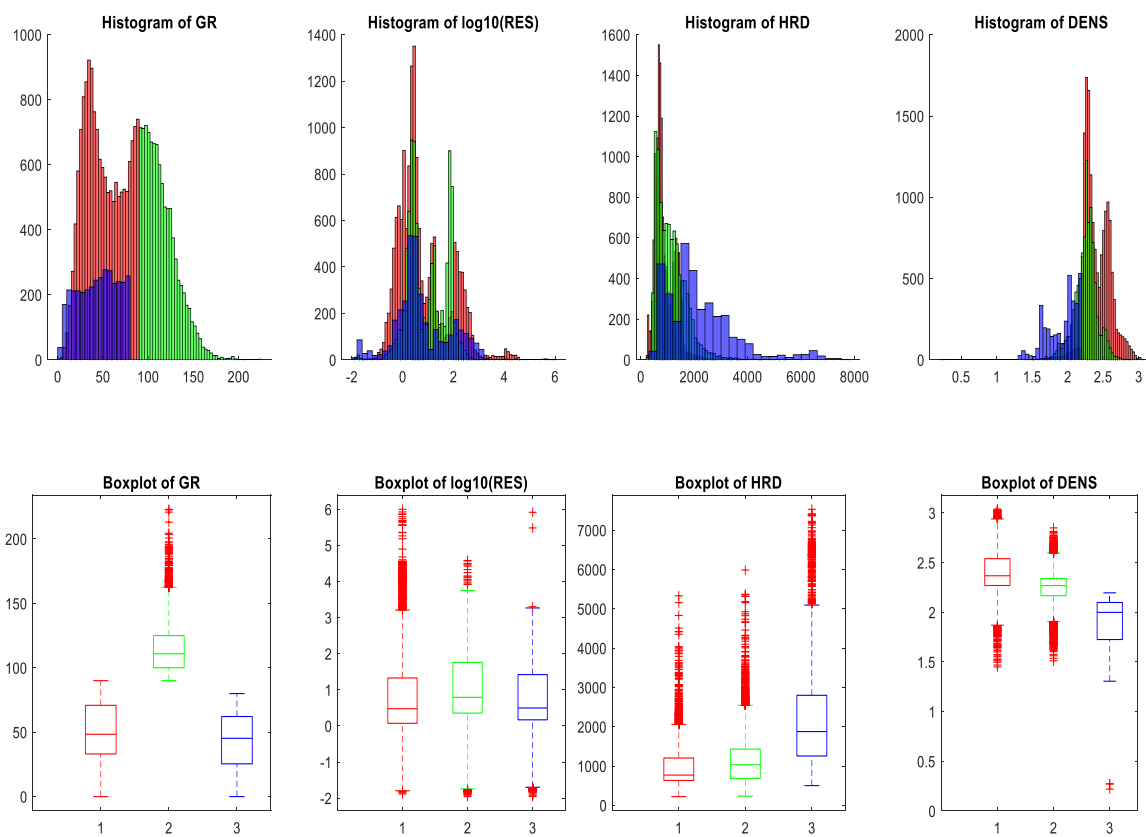


Рисунок 1. Общий анализ набора данных

Эти графики представляют собой визуальное отображение характеристик распределения набора данных. Горизонтальная ось (ось X) иллюстрирует диапазон значений параметров бурения, тогда как вертикальная ось (ось Y) описывает частоту данных в определенном интервале. На графике ось Y количественно характеризует число случаев вхождения в заданные диапазоны значений набора данных.

На основе выборочных данных из скважин GK288 и GK269, породы данного участка классифицируются на три основных литологических типа: песок (55%), глины (33%) и угольные пласты, которые занимают относительно небольшую долю (12%) по вертикальной глубине.

При этом было также установлено, что распределение одноименных слоев горных пород в двух скважинах является довольно сложным, поскольку слои горных пород имеют склонность перемежаться и характеризуются относительно небольшой мощностью. Таким образом, можно заключить, что, хотя эти скважины находятся в одном и том же горнодобывающем районе, интервалы глубин одноименных горных пород значительно разнятся, что затрудняет прогнозирование литологической колонки новой скважины без отбора образцов керна. Для повышения точности классификации

предлагается использовать методы машинного обучения для решения поставленной задачи прогнозирования литологических слоев для скважин GK288 и GK269 на угольной шахте X на основе значений вышеуказанных параметров каротажа. Данную задачу можно рассматривать как задачу классификации, которая является типовой задачей, эффективно решаемой с использованием методов машинного обучения с учителем. Для решения данной задачи авторы применили алгоритм KNN. Алгоритм k-ближайших соседей (KNN) представляет собой непараметрический классификатор с учителем, который использует близость для выполнения классификации или прогнозирования группировки по одному или большему количеству признаков, как показано на рисунке 2.

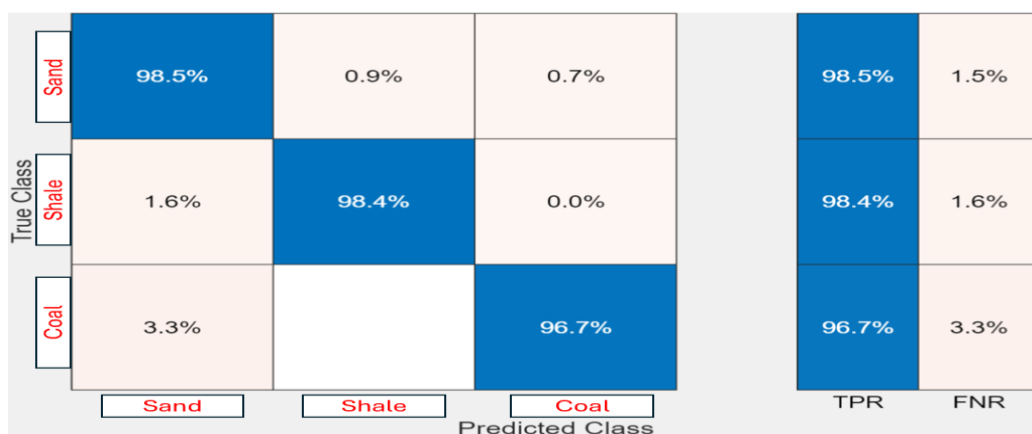


Рисунок 2. Результаты литологической классификации модели

На рисунке 2 показаны результаты прогнозирования и распределения литологических групп из набора данных параметров геофизического каротажа с использованием алгоритма KNN. Общая точность прогнозирования по сравнению с выборочными данными достигает 98,3%, а точность для каждой литологической группы составляет: песок (98,5%), глина (98,4%) и уголь (96,7%).

Выводы

На основании результатов проведенных экспериментальных работ можно сделать вывод о том, что применение алгоритмов машинного обучения для решения задачи идентификации и разделения угольных пластов с другими литологическими слоями по данным геофизического каротажа обеспечивает точные и многообещающие результаты. Этот подход требует усиленного внимания, инвестиций и дальнейших углубленных исследований.

Благодарности

Данное исследование поддержано Ханойским университетом горного дела и геологии по гранту номер T25-07.

Библиография

1. Binzhong Zhou, Graham O'Brien, 2016. Improving coal quality estimation through multiple geophysical log analysis. International Journal of Coal Geology, Volume 167, Pages 75-92, ISSN 0166-5162.
2. David A. Wood, Jianchao Cai, 2022. Chapter Nine - Coal-bed methane reservoir characterization using well-log data. Editor(s): David A. Wood, Jianchao Cai, In The Fundamentals and Sustainable Advances in Natural Gas Science and Eng, Sustainable Geoscience for Natural Gas Subsurface Systems, Gulf Professional Publishing, Volume 2, Pages 243-274, ISBN 9780323854658.
3. Gordon H. Wood, Jr., Thomas M. Kehn, M. Devereux Carter, and William C. Culbertson, 2016. Coal Resource Classification System of the U.S. Geological Survey. GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 891.
4. Miller, Marshall S., and Mackey Moore, 1980. "Geophysical Logging and Exploration Techniques in the Appalachian Coal Fields." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, September 1980. doi: <https://doi.org/10.2118/9466-MS>.

Влияние минералов на качество коллектора в миоценовых породах нефтяного месторождения Белый Тигр, Вьетнам

Ву Хонг Зыонг* (Ханойский горно-геологический университет,
vuhongduong@humg.edu.vn),

Некоз С.Ю. (МГРИ университет, *nekozsy@mgri.ru*),

Арсентьев Ю.А. (МГРИ университет, *arsentev1956@yandex.ru*),

Калиничев В.Н. (МГРИ университет, *kalinichevvn@mgri.ru*)

Аннотация

Прогнозирование уровня качества песчанниковых коллекторов играет ключевую роль в области оптимизации стратегии разведки и добычи углеводородов. Для решения поставленной задачи необходимо определить главные факторы, влияющие на развитие пористости породы в изучаемых интервалах. В данном сообщении приведены результаты применения рентгеновского дифракционного анализа (XRD) для изучения влияния глинистых минералов на качество коллектора в средне-миоценовых песчаниках месторождения Белый Тигр (Вьетнам). При этом установлено, что плотные песчаники, с их разнообразным составом глинистых минералов и размерами частиц, характеризуются чрезвычайно низкой пористостью и проницаемостью. Большинство пор и каналов пространства заполнены аутигенными глинистыми минералами, такими как иглообразный хлорит, пластинчатый каолинит, чешуйчатый и нитевидный иллит, с минимальным содержанием силикатного и карбонатного цемента. Выводы указывают на ключевую роль глинистых минералов в формировании свойств коллектора, включая распределение размеров и соединение поровых каналов по разным литофациям.

Ключевые слова

Минерал, нефтяное месторождение, рентгеновский дифракционный анализ, Белый Тигр месторождение

Теория

Песчанниковые коллекторы в месторождении Белый Тигр во Вьетнаме представляют собою основной источник добычи углеводородов. Прогнозирование степени качества песчанниковых коллекторов играет важную роль для разработки стратегических направлений на стадиях разведки и добычи углеводородов. Для реализации данной установки необходимо иметь представление о факторах, влияющих на развитие пористости и проницаемости песчаников в изучаемых слоях. Эти песчаники подвергались диагенетическим процессам во время захоронения, включая замещение минералов, цементацию и перекристаллизацию. Процессы диагенеза существенно влияют на качество коллектора, изменяя его пористость и проницаемость [1-4].

На газовое хранилище в плотных песчанниковых коллекторах влияет несколько факторов, включая характеристики структуры порового пространства, такие как литотип, морфология глинистых минералов, распределение размеров, пористость, проницаемость и концентрация глинистых минералов. В данном случае для изучения влияния глинистых минералов на уровень качества коллектора в средне-миоценовых песчаниках месторождения Белый Тигр (Вьетнам) использовался рентгеновский дифракционный анализ (XRD). Результаты анализа показывают, что исследуемые плотные песчаники, с их разнообразным составом глинистых минералов и размерами частиц, характеризуются чрезвычайно низкой пористостью и проницаемостью. Большинство пор и каналов пространства резервуара заполнены аутигенными глинистыми минералами, такими как иглообразный хлорит,

пластинчатый каолинит, чешуйчатый и нитевидный иллит, с минимальным содержанием силикатного и карбонатного цемента. Выводы указывают на ключевую роль глинистых минералов в формировании свойств коллектора, включая распределение размеров и соединение поровых каналов по разным литофациям.

Основные цели исследования:

1. Провести анализ данных XRD и интеграцию данных, полученных из геофизических замеров и записей образцов керна.

2. Установить взаимосвязь между проницаемостью и пористостью, изучив влияние диагенетических процессов и глинистых минералов на свойства коллектора средне-миоценовых песчаников нефтяного месторождения Белый Тигр, Вьетнам.

В исследовании используется база данных, включающая данные XRD и результаты анализа керна (RCA) из миоценовых отложений (Рисунок 1), собранных из трех скважин (А, В и С), а также геологическая документация месторождения Белый Тигр (Таблица 1).

Таблица 1. Сводные данные о кернах

Скважина А	Скважина В	Скважина С
23 образца	27 образцов	28 образцов
Пористость (3% – 11%)	Пористость (1% – 13%)	Пористость (0% – 7%)
Проницаемость (0 – 28 мД)	Проницаемость (0 – 21 мД)	Проницаемость (0 – 6 мД)

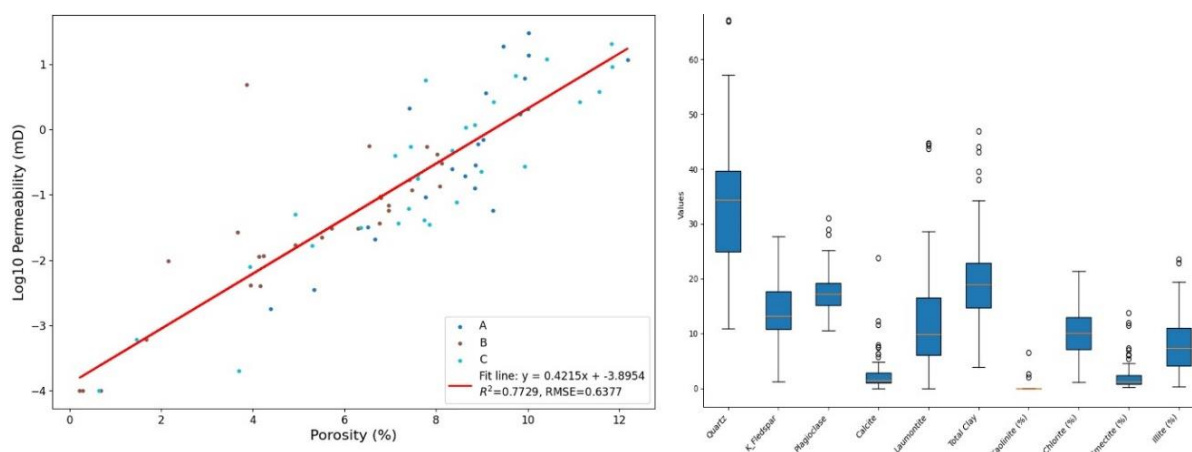


Рисунок 1. Анализ данных XRD и RCA

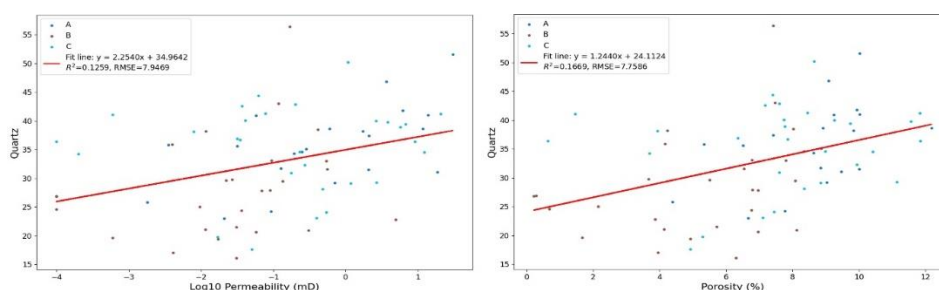


Рисунок 2. Корреляции содержания кварца с пористостью и проницаемостью в образцах керна

Наличие кварца напрямую не способствует увеличению пористости (Рисунок 2), однако его наличие играет важную роль в поддержании структурной целостности порового

пространства. Породы с высоким содержанием кварца лучше сохраняют пористость под давлением по сравнению с породами, содержащими более легко деформируемые минералы.

Кварц повышает проницаемость породы, способствуя образованию хорошо связанных сетей пор, что улучшает поток жидкости.

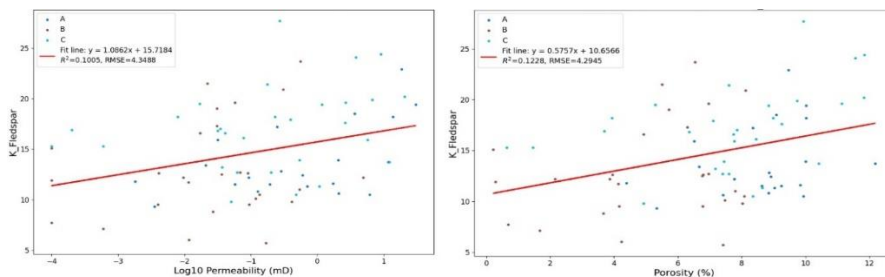


Рисунок 3. Корреляции содержания калиевого полевого шпата с пористостью и проницаемостью в образцах керна

Растворение калиевого полевого шпата играет ключевую роль в увеличении пористости и проницаемости песчаниковых коллекторов. Этот процесс приводит к образованию травленных ямок на поверхности калиевого шпата, что способствует увеличению общей пористости (Рисунок 3).

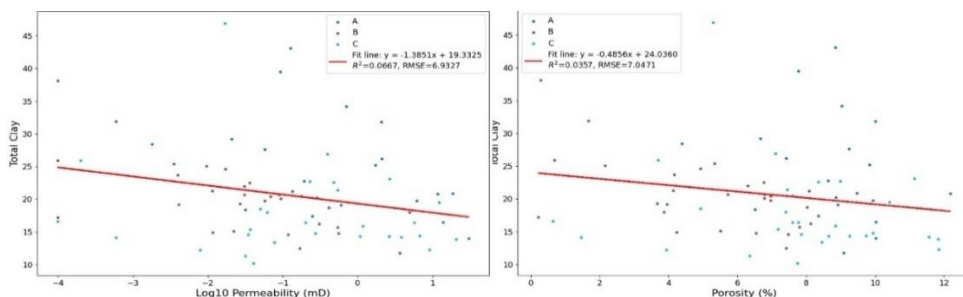


Рисунок 4. Диаграмма зависимости общего содержания глинистых минералов от пористости и проницаемости в образцах керна

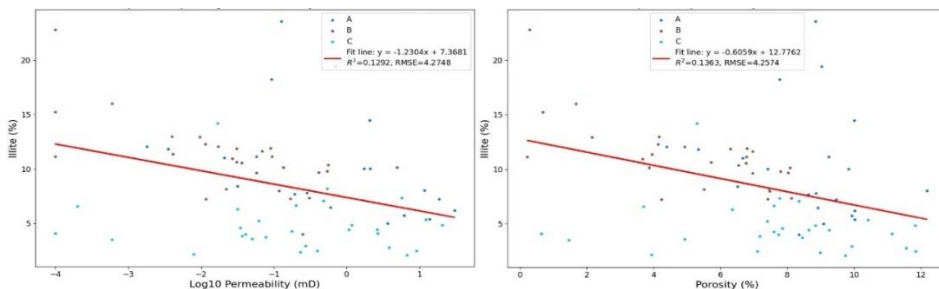


Рисунок 5. Взаимосвязь содержания отдельных глинистых минералов (иллит) с пористостью и проницаемостью

Влияние содержания глины на качество коллектора (Рисунки 4, 5):

- высокое содержание глинистых минералов может значительно уменьшить как пористость, так и проницаемость. Глинистые минералы заполняют поровое пространство и блокируют пути течения жидкости, ограничивая поток нефти и газа.

- определенные глинистые минералы могут набухать при контакте с водой, что дополнительно снижать проницаемость.

Выводы

1. Плотные песчаники характеризуются очень низкой пористостью и проницаемостью при изменчивом составе кварца, калиевого полевого шпата и глинистых минералов.

2. Большинство поровых каналов межскважинного пространства заполнены аутигенными глинистыми минералами, включая нитевидный иллит и иглообразный хлорит, на долю которых приходится более 80% объема коллектора.

3. Диагенетические и глинистые минералы существенно влияют на пористость и проницаемость коллектора.

4. Для повышения точности и надежности данного метода следует учитывать геологические данные наряду с анализом XRD и интерпретацией сведений геофизического каротажа.

Библиография

1. Bjørlykke, K. “Clay Mineral Diagenesis in Sedimentary Basins — a Key to the Prediction of Rock Properties. Examples from the North Sea Basin.” *Clay Minerals* 33, no. 1 (1998): 15–34. <https://doi.org/10.1180/000985598545390>.

2. Makeen, Y. M., Abdullah, W. H., Ayinla, H. A., Hakimi, M. H. & Sia, S. G. Sedimentology, diagenesis and reservoir quality of the upper Abu Gabra Formation sandstones in the Fula Sub-basin, Muglad Basin, Sudan. *Mar. Pet. Geol.* **77**, 1227–1242 (2016).

3. Haile, B.G., Klausen T.G., Czarniecka U., Jahren K. Xi, J., Hellevang H. How are diagenesis and reservoir quality linked to depositional facies? A deltaic succession, Edgeøya, Svalbard, *Marine and Petroleum Geology*, Volume 92, 2018, Pages 519-546, ISSN 0264-8172,

4. Scott, SW & Driesner, T 2018, 'Permeability Changes Resulting from Quartz Precipitation and Dissolution around Upper Crustal Intrusions', *Geofluids*, vol. 2018, 6957306. <https://doi.org/10.1155/2018/6957306>.

Разработка технологии биовыщелачивания пиритового огарка

Даниленко И.С. (ФГБОУ ВО «ВГУ», danilenkos766@gmail.com),
Логачёв В.В. (ФГБОУ ВО «ВГУ»)*

Аннотация

Было проведено исследование гранулометрии и минералогии пиритовых огарков вблизи г. Рошаль Московской области. Минералогические исследования проводились с использованием оптической микроскопии, рентгенофазового и рентгенофлюорисцентного анализов. Проведена попытка удаления серы из огарка методом биовыщелачивания с использованием бактерий «аборигенов».

Ключевые слова

Огарок, сера, рентгенофазовый анализ, биовыщелачивание

Теория

В качестве примера отвалов, которые можно было бы вторично использовать, могут служить пиритовые огарки на территории г. Рошаль, Московской области. Огарок – продукт отжига пирита для производства серной кислоты, они занимают площадь в несколько квадратных километров, через отвалы протекают ручьи, загрязняющие городскую экологию. Стоимость тонны этого материала в разы меньше аналогичных железных руд. Наличие технологии переработки этих отвалов позволило бы улучшить состояние окружающей среды и получить прибыль от увеличения стоимости продукта после извлечения загрязняющих элементов, мешающих переработке.

Исследованное вещество было проанализировано с помощью ситового анализа, размер частиц вещества колеблется от пелитовой до щебнистой с преобладанием мелкодисперсной фракции. Псамитовая часть составляет до 75% массы огарка, из которых только 45% принадлежат крупнозернистому песку и щебню. Магнитная фракция составляет до 96% от общей массы, разделение проводилось на магните «Геологоразведка» с мощностью тока в 320 Вт. Необычным фактом для гематита с примесью кварца до 16% и отсутствием фазы магнетита обладает магнитными свойствами. Однако, при детальном рассмотрении можно предположить, что гематит под воздействием высокой температуры (при производстве серной кислоты до 800 градусов) мог частично восстановиться до магнетита с значительным усилением магнитных свойств [1], этому так же способствует пелитовый размер частиц гематита так как при уменьшении размерности увеличивается магнитная восприимчивость. Минералогический анализ был проведён с помощью аншлифа, изготовленного из двухкомпонентной пластмассы (протакрила) в смеси с измельчённой на щековой дробилке и дисковом истираете пробы. Визуальный анализ проводимся на микроскопе Полам 312-р в косом освещении, приближённая количественная оценка минерального состава: кварц-20%, гематит-78%, 2%-магнетит.

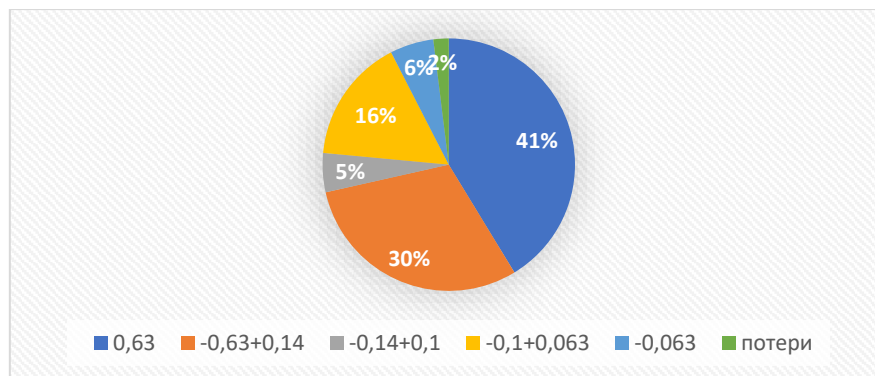


Рисунок 1. Гранулометрический анализ пиритового огарка

Рентгенофазовый анализ

Сначала был проведен качественный анализ: с помощью специальной программы – компаративиста, позволяющей сопоставить экспериментальную съёмку и свободную базу профилей отражений известных минералов, в образце были найдены 4 фазы [4].

Далее для объемного количественного анализа был применён метод расчета итоговых концентраций фаз в образце посредством уточнения соответствия расчетной картины эксперименту – метод Хуго Ритвельда, или метод наименьших квадратов. Расчет был выполнен с помощью свободного программного обеспечения, его результаты также представлены в табл. 1.

Таблица 1. Качественный и количественный состав пиритового огарка (Количество вес. % подсчитано полуколичественным методом)

№ пункта	Наименование минерала	Химическая формула	№ карточки профиля в базе COD (Crystallography Open Database)	Количество, вес. %	Δ, вес. %
1	Гематит	Fe ₂ O ₃	96-901-5066	33,15	0,00
2	Кварц	SiO ₂	96-210-0189	18,19	0,32
3	Магнетит	FeFe ₂ O ₄	96-900-9684	10	
4	Сера	S ₁₈	96-901-2334	25,50	1,29

Также можно отметить точность модели: считается, что уточнение по Ритвельду состоялось, если параметр соответствия модели эксперименту – GOF (Goodness of fit – Rwp (параметр модели / Rexp (параметр эксперимента)) – составляет < 2 (чем точнее модель, тем ближе этот параметр к единице). В нашем случае GOF равен 1.13 (см. его расчет ниже):

$$\begin{aligned} R_{wp} (\%) &= 1.4776943 \\ R_{exp} (\%) &= 1.3020874 \\ GOF &= 1.13 \end{aligned}$$

Возможному использованию пиритовых огарков мешает избыточное количество серы в составе. По данным рентгенофлюорисцентного анализа (РФА) (таблица 2), выполненного на волновом спектрометре S8 Tiger в исходном материале содержание серы составляет 3,14%. Так как данные модели по рентгенофазовому анализу являются приближенно-количественными приоритетными считаются результаты РФА. В случае уменьшения

концентрации S до 0,1% вещество можно использовать как высококачественный железный сурик марки «К» согласно ГОСТ 8135-74. В случае полной отчистки от серы огарок мог бы стать потенциальном сырьём для извлечения ценных компонентов [3].

Таблица 2. Химический состав пробы по данным РФА до и после эксперимента. Данные приведены к 100%

Имя образца	Na (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	S (%)	K (%)	Ca (%)	Ti (%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn (%)	Ba (%)
Огарок после	0,305	0,168	3,368	13,2	2,65	0,84	0,25	0,17	77,3	0,55	0,243	0,552
Огарок до	0,363	0,202	3,568	13,2	3,14	0,88	0,25	0,18	76,4	0,72	0,27	0,585

Возможным способом очищения огарка от серы может служить биовыщелачивание [2]. Суть методики для данного материала состоит в попытке создания условий для развития сульфатредуцирующих бактерий с целью окисления самородной серы до серной кислоты с промежуточными стадиями в виде SO_2 и SO_3 [2]. В процессе своей жизнедеятельности бактерии используют энергию, образующуюся в результате окисления сульфидной и самородной серы, встречаются в рудничных водах многих сульфидных месторождений.

Для семейства сульфатредуцирующих бактерий характерно существование в анаэробной среде, однако наличие большого количества кислорода необходимо для окисления серы, низкие значения $pH = 3-3,5$ и $t = 25-30$, а также низкое соотношение Fe^{+3}/Fe^{+2} . Для поддержания комфортных условий жизнедеятельности и увеличения численности бактерий, существующих в первичной породе, условно названных аборигенами, было проведено испытание проб в эрлифтногм перколяторе.

Эксперимент проводился 14 дней, использовался не обработанный материал пиритового огарка в соотношении твёрдой фазы к жидкой 1:10 и поддержании необходимых для бактерий условий жизнедеятельности с регулярными замерами показателей температуры pH и Eh , главным показателем был признан pH как показатель развития сульфатредуцирующих бактерий. В ходе опыта водородный показатель опускался (увеличивалось количество бактерий, подкисляющих среду), однако не значительно по сравнению с аналогичным процессом, проходившими в сульфидных рудах (рис.3).

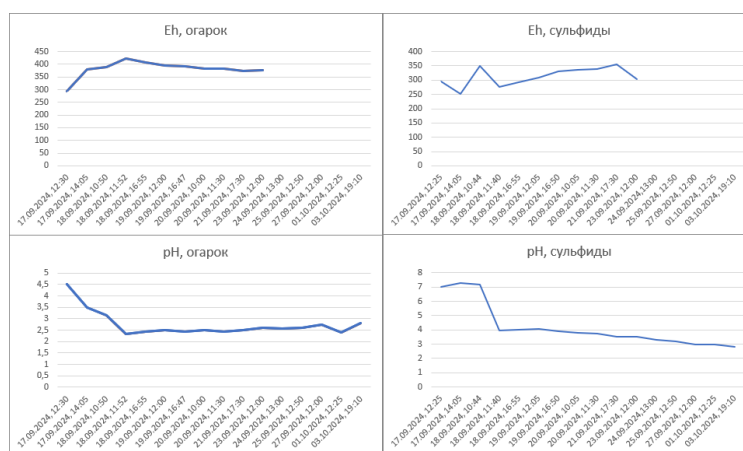


Рисунок 2. Графики (pH , Eh) построенные по ходу эксперимента в перколяторах для огарка и сульфидов

Выводы

Было проведено испытание по созданию условий для использования тионовых бактерий, присутствующих в первичной пробе, для выведения из состава пиритового огарка самородной серы, мешающей вторичному использованию этого материала в промышленности. Данный метод помог незначительно снизить количество серы в исходной пробе на 0,5% и количество железа 1% что происходило, вероятно, из-за перехода железа в раствор. По ходу эксперимента (рис. 3) pH стабилизировался и перестал падать за счёт, скорее всего, снижения активности бактерий, причиной может служить отсутствие легко окисляемых соединений двухвалентного железа, энергия разрушения которых так же необходима бактериям, а также проведение опыта в пластиковой таре что сильно влияет на количество бактерий в растворах так как частицы микропластика препятствуют их жизнедеятельности.

Для продолжения исследования и для достижения полного вывода серы из состава необходимо выведение бактерий, устойчивых к повышенной концентрации оксидов трёхвалентного железа, проведение испытаний в стеклянной посуде.

Библиография

1. П.С. Минюк и др. // Термокаппаметрия природных сульфидов железа северо-востока России // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 4, с. 601—614
2. Г.Н. Каравайко и др. // Биотехнология металлов. Практическое руководство.
3. Патент № RU 2 740 930. Способ переработки пиритных огарков.
4. Dr. Holger Putz // Match! – Phase Analysis using Powder Diffraction – Version 3 // Crystal Impact, Bonn, Germany.

Оценка влияния фиброволокна на повышение прочности грунтобетона на разных этапах твердения грунтобетонной смеси

**Демешкан В.Ю. * (МГРИ, vadim@demishkan.ru),
Иляхин С.В. (МГРИ, isv11@mail.ru)**

Аннотация

В статье рассматриваются результаты лабораторных экспериментов по оценки влияния добавления различных видов фиброволокна в кубические образцы грунтобетона на график их набора прочности. Представлено описание теоретических основ испытаний с использованием склерометра и выводы о влиянии фиброволокна на повышение прочности грунтобетона на различных стадиях твердения.

Ключевые слова

Грунтобетон, фиброволокна, образцы грунтобетона, молоток Шмидта, склерометр

Теория

Технология струйной цементации — это метод создания свай из грунтобетона с помощью размыва грунта водой или цементным раствором и их дальнейшее перемешивание. Однако, не смотря на широкое применение данной технологии, при её использовании требуется решать проблемы, такие как повышение трещиностойкости и прочности на растяжение [1].

В строительстве, одним из способов повышения трещиностойкости и прочности на растяжение является добавления в состав фиброволокна, однако на данный момент использование фиброволокна при технологии струйной цементации слабо изучено.

Фибра предназначена, в первую очередь, для увеличения прочностных характеристик различных материалов (бетонов, асфальтов, пластиков, лакокрасочных веществ, мастик и т.п.) и применяется в качестве армирующей добавки [5].

На данный момент в строительстве применяют стальную, базальтовую, полипропиленовую, стеклянную и углеродные фибры (Таблица 1).

Таблица 1 – Основные характеристики различных видов фибр [2]

Показатель / Вид фибры	Стальная	Стеклянная	Полимерная	Базальтовая	Углеродная
Плотность материала, кг/м ³	7700-7900	2500-2600	900-1190	2600-3100	1700-2000
Диаметр волокна, мкм	200-1200	5-35	10-500	7-400	3-15
Длина волокна, мм	15-60	6-25	3-50	3-72	2-50
Прочность на растяжение, МПа	800-3150	1000-3900	4000-8400	1600-3600	2000
Модуль упругости, ГПа	190-210	70-80	1.4-8.4	80-110	245

Удлинение при разрыве, %	3-4	1.5-3.5	10-45	1.4-3.6	1
Температура плавления, С°	1300-1500	425-600	115-260	1200-1300	3550
Стойкость в среде гидратации цемента	Низкая у обычной стали, высокая - у оцинкованной	Низкая у обычного стекла, высокая - у щелочного	Высокая	Высокая при диаметре волокон не менее 0.1мм	Высокая

С целью изучения влияния фиброволокн на прочность грунтобетона были проведены испытания на основе метода неразрушающего контроля прочности с помощью склерометра (молотка Шмидта) кубических образцов грунтобетона на нескольких этапах их твердения.

Молоток Шмидта основан на измерении величины отскока бойка после его удара о поверхность бетона [3]. Основные элементы устройства:

- Ударный боек;
- Пружина для приведения бойка в движение;
- Шкала для отображения величины отскока.

Отскок бойка пропорционален упругости материала, а, следовательно, и прочности бетона.

Процедура проведения испытаний, согласно работе [3], выглядит следующим образом:

- Подготовка поверхности: перед измерением бетонная поверхность очищается от грязи и неровностей.
- Расположение молотка: прибор устанавливается строго перпендикулярно к поверхности бетона.
- Проведение испытания: пружина молотка натягивается, после чего боек освобождается для удара. Результат отскока фиксируется на шкале.
- Среднее значение: измерения проводятся в нескольких точках, после чего вычисляется среднее значение.

При проведении испытаний использовался один тип грунта — суглинок, взятый из природных условий и 3 типа фибры: базальтовая, полипропиленовая, углеродная, с длиной волокна, равной 6мм.

Подготовка образцов производилась с использованием кубических форм специальных форм согласно актуальному ГОСТ 22685-89 с использованием дополнительных смазочных материалов для сохранения геометрии как при твердении, так и при извлечении образцов, согласно существующим практикам в промышленности. [4] Всего было подготовлено 24 образца.

Замеры прочности проводились на 3, 7, 14, 21, 28 дни после отливки с использованием молотка Шмидта модели L (Рисунок 1)



Рисунок 1. Электронный молоток Шмидта: тип SILVER SCHMIDT

По результатам проведённых замеров, можно сделать вывод о том, что, не смотря на схожесть значений результатов замеров всех образцов на 3 день после заливки, в последующие дни замера наблюдалась линейная разница в значениях результатов замеров, так при использовании базальтовой и полипропиленовой фибры замеры показали повышение прочности в 1,4 раза выше, чем в образцах без добавления фиброволкн, для углеродной фибры это значение ещё выше – прочность в 2,2 раза выше, чем в образцах без фибры.

Выводы

В результате проведённой работы можно сделать следующие выводы:

- Применение фиброволкн при армировании бетона повышает его трещиностойкости и прочность на растяжение при этом, исследования по влиянию различных типов фибр в научном сообществе на данный момент не представлены.
- Применение склерометра (молотка Шмидта типа SILVER SCHMIDT) позволило объективно оценить динамику набора прочности грунтобетона на всех этапах твердения, сохранив целостность образцов. Стандартизация подготовки кубических форм (согласно ГОСТ 22685-89) и использование единого типа грунта (суглинок) обеспечили воспроизводимость эксперимента, минимизировав внешние погрешности. Такой подход не только подтвердил эффективность фиброволокон, но и установил методическую базу для будущих исследований, где точность измерений и унификация условий остаются критически важными.
- Испытания проводились с использованием 1 типа грунта и 3 типов фибры, в результате были получены графики набора прочности, согласно которым при использовании базальтовой и углеродной фибры прочность грунтобетона повышалась на 1,4 раза, а при использовании углеродной фибры – в 2,2 раза.

Библиография

1. А. Г. Малинин Струйная цементация грунтов. – 3-е изд. – М.: Стройиздат, 2010. – 226. с.
2. Фибра для бетона – виды и как выбрать // Грунтовозов URL: <https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemye-voprosy/vidy-betona/vidy-betona-po-tipu-zapolnitelya/fibrobeton-dispersno-armirovannyj-beton/fibra-dlya-betona/> (дата обращения: 12.02.2024).
3. О. Болотских. Европейские методы физико-механических испытаний – Харьков: Харьковская национальная академия городского хозяйства, 2010. — 164 с.
4. Как правильно изготовить образцы-кубы в полевых условиях // СтройЭкспертЭкология URL: <https://stroy-ekspert-ekologiya.ru/nash-vzglyad/98-kak-pravilno-izgotovit-obraztsy-kuby> Электронный ресурс (дата обращения 25.02.2024)
5. Anas M. et al. Fiber reinforced concrete: a review //Engineering Proceedings. – 2022. – Т. 22. – №. 1. – С. 3.

К вопросу повышения эффективности закладочных работ на горных предприятиях

***Долгополов М.А.* (МГРИ, dolgoplov.00@list.ru),
Брюховецкий О.С. (МГРИ, bryhovetskyos@mgri.ru)***

Аннотация

В последние годы наметилась тенденция значительного повышения удельного веса систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Это связано в первую очередь с необходимостью увеличения полноты извлечения полезного ископаемого из недр, а также снижения разубоживания его пустыми породами. Сравнительно высокая стоимость очистных работ при системах с закладкой компенсируется полнотой выемки полезного ископаемого, снижением разубоживания, а также возможностью селективной выемки руд. [1, 5, 8].

Полученные хорошие результаты привели к распространению данного способа на ряде медных и никелевых рудниках как в России, так и за рубежом (Канада, США, Финляндия, Швеция, Польша, Австралия, Австрия и др.)

В горнорудной промышленности, в связи с сокращением запасов богатых руд и перемещением горных работ на большие глубины, доля систем разработки с закладкой выработанного пространства в общем объеме добычи руд цветных металлов значительно выросла. Следует отметить еще одну тенденцию в совершенствовании закладочных работ. Ранее применявшаяся «сухая» породная закладка характеризовалась большой затратой ручного труда, значительной стоимостью работ, большой усадкой заложеного массива и широкого распространения не получила. Но затем, в связи с увеличением выпуска цемента и возможностью применения в качестве вяжущего компонента молотых гранулированных шлаков, все большее применение стала находить упрочняющаяся закладка (бетонная и твердеющая). Приготовленная на поверхности на специализированных закладочных установках, упрочняющаяся закладка доставляется до места укладки с помощью высокопроизводительного трубопровода гидротранспорта, легко поддающегося автоматизации, и затвердевая, образует прочный массив [2, 3, 7].

Наибольшее распространение в качестве закладочного материала получили отходы обогащения – хвосты прошлых лет (отвальные) и текущей переработки руд.

Ключевые слова

Эффективность работы закладочных комплексов, отходы (хвосты) обогащения, закладочная смесь, водосодержание смеси, активация вяжущего компонента

Теория

По своим физико-механическим, зерновым, химическим характеристикам хвосты в большинстве случаев не соответствуют требованиям к материалам для бетонов и растворов, что вызывает необходимость повышенного расхода вяжущего компонента. Тем не менее экономическая эффективность использования для закладки хвостов обогащения неоднократно отмечается в работах последних лет.

Мнения специалистов о влиянии тонкозернистых частиц в составе хвостов на прочность закладки неодинаковы. Используемые для закладки хвосты обычно подвергаются предварительной переработке. При возведении гидрозакладочного массива стремятся к скорейшему его обезвоживанию, поэтому при подготовке хвостов к закладке оптимизируют их гранулометрический состав. Считают, что массовая доля в них частиц размером менее 74 мкм должна быть не более 25 – 45%, а скорость фильтрации – не менее 100 – 150 мм/ч [5].

Перед приготовлением твердеющей закладки хвосты часто обесшламмливают по граничному классу 74 мкм для улучшения водоотделения и устранения негативного воздействия тонких частиц на процесс образования цементного камня [4].

На рудниках, использующих обесшламленные хвосты, нередко наблюдается дефицит заполнителя. Причиной является: с одной стороны, резкое увеличение объемов закладки, а с другой – повышение крупности помола руд на обогатительных фабриках. В связи с этим возникает необходимость более полного использования и тонкозернистой части хвостов.

В исследованиях [6] показано, что при традиционных методах приготовления и транспорта закладочной смеси, оптимальной по прочностным показателям закладки, является добавка к обесшламленным хвостам 10 – 20% (по массе) тонкого материала (при массовой доли класса – 20 мкм до 75 %).

Исследования показывают, что наилучших результатов при использовании необесшламленных хвостов для закладки добиваются применением специальных технологических приемов, обеспечивающих равномерное распределение вяжущего компонента в объеме заполнителя при минимальном содержании воды и получении изотропного массива [4,5] (Рисунок 1.).

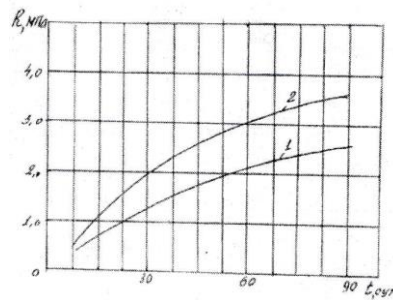


Рисунок 1. Динамика набора прочностизакладки: обычной (1) и высокой (тиксотропной) плотности (2)

Приготовление смеси может осуществляться на поверхности или в подземных условиях, циклично или непрерывно, на стационарных или передвижных установках. В настоящее время наиболее распространены стационарные закладочные установки, расположенные на поверхности и оборудованные смесительными устройствами непрерывного действия.

Подготовку текущих хвостов для обогащения и закладки – обезвоживание и классификацию – производят в гидроциклонах в одну или две стадии: в последнем случае первую стадию гидроциклонирования выполняют на фабрике, а вторую – на закладочной установке. Массовая доля твердого компонента в песках гидроциклонов на первой и второй стадиях составляет соответственно 35 – 38% и 70 – 73%.

В зарубежной практике имеются примеры использования для обезвоживания хвостов сгустителей и центрифуг. Основной недостаток этих схем: большие потери материала (до 50 %) при гидроциклонировании и недостаточно высокая степень обезвоживания. Последнее обуславливает наличие в смеси избыточной воды (общий расход-до 500 л. на 1 м³ закладки).

Значимая операция в технологии приготовления смеси – перемешивание компонентов. На большинстве рудников для этой цели применяют смесители, предназначенные для приготовления жестких строительных бетонов: например, двухвальный лопастной, барабанный и др.

Общим недостатком большинства применяемых смесителей является неудовлетворительное перемешивание компонентов, в результате чего не обеспечивается

получение однородной смеси. Наиболее ярко это проявляется при приготовлении смесей на мелком заполнителе с содержанием тонкозернистых фракций. В этом случае добиться равномерного распределения тонких частиц заполнителя и цемента в смесителях крайне трудно в связи с процессами коагуляции, протекающими при взаимодействии твердых компонентов с водой. Образующиеся при этом агрегаты не поддаются дезинтегрированию в процессе перемешивания и входят в структуру искусственного массива в виде ослабляющих его включений. Такие смеси не обладают достаточной подвижностью, необходимой для самотечного транспортирования по трубопроводу. На практике для получения смеси необходимой пластичности в нее добавляют воду, что приводит к ослаблению прочности массива. Очевидно, что образование смеси необходимого качества в таких установках практически нереально и это в большей степени обусловлено их конструктивными недостатками.

Применяемые в настоящее время способы и устройства для активации цемента с целью более полного использования его вяжущих свойств, обладают, как правило, избирательным воздействием на закладку, то есть способствуют улучшению определенных ее свойств. Анализ данных практики показывает, что наиболее эффективны такие способы активации, которые способствуют улучшению перемешивания компонентов или хорошо сочетающиеся с процессом смесеобразования. Очевидно, например, что малые добавки ПАВ, или обработанная в электромагнитном поле вода, дадут наибольший эффект при равномерном распределении всех компонентов в объеме гидросмеси.

Целью закладочных работ является получение монолитного однородного массива, обладающего необходимыми структурно-механическими характеристиками. Существуют различные способы возведения искусственных массивов в выработанном пространстве. Наибольшее распространение получила технология, при которой в выработанное пространство подается готовая закладочная смесь.

При этом обеспечивается высокая производительность и непрерывность закладочных работ, максимальная дозакладка пустот, а также возможность прогнозирования характеристик, закладочного массива.

Во многих работах, посвященных исследованию технологии возведения искусственного массива, отмечается неоднородность его свойств [5, 8 и др.]. Непостоянство свойств наблюдается и в пределах каждого слоя в зависимости от расстояния до пункта подачи смеси. Наличие горизонтальной слоистости объясняют, как правило, перерывами в подаче смеси, а различия в прочности в пределах слоя – неодинаковым расположением участков массива по отношению к закладочному трубопроводу. Основной причиной неоднородности искусственного массива является избыточная вода в смеси. С течением времени часть воды отстаивается на поверхности закладки. Избыточная вода накапливается слоем 3 – 4 м, и при этом значительно ухудшаются условия формирования вышележащих слоев закладки, их прочностные свойства.

Негативное влияние повышенного водосодержания смеси и неоднородность закладки сказывается на деформационных свойствах искусственного массива [3], обуславливает значительную первичную усадку и пористость закладки, которые в свою очередь приводят к увеличению коэффициента компрессии сверх нормы, определяющей допустимые смещения налегающих пород.

Выводы

Итак, к числу основных проблем, возникающих при ведении закладочных работ, относится проблема избыточного количества воды, подаваемой в шахту в составе закладочной смеси с целью повышения текучести смеси и предотвращения закупорки в трубопроводе, по

которому смесь транспортируется к выработанному пространству. На практике это количество в 2 – 3 раза превышает расчетное значение.

Наличие избытка воды в заложенной выработке приводит к значительному увеличению сроков схватывания и твердения искусственного массива, что увеличивает затраты на создание и поддержание необходимых объемов вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов. Избыток воды имеет следствием вынос мелких частиц инертного заполнителя и вяжущего компонента через перемычки, тем самым исключается их участие в формировании закладочного массива. В выработки откаточного горизонта выносятся до 12 % закладочного материала от общего его количества, поданного в выработанное пространство. Обводнению и как следствие, заиливанию, подвергаются откаточные штреки, квершлаг и водосборники откаточного горизонта. При высокой стоимости закладочного материала, чистка шлама на откаточных выработках и в водосборниках, а также отрицательное влияние обводненности выработок на состояние путевого хозяйства и крепи приносит рудникам значительный экономический ущерб.

Библиография

1. Атманский С.А. и др. Шламы глиноземного производства как сырье для закладочных смесей. – В кн.: Труды института УНИПРОМедь, вып. XIX. Свердловск, 1976, с. 54 – 57.
2. Байконуров О.А. и др. Подземная разработка месторождений с закладкой. Алмата. «Наука», 1972, 382 с. Бронников Д.М., Замесов Н.Ф. и др.
3. Основы технологии подземной разработки рудных месторождений с закладкой. – Москва, «Наука», 1973, 200 с.
4. Коган Е.И. Исследование и разработка технологии закладки на основе тиксотропных смесей (на примере рудника «Глубокий» комбината «Ачполиметалл». Автореферат канд. Дисс., 1978.
5. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей. М. Машиностроение, 1989.-265 с.
6. Соколов Г.В. и др. Использование тонкой фракции песков обогащения для закладки на Лениногорском комбинате. Бюлл. Цветная металлургия, 1974, №19 с. 29 – 31.
7. Цыгалов М.Н., Зурков П.Э. Разработка месторождений полезных ископаемых с монолитной закладкой. Москва, «Недра», 1970, 175 с.
8. Брюховецкий О.С. Рудничный напорный гидравлический транспорт горной массы. СПб. Издательство «Лань», 2018.-196 с.

Рациональный способ приготовления твердеющей закладочной смеси на основе хвостов обогащения при подземной разработке месторождений

***Долгополов М.А.* (МГРИ, dolgopolov.00@list.ru),
Брюховецкий О.С. (МГРИ, bryhovetskyos@mgri.ru),
Найденко И.Ю. (МГРИ)***

Аннотация

Получение закладки, обладающей высокими прочностными и упругими характеристиками при наиболее полном использовании активности вяжущего компонента, возможно при использовании тиксотропных закладочных смесей [9]. Такие смеси обладают необходимой для трубопроводного транспортирования подвижностью при снижении расхода воды до соотношения Т:Ж = 80:20. Расход вяжущего компонента при этом уменьшается на 20 – 22%.

Особенностью технологии приготовления тиксотропных смесей является применение тонкоизмельченного инертного заполнителя, что позволяет использовать для закладки пустот всю массу хвостов обогащения, считавшихся ранее не пригодными и накапливающихся в отвалах и хвостохранилищах.

Новая технология закладочных работ была создана и успешно применялась на Ачисайском ПМК [2].

Научной основой этой технологии послужило новое понимание процессов взаимодействия частиц тонкомолотого заполнителя, вяжущего компонента и воды с точки зрения физико-химической механики дисперсных систем.[4].

Известно, что содержание в закладочной смеси большого объема шламовых частиц при традиционной технологии ее приготовления и транспортирования с относительно большим количеством воды обуславливает резкое снижение прочности даже при повышенном расходе вяжущего компонента, так как шламовые частицы наполнителя, обволакивая агрегатные зерна вяжущего компонента, коагулируют, образуя комки. Кроме того, при транспортировании и укладке происходит старение и расслаивание смеси. Эти факторы в основном и являются причиной резкого ослабления плотности искусственного массива [1, 8].

Ключевые слова

Тиксотропные смеси, подземная разработка, технологии закладочной смеси

Теория

При создании тиксотропной технологии закладочная смесь была впервые рассмотрена как структурированная тиксотропная система. Использование технологии механического воздействия (взвешивания, вибрирования и т.д.) на систему приводит ее в состояние золь. При этом огромное количество частиц закладочной смеси приходит а интенсивное броуновское движение и вместо традиционного механического перемещения инертного материала с цементом происходит физико-химическое распределение частиц вяжущего компонента в закладочной смеси, подобно ионам соли в растворе. Кроме того, при соударении частиц цемента с их поверхности удаляются продукты диспергирования и перекристаллизации, обнажая при этом все новые поверхности для взаимодействия с водой, что способствует возникновению большого числа мелких кристаллов и, как следствие, образование кристаллической структуры искусственного массива и более полной гидратации цемента.

В качестве примера осуществления гомогенизации закладочной смеси, в результате которой тиксотропная смесь переходит в состояние золь, можно рассматривать работу

взвихривателя, в полости которого помещен диско-образный ротор с концентрично расположенными на нем обрабатывающими элементами (штифтами). На стенках корпуса имеются фигурные выступы-отражатели. Частота вращения ротора 1500 об/мин. При соударении частиц с штифтами ротора разрушаются сгустки компонентов смеси. Смесь движущаяся со скоростью более 25 м/с, центробежной силой отбрасывается на стенки корпуса. Встречая на своем пути отражатели, она интенсивно взвихривается и вновь попадает под удары штифтов. Такие механические воздействия на тиксотропную смесь превышают силу сцепления между водяными пленками и частицами, водяные пленки отрываются от частиц и смесь переходит в состояние золя [4]. В такой смеси происходит физико-механическое перемешивание компонентов, обеспечивающее ее высокую однородность и полное использование цемента.

Наряду с указанными преимуществами способа приготовления, транспорта и закладки выработанного пространства тиксотропными смесями, можно добавить, что предполагаемая к использованию дисперсная часть хвостов обогащения, то есть шламы, выполняет роль пластификатора, снижая напряжение сдвига, благоприятствуя сокращению износа трубопровода, а также может использоваться как добавка к вяжущему компоненту за счет эффекта раздвижки зерен. Этот эффект заключается в том, что после механического разукрупнения зерен цемента, а следовательно, увеличения активной поверхности цементного вещества, наличие шламовой фракции препятствует обратному их воссоединению.

Активация цемента, которая происходит при описанной обработке тиксотропной смеси во взвихривателе, позволит исключить еще один недостаток, связанный с тем, что значительная часть зерен цемента марки 400, который используется на большинстве рудников в твердеющей закладке в качестве вяжущего компонента (удельная поверхность 2500 – 2800 см²/г), имеет размеры больше 30 мкм. Это не позволяет полностью использовать их активность, так как такие зерна гидратируют только с поверхности, причем толщина слоя гидратации после 6 месяцев твердения не превышает 15 мкм [3].

Следует отметить, что в настоящее время созданы многочисленные конструкции активаторов. Кроме чисто механических разработаны гидродинамические с возможностью управления реологическими свойствами закладочной смеси путем изменения рабочей частоты вращения вихревой камеры активатора, испытаны и многоступенчатые конструкции активаторов, устанавливаемые на трубопроводе и создающие существенно больший напор в направлении движения закладочной смеси.

Подводя итог сказанному, можно отметить, что использование тиксотропных свойств закладочных смесей позволяет высвободить большое количество цемента, обеспечит изотропность закладочного массива и его высокие прочностные и компрессионные свойства, позволит применять смеси с более низким водо-вяжущим отношением при сохранении заданной подвижности.

Анализируя положительные опыты приготовления и использования тиксотропных закладочных смесей, тем не менее необходимо отметить следующее.

В созданной новой технологии ведения закладочных работ на основе тиксотропных смесей никакого места не отводится влиянию температуры на качество получаемой тиксотропной закладочной смеси, в то время как по законам физико-химической механики дисперсных систем температурные условия оказывают влияние на процесс гомогенизации, на тиксотропность и вязкость приготовления золя. Так, например, известно, что, во-первых после определенного значения температуры гели теряют тиксотропные свойства, во-вторых, существует определенное значение температуры, ниже которого условия для гомогенизации дисперсной системы для достижения пониженной вязкости – значительно ухудшаются. То есть необходимо рассмотреть вопрос о целесообразности тепловой обработки закладочной

смеси наряду с рекомендуемой механической и о возможной конструкции аппарата для одновременного механического и теплового воздействия на смесь [7]. (Рисунок 1.)

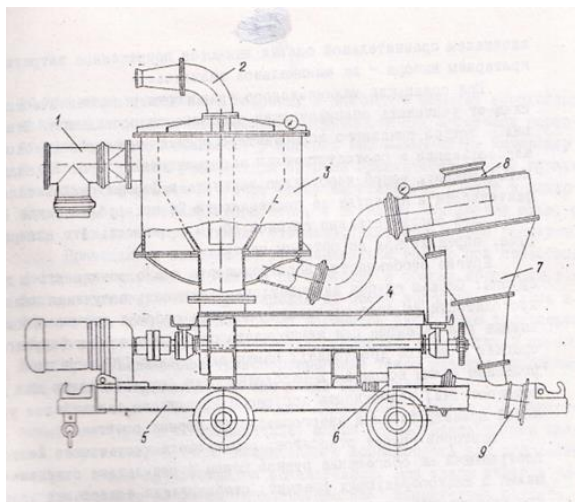


Рисунок 1. Передвижная закладочная установка ПЗУ-1. 1 – трубопровод для подачи гидросмеси инертного заполнителя; 2 – трубопровод для подачи раствора вяжущего компонента; 3 – цилиндрико-конический грохот (водоотделитель); 4 – лопастной гидродинамический смеситель; 5 – вагонетка; 6 – пневмо-инжектор; 7 – гидроциклон; 8 – сливная труба гидроциклона; 9 – трубопровод для подачи твердеющей закладки

Не получил должного изучения вопрос о рациональной продолжительности воздействия на смесь сил деформации. В то время, как по законам физико-химической механики дисперсных систем – параметры смеси в зависимости от длительности воздействия изменяются неравномерно, следовательно существует какая-то оптимальная продолжительность воздействия [7].

Не изучено поведение и соответствующие возможности инертных заполнителей закладочной смеси, приведенной в тиксотропное состояние. Ведь известно, что в условиях уплотнения даже практически инертные заполнители бетона, такие как песчаник и известняк, участвуют в образовании низкоосновных гидросиликатов или карбоалюминатов кальция, придающих бетону дополнительную прочность [6].

В существующей технологии закладки выработанного пространства тиксотропными смесями, расход воды составляет 400 – 450 литров на 1 м³ закладочной смеси, в то время, как для гидратации закладочного материала достаточно 200 – 300 литров на 1 м³ смеси. Таким образом, не исчерпана возможность сокращения расхода воды на приготовление смеси за счет использования воды, удерживаемой на поверхности частиц поверхностным натяжением и смачиваемостью вещества. Отделение водяных пленок от частиц, как известно, возможно при тиксотропном воздействии на смесь, превышающим силу сцепления между водяными пленками и частицами в результате которого смесь переходит в состояние золя. Указанное особенно важно, вследствие вредного влияния, как было выше отмечено, избытка воды на прочность закладочного массива, вынос цемента водой через перемычки, обводненность горных выработок [5].

Для расширения сферы внедрения новой технологии на предприятиях горной промышленности и, в частности на предприятиях КМА, необходимо изучить возможность получения закладочных смесей с крупным заполнителем, обладающих тиксотропными свойствами [9]. Смесь должна получиться текучей, с равномерным распределением крупного заполнителя по всему объему смеси. Получение такого качественного продукта требует

разработки более совершенных конструкций и технологий приготовления и транспортирования компонентов закладочной смеси.

Выводы

Главным недостатком разработанных на сегодняшний день активаторов-смесителей является несовершенство конструкций, недостаточная износостойкость рабочего органа, высокая энергоемкость процесса.

Устранение известных недостатков прогрессивной технологии закладочных работ на основе тиксотропных смесей и дальнейшее ее совершенствование обеспечит приготовление твердеющих смесей с улучшенными реологическими свойствами без увеличения расхода воды, возведение закладочных массивов с заданными свойствами и уменьшенными сроками твердения, снижение расхода цемента при сохранении прочностных характеристик, повышение интенсивности разработки месторождений.

Библиография

1. Байконуров О.А. и др. Технология добычи руд с твердеющей закладкой. Москва, «Недра» 1979, 151 с.
2. Балах Р.В. Разработка месторождений с закладкой хвостами обогащения. – Алма-ата. «Наука», 1977, 321
3. Бутт Ю.М. Журнал прикладной химии. 1949, т. 22, №3
4. Коган И.Ш. Разработка и внедрение технологии закладочных работ на основе тиксотропных смесей. Обзор., инф. Серия Горное дело, вып. Москва, Цветметинформация, 1982
5. Смолдырев А.Е. Технология и механизация закладочных работ. Москва, Недра, 1974. 328 с.
6. Студзинский С.А. Об использовании местных материалов и отходов производства для вяжущего в твердеющей закладке. Г.Ж. 1977, № 11, с. 50
7. Развитие и обработка тиксотропного поведения. Ritter R.A., Glover G.W. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1970, X, №5, p. 505 – 510.
8. Брюховецкий О.С. Рудничный напорный гидравлический транспорт горной массы. СПб. Издательство «Лань», 2018.-196 с.
9. Анушенков А.Н. Разработка комплексов приготовления и транспорта твердеющих смесей для закладки горных выработок. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2006. 170 с.

Краткий обзор скважинных гидрораскалывающих устройств и области их применения

Енютин В.И. (ФГБОУ ВО «МГРИ» (МГРИ, enyutinvi@mgri.ru))

Аннотация

В работе рассмотрены отдельные зарубежные и отечественные образцы гидрораскалывающих устройств для безвзрывного разрушения скальных массивов и монолитных бетонных объектов. Даны краткие характеристики конструктивных особенностей гидроклиньев, рабочих параметров и области их применения.

Информация может быть полезной для студентов горных специальностей и инженеров-практиков, занимающихся использованием экологически чистых технологий в горном деле и строительстве.

Ключевые слова

Гидроклин, направленные трещины, безвзрывное раскалывание скальных массивов, экологичность

Теория

На мировом рынке оборудования для безвзрывного разрушения скальных массивов и монолитных бетонных объектов наиболее известны гидроклинья немецкой компании **Darda GmbH** [4]. Аналогичные по конструкции гидроклинья, выпускаются также в Италии, Японии, Ю. Корее, КНР и некоторых других странах.

Рабочая часть гидроклина DARDA (Рис.1) представляет собой два подвижно соединенных с гидроцилиндром полуцилиндрических пуансона, между которых внедряется клин, жестко связанный со штоком гидроцилиндра. Пуансоны с клином помещаются в шпур и передают расклинивающее усилие на его стенки до образования в горной породе или бетоне направленной трещины. На схеме работы гидроклина (Рис.2) видно, что его гидропривод (гидроцилиндр) находится над шпуром, чем обусловлен большой вес всего устройства (18 – 32 кг, в зависимости от диаметра клиновой части и усилия). Из-за внешнего гидропривода рабочий орган гидроклина можно разместить только в устье шпура, но не на глубине, что несколько снижает эффективность работы оборудования по созданию направленного трещинообразования.



Рисунок 1. Гидроклин DARDA: 1) гидроцилиндр; 2) рабочая часть гидроклина; 3) гидравлическая силовая установка (маслостанция)

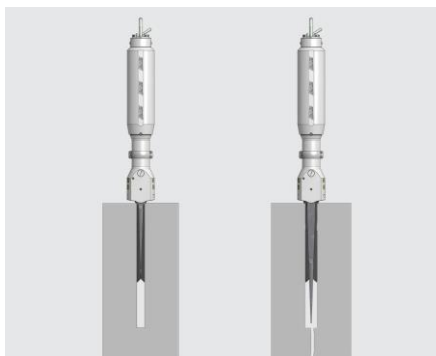


Рисунок 2. Схема создания направленной трещины гидроклиньями DARDA

Отечественные силовые элементы гидравлические раскалывающие (СЭГР) были изобретены выпускником МГРИ Юрием Лебедевым в 1982 году.

СЭГР отличается тем, что имеет гидропривод (эластичную камеру), размещенный между пуансонами, находящимися непосредственно в шпуре [1, 2, 3]. Его клинья перемещаются камерой не вдоль шпура, а в поперечном направлении, что значительно снижает контактные напряжения на внутренних плоскостях пуансонов.

Силовые элементы такой конструкции (Рис.3.) можно размещать на любой глубине шпура или скважины и соединять их последовательно в гирлянды, многократно усиливая давление на стенки шпура. Относительно малые массогабаритные параметры, энергопотребление и себестоимость СЭГР делает их уверенно конкурентоспособными, а в секторе диаметров скважин более 63 мм.зарубежные гидроклинья просто отсутствуют на рынке из-за их «избыточного веса».

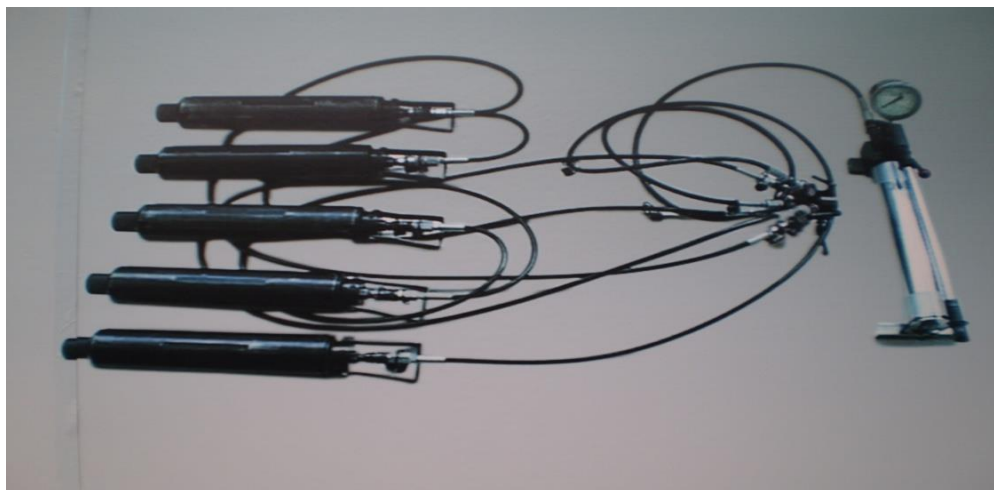


Рисунок 3. Комплект гидрораскалывающего оборудования из пяти СЭГР и ручного гидравлического насоса

СЭГР предназначены для образования направленных трещин (Рис.4) в высокопрочных монолитных массивах (скальном, бетонном и железобетонном). СЭГР обладает высокой раскалывающей мощностью (от 100т до 850т) при малой массе (от 1,5кг до 25кг) и емкости гидросистемы (от 50мл до 670 мл в зависимости от типоразмера), компактной конструкцией, высокой производительностью – создание направленной трещины в массиве занимает несколько минут. Благодаря большому раскалывающему усилию развиваемому СЭГР (более

1500 тонн на погонный метр скважины) обеспечивается возможность разрушение массивов в заданном направлении и отделение от него блоков до 1000 куб. метров и более.



Рисунок 4. Образование направленной трещины гидроклиньями СЭГР в скальном массиве на карьере блочного камня

СЭГР отличается эксплуатационной долговечностью и высокой гибкостью технологии применения:

- СЭГР могут подключаться к ручному гидравлическому насосу или маслостанции параллельно, последовательно и в любом сочетании;
- СЭГР могут помещаться в шпуров любого направления и глубины. При раскалывании скальных массивов можно эффективно использовать их природные структурные свойства;
- СЭГР можно использовать на открытых, подземных работах и под водой;
- СЭГР можно использовать в сочетании с любым типовым горным и строительным оборудованием: буровыми машинами, канатными пилами, алмазными и твердосплавными дисками.
- Экологическая чистота СЭГР - отсутствие шума, пылеобразования и вибрации.

Наиболее близкими конкурентами **СЭГР** в секторе скважин диаметром более 100 мм являются бетоноломы (гидроклинья) компании HYDROSTRESS (Швейцария).

Гидроклинья HYDROSTRESS (Рис.5) представляют собой размещаемую в скважине диаметром не менее 100 мм гидравлическую систему, состоящую из цилиндрического корпуса и нескольких выдвигающихся в поперечном направлении штоков-пуансонов. Из-за необходимости размещать рабочие цилиндры поперек оси скважины, конструктивно невозможно сконцентрировать большие раскалывающие усилия по длине скважины. Поэтому гидроклин HYDROSTRESS может обеспечить раскалывающее усилие до 600 тонн на один метр скважины диаметром 110 мм., что приемлемо для разрушения, в основном, только бетонных конструкций.



Рисунок 5. Общий вид бетонолома компании HYDROSTRESS

Выводы:

1. В настоящее время гидрораскалывающие установки, в основном, успешно применяются в строительной отрасли при реконструкции массивных бетонных и железобетонных конструкций, а также на карьерах стройматериалов по добыче блочного камня. В перспективе, учитывая очевидные достоинства оборудования (безвзрывное разрушение скальных пород и его экологичность), представляется целесообразным применение гидроклиньев при проходке подземных горных выработок, разделке негабарита (в том числе на рудных карьерах) и добыче ценного оптического сырья.

2. Сравнительная оценка показывает, что российские СЭГР превосходят зарубежные аналоги как по массогабаритным показателям, так и по функциональным критериям, обладая расширенными технологическими возможностями и большим разрывным усилием.

Библиография

1. А.с. СССР № 1767174, кл. E21C 37/10, 1992.
2. Патент РФ № 2131033, кл. E21C 37/10, 1999.
3. РФ ПМ № 85552 по кл. E21C 37/10, 2009.
4. www.dardatools.ru

Исследование влияния технологических режимов электроискрового модифицирования поверхностей деталей горнодобывающего оборудования на основе регрессионного анализа

***Иванова Е.В.* (Российский университет транспорта, elenaivanova-01@mail.ru),
Коротаев Д.Н. (МГРИ, korotaevdn@mgri.ru)***

Аннотация

Современное развитие техники и технологий в горнодобывающей отрасли требует системного подхода к обеспечению надежности и долговечности механизмов. Условия эксплуатации деталей машин характеризуются повышенным воздействием агрессивной внешней среды, что ставит высокие требования к материалам, используемым в производстве оборудования.

Одним из ключевых направлений, способствующих решению этих задач, является создание функциональных покрытий, которые не только улучшают физико-механические свойства деталей, но и значительно повышают их эксплуатационные характеристики. Они способны противостоять коррозии, абразивному изнашиванию, что, продлевает срок службы оборудования и снижает затраты на его обслуживание.

Ключевые слова

Горнодобывающая техника, гидравлические системы, покрытие, сила адгезии, электроискровое модифицирование, технологические режимы, регрессионный анализ

Теория

Российская Федерация уделяет особое внимание проведению геологоразведочных работ, что напрямую обусловлено сырьевой ориентацией её экономики. При этом, добыча и переработка полезных ископаемых требуют применения широкого спектра высокотехнологичного оборудования. Для каждого вида работ используются специализированные машины [1]: горные экскаваторы, карьерные самосвалы, погрузчики и бульдозеры, и другое разнообразное оборудование (буровые станки, дробильно-сортировочное оборудование, проходческие комбайны, погрузочно-доставочные машины и т.д.).

Неотъемлемыми частями современной горнодобывающей техники являются разнообразные гидравлические системы и устройства: гидравлический инструмент, гидрозамки, гидрораспределители, гидронасосы, плунжерные насосы, насосные станции высокого давления, гидравлические прессы, гидромоторы, гидроцилиндры и др. [2]. От эффективности работы гидравлических насосов, цилиндров и прочей периферии напрямую зависит производительность и экономическая выгода всего предприятия. Штоки цилиндров, рабочие колеса, плунжеры подвергаются гидроабразивному изнашиванию.

В реальных условиях замена, отработавших свой срок деталей, осуществляется не вовремя. Это связано со сложными специфическими особенностями замены, высокой трудоемкостью и иногда, отсутствием требуемых деталей. Поэтому эксплуатируемые устройства простаивают, что негативно влияет на общую производительность горнодобывающего предприятия [3].

Чтобы увеличить ресурс эксплуатации горнодобывающей техники необходимо применять технологии изменения качества и свойств поверхности, в результате которых образуются износостойкие и ударопрочные покрытия. Одним из методов, применяемым для упрочнения и восстановления поверхностей металлических деталей, является электроискровое модифицирование (ЭИМ), [4-6].

Формирование упрочненного слоя происходит в результате сложных плазмохимических, теплофизических и механотермических процессов, реализуемых на микролокальных участках воздействия единичного искрового разряда. При сближении легирующего электрода с упрочняемой поверхностью на определенном расстоянии происходит искровой разряд малой длительности. В результате образуются локальные очаги плавления и испарения, вызывающие электрическую эрозию и взаимный массоперенос между анодом и катодом. На поверхности катода формируется тонкое покрытие с определенными физико-химическими и механическими свойствами. При этом процессе возникает дополнительное импульсное тепловое воздействие, которое вызывает протекание различных механотермических процессов, приводящих поверхностные слои электродов в сложнапряженное состояние. Анод и катод при ЭИМ находятся между собой во взаимосвязи и вслед за осажденными частицами упрочняемая поверхность подвергается ударно-вибрационному воздействию [7, 8].

В результате, упрочненная поверхность, сформированная ЭИМ, представляет новую композиционную структуру, состоящую из отдельных слоев:

- верхний «белый» слой, состоит из материала анода и элементов межэлектродной среды;
- нижний подслоя, диффузионный, смесь материала анода и катода;
- зона, переходящая в структуру основного материала, образованная в результате термического воздействия.

Достоинствами технологии ЭИМ являются:

- 1) возможность наносить покрытие на микроскопический участок, не превышающий доли миллиметра;
- 2) незадействованная в обработке площадь поверхности объекта не получает повреждений, следовательно, не требует защиты в процессе легирования;
- 3) высокая адгезия нанесённого слоя с поверхностью подложки обеспечивает надёжное, прочное, долговечное сцепление – благодаря эффекту диффузии внешнего слоя вглубь металла;
- 4) технология модифицирования сопровождается минимальным нагревом обрабатываемой поверхности, отсутствует вероятность возникновения коррозии металла;
- 5) отсутствуют требования к характеру металлической поверхности, предназначенной для упрочнения, нет необходимости в какой-либо подготовке;
- 6) возможность использования в качестве легирующих материалов чистых металлов, многих сплавов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений.

Целью данной работы является регрессионный анализ технологических режимов обработки поверхностей, образованных технологией ЭИМ.

Анализ научных работ в области ЭИМ [9] позволил установить, что основными факторами, которые влияют на качество и свойства обрабатываемых поверхностей (покрытий), являются материал легирующего электрода и технологические режимы установки ЭИМ – емкость конденсаторов и напряжение в импульсе.

Влияние материала легирующего электрода на эксплуатационные свойства поверхностей, обработанных ЭИМ, исследовано в работе [10].

При эксплуатации контактирующие поверхности изнашиваются. Изнашивание обусловлено адгезионным взаимодействием. Поэтому сила адгезии влияет на износостойкость.

Влияние технологических режимов обработки ЭИМ на силу адгезионного взаимодействия исследовали, используя планирование многофакторного эксперимента. В качестве функции отклика выбрана зависимость силы адгезии от режимов ЭИМ. Факторами воздействия на исследуемый объект (силу адгезии, Y) были приняты: X_1 – напряжение между

легирующим электродом и поверхностью; X_2 – емкость конденсаторов; X_3 – время обработки ЭИМ. Было получено уравнение регрессии:

$$Y = 74,79 + 17,21X_1 - 27,29X_2 + 12,29X_3 - 0,71X_1X_2 + 14,71X_1X_3 + 0,21X_2X_3 + 6,79X_1X_2X_3$$

Значимость коэффициентов осуществляли по критерию Стьюдента: коэффициенты b_{12} , b_{23} , b_{123} являются незначимыми, поэтому уравнение регрессии приобрело следующий вид:

$$Y = 74,79 + 17,21X_1 - 27,29X_2 + 12,29X_3 + 14,71X_1X_3$$

Для визуализации взаимосвязи технологических режимов ЭИМ с силой адгезии построена поверхность отклика, приведенная на рисунке.

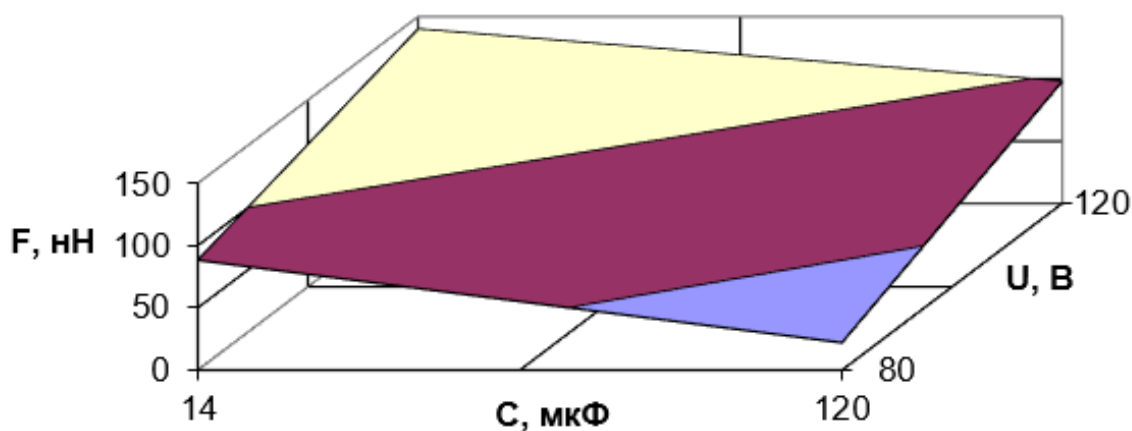


Рисунок 1. Поверхность отклика для параметра оптимизации (сила адгезии) с обработкой ЭИМ электродом состава 50% WC-Co и 50% Ni-Cr-B-Si

В результате регрессионного анализа обнаружено, что технологические параметры ЭИМ – напряжение, емкость и длительность воздействия, оказывают влияние на силу адгезии, возникающую между взаимодействующими поверхностями.

1) Сила адгезии демонстрирует линейную и прямую зависимость от величины напряжения искрового разряда.

2) Наблюдается линейная, но обратно пропорциональная зависимость силы адгезии от емкости используемых конденсаторов.

3) Помимо указанных линейных эффектов, зафиксировано взаимодействие между напряжением и временем обработки, которое становится существенным при определенных сочетаниях режимов электроискровой обработки.

Выводы

Применение технологии ЭИМ перспективно для металлических поверхностей, требующих восстановления. В современных условиях реализуются следующие направления ЭИМ:

- 1) расширение видов обрабатываемых поверхностей сложной формы;
- 2) возможно применение манипуляторов и робототехники;
- 3) использование новых электродных материалов, применение которых позволит улучшить эксплуатационные свойства обрабатываемой поверхности;

4) используют комбинированные технологии, например, ЭИМ + лазерная обработка.

Библиография

1. Скворцов Ю.С., Амоа К.А. Перспективы развития нефтегазового машиностроения для Арктики и северных территорий. В сборнике: АРКТИКА: инновационные технологии, кадры, туризм. Материалы международной научно-практической конференции. под общ. ред. В. И. Прядкина. 2018. С. 161-166.
2. Дергачева Л.В. Износ рабочего колеса насоса: причины, последствия и пути решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 412-417.
3. Кузнецов И.С., Прокошина Т.С. Анализ технического состояния изношенного блока плунжеров гидравлического насоса // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 4 (33). С. 164-168.
4. Бурнышев И.Н., Калюжный Д.Г., Кузнецов К.И. Электроискровое легирование стали, титановых и ниобиевых сплавов методом вращающегося электрода // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20. № 5 (233). С. 218-222.
5. Гадалов В.Н., Филатов Е.А., Филонович А.В., Макарова И.А. Повышение эксплуатационных характеристик электроискровым легированием поверхностей деталей машин // Главный механик. 2020. № 7. С. 38-51.
6. Казанников О.В., Отмахов Д.В. Восстановление штоков гидроцилиндров методом ЭИЛ // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 101-107.
7. Гадалов В.Н., Филонович А.В., Ворначева И.В., Муратов М.А. Исследование влияния режимов электроискрового легирования на кинетику массопереноса материала легирующего электрода на титановые сплавы для лопаток паровых турбин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 10 (190). С. 452-456.
8. Овчинников Е.В. Нанокпозиционные триботехнические ЭИЛ покрытия // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2021. № 4 (75). С. 59-69.
9. Иванов В.И. О путях повышения эффективности и универсальности электроискрового легирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 9 (177). С. 404-411.
10. Korotaev D.N. and others. Structural-morphological features and fretting resistance of nanostructured topocomposites formed by ion-plasma modification // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2019. С. 062013.

Анализ способов контроля за деформацией бортов карьера

Исайчева Е.А. (МГРИ, isajcheva.kate2003@yandex.ru),
Яшин В.П. (МГРИ, yashinvp@mgri.ru)*

Аннотация

В условиях интенсивной эксплуатации карьеров обеспечение безопасности и стабильности их конструкций приобретает первостепенное значение. Деформация бортов карьера может приводить к аварийным ситуациям, нарушению производственного процесса и экологическим проблемам.

В докладе содержится информация о современных методах контроля состояния бортов карьера, приведены факторы, которые приводят к риску деформации. Проанализированы существующие на практике методы мониторинга, а также рассмотрены новые подходы, включающие методы машинного обучения.

Ключевые слова

Геомеханика, мониторинг, деформации бортов, машинное обучение

Теория

В формировании деформаций бортов карьера играет роль совокупность многих факторов. К опасным факторам, которые приводят к риску деформации бортов карьера можно отнести следующие: залегание слоистости горных пород изучено не для всех секторов карьера; не все разломы в структурной модели изучены; неопределенность границы промерзания и уровня грунтовых вод, оползания откосов, связанные с пластическими деформациями в пределах многолетнемерзлых пород; снижение прочности пород при размокании [5].

Деформации бортов карьера могут иметь наиболее масштабные последствия. В качестве примера (рис.1) приведена деформация борта полиметаллического карьера. Информация об опасном движении борта карьера поступала задолго до деформации, но принятые меры по ее стабилизации результатов не дали, объем деформации превысил прогнозные значения, в результате чего пострадала техника и внутрикарьерная инфраструктура.



Рисунок 1. Деформация борта полиметаллического карьера [3]

После произошедшей деформации была усилена система мониторинга, в том числе с применением систем автоматизированного и глубинного мониторинга.

Проанализированы существующие на практике методы мониторинга:

- визуальный – визуальные (маршрутное) обследования состояния откосов и берм;
- фотограмметрический – выявление проявлений неустойчивости по фотоматериалам наземной или воздушной съемки и анализ изменения геометрии откоса за разные периоды съемок;
- маркшейдерский, выполняется с использованием электронно-оптических приборов, в том числе с наблюдениями по стационарно установленным отражательным призмам (призменный), спутникового оборудования, лазерного сканирования поверхности откоса, а также других инструментов для упрощенного мониторинга за раскрытием трещин или активными деформационными процессами;
- радарный, выполняется с использованием радаров (наземного или аэрокосмического базирования) мониторинга сдвижений со сплошной зоной покрытия области мониторинга. Метод наземного радарного мониторинга по сравнению с другими методами (лазерное сканирование, призменный мониторинг) имеет более высокую точность и степень автоматизации непрерывных наблюдений. К недостаткам относится получение величин смещений вдоль линии визирования, что не позволяет получить трехмерные вектора смещений. Радарный мониторинг (аэрокосмический) - метод интерферометрического анализа спутниковых радарных снимков (InSAR) применяется главным образом для мониторинга оседаний больших площадей земной поверхности для оценки их деформированного состояния [2].
- гидрогеологический – мониторинг изменения уровней подземных вод, давления воды, а также участков просачивания подземных вод;
- геотехнический мониторинг осуществляется с помощью устройств (инклинометры, экстензометры и др.), позволяющих фиксировать смещения, деформации и другие характеристики породного массива. Системы геотехнического мониторинга, чаще всего, устанавливаются в скважинах (глубинный мониторинг) и применяются для уточнения зоны сдвига в прибортовом массиве.
- геофизический, основан на наблюдении за изменениями физических показателей (скорость распространения упругих волн, электрическое сопротивление, магнитные поля, ускорение свободного падения и др.) в массиве горных пород.

При выборе метода мониторинга необходимо учитывать следующие факторы: какой механизм деформации предполагается, скорость развития деформаций; требования к точности и периодичности наблюдений; требования к частоте установки реперов (какая зона покрытия); если не предусмотрены дистанционные методы, то имеется ли возможность обеспечения доступа к этим реперам; наличие внутренних и внешних отвалов, зданий и сооружений.

Выбор методов мониторинга зависит от масштабов предполагаемых деформаций и скорости протекания процессов деформирования. В нормативных документах [3] даны следующие рекомендации: для скоротечных деформационных процессов (часы, дни) малых масштабов (до 1000 м³) визуальных наблюдений, которые могут быть дополнены наземным радарным мониторингом; для более медленных деформационных процессов (дни, недели, месяцы) более крупных масштабов (1000 м³ и более) мониторинг дополняется инструментальными методами наблюдений.

Система мониторинга должна определяться для каждого объекта индивидуально и носить комплексный характер.

На многих карьерах на начальных стадиях разработки месторождения системы мониторинга не устанавливают, поскольку временные откосы бортов часто имеют малую высоту или относительно пологие, и риск значительной неустойчивости ниже, чем в случае более высоких и крутых откосов на поздних стадиях. Однако при возникновении деформаций

на более поздних стадиях разработки без этих первоначальных наблюдений часто бывает трудно оценить значение подвижек в отношении абсолютных измерений [4].

Поэтому на всех карьерах должны быть предусмотрены инструменты и возможность выполнения базовой программы мониторинга уже на ранних стадиях эксплуатации. Базовая система мониторинга бортов должна закладываться горными инженерами при сотрудничестве с геомеханиками. Структура первоначальной системы должна создаваться на основе оценки возможных видов неустойчивости.

Традиционные методы мониторинга, такие как геодезические измерения и визуальный контроль, обладают ограниченной частотой и пространственным разрешением, что может привести к запоздалому выявлению опасных деформаций.

Загибалов А.В. и др. [1] предлагают новый подход к автоматизации мониторинга деформации бортов карьера, основанный на интеграции беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), интеллектуальных датчиков деформации и методов машинного обучения для прогнозирования потенциально опасных изменений.

Комплексная система мониторинга, включает:

- Беспилотные летательные аппараты (БПЛА): Оснащены высокоточным GPS, мультиспектральными камерами и LiDAR-сенсорами для получения детализированных данных о состоянии бортов карьера.
- Интеллектуальные датчики деформации: Установленные в ключевых точках карьера, способны адаптивно настраиваться и передавать данные в режиме реального времени.
- Методы машинного обучения: Использование гибридных моделей, объединяющих нейронные сети и статистические методы для анализа и прогнозирования деформаций.
- Геоинформационные системы (ГИС): Интеграция и визуализация пространственных данных, полученных от различных сенсоров.

Предложенная методика [1], позволяющая с высокой точностью и в режиме реального времени отслеживать деформации и предсказывать их развитие. Представлены преимущества предлагаемой системы по сравнению с существующими методами мониторинга, а также основные вызовы и направления дальнейших исследований. Включены математические модели и алгоритмы, разработанные для обработки данных и прогнозирования изменений в структуре карьера.

На вход подается последовательность измерений деформаций и внешних факторов. Для сохранения долгосрочных зависимостей используется функция активации LSTM (Long Short-Term Memory). Целевая функция — минимизация среднеквадратичной ошибки.

LSTM была предложена в 1997 году Шмидхубером и Хохрайтером. LSTM предназначалась для сохранения информации на длительные периоды времени и ее эффективного извлечения, когда это необходимо. Основной идеей было внедрение так называемых «ворот» в структуру нейронной сети, которые контролируют поток информации, позволяя избежать проблемы затухания градиента.

Основной инновацией в LSTM являются три типа ворот: входные (input gates), забывания (forget gates) и выходные (output gates). Эти ворота позволяют модели решать, какую информацию сохранить, какую обновить и какую передать дальше. Такая структура позволяет LSTM обрабатывать данные с долгосрочными зависимостями, что было недостижимо для традиционных рекуррентных нейронных сетей (RNN).

Ячейка состояния в LSTM действует как носитель долгосрочной памяти. Она способна переносить информацию на протяжении множества шагов, благодаря своей способности добавлять или удалять информацию через ворота. Это позволяет LSTM запоминать

информацию на долгие периоды времени, что является ключевым преимуществом по сравнению с традиционными RNN.

Выводы

Многочисленные исследования показывают потенциал использования машинного обучения для прогнозирования деформаций на основе собранных данных. Это мощная нейросетевая архитектура LSTM, и тем не менее, она всего лишь определяет, в каком порядке складываются и перемножаются вектора. Конкретный смысл в свой проект должен вкладывать сам разработчик. Поэтому важно понимать причины деформаций бортов карьера, учитывать опасные факторы риска, выбирать методы мониторинга с учетом совокупности всех факторов, а не использовать бездумно методы машинного обучения, полностью перекладывая ответственность на искусственный интеллект.

В большинстве многочисленных методов контроля за состоянием бортов не учитывают сложные геотехнические условия и не интегрированы в единую автоматизированную систему мониторинга.

Использование современных технологий сбора данных в сочетании с передовыми методами машинного обучения позволит не только точно отслеживать текущие состояния бортов карьера, но и достоверно прогнозировать возможные деформации. Это открывает новые возможности для повышения безопасности и эффективности горных работ.

Библиография

1. Автоматизация мониторинга деформации бортов карьера //Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Загibalов А.В. [и др.]. 2024. 10(127). URL:<https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18460>
2. Горбунов, В. А. Результаты космического радарного мониторинга деформаций бортов и уступов карьеров ОАО «Гайский ГОК» и смещений земной поверхности и сооружений на промышленной площадке предприятия / В. А. Горбунов, Ю. И. Кантемиров // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 70-76. – EDN SVUTMJ.
3. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов / М. В. Рыльникова, А. Б. Алексеев, Е. Н. Есина [и др.]. – Москва : Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2022. – 90 с. – ISBN 978-5-6041085-9-8. – EDN NJKONX.
4. Руководство по проектированию бортов карьера [перевод с английского] / под ред.: Джон Рид, Питер Стейси. — Екатеринбург : Правовед, Полиметалл, 2015. — 527 с. ил., цв. ил.; 28. — ISBN 978-5-94782-116-1.
5. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. 2-е изд. – Госгортехнадзор России, 2002. – 31 с.

Перспективы применения электрокинетических явлений при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания

Каримов Н.М.* (Навоийский государственный горно-технологический университет, 92nurkhan92@gmail.com),

Халимов И.У. (Навоийский государственный горно-технологический университет),
Хамидов С.Б. (Навоийский государственный горно-технологический университет)

Аннотация

Добыча урана методом подземного выщелачивания является одним из наиболее эффективных и экологически безопасных способов разработки урановых месторождений. Однако эта технология сталкивается с рядом актуальных проблем, таких как низкая эффективность извлечения урана в низко проницаемых пластах, неравномерное выщелачивание, приводящее к образованию "застойных зон", и высокий риск загрязнения окружающей среды из-за использования больших объемов химических реагентов. Решением этих проблем может стать применение электрокинетических явлений, такие как электроосмос, электрофорез и электромиграция. Эти методы позволяют увеличить скорость фильтрации выщелачивающего раствора, ускорить миграцию ионов урана и снизить объем используемых реагентов, что способствует повышению эффективности извлечения урана и минимизации экологической нагрузки. Проведен анализ последних научных достижений в области электрокинетики для ПВ урана, рассмотрены ключевые механизмы воздействия электрического поля на процессы выщелачивания и предложены перспективные направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова

Электрокинетика, подземное скважинное выщелачивание, уран, ионная миграция, пористые среды

Теория

Добыча урана является ключевым процессом для обеспечения топливом атомной энергетики, которая играет важную роль в глобальной энергетической системе. Одним из наиболее распространенных и экологически безопасных методов добычи урана является подземное скважинное выщелачивание (ПВ) [1, 2]. Этот метод основан на закачке выщелачивающего раствора (обычно серной кислоты или карбонатных растворов) в пласт, содержащий уран, с последующим извлечением обогащенного раствора через добывающие скважины. ПВ имеет ряд преимуществ перед традиционными методами добычи, такими как открытые или подземные горные работы, включая меньшие затраты, снижение воздействия на окружающую среду и возможность разработки низкосортных месторождений.

Однако, несмотря на свои преимущества, технология ПВ сталкивается с рядом актуальных проблем [3]. Во-первых, эффективность извлечения урана может быть значительно снижена в низко проницаемых пластах, где движение выщелачивающего раствора и ионов урана затруднено [4]. Во-вторых, в некоторых случаях наблюдается неравномерное выщелачивание, что приводит к неполному извлечению урана и образованию "застойных зон" [5]. В-третьих, использование больших объемов выщелачивающих растворов повышает риск загрязнения грунтовых вод и почвы [6, 7], что требует дополнительных мер по экологической безопасности.

Решением этих проблем может стать применение электрокинетических явлений, таких как электроосмос, электрофорез и электромиграция. Электрокинетика изучает движение жидкостей и заряженных частиц под действием электрического поля. В контексте ПВ урана

применение электрического поля может способствовать увеличению скорости транспорта выщелачивающего раствора через низко проницаемые пласты, ускорению миграции ионов урана к добывающим скважинам и снижению объема используемых химических реагентов. Это не только повышает эффективность извлечения урана, но и снижает экологическую нагрузку.

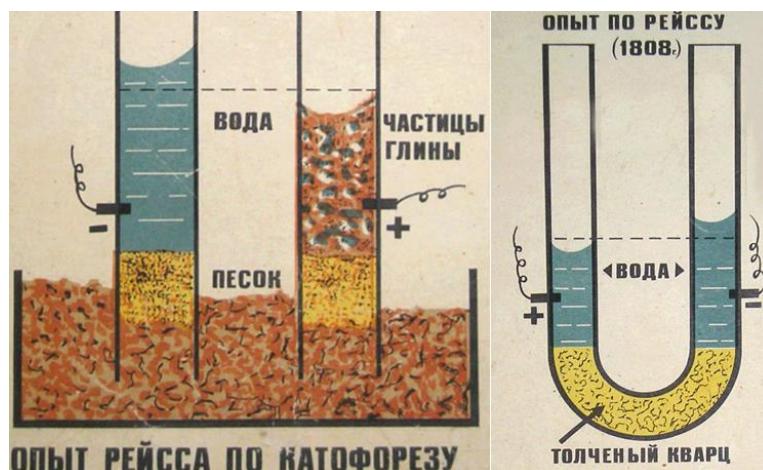


Рисунок 1. Получение электрофореза (справа) и электроосмоса (слева) в лабораторных условиях

В последние годы интерес к электрокинетическим методам в горной промышленности значительно вырос. Ряд исследований [8, 9] продемонстрировал, что применение электрического поля может значительно улучшить характеристики ПВ, особенно в сложных геологических условиях. Однако, несмотря на положительные результаты, широкое внедрение электрокинетических технологий в промышленность требует дополнительных исследований и разработок. Электрокинетика, включающая такие явления, как электроосмос, электрофорез и электромиграция, позволяет управлять движением жидкостей и ионов в пористых средах под действием электрического поля. Это особенно актуально для низко проницаемых пластов, где традиционные методы ПВ сталкиваются с ограничениями. Исследования последних лет демонстрируют, что применение электрического поля с напряженностью 1-2 В/см может увеличить скорость фильтрации выщелачивающего раствора на 20-30% за счет электроосмотического эффекта [10]. Эти результаты подтверждаются математическими моделями, которые учитывают влияние дзета-потенциала и вязкости жидкости на эффективность процесса [11].

Важным направлением исследований является изучение электрофореза и его влияния на миграцию ионов урана (UO_2^{2+}) в пористых средах. Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях, показали, что при напряженности электрического поля 0.5-1 В/см скорость миграции ионов урана увеличивается на 40-50% [12]. Это открывает новые возможности для повышения степени извлечения урана на месторождениях с низкой проницаемостью. Кроме того, комбинированные подходы, сочетающие электрокинетические явления с изменением pH выщелачивающего раствора, демонстрируют значительный потенциал. Например, исследования показали, что оптимальное сочетание электрического поля и кислотности раствора позволяет увеличить степень извлечения урана на 60% по сравнению с традиционными методами [13].

Экологические аспекты применения электрокинетики также находятся в центре внимания исследователей. Было установлено, что электрическое поле не только повышает эффективность извлечения урана, но и способствует снижению экологической нагрузки. В

частности, применение электрокинетических методов позволяет уменьшить концентрацию загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы, в грунтовых водах на 30-40% [14]. Это делает технологию более безопасной для окружающей среды и соответствует современным требованиям к устойчивому развитию.

Промышленные испытания электрокинетических методов на реальных месторождениях урана подтверждают их практическую применимость. Например, на месторождениях в Казахстане применение электрического поля позволило увеличить степень извлечения урана на 25% и сократить время разработки месторождения на 15% [15]. Аналогичные результаты были получены на месторождениях в Австралии, где использование электрокинетики позволило повысить эффективность ПВ на 20%. Эти успехи демонстрируют, что электрокинетика может стать важным инструментом для повышения эффективности добычи урана в промышленных масштабах.

Таким образом, последние научные достижения демонстрируют, что электрокинетика является мощным инструментом для решения актуальных проблем добычи урана. Однако для широкого внедрения этих методов необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию технологических параметров, снижение затрат и минимизацию экологической нагрузки. Учитывая растущий интерес к электрокинетике со стороны научного сообщества и промышленности, можно ожидать, что в ближайшие годы эта технология получит дальнейшее развитие и широкое применение в практике добычи урана.

Практическое применение электрокинетических явлений в реальных условиях требует установки электродов в скважины для создания электрического поля, оптимизации параметров электрического поля (напряженность, частота, продолжительность воздействия) и контроля состава и pH выщелачивающего раствора для минимизации побочных реакций. Таким образом, электрокинетические методы представляют собой мощный инструмент для повышения эффективности ПВ урана, особенно в сложных геологических условиях.

Выводы

Применение электрокинетических явлений в технологии ПВ урана представляет собой перспективное направление, которое может значительно повысить эффективность извлечения урана и снизить экологическую нагрузку. Последние научные достижения демонстрируют, что электрокинетика особенно эффективна в низко проницаемых пластах и при работе с низкосортными месторождениями. Однако для широкого внедрения этих методов необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию технологических параметров и снижение затрат.

Библиография

1. Ilhom Halimov, Sukhrob Khamidov, Nurkhan Karimov. Основы геотехнологии. Navoi, 2022. 246 p.
2. Kurbanov M.A., Alikulov Sh.Sh., Ganiyeva D.S., Nurkhan Karimov. Researches in the field of technology of extraction concentration of rhenium from desorbates. Gorniy vestnik Uzbekistana, 2020, No 2(81) pp. 75-78.
3. Petukhov O.F., Khalimov I.U., Istomin V.P., Karimov N.M. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium. Mining Science and Technology (Russia). 2023;8(1):39–46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>
4. Alikulov Sh.Sh., Ilhom Halimov, Rabbimov X.T., Nurkhan Karimov. Research and development of measures to prevent mechanical colmation of the form during in-situ leaching of uranium. Gorniy vestnik Uzbekistana, 2022, No 2(89) pp. 33-40. <http://dx.doi.org/10.54073/GV.2022.2.89.008>

5. Sh.Sh. Alikulov; S.B. Khamidov; N.M. Karimov Experience in improving the technology of uranium processing from technological solutions of in-situ leaching. Proceedings of the IV International Conference on Advances in Science, Engineering, and Digital Education AIP Conf. Proc. 3268, 020031-1–020031-5; <https://doi.org/10.1063/5.0259476>
6. G. N. Zhinkin and V. F. Kalganov, 'Electrochemical Processes in Underground Leaching,' Mining Journal, no. 4, pp. 48-49, 1986.
7. Sharafutdinov U.Z., Khalimov I.U., Khamidov S.B., Karimov N.M. Use of carbon adsorbents for rhenium sorption from uranium re-extracts. Tsvetnye Metally (Russia). 2023; 12(972): 51–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.12.04>
8. E. A. Lokshina, 'Electrokinetic Phenomena in Porous Media,' Ph.D. dissertation, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, 2024.
9. F. Reuss, 'Notice on the Flow of Water through a Capillary Tube by Electric Current,' Proceedings of the Imperial Society of Naturalists of Moscow, vol. 1, pp. 327-344, 1809.
10. S. S. Dukhin and N. A. Mishchuk, 'Nonlinear Electrokinetic Phenomena,' Advances in Colloid and Interface Science, vol. 35, pp. 173-196, 1991.
11. A. V. Delgado et al., 'Measurement and Interpretation of Electrokinetic Phenomena,' Journal of Colloid and Interface Science, vol. 309, no. 2, pp. 194-224, 2007.
12. J. H. Masliyah and S. Bhattacharjee, Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena, Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
13. R. F. Probstein, Physicochemical Hydrodynamics: An Introduction, 2nd ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
14. J. Lyklema, Fundamentals of Interface and Colloid Science, vol. 2, San Diego: Academic Press, 1995.
15. I.U. Khalimov; S.B. Khamidov; N.M. Karimov The behavior of uranium in the system: Ore clay – Barren clay - Ore sand. Proceedings of the IV International Conference on Advances in Science, Engineering, and Digital Education AIP Conf. Proc. 3268, 030028-1–030028-5; <https://doi.org/10.1063/5.0257105>

Биоинспирированные роботизированные технологии подземной добычи руд на больших глубинах: переход к новому технологическому укладу

***Комаров Д.П. * (ИПКОН РАН, danyaa68@gmail.com),
Радченко Д.Н. (ИПКОН РАН, mining_expert@mail.ru)***

Аннотация

Статья посвящена перспективам внедрения биоинспирированных роботизированных технологий при подземной добыче руд на больших глубинах.

Рассмотрены ограничения традиционных методов добычи, включая погрузочно-доставочные машины (ПДМ), и предложены инновационные решения, основанные на принципах бионики. Проанализирован успешный опыт применения биоинспирированных технологий в других отраслях, таких как авиация, медицина и строительство, а также представлены направления их использования в горной промышленности. Особое внимание уделено разработке автономных роботизированных систем, способных адаптироваться к сложным условиям глубоких шахт, и их интеграции с передовыми технологиями, такими как искусственный интеллект, аддитивное производство. Обсуждены вызовы, связанные с внедрением биоинспирированных технологий, включая высокую стоимость разработки, необходимость междисциплинарного подхода и правовые аспекты. В заключение подчеркивается, что переход к новому технологическому укладу в горнодобывающей промышленности на основе биоинспирированных решений может стать ключевым фактором повышения эффективности, безопасности и устойчивости добычи руд в XXI веке.

Ключевые слова

Биоинспирированные технологии, роботизированные системы, подземная добыча руд, погрузочно-доставочные машины

Теория

Современная горнодобывающая промышленность сталкивается с рядом вызовов: истощение доступных запасов руд, необходимость разработки месторождений на сверхбольших глубинах, ужесточение экологических норм и требований промышленной безопасности. В этих условиях традиционные методы добычи становятся менее эффективными и экономически оправданными. Одним из перспективных направлений является внедрение биоинспирированных роботизированных технологий, которые позволяют не только повысить эффективность добычи, но и минимизировать воздействие на окружающую среду. Теоретической основой статьи является проецирование принципов бионики на технологии подземной добычи руд, с учетом анализа существующих погрузочно-доставочных машин (ПДМ) и опыта использования биоинспирированных технологий в других отраслях.

Погрузочно-доставочные машины (ПДМ) являются ключевым элементом подземной добычи. Современные ПДМ обладают высокой производительностью, но имеют ряд ограничений [3]:

- необходим оператор, способный управлять, оценивать риски и принимать решения на основе личного опыта;
- ограниченная маневренность в достаточно стесненных условиях горных выработках;
- высокое энергопотребление на доставку и проветривание горных выработок, а также значительный экологический след при применении машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания.

Для преодоления этих ограничений необходимы новые подходы, такие как автономные роботизированные системы, способные адаптироваться к сложным условиям.

Бионика — это заимствование идей и принципов у живой природы для создания технологий. Уже сегодня биоинспирированные решения успешно применяются в различных отраслях [4]: авиация (форма крыльев дронов, вдохновленная птицами и насекомыми, позволяет повысить маневренность и энергоэффективность), медицина (роботы-хирурги, имитируют движения человеческих рук, обеспечивают высокую точность операций), строительство (роботы, вдохновленные термитами, способны строить сложные структуры без централизованного управления). Эти примеры демонстрируют потенциал бионики для создания адаптивных, энергоэффективных и устойчивых систем.

В горной промышленности бионика только начинает находить применение, но уже есть несколько перспективных направлений [2]: Роботы-бурильщики (вдохновленные червями и корневыми системами растений, такие роботы способны проникать в сложные горные породы, адаптируясь к их структуре), автономные ПДМ, работающие по принципу роевого интеллекта (роботы, имитирующие поведение муравьев или других социальных насекомых, могут работать в команде, распределяя задачи и оптимизируя процессы добычи), сенсоры и материалы (использование принципов, заимствованных у живых организмов, позволяет создавать сенсоры устойчивые к экстремальным условиям, и материалы с повышенной прочностью и гибкостью).

Внедрение биоинспирированных роботизированных технологий в горной промышленности требует комплексного подхода, который должен включать в себя разработку и использование искусственного интеллекта для анализа данных и оптимизации процессов, создание новых материалов, устойчивых к высоким температурам, износу и динамическим нагрузкам, коллаборация с другими технологиями, композитными, аддитивными и др.

Уже сегодня существуют пилотные проекты, демонстрирующие потенциал биоинспирированных технологий [1]: роботы-черви, разработанные для прокладки тоннелей (они могут быть адаптированы для добычи руд на больших глубинах), роботы-муравьи, используемые в логистике (они могут быть применены для транспортировки руды в сложных условиях), биомиметические сенсоры, предназначенные для мониторинга состояния горных пород и оборудования.

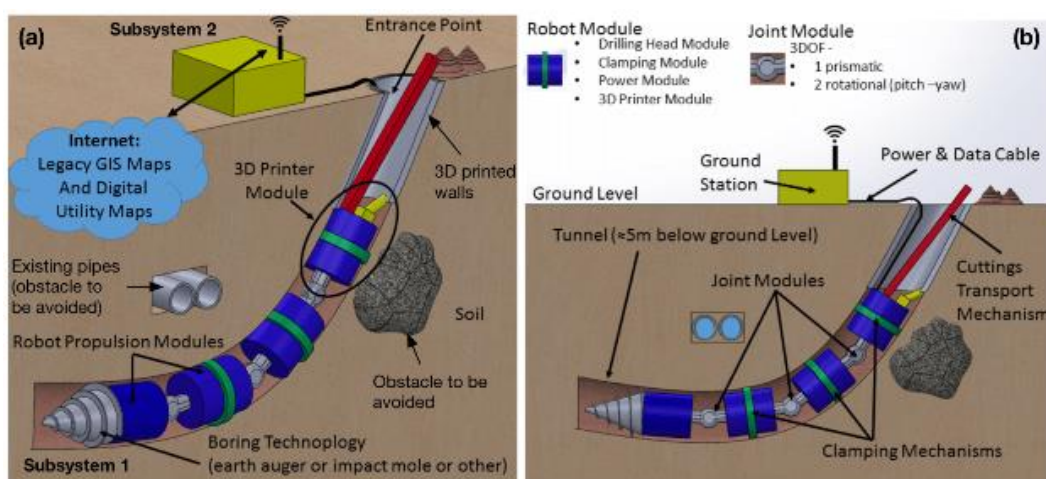


Рисунок 1. Червеподобный робот BADGER

Вдохновившись биоинспирированными технологиями, инженеры Мадридского университета разработали концепт робота BADGER (рис.1). Робот, похожий на

сегментированную змею, способен рыть тоннели для прокладки труб и кабелей, избегая трудоёмкого рытья траншей. На переднем конце расположена бурильная установка, а каждый сегмент оснащён двигательными механизмами. Отработанная порода выкачивается на поверхность насосом. Один из хвостовых сегментов наносит на стенки тоннеля специальный раствор, превращая его в готовую трубу, что упрощает прокладку коммуникаций.

Несмотря на перспективность, внедрение биоинспирированных технологий сталкивается с проблемами в высокой стоимости разработки и внедрения, необходимости междисциплинарного сотрудничества (биология, робототехника, геология, материаловедение), правовые и этические аспекты автоматизации добычи.

Выводы

Биоинспирированные роботизированные технологии открывают новые возможности для подземной добычи руд на больших глубинах. Они позволяют повысить эффективность, снизить затраты и минимизировать воздействие на окружающую среду. Переход к новому технологическому укладу требует комплексного подхода, включающего разработку интеллектуальных систем, создание новых материалов и интеграцию с другими передовыми технологиями. Уже сегодня пилотные проекты демонстрируют потенциал биоинспирированных технологий, и в ближайшие годы можно ожидать значительного прогресса в этой области.

Горнодобывающая промышленность стоит на пороге революции, и биоинспирированные технологии могут стать ключевым фактором ее успешного перехода к новому этапу.

Библиография

1. Михаил Александрович Петров, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», факультет машиностроения, кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии». Примеры бионического проектирования машиностроительных изделий. [Электронный ресурс]. <https://ritm-magazine.com/ru/public/primery-bionicheskogo-proektirovaniya-mashinostroitelnyh-izdeliy> (дата обращения: 28.02.2025)
2. Хабарова Е.И. Бионические решения, представляющие интерес для отраслей по добыче полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2—1. — С. 287–297. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-287-297.. [Электронный ресурс]. <https://giab-online.ru/files/Data/2021/2/287-297.pdf> .(дата обращения: 28.02.2025)
3. Шемет, А. А. Погрузочно-доставочная машина / А. А. Шемет, П. С. Жук ; науч. рук. Л. Г. Филипова // НИРС-2014: материалы 70-й студенческой научно-технической конференции / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет. Секция «Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод». – Минск : БНТУ, 2015. – С. 91.
4. Lopes, L., Bodo, B., Rossi, C., Henley, S., Žibret, G., Kot-Niewiadomska, A., and Correia, V.: ROBOMINERS – Developing a bio-inspired modular robot-miner for difficult to access mineral deposits, Adv. Geosci., 54, 99–108, [Электронный ресурс]. <https://doi.org/10.5194/adgeo-54-99-2020>, 2020 (дата обращения: 28.02.2025).

Метод создания гидроизоляции рудного тела с применением гидрогеологических методов при разработке месторождений с использованием физико-химической геотехнологии

Абрамов А.М.* (МГРИ, sashaabramovfeo@gmail.com),

Лукин Д.С.* (МГРИ, daniluhin25@gmail.com),

Дьяченко Е.Н. (МГРИ, dyachenkoen@mgri.com)

Аннотация

В статье рассмотрен инновационный метод гидроизоляции продуктивных пластов, направленный на расширение границ применения физико-химической геотехнологии, в частности метода выщелачивания, для добычи стратегически важных полезных ископаемых, таких как золото и уран. Предложенный метод предполагает создание гидроизоляционной воронки путем нагнетания в пласт раствора с плотностью, превышающей плотность продукционного флюида, что предотвращает их смешение и обеспечивает удержание полезного ископаемого в пределах добычного блока.

Описаны принципиальные схемы реализации метода, включая использование технологических и добычных скважин, а также особенности распределения раствора в зависимости от горно-геологических условий. Отмечены ключевые преимущества метода, такие как повышение экологичности за счет минимизации загрязнения грунтовых вод, экономичность благодаря снижению потерь полезного ископаемого и уменьшению расхода рабочего раствора, а также технологичность, позволяющая увеличить глубину добычи и интенсифицировать процесс выщелачивания.

Особое внимание уделяется анализу потенциальных проблем, возникающих в процессе разработки месторождений методом выщелачивания, таких как утечки растворов, нарушение целостности гидроизоляционных конструкций, изменения гидрогеодинамических режимов и экологические риски. Предложены инновационные подходы к предотвращению этих потенциальных проблем, которые могут возникнуть в процессе разработки месторождений.

Ключевые слова

Физико-химическая геотехнология, гидроизоляция, выщелачивание

Теория

Физико-химическая геотехнология – одно из наиболее перспективных направлений в сфере разработки месторождений твердых полезных ископаемых, в частности метод выщелачивания активно используется по всему миру для добычи стратегически важных полезных ископаемых таких как золото или уран, однако данный метод является достаточно требовательным к горно-геологическим условиям для применения, следовательно особой важностью в современном мире будут пользоваться методы расширяющие границы применения данного метода, в данной работе рассматриваются методы гидроизоляции продуктивных пластов, что потенциально может привести к сокращению расходов на разработку методом выщелачивания, а также позволить осваивать месторождения разработка которых ранее была невозможна или экономически не выгодна.

Представленный метод предлагает создание гидроизоляции продукционного тела за счет нагнетания в пласт раствора большей плотности, чем продукционный раствор. Принципиальная схема метода представлена на рисунке 1.

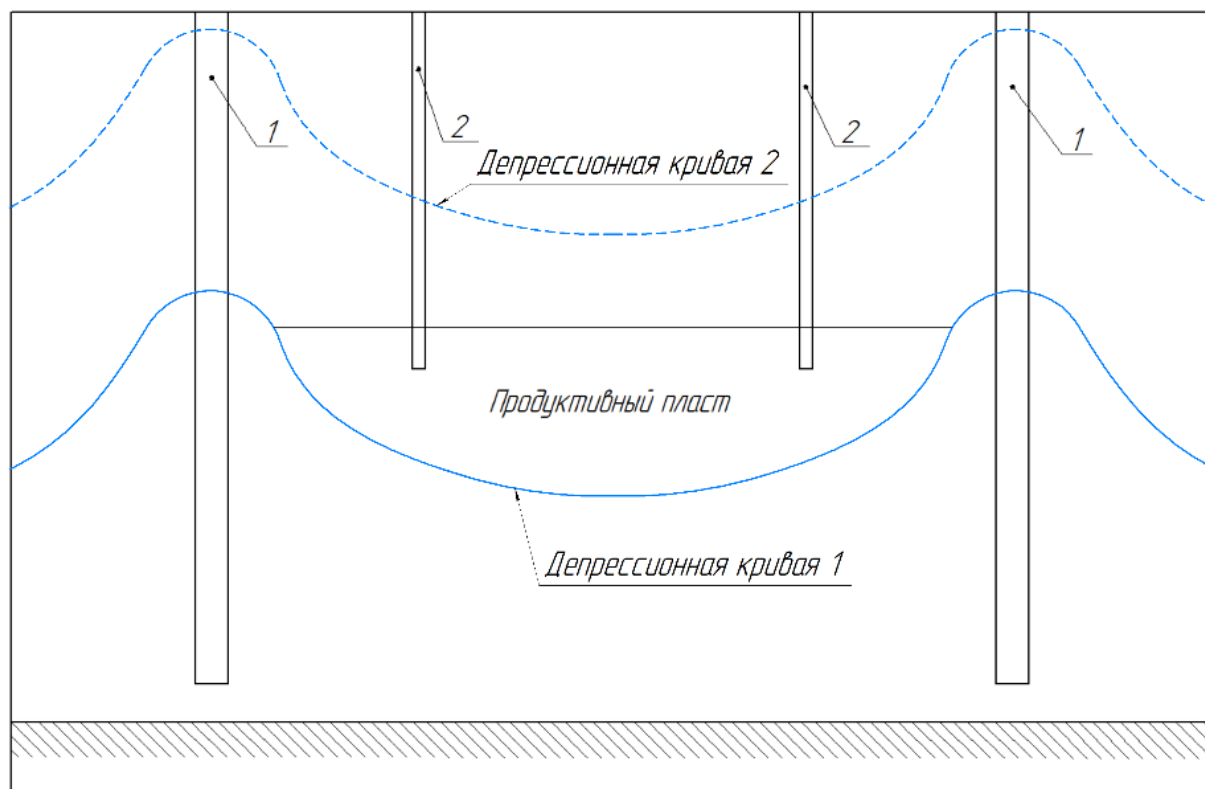


Рисунок 1. Принципиальная схема метода (название метода).

- 1 – Технологические скважины (через которые подается гидроизолирующий раствор)
2 – Добычные скважины (через которые ведется добыча полезного ископаемого)

Через технологические скважины 1, пробуренные по периметру добычного блока, нагнетается гидроизолирующий раствор соответствующей плотности. В зависимости от горно-геологических условий и геометрических параметров добываемого блока возможно бурение как наклонных и горизонтальных скважин, так и дополнительных скважин, пробуренных сквозь блок, однако в таком случае необходимо применять обсадные колонны.

Раствор распределяется по депрессионной кривой с учетом давления продукционного флюида, пластового давления и свойств массива. Плотность раствора должна превышать плотность продукционного флюида, что в свою очередь будет не допускать их смешения и гарантировать заложенное методом их распределение. Целью операции является создание гидроизоляционной воронки, которая будет удерживать продуктивный раствор.

При рекультивации участка недр необходимо поднять уровень гидроизолирующего раствора, как показано на рисунке 1, с депрессионной кривой 1 до депрессионной кривой 2. После чего гидроизоляционный раствор подается в добычные скважины начиная с периферии и двигаясь к центру блока, сокращая объем продукционного раствора в недрах, то есть вытесняя его.

К преимуществам метода можно отнести:

- Экологичность. Удержание флюида позволит уменьшить загрязнение грунтов и грунтовых вод.
- Экономичность. Уменьшение расхода рабочего раствора, что уменьшает затраты на него (система оборота флюида становится более замкнутой и изолированной). Уменьшение потерь полезного ископаемого.

• Технологичность. Гидроизоляция позволяет поднять пластовое давление без увеличения потерь, что в свою очередь увеличивает область применения методов физико-

химической геотехнологии, так как уменьшаются требования к всасывающему оборудованию, что позволяет увеличить возможную глубину добычи.

Также увеличение давления может интенсифицировать процесс растворения, однако для оценки данного факта необходимы лабораторные исследования.

Возможность более тонкого управления режимом движения жидкостей в пласте.

Однако стоит отметить недостатки и потенциальные проблемы данного метода:

- Большие расходы гидроизоляционного раствора. Значительно превосходящие расход рабочего раствора при традиционных методах скважинной ФХГТ.

Потенциальные проблемы в применении данного метода при разработке месторождений могут быть связаны в первую очередь со сложностью горно-геологических условий. Анизотропия, которая может быть широко развита в продуктивных пластах типичных для месторождений соответствующего (инфильтрационного) генезиса, существование которой им и обусловлено, и которая также актуальна для тел жильной формы, приводит к появлению ряда проблем, связанных с распределением гидроизоляционного раствора, а значит в перспективе и внутрипластового давления. Другая потенциальная проблема, которая может возникнуть при разработке – проблема распределения раствора в горной породе, из-за фильтрующих свойств горных пород – фильтруясь раствор постепенно снижает свою концентрацию, так как взвесь находящаяся в растворе будет задерживаться порами, на достижение необходимой концентрации глинистых частиц в растворе, а значит и его плотности могут потребоваться ощутимые затраты времени. Также крупной проблемой может стать кольматация гидроизоляционным раствором – раствор, используемый для гидроизоляции рудного тела, потенциально может изолировать сам себя в скважинах. С эколого-экономической точки зрения достаточно строгие требования должны предъявляться к раствору, который будет использоваться для гидроизоляции рудного тела, он должен отвечать таким параметрам как экологичность, дешевизна производства и логистики, а также эффективность применения на том или ином конкретном объекте, в частности должен содержать активно мигрирующие рабочие компоненты для преодоления сложностей, описанных выше.

Исходя из вышеописанного серьезные требования предъявляются также к предварительному геологическому и гидрогеологическому исследованию недр предшествующему разработке месторождения, также должно быть проведено геофизическое исследование массива с целью установления всех необходимых параметров пород, вмещающих рудное тело (коэффициенты фильтрации, трещиноватость и прочие). Также стоит отметить необходимость мониторинга гидрогеологических условий, так как из-за специфики метода неизбежно их изменение, в следствие чего должны вноситься корректировки в режим работы технологических скважин.

Выводы

Представленный в статье метод может найти применение в следующих условиях:

- Недопустимость значительных эксплуатационных потерь полезного ископаемого в связи с высокой стоимостью полезного ископаемого, его стратегической ценностью, либо по другим причинам.
- Превышение глубины, допускающей добычу традиционными методами физико-химической геотехнологии при современном уровне развития технологий и техники, применяемых в горном деле.
- Необходимость сокращения потерь раствора в связи с его дороговизной либо экологическим эффектом.

- Необходимость повышения качества рекультивации недр в связи с их близким расположением к населенным пунктам, водным объектам или природоохранным территориям.
- Разработка месторождений с низким содержанием полезного ископаемого.

Библиография

1. Аренс В.Ж., Физико-химическая геотехнология: Учеб. пособие. – М.: Издательство Московского горного университета, 2001. – 656 с.
2. Гавич И.К. – Гидрогеодинамика – М.: Недра 1988. – 344 с.
3. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнений подземных вод: Учебник для вузов. – СПб.: Наука, 2020. – 559 с
4. Языков В.Г. Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (гидрогенных) месторождений урана: учебное пособие / В.Г. Языков, А.В. Легавко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 95 с.

***О важности преподавания дисциплины «Теория горения и взрыва»
для всех направлений подготовки в МГРИ (МГРИ)***

Насыров А.А.* (МГРИ, nasyrovaa@mgri.ru)

Аннотация

Интенсивное развитие всех отраслей промышленности, революционные решения по росту энергоэффективности процессов сжигания различных видов топлив, переход на многокомпонентную составляющую горючих веществ и окислителей, новые подходы к разработке композитных материалов для высокотемпературных двигателей. необходимость импортозамещения и развития военного дела, требует от современных российских инженеров хорошей ориентации в вопросах теоретических знаний о процессах горения, детонации и взрыва.

Растут технологические, экологические и экономические требования к безопасности и экономичности энергетических установок, расходу топлив, их составу и стоимости. Проведение СВО показало жизненную необходимость владения населением основами знаний по взрывному делу, защите от поражающих факторов взрыва, минимизации и нейтрализации теплового излучения, обеспечению собственной безопасности в случаях пожаров и внезапных чрезвычайных ситуаций. Все это требует введения преподавания дисциплины «Теория горения и взрыва» для всех студентов, независимо от названия факультета и направления подготовки, дисциплины, которая давала бы подробные знания по данным актуальным перечисленным направлениям с возможностью практических расчетов.

Ключевые слова

Теория горения, теория взрыва, окислительно-восстановительные реакции, охрана труда, безопасность работ, военное дело, комплексность горно-геологического образования

Теория

Дисциплина «Теория горения и взрыва» (ТГВ), читаемая в текущий момент на кафедре Горного дела для нескольких специальностей и направлений подготовки, отражает злободневность и актуальность решаемых сегодня народнохозяйственных и научных задач, являясь, по своей сути и содержанию, междисциплинарным интегральным направлением развития классических образовательных дисциплин: математики, физики, химии, а также большого ряда спецдисциплин[2].

В курсе ТГВ можно выделить три главных раздела. Первая составляющая дисциплины - Теория горения – дает понятия о принципах осуществления окислительно-восстановительных реакций, возможностях условий их протекания в природных и искусственных средах, позволяет рассчитывать наиболее энергетически, экономически и экологически выгодные пропорции горючего и окислителя для ведения реакций с максимальным выделением теплоты и минимальным образованием экологически опасных продуктов горения[3]. Рассматриваются стадийности превращения твердых и жидких топлив в газообразное состояние, вопросы кинетики и температурных режимов горения твердых, жидких, капельных, аэрозольных и газообразных видов топлива[4].

Подробно рассматриваются способы создания оптимального контролируемого очага горения, конструкции и эксплуатация топок, печей, котлов, двигателей внутреннего сгорания и отопительных устройств. Изучаются способы подачи и регулирования окислителя, механизмы оптимального смешивания с горючим и подготовки горючей смеси. Отдельно несколько занятий посвящаются очень важной теме курса – изучению и расчету кислородного баланса химических реакций горения и окисления. С учетом специфики вуза и различных

направлений подготовки, изучение кислородного баланса может быть связано с процессами изучения образования и окисления пород, руд и минералов (направление «Геология»); закономерностей видоизменения полезных ископаемых, добытых руд и отвалов хвостохранилищ («Инженерная геология», «Горное дело», «Геотехнология», «Экология», «Экономика»); с изменением прочностных свойств пород, руд, грунтов и почв при окислительно-восстановительных реакциях («Горное дело», «Технология геологической разведки», «Инженерная геология», «Прикладная геология», «Бурение», «Геофизика», «Строительство»), с изменением химических свойств жидкостей («Гидрогеология»). Даже, казалось бы, на первый взгляд, далекие от «Теории горения и взрыва» направления подготовки «Экономика» и «Менеджмент» и то сильно зависят от прогнозов подсчета ценности запасов и его изменений со временем, с учетом неизбежного метаморфизма полезных ископаемых с течением времени при отработке месторождения за счет начала их активного окисления. Глубина зоны окисления, формы развития, скорость происходящих там реакций, трещиноватость и крупность добываемого п.и. непосредственно будут определять порядок его разработки, сортность, затраты, цену и прибыль. Кроме того, знания процессов горения и взрывных работ, как весьма затратных в деле разведки, добычи и переработки п.и., будут способствовать выработке у экономистов и менеджеров энергоэффективного ресурсосберегающего подхода к освоению недр.

Особое место в дисциплине ТГВ занимает рассмотрение понятия калорийности топлив: рассматриваются их виды, пути естественного и искусственного происхождения, даются расчеты расходов и запасов различных видов топлив исходя из калорийности, делаются выводы по оптимизации их составных частей. Осуществляются анализ и обучение расчету энергетического баланса различных устройств, в т.ч. энергетических и биологических объектов, формулируются основы энергоучета и энергоаудита предприятия, энергодиет для человека в зависимости от возраста, пола и физических нагрузок. Дается представление об энергетике, источниках и механизме образования парникового эффекта. В курсе дисциплины ТГВ также затрагиваются актуальнейшие вопросы теплопередачи, теплоизоляции и теплопотерь в различных средах, приводятся методики расчета отопления производственных и жилых помещений, потерь тепла при горении и способы его утилизации (направление «Энергетика»).

Немаловажное значение имеет изучение зольности топлив, влияния содержания различных видов примесей и летучих веществ, влажности, как условий эффективного его использования, что важно для исследования и опробования залежей углей, торфов, сланцев, различных углеводородов, соблюдению экологических требований к их сжиганию (направление «Нефтегазовое дело», «Экология»).

Второй большой раздел теории ТГВ – Теория взрыва – заставляет обучаемого отличать реакции горения от реакций детонации и взрыва. Это важно для понимания механизма генерирования удельной мощности вышеперечисленных процессов, которые могут быть использованы для достижения различных целей: разрушения различных сред и синтеза материалов, а также выработки защиты от воздействия основных поражающих факторов: осколков, ударной волны, высокой температуры и сейсмических волн.

Изучение этого раздела устанавливает закономерности осуществления и протекания различных видов взрывов, их механизмы, скорости разрушения и синтеза различных веществ, материалов, скорости передачи механических и электромагнитных колебаний, скорости детонации, что способствует пониманию таких важных дисциплин как физика, химия, материаловедение, научно-образовательных и производственных направлений - геофизики, сейсмологии, горного и военного дела, бурения, нефтегазодобычи, экологии, БЖД и т.д.

Раздел теории взрыва связан также с пониманием закономерностей поведения газозвушных смесей при воздействии на них химических веществ, температуры, пламени,

взрывной волны, а также с изучением их поведения при нахождении под большим давлением и при разряджении. Особое внимание уделяется правилам обращения с метановоздушными смесями и производственной пылью в условиях горных и разведочных работ. Дается анализ производства взрывчатых материалов, рассматриваются химические реакции их приготовления, применения и условия использования[1]. (направления «Горное дело», БЖД). Производятся экологические расчеты по допустимому воздействию взрыва на окружающую среду, минимизации нежелательных разрушений, образования ядовитых и отравляющих веществ («Экология», БЖД, «Техносферная безопасность»).

Оба вышеупомянутых раздела способствуют формированию и пониманию третьего, вспомогательного раздела дисциплины – «Основы пожарной безопасности при осуществлении реакций горения и взрыва». Это, по сути, часть предмета «Основы безопасности жизнедеятельности», которая в более развернутом виде представляет собой рассмотрение условий безопасности применительно к созданию и использованию различных видов топлива, двигателей внутреннего сгорания, промышленных котельных, реакторов, а также к производству взрывов, изготовлению, хранению и применению взрывчатых веществ и материалов.

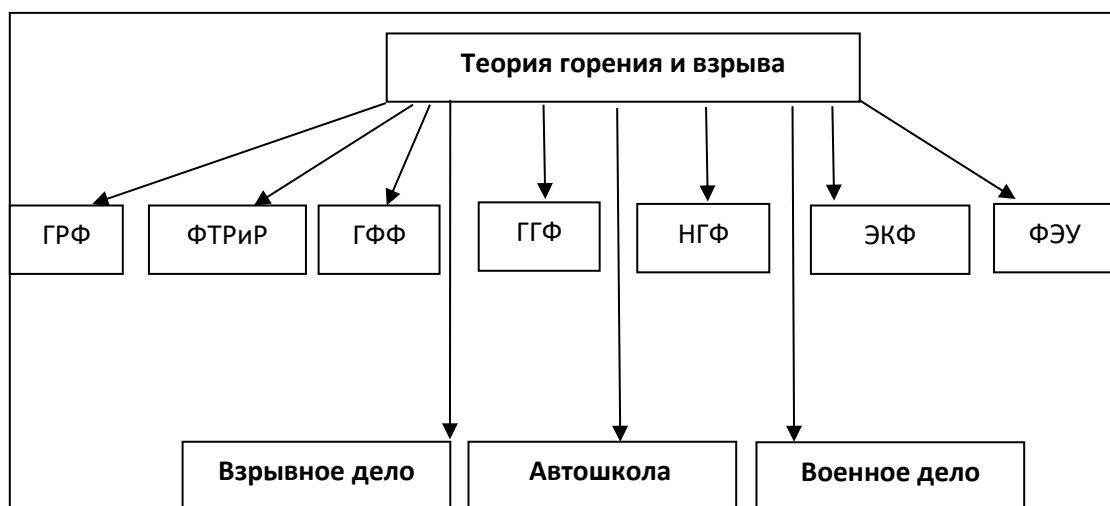


Рисунок 1. Взаимосвязь дисциплины «Теория горения и взрыва» с факультетами и направлениями подготовки

В третьем разделе дисциплины изучается теория возникновения, локализации и тушения пожаров различных веществ и объектов исходя из принципа теории горения по условиям возникновения компонентов очага: одновременности присутствия горючего, окислителя и температуры, необходимой для возникновения и осуществления горения; изучаются условия возникновения детонации и взрыва в различных веществах и системах, что крайне важно для обеспечения безопасности будущих научных и технических работников, связанных с данными явлениями. Кроме того, приводятся меры защиты населения и объектов от возникновения пожаров и взрывов, раскрывается суть организации противопожарных мероприятий, изучаются технические средства по предотвращению и извещению персонала организаций о возгораниях или угрозе взрыва, производится ознакомительное посещение учащимися пожарной части (направления БЖД, «Техносферная безопасность»).

Знания, излагаемые в данном разделе, ценны для всех без исключения учащихся, т.к. позволяют сохранять самое главное для человека - собственное здоровье и жизнь в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций и военной угрозе.

Таким образом, дисциплина «Теория горения и взрыва», как мы видим, затрагивая и аккумулируя часть знаний многочисленного ряда дисциплин и образовательных направлений, существенно укрепляет эти знания углубленным изучением трех вышеперечисленных разделов. Как видно из перечня вопросов, охватываемых дисциплиной «Теория горения и взрыва», знания по данному разделу полезны и остро необходимы всем направлениям подготовки и специальностям МГРИ на его факультетах, а также на курсах по взрывному делу, в автошколе и занятиях по военной подготовке (рис.1).

Выводы

Из проведенного исследования видно, что перечисленные в преподаваемом курсе ТГВ темы существенно содействуют изучению таких учебных дисциплин и направлений, как физика, химия, теплотехника, горное дело, строительство, БЖД, техносферная безопасность, экономика, энергетика, климатология, экология, военное дело, медицина и ряда других, способствуя расширению профессионального кругозора и формированию комплексности горно-геологического образования.

Исходя из вышеизложенного, представляется целесообразным внесение предложения в учебный отдел вуза о включении дисциплины «Теория горения и взрыва» в учебные планы всех направлений обучения во МГРИ, как необходимой, злободневной и актуальной системы знаний, ощутимо усиливающей качество профессиональной подготовки современного инженера - будущего горного менеджера.

Библиография:

1. Багдасаров Ш.Б., Верчеба А.О., Пальмов И.И. Справочник горного инженера геологоразведочных партий /М.: Недра, 1986 – 357с
2. Ганьшина Г. В. Методика преподавания специальных дисциплин: учебное пособие для вузов / М., Изд-во Юрайт, 2025. -156 с
3. Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С.. Теория горения и взрыва. Практикум. /М.: Форум, 2012 – 352с
4. Лепешкин О.М., Доронин А.С. Теория горения и взрыва. Уч. пособие./ СПб., 2023 – 165с

Использование машинного обучения и искусственного интеллекта для прогнозирования модуля Юнга с целью оптимизации процесса бурения скважин

***Нгуен Тьен Хунг* (Ханойский горно-геологический университет,
nguyentienhung.dk@humg.edu.vn),***

***Ву Хонг Зыонг (Ханойский горно-геологический университет,
vuhongduong@humg.edu.vn),***

***Ву Тьет Тхатъ (Ханойский горно-геологический университет, vuthietthach@humg.edu.vn),
Арсентьев Ю.А. (МГРИ, arsentev1956@yandex.ru)***

Аннотация

Бурение нефтяных (газовых) скважин часто сопровождается большим количеством проблем, таких как аномальные давления, прихваты колонн бурильных и обсадных труб, нарушение целостности стенок ствола скважины, поглощение буровых и тампонажных растворов и осложнения при спуске вспомогательного оборудования на проектную глубину. На практике, отдельные виды осложнений можно предупредить, если геомеханические параметры, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, напряжение бокового распора (in-situ) и другие, будут предварительно определены с высокой степенью точности. Тогда можно будет предложить оптимальные стратегии бурения скважин, позволяющие инвесторам сократить материальные затраты на процесс их сооружения. С этой целью авторы разработали модель искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования параметра - модуля Юнга - на основе использования данных геофизического каротажа для трех скважин на нефтяном месторождении СТ (Вьетнам). Сведения, полученные из скважин А и В, использовались в качестве обучающего набора маркированных данных с предопределенными результатами, а информация - из скважины С применялась для слепого тестирования и оценки адаптации модели ИНС к конкретным условиям бурения. Прогнозируемый, с помощью модели ИНС, модуль Юнга показал очень высокую степень точности определения, с коэффициентом корреляции около 97%, по сравнению с модулем Юнга, рассчитанным по данным геофизического каротажа скважин или с использованием традиционных методов.

Ключевые слова

Машинное обучение, бурение скважины, модуль Юнга, искусственный интеллект

Теория

Существует несколько методов определения модуля Юнга горных пород, среди которых наиболее распространенным является традиционное испытание лабораторных образцов керна на одноосное сжатие [5,2]. Однако лабораторные работы затратны как во временном, так и в стоимостном отношении. Поэтому некоторые исследователи для оценки модуля Юнга изучили альтернативные методы, основанные на эмпирических корреляциях [6,3]. В последнее десятилетие применение машинного обучения, как направления искусственного интеллекта (ИИ), позволило прогнозировать в реальном времени бурения, например, модуль Юнга горных пород, используя данные геофизического каротажа скважин, демонстрируя при этом эффективность данного подхода по сравнению с традиционными методами. В связи с этим можно обратить внимание на некоторые публикации, описывающие результаты применения ИНС.

В 2019 году Гонг и др. [4] применили сеть ИНС для определения модуля Юнга. Входные данные из сланцевого месторождения Фулин и сланцевого месторождения Утика в Аппалачском бассейне включали информацию о характеристиках трещин, геомеханических параметрах и литологическом составе, которые были собраны с помощью анализа

изображений сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), интерпретации данных геофизического каротажа скважин и анализа образцов керна. Техники кластеризации К-средних, иерархической и РАМ (разбиение вокруг медоидов) использовались для группировки этих данных в три различных литофации. Затем модель сети ИНС использовалась для определения модуля Юнга для каждой литофации. В 2020 году исследование Аджана и др. [1] предсказало геомеханические параметры (коэффициент Пуассона, горизонтальный модуль упругости, модуль Юнга, объемный модуль упругости) на основе сейсмических и данных каротажа скважин на месторождении АЖАН у побережья дельты Нигера с использованием сети ИНС. Коэффициенты корреляции по прогнозированию геомеханических параметров с использованием модели ИНС были выше 0,65.

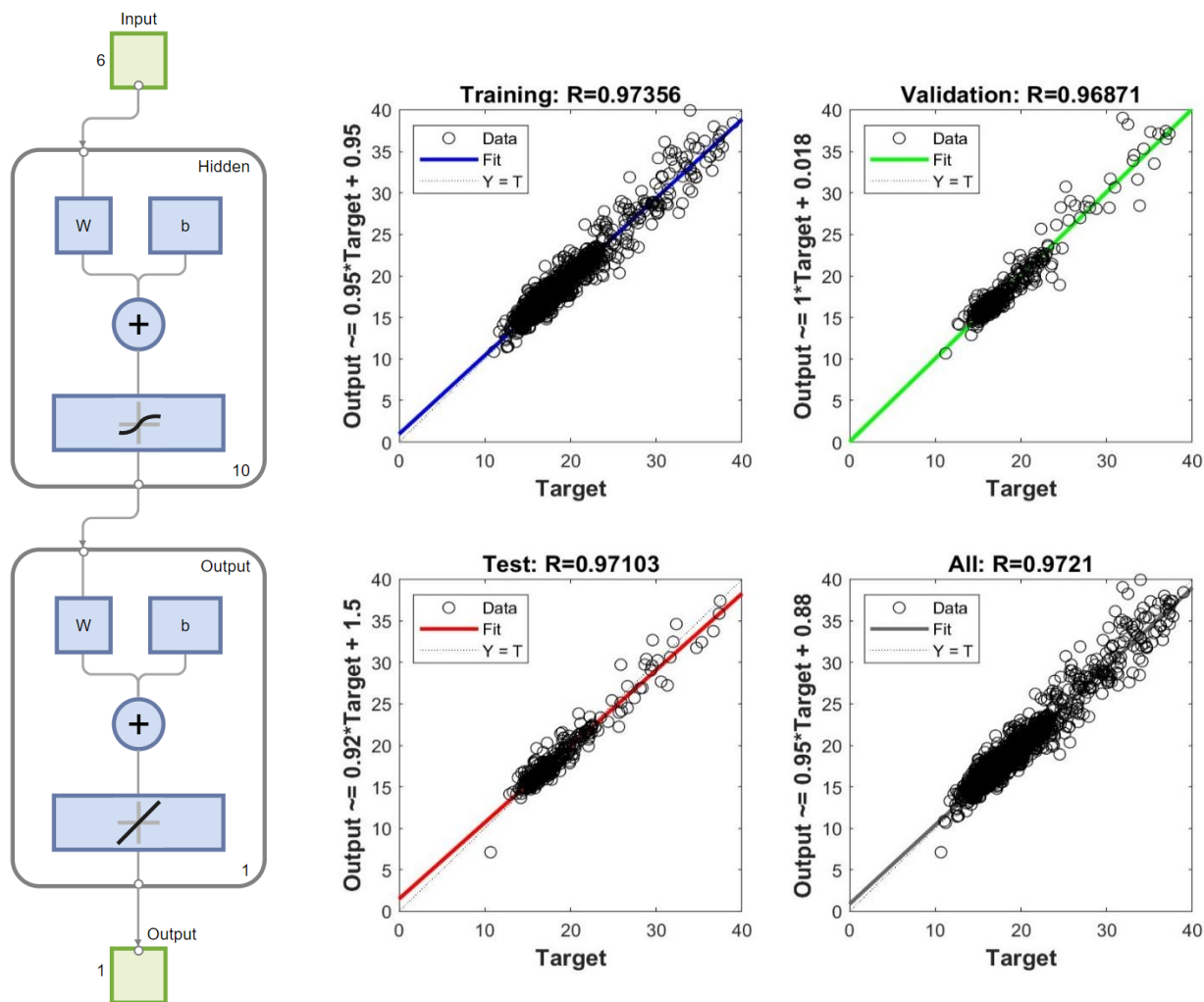


Рисунок 1. Модель ИНС для прогнозирования модуля Юнга

В данном сообщении приводятся результаты применения ИНС с алгоритмом обучения обратного распространения (BPNN) и логсигмоидальной функцией активации для прогнозирования модуля Юнга на основе параметров бурения (Рис. 1). Обучающий набор данных, составленный на основе 986 образцов керна, полученного из 2-х (А и В) скважин на нефтяном месторождении СТ (Вьетнам), был разделен на три отдельно взятых набора. Первый набор составляет 70% образцов керна, используемых для обучения сети; второй набор составляет 15% керна материала, предназначенного для тестирования, и третий набор составляет 15% изучаемых образцов для проведения валидации. При этом в качестве входных

данных рассматриваются шесть параметров бурения: механическая скорость бурения (ROP), частота вращения (RPM), нагрузка на долото (WOB), давление в стояке (SPP), расход промывочной жидкости (FLW) и крутящий момент (TQ), а выходного параметра модели ИНС - значение модуля Юнга. Можно наблюдать, что прогнозируемые результаты модуля Юнга из модели ИНС имеют очень высокую корреляцию с набором образцов (R примерно 0.97). Для объективной оценки и подтверждения превосходства модели прогнозирования авторы использовали данные бурения из скважины С (которая не использовалась в процессе обучения сети) для слепого теста. Результаты показывают, что параметр модуля Юнга, прогнозируемый моделью, имеет высокую корреляцию и очень низкую среднюю квадратичную ошибку по сравнению с фактическими значениями модуля Юнга (рисунок 2).

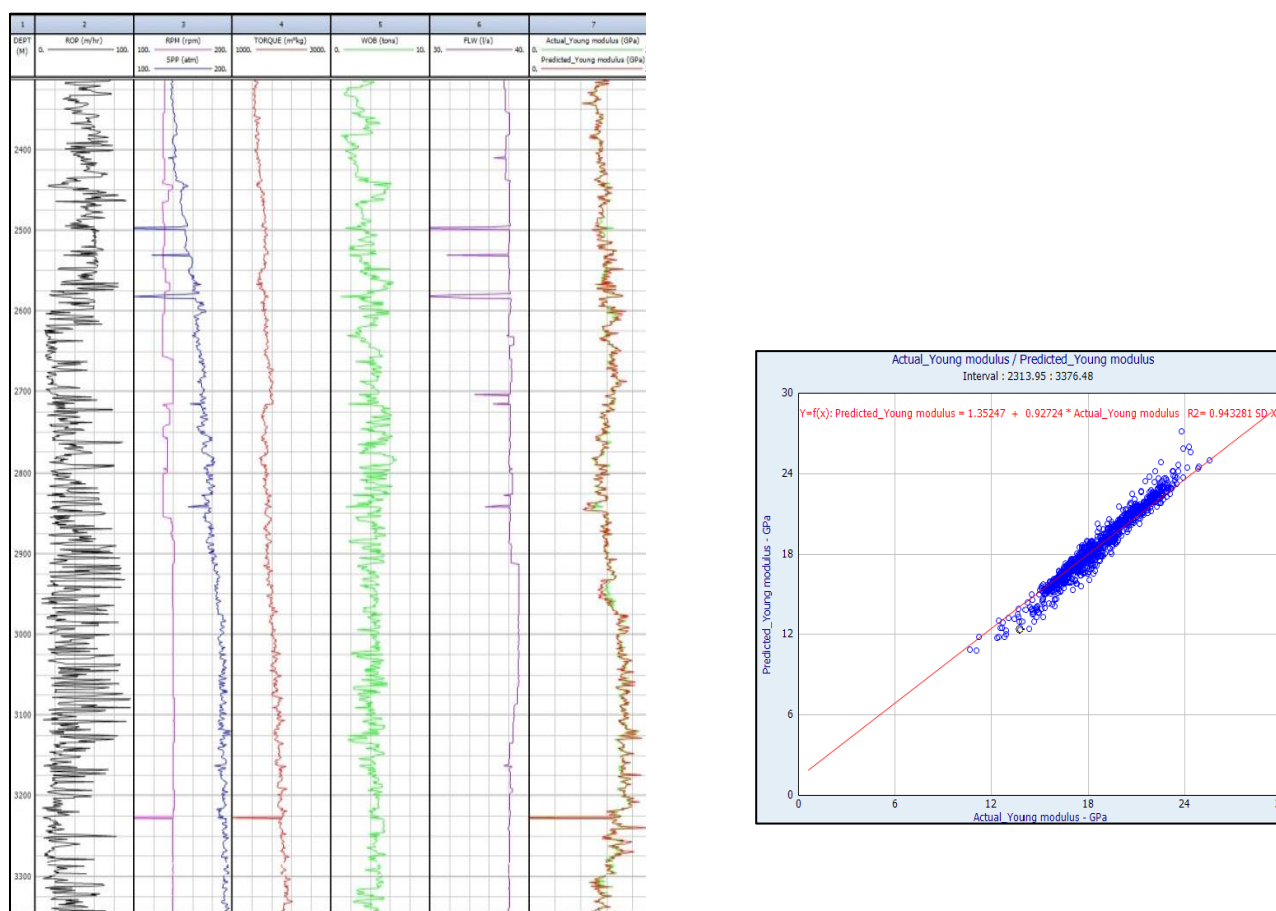


Рисунок 2. Результат слепого теста

Выводы

Анализ результатов исследований показывает, что методы, формируемые на основе ИИ, значительно превосходят традиционные подходы, предлагая более высокую степень точности прогнозирования величины модуля Юнга и других геомеханических параметров с целью оптимизации процесса бурения и минимизации потенциальных осложнений, возникающих при бурении нефтяных скважин.

Благодарности

Это исследование поддержано Ханойским университетом горного дела и геологии в рамках гранта номер T25-09.

Библиография

1. Ajah N.J., Dosunmu A., Akaolisa C.C.Z., et al. (2020). Analysis of Elastic Geomechanical Properties Derived From Well Log and Seismic Data, Using Artificial Intelligence (ANN): A Case Study of “AJAH” Field Offshore Niger Delta. 8(1), 19–27.
5. Brady B.H.G., Brown E.T., 2006. Rock Mechanics for underground mining, Third edition with corrections, Springer, 2006.
6. Castagna, J. P., Batzle, M. L., Kan, T. K., & Backus, M. M. (1993). Rock physics—The link between rock properties and AVO response. Offset-dependent reflectivity—Theory and practice of AVO analysis: SEG, 8, 135-171.
7. Gong Y., Mehana M., Xiong F., et al. (2019). Towards Better Estimations of Rock Mechanical Properties Integrating Machine Learning Techniques for Application to Hydraulic Fracturing. Day 1 Mon, September 30, 2019, Calgary, Alberta, Canada, SPE, D011S017R005, D011S017R005
8. Malkowski, Piotr, and Lukasz Ostrowski, 2017. "The Methodology for the Young Modulus Derivation for Rocks and Its Value." Paper presented at the ISRM European Rock Mechanics Symposium - EUROCK 2017, Ostrava, Czech Republic, June 2017.
9. Mansoor Zoveidavianpoor. An integrated approach in determination of elastic rock properties from well log data in a heterogeneous carbonate reservoir, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 153, 2017, Pages 314-324, ISSN 0920-4105.

Прогнозирование проницаемости карбонатных резервуаров месторождений нефти с использованием метода гидравлических единиц потока

***Нгуен Тьен Хунг* (Ханойский горно-геологический университет,
nguientienhung.dk@humg.edu.vn),***

***Дыонг Ву (Ханойский горно-геологический университет, vuhongduong@humg.edu.vn),
Арсентьев Ю.А. (МГРИ, arsentev1956@yandex.ru)***

Аннотация

Настоящее исследование было направлено на подтверждение возможности приложения классификации литологических типов пород, рассматриваемых в качестве самостоятельных гидравлических единиц потока, для прогнозирования проницаемости карбонатных резервуаров на Х-геологическом разрезе бассейна Кыу Лонг (Вьетнам), с использованием отдельных исследуемых образцов керна. Полученные результаты позволили выявить закономерности развития улучшенных фильтрационно-емкостных параметров в скважинах в пределах изучаемых структур с целью их дальнейшего распространения в межскважинном пространстве.

Ключевые слова

Проницаемость, Кыу Лонг бассейн, гидравлические единицы потока

Теория

Карбонатные природные резервуары являются источником приблизительно 60% мировых запасов нефти и газа. Учитывая их значимость и сложность структуры сообщающихся каналов, были проведены обширные исследования [1, 5, 3]. Авторы указывают на гетерогенность карбонатных резервуаров и акцентируют внимание на необходимости формирования их классификации на основе набора определенных литологических типов пород, которые обладают одинаковыми структурно-петрографическими свойствами и регулируются структурой порового пространства и минералогической составляющей, определяющих главные петрофизические свойства коллектора - пористость и проницаемость. В связи с этим, именно, литологические типы пород могут быть выделены в качестве самостоятельных гидравлических единиц потока, имеющих связь как со статическими (пористость), так и динамическими (абсолютная и фазовые проницаемости) параметрами резервуара.

Проницаемость является первостепенным параметром, влияющим на определение динамики добычи нефти. Следовательно, при определении проницаемости необходим метод, который бы позволял с учетом структуры порового пространства отдельных исследуемых образцов керна добиться лучшей корреляции петрофизических зависимостей. Одним из таких методов является метод гидравлических единиц потока (Hydraulic Flow Unit - HFU), суть которого заключается в объединении пород с близкими характеристиками порового пространства и физико-химических свойств в одну единицу, называемую гидравлической единицей потока. Таким образом, чтобы выделить единицы потока, рассчитывается индикатор FZI, который представляет собой отношение проницаемости к пористости и характеризует средний гидравлический радиус поровых каналов, по формуле вида (1):

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s} \tau S_{gv}}. \quad (1)$$

При этом вводится понятие индикатора потока зоны IPZ, численно равного FZI и характеризующего поровую структуру (площадь поверхности и кривизну) горной породы. Индикатор IPZ является специфическим для каждой гидравлической единицы потока.

Используя данные ртутного анализа свойств керна (РАК), полученного из 14 скважин на X-геологическом разрезе бассейна Кыу Лонг (Вьетнам), интерпретации данных ГИС и расчета индикатора FZI был построен кумулятивный график IPZ (Рисунок 1).

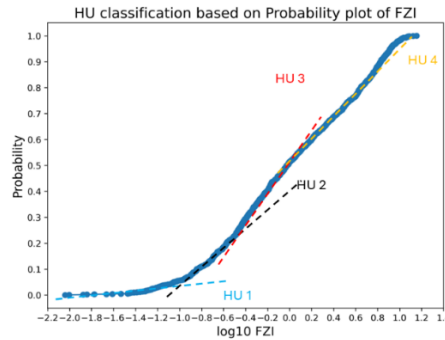


Рисунок 1. Кумулятивный график IPZ

В результате были выделены 4 (четыре) группы коллекторов (ГЕП) с близкими характеристиками порового пространства (Рисунок 2).

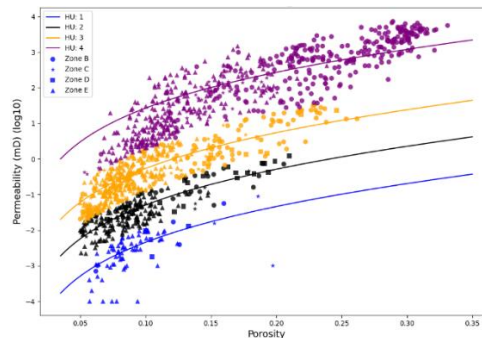


Рисунок 2. Классификация коллекторов (ГЕП) на основе данных о петрофизических параметрах отобранных из скважин образцов керна

После установления числа групп ГЕП были определены методом наименьших квадратов (МНК) средние значения индикатора потока зоны IPZ_{cp} для каждой группы, которые приведены в табл.1. Затем с помощью эмпирических уравнений, составленных для обозначенных гидравлических единиц потока, с учетом следующего подхода была рассчитана проницаемость k .

Из уравнения Кармана-Козени и принятого обозначения следует, что

$$\sqrt{\frac{k}{\phi_e}} = \frac{1}{\sqrt{F_s} \tau_{gv}} * \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} = IPZ_{cp} * PHIZ, \quad (2)$$

где: PHIZ – параметр эффективной пористости, доли ед.

Возведем левую и правую части выражения (2) в квадрат, получим

$$\frac{k}{\phi_e} = IPZ_{cp}^2 * \frac{\phi_e^2}{(1-\phi_e)^2} = IPZ_{cp}^2 * PHIZ^2. \quad (3)$$

Решая его относительно проницаемости k коллектора, имеем

$$k = IPZ_{cp}^2 * \frac{\phi_e^3}{(1-\phi_e)^2} = IPZ_{cp}^2 * PHIZ^2 * \phi_e. \quad (4)$$

Тогда эмпирическое уравнение, аппроксимирующее фактические сведения, полученные для каждой гидравлической единицы потока, с учетом выражения (4) будут иметь вид (5), указанный в табл.1.

$$k = 1014,24 * IPZ_{cp}^2 * \frac{\phi_e^3}{(1-\phi_e)^2}. \quad (5)$$

Таблица 1. Классификация гидравлических единиц потока и прогнозирование проницаемости

(HU)	Количество образцов	IPZ			Результат прогноза проницаемости		
		Мин	Макс	Средн.	R ²	MSE	Уравнение
1	81	011	062	096	25	.412	$4.24 * (0.05932) * (PHIE^3) / (1-PHIE)^2$
2	227	063	241	331	681	.317	$4.24 * (0.24212) * (PHIE^3) / (1-PHIE)^2$
3	415	305	649	458	763	.212	$4.24 * (0.6342) * (PHIE^3) / (1-PHIE)^2$
4	579	112	138	271	324	.357	$4.24 * (4.2182) * (PHIE^3) / (1-PHIE)^2$

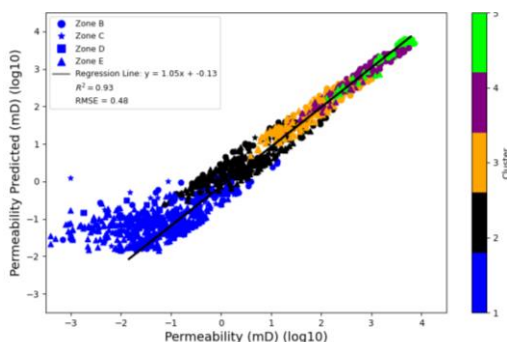


Рисунок 3. Сравнение предсказанной проницаемости и проницаемости данных образцов керна

Совпадение предсказанных значений проницаемости с величиной проницаемости набора данных для образцов керна, указывает на высокую степень корреляции ($R^2 = 0,93$; $RMSE = 0,48$), подтверждая, тем самым, эффективность применения метода NFU для построения гидродинамической модели карбонатного резервуара.

Выводы

1. Карбонатные породы на X-геологическом разрезе бассейна Кыу Лонг (Вьетнам), демонстрируют «высокую» гетерогенность, с проницаемостью от менее 1 мД до более 2000 мД.
2. Связь между пористостью и проницаемостью является нелинейной функцией и зависит от гидравлической единицы потока.

3. Индивидуальный вид эмпирического уравнения, составленного для определения проницаемости каждой из четырех гидравлических единиц потока (ГПЕ), увеличивает степень точности прогнозов.

4. Для дальнейшего повышения точности и надежности прогнозирования запасов рекомендуется, в дополнение к результатам ртутного анализа кернового материала (РАК), учитывать интерпретации данных геофизических исследований скважин.

Библиография

1. Amaefule, Jude O., Altunbay, Mehmet, Tiab, Djebbar, Kersey, David G., and Dare K. Keelan, 1993. Enhanced Reservoir Description: Using Core and Log Data to Identify Hydraulic (Flow) Units and Predict Permeability in Uncored Intervals/Wells. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, October 1993. doi: <https://doi.org/10.2118/26436-MS>

2. Amanat Ali Bhatti, Atif Ismail, Arshad Raza, Raoof Gholami, Reza Rezaee, Ramasamy Nagarajan, Eric Saffou, 2020. Permeability prediction using hydraulic flow units and electrofacies analysis, Energy Geoscience, Volume 1, Issues 1–2, 2020, Pages 81-91, ISSN 2666-7592, <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.04.003>

3. Amaefule, J.O., et al. (1993) Enhanced Reservoir Description: Using Core and Log Data to Identify Hydraulic (Flow) Units and Predict Permeability in Uncored Intervals/Wells. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, October 1993, 205-220. <https://doi.org/10.2118/26436-MS>

4. Al-Ajmi, Fahad A., Aramco, Saudi, and Stephen A. Holditch, 2000. Permeability Estimation Using Hydraulic Flow Units in a Central Arabia Reservoir. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 2000. doi: <https://doi.org/10.2118/63254-MS>

5. Dunham, R.J. (1962) Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In: Ham, W.E., Ed., Classification of Carbonate Rocks, AAPG, Tulsa, 108-121.

6. Khalid, Mostafa & Desouky, Saad & Rashed, Mohammed & Shazly, Tarek & Sediek, Kadry. (2019). Application of hydraulic flow units' approach for improving reservoir characterization and predicting permeability. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 10. 10.1007/s13202-019-00758-7.

Определение области влияния микросейсмического события на массив горных пород в процессе сейсмомониторинга угольных шахт и рудников

**Романевич К.В.* (АО ВНИМИ, ИГД СО РАН, romanevichkirill@yandex.ru),
Мулев С.Н. (АО ВНИМИ, info@vnimi.ru),
Иванов Д.А. (АО ВНИМИ, info@vnimi.ru)**

Аннотация

В работе проведено численное моделирование влияния микросейсмических событий на напряжённо-деформированное состояние (НДС) массива горных пород. Задача рассматривалась в плоской постановке для трёх значений энергии сейсмособытий: 4, 33 и 112 кДж. Установлено, что максимальные отклонения главных напряжений в массиве зависят от объёма очага сейсмособытия, его расположения относительно горной выработки и степени снижения упруго-прочностных свойств пород в зоне очага. Отклонения главных напряжений наблюдаются на расстояниях 20-100 м и более от контура области сейсмособытия в зависимости от направления и компоненты напряжений. Эти данные необходимо учитывать при оценке устойчивости пород, окружающих горные выработки.

Ключевые слова

Массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, сейсмособытие, сейсмомониторинг, численное моделирование, GITS, Fidesys

Источники финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>.

Теория

Нормативными документами по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях склонных и опасных по горным ударам, а также инструкциями по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных и рудных месторождений предусмотрено выполнение регионального прогноза динамических явлений по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям. Этот вид прогноза проводится на шахтах и рудниках для выявления зон активизации сейсмических и геодинамических процессов во вмещающих массивах и основан на мониторинге горных пород системами, состоящими из совокупности технических средств, предназначенных для реализации функций регистрации, сбора, отображения, хранения и анализа информации (системами сейсмомониторинга – шахтными сейсмостанциями).

В настоящее время на ряде шахт и рудников России функционируют системы сейсмомониторинга GITS, производства АО ВНИМИ. В результате автоматизированного круглосуточного мониторинга вмещающих массивов горных пород формируются каталоги сейсмической активности с фиксацией в них координат и энергий всех динамических проявлений горного давления, происходящих в контролируемых зонах и проявляющихся в форме микросейсмических событий.

По силе и характеру динамические проявления горного давления на шахтах и рудниках, подразделяются на горно-тектонические удары, собственно горные удары, микроудары, толчки и стреляния. К внешним признакам, характеризующим склонность массива к динамическим проявлениям горного давления, относятся интенсивное заколообразование, шелушение пород (руд), а также акустические звуковые импульсы (хруст, щелчки, треск) на контуре горных выработок. Количество регистрируемых сейсмособытий при подземной

разработке рудных и нерудных месторождений достигает десятков и первых сотен событий различной энергии в сутки.

В ходе накопления базы данных о микросейсмических событиях и анализа этих данных выполняется определение количественных оценок параметров динамических явлений, возникающих в контролируемом массиве горных пород, оценка и районирование сейсмической активности шахтных полей, прогнозирование подготовки и развития процессов хрупкого разрушения напряженного массива горных пород, сопровождающихся сейсмическими проявлениями.

Программное обеспечение системы мониторинга GITS позволяет выгружать из баз данных информацию о событиях за требуемый период времени и осуществлять анализ этой информации, с помощью таких функций как визуализация положения гипоцентров событий на горизонтальных и вертикальных планах шахты (рудника или карьера), визуальная идентификации событий на карте с помощью цветовой дифференциации по энергии, а также по давности события, просмотр графиков статистик – количества событий и их энергии в определенный период времени, классификация различных типов сейсмических событий с использованием методов машинного обучения [3] и др.

Конечным результатом интерпретации является генерация карт сейсмической активности по различным критериям [1,2] с настраиваемыми параметрами и определение удароопасных областей в виде прогнозных карт сейсмической активности, совмещенных с планами горных работ (рис.1).

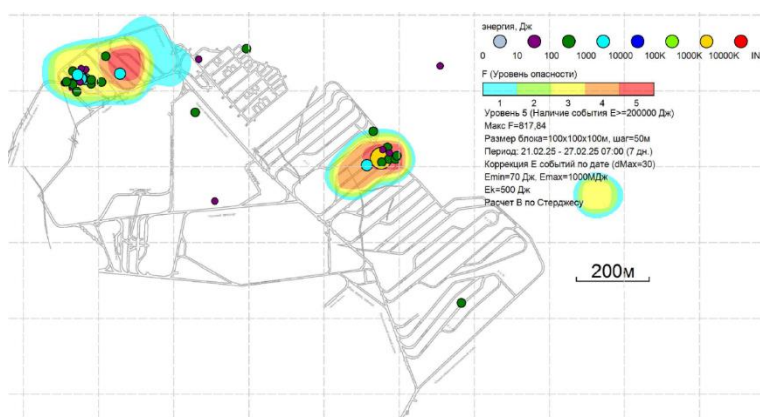


Рисунок 1. Пример карты сейсмической активности, совмещенной с планом горных работ рудника. Точками показаны единичные сейсмические события за одни сутки, цветом показана рассчитанная зона сейсмической активности по методике ВНИМИ [2]

Одной из важнейших задач анализа сейсмических данных, поступающих в ходе сейсмомониторинга шахты или рудника с системы шахтной сейсмостанции является определение области действия очередного микросейсмического события в массиве. Это позволяет на качественном уровне оценивать влияние события на устойчивость горных выработок, попадающих в зону влияния сейсмособытия.

Очаг сейсмособытия представляет собой зону деформаций массива, которая может быть охарактеризована объемом разрушенного материала, и чем больше энергия в очаге, тем больше его размеры. Рассматриваются также различные формы очага (близкая сфере, эллипсу, плоскости, линии и т.п.). Для оценки размера очага при различных его формах используют следующие эмпирические формулы (1-3):

$$r = 1.85 * E c^{0.186}, \text{ м (сфера);} \quad (1)$$

$$L = 2.9 * E_c^{0.24}, \text{ м (плоскость)}, \quad (2)$$

$$W = 2.0 * E_c^{0.21}, \text{ м (плоскость)}, \quad (3)$$

где E_c – сейсмическая энергия события, r – радиус сферы, охватывающий зону неупругих деформаций, L – длина разрыва, W – ширина разрыва.

В рамках данной работы было выполнено определение области влияния микросейсмического события заданной энергии и формы на массив горных пород. Моделирование проводилось в программном комплексе «Fidesys». Задача рассматривалась в плоской постановке.

С учетом формул 2-3 было выполнено моделирование параметров очага сейсмособытия, а также моделирование массива горных пород. Для моделирования влияния сейсмособытий на изменение НДС массива горных пород были выбраны три значения энергии сейсмособытий: 4, 33 и 112 кДж.

Область сейсмособытия моделировалась условно в виде прямоугольника шириной соответственно 11,4, 17,8 и 23,0 м и длиной соответственно 21,2, 35,2 и 47,3 м в зависимости от принятой расчетной схемы, выработка – сводчатой формы, высотой и шириной 5 м. Относительно данной выработки рассматривались различные варианты формирования зоны сейсмособытия, в которой моделировалось уменьшение упруго-прочностных показателей породы в 10 и 100 раз относительно характеристик нетронутого массива. Массив представлен скальной горной породой со следующими характеристиками: модуль упругости – 50 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,25, плотность – 2700 кг/м³.

Размеры модели относительно оси X и Y составляют 250 м. По верхней поверхности модели было задано давление в 8 МПа, а также учтен вес пород в самой модели с помощью задания гравитационных сил. По приложенным нагрузкам и геометрии модели можно сказать, что проходка выработки осуществляется на глубине около 420 м. По боковым и нижней граням модели заданы граничные условия, запрещающие их поступательное перемещение.

Область сейсмособытия располагается на расстоянии 5 м от контура горной выработки. Зона сейсмособытия в зависимости от расчетной схемы моделировалась сбоку, сверху и снизу относительно выработки (рис.2).

Для сопоставления полученных результатов была рассмотрена модель массива горных пород с выработкой без учета формирования сейсмособытия.

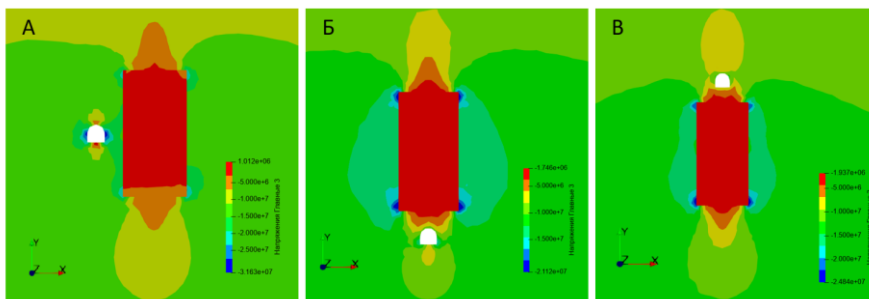


Рисунок 2. Моделирование НДС массива горных пород с выработкой и сейсмособытия в форме разрыва шириной 11,4 и длиной 21,2 на расстоянии 5 метров от выработки (А – сейсмособытие в стороне от выработки; Б – сейсмособытие над выработкой; В – сейсмособытие под выработкой) – распределение главных напряжений (σ_3). В программном комплексе «Fidesys» напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения – положительными

Отклонения главных напряжений наблюдаются на расстояниях 20-100 м и более от контура области сейсмособытия в зависимости от направления и компоненты напряжений, что указывает на значительное влияние зон, в которых произошли сейсмические события на НДС массива.

Выводы

Проведённый анализ результатов моделирования и расчета показал, что максимальные отклонения главных напряжений в массиве горных пород зависят от объёма очага сейсмособытия, его расположения относительно выработки и степени снижения упруго-прочностных свойств массива при моделировании. На данном этапе выявлена качественная зависимость, в дальнейшем в процессе моделирования необходимо рассмотреть различные формы очага и комбинации его параметров, а также различные параметры массива горных пород. Это позволит установить количественные взаимосвязи и определять зону и степень изменения НДС массива в момент регистрации сейсмособытий системой сейсмомониторинга.

Библиография

1. Еременко, А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 12-22. – DOI 10.15372/FTPRPI20220102
2. Питаль М.Н., Мулев С.Н. Программный комплекс GITS2. Руководство по эксплуатации. ВНИМИ, СПб, 2024. 117 с.
3. Романевич К.В., Мулёв С.Н. Автоматизация классификации сейсмических событий при сейсмомониторинге угольной шахты с использованием машинного обучения. Горная промышленность. 2023;(5S):00–00. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-00-00>
4. Сидоров М.С., Лебедев И.М., Мулев С.Н., Тюхрин В.Г. Обеспечение геодинамической безопасности на угольных шахтах. Горная промышленность. 2024;(3S):37–43. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-37-43>

***Повышение контрастности отраженного сигнала георадиолокационного зондирования
под действием фонового поля (поля подсветки)
при поисках кристаллосырья***

Савватеев Я.В.* (ИФЗ РАН им.О.Ю.Шмидта, savvateev-yar@yandex.ru),

Иляхин С.В. (МГРИ, isv11@mail.ru),

Корнилов Б.А. (научно-технический кооператив «Диоген», ntkdiogen48@mail.ru)

Аннотация

Одним из главных методов при разработке месторождений кристаллосырья является извлечение породы при помощи взрывных работ. При этом часть полезного компонента может быть потеряна из-за нарушения целостности кристаллов. Предварительное уточнение зон локализации залегания кристаллосырья, и картирование связанных с ними геофизических аномалий решается применением георадиолокационного зондирования, в том числе скважинными георадарами. Одним из методов решения подобной задачи является также является метод георадиолокационного зондирования, с получением отраженного сигнала под дополнительным действием скважинного источника фонового поля (поля подсветки).

Ключевые слова

Частотный спектр, временной спектр, локальные объекты; прямое Фурье-преобразования, обратное Фурье-преобразование

Теория

Залегание в породе отдельных кристаллов и их скоплений оценивается порядка от 1-3 см до 5-10 см, т.е. для существующих методов геофизических исследований это крайне малое расстояние, чтобы с существующими методиками пространственных разрешений уверенно выделить данные участки на отраженных или дифрагирующих волнах. В целом, разрешающая способность метода определяется различным расстоянием между частотными пиками в координатах ось частот – спектральная плотность [1, 2]. Возможный метод геофизических исследований, позволяющий определять положение подобных объектов – георадиолокационное зондирование, в частности, зондирование высокочастотным георадаром с центральной частотой 1500 МГц и более в области геомассива, непосредственно примыкающего к скважине с георадаром. Осложняющий фактор - глубина зондирования не более 40 – 45 см. По результатам предварительных исследований решено было применить совмещенный георадар АБ-150 МГц/400 МГц с возможностью повышения разрешающей способности метода действием фонового поля (поля подсветки), представляющее собой наложение электромагнитного поля на поле отраженного сигнала георадара. Для эффективного решения рассматриваемой задачи необходимо восстановить исходный спектр [3]. Под воздействием фонового поля происходит смещение спектра в сторону высокочастотной составляющей, в записи проявляются дифракционные волны над локальными объектами (в эксперименте применялись модели горной породы с кристаллами берилла и мориона).

При анализе полученного спектра видно, что повысилась частота полезного сигнала, т.е. имеем аппаратный аналог операции деконволюции [4]. Для оптимального обратного фильтра сжатия желаемым результатом фильтрации является предельно короткий импульс – дельта функция: $g(t) = \delta(t)$.

В результате, из уравнения Винера – Колмогорова

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) b_y(\theta - \tau) d\tau = r_{gy}(\theta) \quad (1)$$

$h(\tau)b_y(\theta - \tau)d\tau = r_{gy}(\theta)$, где $h(\tau)$ – оператор фильтра, $b_y(\theta)$ – автокорреляционная функция исходной трассы, $r_{gy}(\theta)$ – взаимнокорреляционная функция заданного импульса и исходной трассы. Учитывая независимость сигнала и помехи, и нулевое математическое ожидание последней, получаем

$$r_{gy}(\theta) = r \delta_y(\theta) = r \delta_f(\theta) = \delta(t) * f(-t) = f(-t) \quad (2)$$

Аналогично действию операции деконволюции, действие поля подсветки повысило временную разрешенность записи [5]. Важным условием эффективности обратной фильтрации является присутствие в спектре полезных волн достаточно интенсивных высокочастотных составляющих [6].

Методика измерений

В целом, задачей поставленного эксперимента было проверка возможности определения наличия кристаллов во вмещающей породе при помощи высокочастотного излучения георадара в отсутствии фонового поля, и при наличии поля подсветки для нескольких центральных частот. В качестве источника высокочастотного излучения использовался георадар производства группы компаний «Логис-Геотех» АБ-150/400 (совмещенный блок с центральными частотами 150 МГц и 400 МГц. Объекты поиска – три кристалла берилла и три кристалла мориона различного размера были вставлены внутрь специально высверленных отверстий (Рисунок 1) в блоке газобетона (блок газобетонный Bonolit D500 600*200*200 мм).

Наличие фонового поля повышает разрешающую способность за счет смещения спектра полезного сигнала в сторону высокочастотной составляющей, облегчая задачу выявления аномалий, связанных с локальными объектами [7]. У нас появляется возможность сравнить запись отраженных сигналов без действия фонового поля, и с включенным генератором фонового поля.



Рисунок 1. Схема расположения кристаллов в модели горной породы

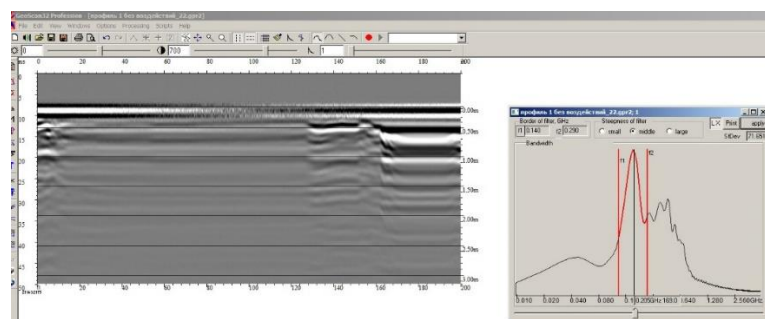


Рисунок 2. Профиль георадиолокационного зондирования в отсутствии фонового поля (центральная частота 150 МГц)

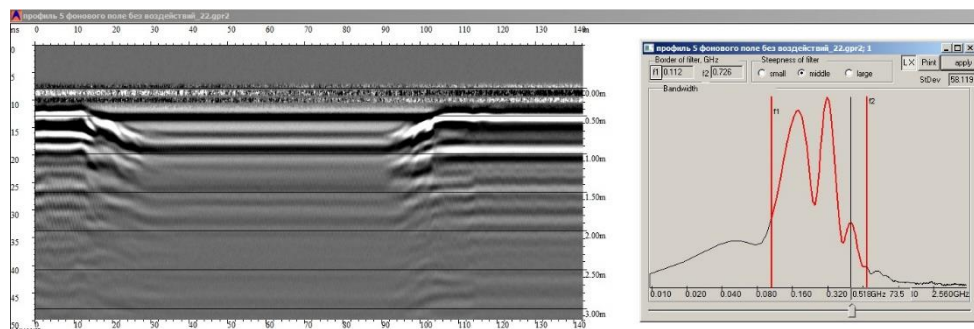


Рисунок 3. Профиль георадиолокационного зондирования в отсутствии фонового поля (центральная частота 400 МГц)

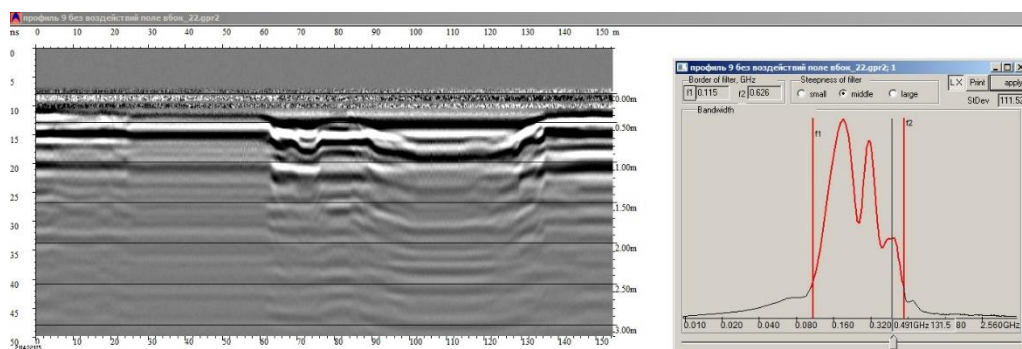


Рисунок 4. Профиль георадиолокационного зондирования под действием фонового поля (центральная частота 150 МГц)

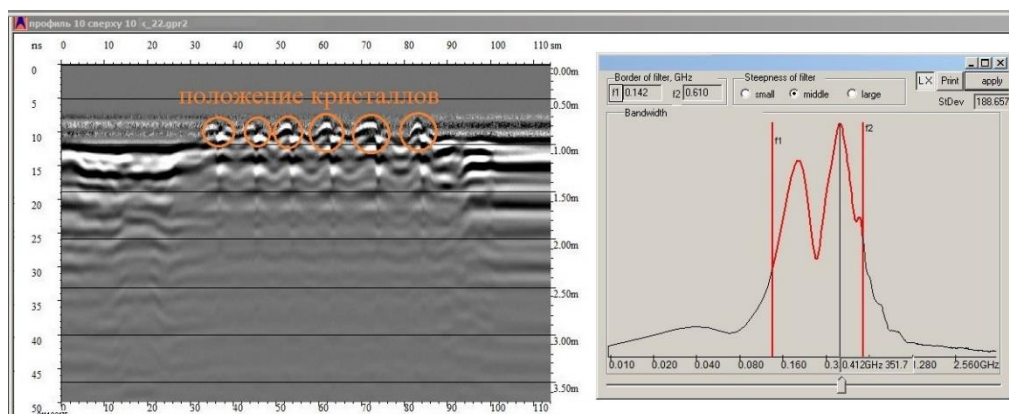


Рисунок 5. Профиль георадиолокационного зондирования под действием фонового поля (центральная частота 400 МГц, оранжевым цветом показано положение кристаллов, отображенных на радарограмме)

Выводы

Показана принципиальная возможность уточнения положения отдельных кристаллов при совместном применении георадиолокационного зондирования и фонового поля. Практически на всех выявленных локальных объектах произошло уточнение положения при наличии фонового поля за счет смещения спектра к более высокочастотным составляющим, в том числе появились переотражения, облегчающие картирование положения кристаллов.

Библиография

1. Подосенов, С.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / С.А. Подосенов, А.А. Потапов, А.А. Соколов. — М.: Радиотехника, 2007. — 720 с.
2. Шорохова, Е.А. Численный анализ задач дифракции электромагнитных волн на кривых цилиндрических структурах / Е.А. Шорохова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2009. — Т. 14. — №1. — С.12-17.
3. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород/журнал «Природные ресурсы Арктики и Субарктики», 2017.
4. Прудеский Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной заполненной льдом / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018.
5. Léger, E.; Saintenoy, A.; Coquet, Y.; Tucholka, P.; Zeyen, H. Evaluating hydrodynamic parameters accounting for water retention hysteresis in a large sand column using surface GPR. J. Appl. Geophys. 2020, 182, 104176.
6. Tran, A.P.; Vanclooster, M.; Zupanski, M.; Lambot, S. Joint estimation of soil moisture profile and hydraulic parameters by ground-penetrating radar data assimilation with maximum likelihood ensemble filter. Water Resour. Res. 2014, 50, p.3131–3146.
7. Yu, Y.; Huisman, J.A.; Klotzsche, A.; Vereecken, H.; Weihermüller, L. Coupled full-waveform inversion of horizontal borehole ground penetrating radar data to estimate soil hydraulic parameters: A synthetic study. J. Hydrol. 2022, p.610.

Моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего грунтового-породного массива при строительстве жилого комплекса в мегаполисе

***Терешин И.А. * (Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС),
Негурица Д.Л. (МГРИ) МГРИ)***

Аннотация

При научно-техническом сопровождении строительства моделирование геомеханических процессов на различных этапах строительства многофункционального жилого комплекса с подземной автостоянкой с применением искусственно улучшенного основания – структурного геотехнического массива, выполняется с целью улучшения прочностных и деформационных характеристик и обеспечения нормативных требований по ограничению абсолютных и относительных деформаций фундаментов.

Ключевые слова

Многофункциональный комплекс, моделирование геомеханических процессов, геотехнический массив, стена в грунте

Объект строительства

Обеспечение заданных параметров качества строящихся, эксплуатируемых и реконструируемых объектов строительства при условии обеспечения безопасности окружающих зданий и сооружений при реновации территорий мегаполиса с целью строительства жилых комплексов, когда реализуются проекты на территориях, окруженных плотной городской застройкой на месте ранее существовавших объектов, не соответствующих современным требованиям по рациональному использованию городских территорий [1,2]. Сложность реализации проектов объектов жилищного строительства состоит в усложнённости условий строительства уникальной планировкой и необходимостью учитывать воздействие на окружающую застройку и коммуникации, попадающие в зону влияния строительства [3-5].

Схема разбивки многофункционального жилого комплекса на секции представлена на рисунке (Рис.1): Жилой дом и малонагруженные части подземной автостоянки имеют отдельные фундаментные плиты, разделенные деформационными швами. Подземная часть комплекса разделена деформационными швами на отдельные секции в связи со значительной разницей высоты строений и действующей на основание нагрузкой. В качестве основного типа фундаментов высотных корпусов применяются монолитные фундаментные плиты на естественном основании, усиленном грунтоцементными элементами при этом необходимы конструктивные решения по усилению основания под фундаментами высотных частей здания.

Под фундаментными плитами секций №1-6 предусмотрено искусственно улучшенное основание – структурный геотехнический массив, выполняемый с целью улучшения прочностных и деформационных характеристик и обеспечения нормативных требований по ограничению абсолютных и относительных деформаций фундаментов. Принцип устройства геомассива заключается в выполнении вертикального армирования грунтового основания жесткими элементами, выполняемыми по технологии струйной цементации грунта и создании поверхностного гибкого распределяющего слоя

Грунтоцементные элементы выполняются по двухкомпонентной технологии струйной цементации грунтов, основанной на использовании энергии струи цементного раствора для разрушения и одновременного перемешивания природного грунта с частичным его замещением цементным раствором. После твердения образуется новый материал –

грунтоцемент, обладающий по сравнению с природным грунтом повышенными прочностными и деформационными характеристиками.

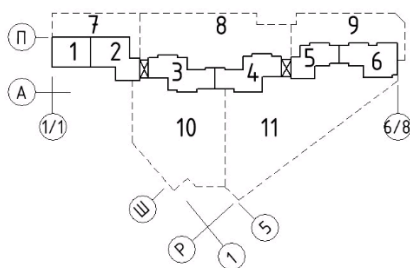


Рисунок 1. Схема разделения здания на секции

При максимальном действующем на поверхность геомассива давлении, равном 550 кПа, расчётное сопротивление сжатию материала армирующих элементов должно составлять не менее 3,7 МПа, назначенное расчётное сопротивление грунтоцемента сжатию $R_{sb.n} = 4,0$ МПа.

Габаритные размеры структурного геотехнического массива: горизонтальные размеры в плане – в пределах пятна фундаментов с выходом за контур на величину не менее 0,3 м, верхняя граница – на 0,2 м ниже подошвы фундамента; мощность зоны закрепления: от 7,0 до 12,0 м.

Подземная часть здания имеет сложную в плане форму с общими габаритами 259 x 118 м. Дно котлована устраивается для корпусных и стилобатных частей. Локально имеются понижения под прямки лифтовых конструкций. Глубина котлована от фактических отметок рельефа переменная 11-14 м.

Котлован разрабатывается с устройством ограждения «стена в грунте» (далее СВГ), с заглублением в водоупорный слой юрских глин по всему периметру. СВГ на период строительства выполняет роль противофильтрационной завесы и предотвращает поступление воды в котлован. Выполняется строительное водопонижения для откачки воды, содержащегося в обводненных грунтах внутри контура СВГ.

СВГ запроектирована траншейной, толщиной 800 мм, из монолитного железобетона с армированием, устойчивость которого обеспечивается устройством 2-х ярусной распорной системы из труб и подкосов, а также заглублением СВГ ниже дна котлована минимум на 14 м. Шаг распорок и подкосов переменный, до 7 м.

Моделирование НДС системы «Основание-фундамент-подземная часть-окружающая застройка»

Объект и его основание рассматриваются в единстве с учетом взаимодействия сооружения с основанием. Для совместного расчета системы «Основание-фундамент-подземная часть-окружающая застройка» используются численный метод конечных элементов [8-10]. Моделирование проводится в пространственной постановке с использованием программного комплекса «PLAXIS».

Рассматриваемый комплекс занимает площадь со сложным геологическим строением на глубину до 50 м. Для построения конечно-элементной модели массива были использованы результаты инженерно-геологических изысканий в пятне площадки строительства. В качестве расчётной модели был выбран грунтовый массив неоднородного сложения с изменяющейся мощностью слоев, согласно данным геологических изысканий (Рис. 2).

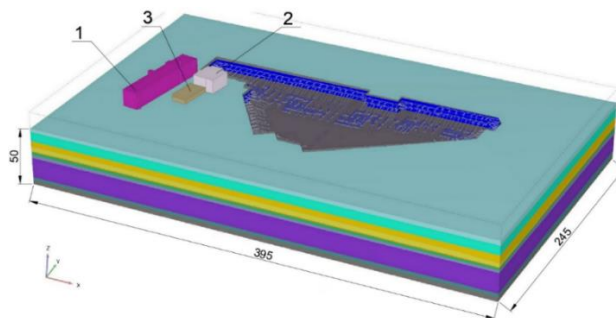


Рисунок 2. Расчетная схема (на последнем этапе моделирования)

- 1) Пятиэтажное здание культурно-просветительского назначения с подвалом;
- 2) Двухэтажное здание;
- 3) Одноэтажное здание.

Для модели назначались следующие граничные условия по закреплениям:

-на поверхности расчетной области – свободное перемещение узлов по всем направлениям, на боковых границах расчетной области – свободное перемещение в вертикальном направлении (вдоль оси Z) и скольжение вдоль грани;

-на подошве расчетной области – запрет перемещений во всех направлениях.

На основании анализа результатов инженерно-геологических изысканий выбраны следующие геомеханические модели, описывающие напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтов основания, слагающих рассматриваемый массив:

упруго-пластическая модель с упрочнением (Hardening soil или HS);

упругопластическая модель с упрочнением грунта и жесткостью при малых деформациях (HS small);

модель изотропной сплошной среды для моделирования выветрелой скальной породы Хёка Брауна (Hoek-Brown model или HB).

Модели позволяют описать упругие и пластические составляющие деформаций грунтовой среды, основанные на упруго-пластической теории Друкера-Прагера (ассоциированный вариант) для МКЭ комплексов.

Основной особенностью модели HS является зависимость жесткости грунта от напряжений, а также возможность различать жесткость грунта при нагрузке и жесткость при разгрузке.

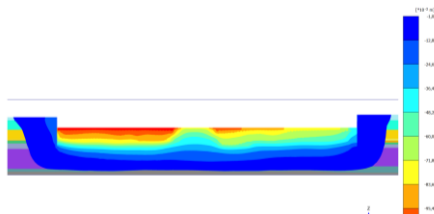


Рисунок 3. Изополя вертикальных деформаций (осадок) массива грунта по сечению В-В* на завершающем этапе моделирования

В результаты расчетов представлены в графическом виде (изополя, эпюры) на завершающем этапе моделирования

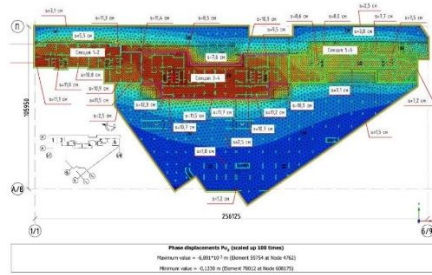


Рисунок 4. Значение осадков в ключевых точках секций

Проведенное моделирование в процессе научно-технического сопровождения строительства показало развитие деформационных процессов при строительстве жилого комплекса в мегаполисе на искусственно улучшенном основании на всех стадиях строительства в установленных безопасных пределах. Полученные результаты будут использованы при организации маркшейдерско-геодезического мониторинга в процессе строительства.

Библиография

1. Broere W. Urban problems - Underground solutions // Proc. 13th World Conf. of ACUUS: Advances in Underground Space Development. 2012 (2013). P. 1528 - 1539.
2. Magsin, Sammantha L., Gilbert Paul H., Ariaratnam Samuel T, etc. Underground Engineering for Sustainable Urban Development // Geo-Congress 2014 Technical Papers : Geo-Characterization and Modeling for Sustainability ; 2014. Pp. 3861-3870. 10.1061/9780784413272.374
3. Картозия Б.А., Корчак А.В., Левченко А.Н. Проблемы методологии и практики освоения подземного пространства мегаполисов // Горный журнал. 2014 №9. С. 60-64
4. Куликова Е.Ю., Потапова Е.В. Синтез управленческих решений для обеспечения безопасности подземного строительства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 2. С. 62-69
5. Neguritsa D.L., Alekseev G.V., Tereshin A.A., Medvedev E.A., Slobodin K.M. Deformation Processes Modelling throughout Underground Construction Within Megapolis Limits // Springer Geology. Processes in GeoMedia—Volume IV. 2022. P. 215-227. DOI: 10.1007/978-3-030-76328-2_23.
6. Neguritsa D. The problems of monitoring the deformation processes in the integrated development of the underground space of metropolitan cities // E3S Web of Conf. 56, 02027 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20185602027 EDN: BPLCIV
7. Дмитриев С. В. Решение упругой задачи методом конечных элементов. Визуализация тензора напряжений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №. 7. С. 222-227

***Геологические аспекты влияния глинистых минералов на процесс подземного
выщелачивания урана***

***Халимов И.У. (Навоийский государственный горно-технологический университет,
halimov_i@bk.ru),***

***Шарафутдинов У.З. (АО «Навоийский горно-металлургический комбинат»,
u.sharafudinov@ngmk.uz),***

***Юлдашев Ш.Ш. (Навоийский государственный горно-технологический университет,
mryuldashevshohruh@gmail.com),***

***Хамидова М.Н. (Навоийский государственный горно-технологический университет,
madina.nizombekovna@gmail.com)***

Аннотация

В статье рассматривается влияние глинистых минералов на процесс подземного выщелачивания (ПВ) урана с учетом геологических особенностей месторождения Сабирсай (Узбекистан). Глинистые минералы играют ключевую роль в формировании фильтрационных свойств рудного горизонта и гидрогеохимических условий выщелачивания. Они выполняют функцию водоупоров, предотвращая утечку продуктивных растворов в непродуктивные горизонты, но при этом снижают фильтрационную способность рудных пород, сорбируют уран и образуют коллоидные частицы, что может приводить к потерям металла. Проведен комплекс лабораторных исследований, включающих анализ минерального состава глинистых отложений, изучение их структурных и сорбционных характеристик, а также моделирование их влияния на процесс ПВ. Полученные данные позволяют скорректировать технологию ПВ с учетом геологических условий месторождения.

Ключевые слова

Подземное выщелачивание, уран, глинистые минералы, водоупор, литология, гидрогеология, сорбция, диффузия, коэффициент фильтрации, месторождение урана

Введение

Подземное выщелачивание является одним из наиболее распространенных методов добычи урана, обеспечивающим минимальное воздействие на окружающую среду по сравнению с открытыми и шахтными способами. Однако эффективность ПВ во многом зависит от геологического строения рудного горизонта, литологического состава пород, минералогии глинистых включений и их пространственного распространения. Глинистые породы в пределах уранового месторождения Сабирсай (Узбекистан) могут выступать как водоупорные слои, препятствующие миграции продуктивных растворов, так и дисперсные включения, снижающие проницаемость рудоносных песчаников. Их минеральный состав, гранулометрические характеристики и степень метаморфизации определяют их способность к набуханию, фильтрации и сорбции урана. Изучение геологической природы глинистых минералов в рудном горизонте и их влияния на гидрогеохимические процессы ПВ является важной задачей для оптимизации технологии выщелачивания [1-3].

Материалы и методы

Для оценки влияния глинистых минералов на ПВ были проведены литолого-минералогические и гидрогеохимические исследования на месторождении Сабирсай (Узбекистан). Минеральный состав глинистых отложений определяли рентгеноструктурным методом (рисунок 1), а их гранулометрические характеристики – методом лазерной дифракции. Коэффициенты диффузии и фильтрации рассчитывались на основе лабораторных экспериментов, имитирующих фильтрационные процессы в рудоносных породах (рисунок 2).

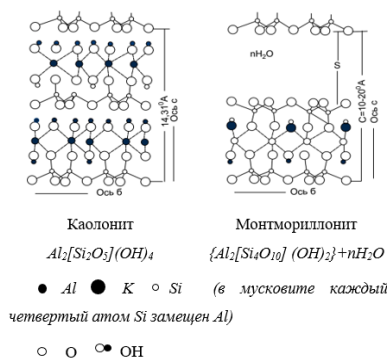


Рисунок 1. Схема минералов глин

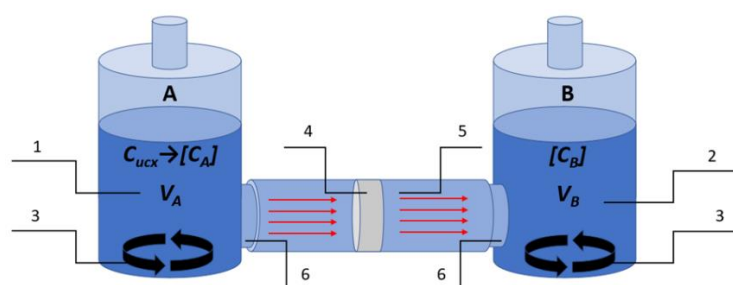


Рисунок 2. Схема лабораторной установки для определения коэффициентов диффузии в глинах: 1-сосуд А, с исходной концентрацией $C_{исх}$, равновесной концентрацией C_A и объемом V_A ; 2-сосуд В, с равновесной концентрацией C_B и объемом V_B ; 3- перемешивающие устройства; 4 -ненарушенный образец глины; 5- стеклянная трубка, соединяющая сосуды; 6 – резиновые пробки

Для оценки сорбционной способности глин по урану использовался метод статического насыщения в термостатированных реакторах с последующим анализом на современном рентгенофлуоресцентном спектрометре Thermo Scientific ARL PERFORM'X. Пространственное распределение глинистых отложений в пределах месторождения анализировалось на основе геофизических данных и керновых образцов скважин.

Результаты и их обсуждение

Минералогический анализ глинистых отложений месторождения Сабирсай показал, что в пределах исследуемого уранового месторождения доминируют монтмориллонит, каолинит, гидрослюды и смешаннослойные глины (таблица 1). Монтмориллонит, характерный для песчаных рудных горизонтов, обладает высокой сорбционной способностью и склонностью к набуханию, что приводит к снижению проницаемости продуктивных пластов. Напротив, каолиновые глины, распространенные в кровле и подошве рудных тел, имеют более низкую сорбционную активность, но могут образовывать плотные водоупорные горизонты, затрудняющие циркуляцию продуктивных растворов.

Таблица 1. Состав глин

Образец глины	Минеральный состав, %				Содержание противоионов, г/кг				КОЕ, г-экв/кг
	Монт мори лонит	Каоли нит	Сери цит	Кварц	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
Бентонит	93,0	2,0	5,0	-	6,32	0,60	0,05	0,15	0,372
Каолинит	-	88,2	5,8	6,0	1,85	0,19	0,07	0,12	0,113

Исследования показали, что коэффициенты диффузии урансодержащих анионов в бентоните и каолините различаются почти в 1,5 раза. В частности, коэффициент диффузии NO₃⁻-анионов в бентоните составляет $3,34 \times 10^{-6}$ см²/с, а в каолините — $2,14 \times 10^{-6}$ см²/с (таблица 2). Это обусловлено различиями в межпакетных расстояниях кристаллических решеток: в монтмориллоните (бентоните) оно составляет до 14 нм, тогда как в каолините – менее 1 нм. Большие межпакетные расстояния в бентоните обеспечивают более свободное движение ионов в поровом растворе, что увеличивает коэффициент диффузии.

Таблица 2. Результаты по определению коэффициентов диффузий

Образец глины	Условия опытов				Результаты				
	h, см	S, см ²	C _{NO3} , мг/см ³	τ, сек	[Ca], мг/см ³	[Cв], мг/см ³	Ca-Cв, г/см ³	Δm, мг	D, см ² /сек
Бентонит	0,5	7,0	1,0	$2,6 \cdot 10^5$	0,65	0,35	0,30	350	$3,34 \cdot 10^{-6}$
Каолинит	0,5	7,0	1,0	$2,6 \cdot 10^5$	0,70	0,30	0,40	300	$2,14 \cdot 10^{-6}$

Коэффициенты фильтрации песчаных образцов с различным содержанием глин продемонстрировали снижение скорости фильтрации растворов по мере увеличения доли глинистых минералов. При содержании глины 20% коэффициент фильтрации снизился до значений, при которых процесс ПВ становится неэффективным (Таблица 3.7). Это связано с тем, что глинистые частицы, обладая высокой дисперсностью и способностью к набуханию, уменьшают пористость породы, препятствуя свободному прохождению продуктивных растворов.

Таблица 3. Влияние содержания глины в песке на коэффициенты фильтрации воды и растворов

Содержание глины в песке, %	Кф в присутствии бентонита, см/сек · 10 ⁻²			Кф в присутствии каолинита, см/сек · 10 ⁻²		
	H ₂ O	10 г/л H ₂ SO ₄	1г/л NaHCO ₃	H ₂ O	10 г/л H ₂ SO ₄	1г/л NaHCO ₃
0,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
3,0	1,2	1,1	1,0	1,3	1,3	1,1
6,0	0,9	0,8	0,6	1,1	1,0	0,9
15,0	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4
20,0	0,2	0,1	0,05	0,3	0,2	0,1

Глинистые минералы также продемонстрировали выраженные сорбционные свойства по отношению к урану. В частности, статическая обменная ёмкость (СОЕ) бентонита по урану составила 104 мг/г из сернокислого раствора и 15 мг/г из бикарбонатного раствора, что значительно превышает аналогичные показатели каолинита (32 мг/г и 5 мг/г соответственно) (таблица 4).

Таблица 4. Результаты по определению СОЕ глин по урану

Образец глины	СОЕ глин по урану, мг/г	
	Из сернокислого раствора	Из бикарбонатного раствора
Бентонит	104	15
Каолинит	32	5

Высокая ёмкость сорбции урана у монтмориллонитовых глин объясняет накопление остаточного металла в пластах с высоким содержанием глинистого материала.

Выводы

Проведенные исследования показали, что глинистые минералы оказывают значительное влияние на процесс подземного выщелачивания урана, определяя гидрогеохимические и фильтрационные условия месторождения Сабирсай (Узбекистан). Они выполняют роль естественных барьеров, предотвращающих утечку растворов, но также могут снижать проницаемость рудных пластов, увеличивать сорбцию урана и способствовать образованию коллоидных комплексов. Полученные результаты подчеркивают необходимость учета глинистой минералогии при проектировании системы ПВ, включая корректировку технологических параметров, прогнозирование сорбционных потерь и выбор оптимальных реагентов для управления процессами сорбции и фильтрации.

Библиография

1. Халимов И.У., Петухов О.Ф., Каримов И.А., Шарафутдинов У.З. Поведение урана в системе: рудная глина – безрудная глина – рудный песок // Горный вестник Узбекистана. - 2022.- №4.- стр. 15-18.
2. Петухов О.Ф., Санакулов К.С., Шарафутдинов У.З. Физическая и коллоидная химия (для металлургических специальностей). – Навои. - 2021.- стр. 324.
3. Аликулов Ш.Ш., Ибрагимов Р.Р., Хамидов Р.А. Исследования интенсификации процесса скважинного подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд при воздействии на них различными физическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. (2), 111-126.

Перспективы отработки остаточных запасов урана из отработанных блоков подземного выщелачивания

Халимов И.У.* (Навоийский государственный горно-технологический университет, halimov_i@bk.ru),

Каримов Н.М. (Навоийский государственный горно-технологический университет, 92nurkhan92@gmail.com),

Муродуллаева М.У. (Навоийский государственный горно-технологический университет)

Аннотация

В ядерной энергетике, помимо первичных источников урана, используются также вторичные источники, которые играют важную роль в обеспечении топливом ядерных реакторов. К ним относятся государственные и коммерческие запасы техногенных урансодержащих материалов, таких как отвалы горнодобывающих, отработанные блоки подземного выщелачивания и обогатительных производств, отработавшее ядерное топливо.

На сегодняшний день в мире увеличение объемов урана за счет вовлечения в отработку остаточных запасов урана без значительных инвестиций в новые технологии и инфраструктуру может повысить общую рентабельность проектов и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. С учетом развития техники и технологии подземного выщелачивания (ПВ), доизвлечь уран из отработанных блоков, обеспеченных необходимой инфраструктурой, становится не только актуальной, но и вполне достижимой задачей.

Ключевые слова

Потребность урана, остаточные запасы урана, выщелачивание

Теория

В мире в условиях глобального перехода на низкоуглеродные источники энергии, уран становится все более важным сырьем для атомной энергетики. Повышение эффективности извлечения остаточных запасов урана из отработанных блоков подземного выщелачивания позволяет уменьшить зависимость от новых месторождений, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов и высокого спроса на энергетические минералы.

По данным ведущих мировых аналитиков по урану прогнозируют что с 2028 года спрос на уран будет превышать предложение из известных источников. Разрыв между выявленными источниками поставок и потребностями может достичь 55 тыс. т урана к 2040 году, что сопоставимо с текущей мировой добычей урана. Он может быть заполнен поставками из неопределенных источников, которые включают коммерческие запасы, неучтенный потенциал существующих рудников, т.е. вовлечение в отработку остаточных запасов урана из отработанных участков, дополнительную добычу на простаивающих рудниках, освоение резервных или новых месторождений (рис.1.) [1,2].

Учитывая прогнозируемое истощение первичных урановых ресурсов, оптимизация стратегий извлечения остаточных запасов урана из отработанных месторождений с целью их вторичного использования является критически важной задачей для устойчивого развития уранодобывающей промышленности.

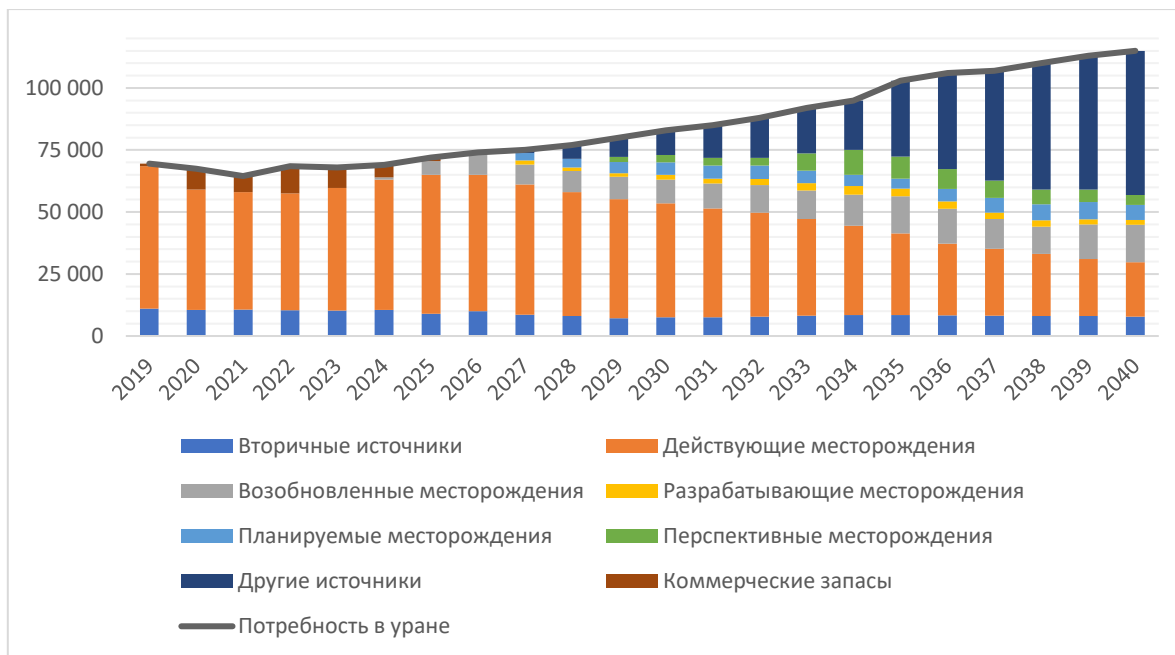


Рисунок 1. Прогноз динамики спроса и предложения урана до 2040 года

Несмотря на экономических и экологических достоинствах метода ПВ коэффициент извлечения урана из месторождений Кызылкумского региона Республики Узбекистан составляет примерно 70 % из-за низкого содержания урана в руде и считается рентабельным. Остальные 25-30% запасов урана остаются не доизвлеченными (в виде остаточного запаса урана) в рудном горизонте по разным горно-геологическим причинам, таких как: фильтрационная неоднородность руд и рудовмещающих пород, присутствие глинистых минералов в рудном горизонте, нарушение гидродинамического режима выщелачивания и т.д. С учётом развития техники и технологии ПВ, доизвлечь уран из отработанных блоков, обеспеченных необходимой инфраструктурой, становится не только актуальной, но и вполне достижимой задачей. Согласно данным [3], в Казахстане нормативный коэффициент извлечения уран из недр колеблется от 80 % до 90 %. Казахстанские предприятия компании Uranium One ведут добычу урана методом ПВ обеспечивая один из самых низких в мире и в отрасли показатели по себестоимости добываемого металла.

Извлечение остаточных запасов урана из ранее отработанных блоков подземного выщелачивания позволяет максимально эффективно использовать существующие инфраструктуру и ресурсы. Это способствует оптимизации добычи урана, снижению необходимости в новых горнодобывающих операциях и сокращению негативного воздействия на окружающую среду. Подобный подход сочетает экономическую эффективность с принципами устойчивого развития, что является важным аспектом в современной энергетической индустрии, а также отработанные блоки подземного выщелачивания могут быть нестандартным источником производства урана.

В 1996 г. в Навоийском горно-металлургическом комбинате была разработана программа по развитию уранодобывающей отрасли, которая предусматривала увеличение объёма добычи, в частности по Южному рудоуправлению в 2 раза. Поставленная задача казалась очень сложной, поскольку рудоуправление миновало пик добычи урана, оставшиеся запасы характеризовались низкой продуктивностью ($0,5 \div 1,5$ кг/м²), малой мощностью рудных тел ($0,3 \div 1,0$ м), высокой карбонатностью, большими глубинами - более $450 \div 550$ м, часть запасов была переведена в категорию технологического забаланса [4-7].

В этих условиях специалисты рудоуправления и комбината рассмотрели вопрос о возможности вовлечения в отработку старых площадей, ранее выведенных из эксплуатации при достижении на них плановых коэффициентов извлечения $70\div 75\%$, а также возможности доработки оставшихся в недрах остаточных запасов после отработки рудника № 1 подземным способом. Были приняты решения о проведении комплексных работ (геофизических и гидрогеологических исследованиях, проанализировать состояние добычных работ на их заключительной стадии).

Проведенный анализ комплекса опытно-эксплуатационных работ выявил ряд положительных и отрицательных факторов, которые необходимо учесть при подготовке к повторной отработке оставшихся в недрах запасов. Среди них — параметры технологических ячеек, схемы расположения технологических скважин и дебиты откачных скважин.

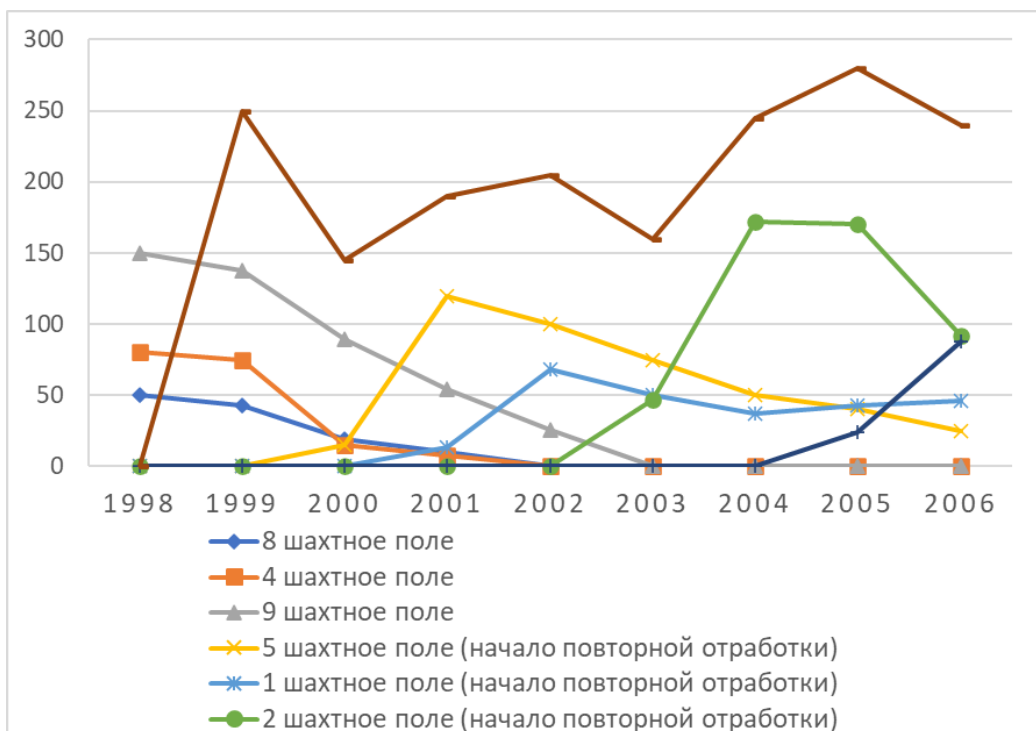


Рисунок 2. Динамика добычи металла по шахтным полям рудника «Сабырсай»

Из рис. 2 видно, что поддерживать добычу на уровне 220 - 240 т/год было бы невозможно без начатой в 2000 г. повторной отработки урана, а дальнейшее развитие уранодобывающего отраслевого комплекса Южного рудоуправления и продление его жизни стало возможным благодаря вовлечению в отработку отработанных блоков.

Выводы

Вовлечение в отработку остаточных запасов урана из отработанных блоков месторождения Сабырсай позволило стабилизировать работу рудника минимум на 20 лет. Этот источник остается основным для добычи урана в перспективе. Кроме этого, процесс извлечения остаточных запасов урана может быть интегрирован в программы по рекультивации и восстановлению экосистем, что способствует снижению экологических рисков. Подобный подход сочетает экономическую эффективность с принципами устойчивого развития, что является важным аспектом в современной энергетической

индустрии, а также отработанные блоки подземного выщелачивания могут быть нестандартным источником производства урана.

Библиография

1. Улянин Ю.А., Бойцов А. В. Мировая урановая промышленность: состояние и перспективы развития //Актуальные проблемы урановой промышленности. – 2022. – С. 6-11.
2. Халимов И.У. и др. Обоснование классификации урановых месторождений, отрабатываемых методом подземного выщелачивания //Universum: технические науки. – 2024. – Т. 3. – №. 12 (129). – С. 24-31.
3. Бойцов А.В. Мировая урановая промышленность: состояние, перспективы развития, вызовы времени // Актуальные проблемы урановой промышленности. – 2017. – Астана. – С. 14-21
4. Наврузов Т.Ю. и др. Практика при повторной отработке запасов месторождения Сабырсай способом подземного выщелачивания // Горный вестник Узбекистана. – 2021. - №1. – С. 29-32.
5. Халимов И.У., Турсунова С.У. Повышение эффективности подземного выщелачивания урана путем гидроразрыва пласта //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 11. – С. 329-334.
6. Petukhov O.F. et al. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium //Mining Science and Technology (Russia). – 2023. – Т. 8. – №. 1. – С. 39-46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>
7. Аликулов Ш. Ш., Халимов И. У. Интенсификация параметров подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд на примере урановых месторождений Узбекистана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 37–48. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48>

Оптимизация расположения геотехнологических скважин при изменении гидродинамического режима растворов в процессе подземного выщелачивания урана

Хамидов С.Б. * (Навоийский государственный горно-технологический университет, sukhrobkhamidov92@gmail.com),

Аликулов Ш.Ш. (Навоийский государственный горно-технологический университет, shukhrat.sh.alikulov@gmail.com)

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы оптимизации расположения геотехнологических скважин при изменении гидродинамического режима растворов в процессе подземного выщелачивания урана. Проанализированы методы балансировки подачи и откачки растворов, направленные на повышение эффективности извлечения урана и минимизацию потерь. Исследование основано на моделировании трех ячеек, содержащих закачные и откачные скважины, с учетом геологических факторов и динамической коррекции потоков.

Ключевые слова

Подземное выщелачивание, уран, геотехнологические скважины, гидродинамический режим, баланс растворов, моделирование, фильтрация, извлечение урана, экологические аспекты, оптимизация добычи

Введение

Подземное выщелачивание (ПВ) урана является одной из наиболее эффективных и экологически безопасных технологий добычи урана. Данная технология основана на циркуляции химических растворов через рудное тело, что позволяет извлекать уран без необходимости ведения горных работ [1, 2].

Однако изменение гидродинамического режима растворов в процессе эксплуатации месторождения требует оптимизации схемы расположения скважин для повышения извлечения урана и снижения потерь полезного компонента [3, 4].

В данной работе анализируется метод корректировки подачи и откачки растворов, позволяющий вовлекать дополнительные запасы урана, а также балансировка подачи и откачки растворов для достижения максимальной эффективности.

Дополнительно рассматриваются технологические аспекты влияния геологической неоднородности на эффективность выщелачивания, а также вопросы моделирования процессов фильтрации растворов в пластовых условиях.

Значительный интерес представляют инновационные подходы к мониторингу и автоматизированному управлению гидродинамическими параметрами, что позволяет значительно повысить эффективность добычи.

Методология

Оптимизация расположения геотехнологических скважин основывается на регулировании подачи и откачки растворов, что приводит к изменению градиента давления и улучшает охват залежи выщелачивающим агентом [5]. Принципиальные аспекты оптимизации включают:

- Применение ячеечного метода расположения скважин, включающего четыре закачные и одну откачную скважину.
- Балансирование объемов подачи и откачки растворов для поддержания стабильного гидродинамического режима.
- Регулирование параметров закачки в скважинах для обеспечения равномерного распространения выщелачивающего агента.

- Введение методов динамической коррекции потока растворов с учетом изменения проницаемости пород и изменения насыщенности рудного тела.

Современные подходы включают применение компьютерного моделирования для прогнозирования изменений концентрации урана в продуктивном растворе, что позволяет заранее корректировать режим подачи реагента и минимизировать потери [6, 7].

Экспериментальные данные

Исследование проводилось на трех ячейках, каждая из которых содержит четыре закачные скважины и одну откачную [8]. Исходные объемы подачи раствора в закачные скважины были сбалансированы и затем оптимизированы для повышения эффективности процесса выщелачивания при соблюдении гидродинамического баланса.

Влияние геологических факторов

Важным аспектом исследования является учет геологических факторов, влияющих на равномерность распределения реагента [9]. Включены данные о:

- Коэффициентах фильтрации пород в различных частях залежи.
- Влиянии трещиноватости и неоднородностей на эффективность транспортировки растворов.
- Возможности локального накопления урана в трудноизвлекаемых участках месторождения.

В таблице 1 представлены исходные и оптимизированные параметры закачки растворов для каждой ячейки, что позволяет оценить влияние перераспределения потоков на равномерность охвата залежи.

Таблица 1. Параметры закачки растворов по ячейкам до и после оптимизации

Ячейка	Скважина	Закачка (м ³ /ч) - начальная	Закачка (м ³ /ч) - измененная	Процент увеличения подачи
Ячейка 1	Закачная 1	1.5	1.78	18.7%
	Закачная 2	2.0	2.42	21.0%
	Закачная 3	2.5	2.92	16.8%
	Закачная 4	1.8	2.14	19.5%
Ячейка 2	Закачная 1	1.2	1.38	17.1%
	Закачная 2	2.3	2.76	20.2%
	Закачная 3	2.7	3.21	18.9%
	Закачная 4	1.6	1.92	20.0%
Ячейка 3	Закачная 1	1.8	2.16	20.0%
	Закачная 2	2.1	2.49	18.6%
	Закачная 3	2.9	3.41	17.6%
	Закачная 4	2.0	2.40	20.0%

В таблице 2 приведено сравнение параметров откачки и изменений в извлечении урана, где видно, что после оптимизации наблюдается увеличение эффективности добычи.

Таблица 2. Сравнение параметров откачки и извлечения урана

Ячейка	Суммарная закачка (м3/ч)	Откачка (м3/ч) - начальная	Откачка (м3/ч) - измененная	Извлечение урана (г/ч) - начальное	Извлечение урана (г/ч) - измененное	Прирост извлечения (г/ч)
Ячейка 1	9.32	9.32	9.32	326.04	397.71	71.66
Ячейка 2	9.22	9.22	9.22	322.86	388.28	65.41
Ячейка 3	10.51	10.51	10.51	367.89	439.93	72.03

Динамическое моделирование

Для повышения точности прогнозов использовано численное моделирование изменения гидродинамического режима в течение эксплуатации скважин. Сценарный анализ включал:

Оценку влияния изменения расхода закачки на конечную концентрацию урана в продуктивном растворе.

Моделирование пространственного распределения растворов в рудном массиве.

Расчет вероятности преждевременного истощения запасов в отдельных частях месторождения.

Выводы

Оптимизация расположения геотехнологических скважин по принципу ячеечного подхода с равномерным распределением потоков растворов позволила достичь улучшения охвата запасов урана и повысить эффективность выщелачивания. Данный подход обеспечивает:

Баланс между закачкой и откачкой растворов в пределах ячейки.

Повышение коэффициента извлечения урана за счет целенаправленного перераспределения потоков.

Минимизацию потерь урана за счет равномерного распространения выщелачивающего агента.

Автоматизированный контроль параметров и возможность корректировки процесса в режиме реального времени.

Перспективные направления [10, 11] дальнейших исследований включают проведение детальных гидродинамических расчетов, позволяющих оптимизировать режим циркуляции растворов в пластовых условиях с учетом изменения проницаемости рудного массива и влияния различных технологических параметров. Кроме того, рекомендуется дальнейшее развитие математического моделирования для прогнозирования эффективности добычи в динамически изменяющихся условиях эксплуатации.

Библиография

1. Ilhom Halimov, Sukhrob Khamidov, Nurkhan Karimov. Основы геотехнологии. Navoi, 2022. 246 p.
2. Sharafutdinov U.Z., Khalimov I.U., Khamidov S.B., Karimov N.M. Use of carbon adsorbents for rhenium sorption from uranium re-extracts. Tsvetnye Metally (Russia). 2023; 12(972): 51–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.12.04>

3. Petukhov O.F., Khalimov I.U., Istomin V.P., Karimov N.M. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium. Mining Science and Technology (Russia). 2023;8(1):39–46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>
4. Alikulov Sh.Sh., Ilhom Halimov, Rabbimov X.T., Nurkhan Karimov. Research and development of measures to prevent mechanical colmation of the form during in-situ leaching of uranium. Gorniy vestnik Uzbekistana, 2022, No 2(89) pp. 33-40. <http://dx.doi.org/10.54073/GV.2022.2.89.008>
5. Ш. Ш. Аликулов, "Совершенствование параметров гидродинамического режима скважинного подземного выщелачивания урана," диссертация кандидата технических наук, Российский государственный геологоразведочный университет, Москва, Россия, 2010.
6. К. С. Санакулов и Ш. Ш. Аликулов, "Обоснование методологии нестационарного режима фильтрации при подземном выщелачивании урана из слабопроницаемых массивов," Горный вестник Узбекистана, с. 19-22, 2017.
7. Sh.Sh. Alikulov; S.B. Khamidov; N.M. Karimov Experience in improving the technology of uranium processing from technological solutions of in-situ leaching. Proceedings of the IV International Conference on Advances in Science, Engineering, and Digital Education AIP Conf. Proc. 3268, 020031-1–020031-5; <https://doi.org/10.1063/5.0259476>
8. I.U. Khalimov; S.B. Khamidov; N.M. Karimov The behavior of uranium in the system: Ore clay – Barren clay - Ore sand. Proceedings of the IV International Conference on Advances in Science, Engineering, and Digital Education AIP Conf. Proc. 3268, 030028-1–030028-5; <https://doi.org/10.1063/5.0257105>
9. Kurbanov M.A., Alikulov Sh.Sh., Ganiyeva D.S., Nurkhan Karimov. Researches in the field of technology of extraction concentration of rhenium from desorbates. Gorniy vestnik Uzbekistana, 2020, No 2(81) pp. 75-78.
10. Х. Р. Баймурзаев, "Совершенствование параметров гидродинамического режима подземного выщелачивания урана при оптимизации сети геотехнологических скважин," диссертация кандидата технических наук, Российский государственный геологоразведочный университет, Москва, Россия, 2014.
11. А. Н. Сопин, Н. И. Чесноков и П. И. Шапиро, "Добыча урана методом подземного выщелачивания," под ред. В. А. Мамилова, Москва: Атомиздат, 1980.

Михайловский ГОК - история и направления развития

**Бунякин П.А.* (МГРИ, pet.buniakin2014@yandex.ru),
Яшина В.И. (МГРИ, yashinavi@mgri.ru),
Яшин В.П. (МГРИ, yashinvp@mgri.ru)**

Аннотация

История образования месторождений Курской магнитной аномалии (КМА) всегда интересовала ученых. Открытие Михайловского месторождения КМА, условия его разработки и переработке железных руд на образованном Михайловском горно-обогатительном комбинате (МГОК) является примером внедрения передовых технологий обогащения и получения железорудного концентрата.

В докладе содержится информация о современном состоянии работ на МГОК по добыче, обогащению и новым технологиям в области транспортировки горной массы с использованием дробильно-конвейерных комплексов (ДКК).

Ключевые слова

Месторождение, магнитная аномалия, железистые кварциты, концентрат, конвейер

Теория

Прошёл век с тех пор, как на буровой скважине в Щигровском районе Курской области была добыта первая железная руда. 7 апреля 1923 года неподалёку от местной деревни Лозовка бур скважины № 1 на глубине 167 метров вошёл в мощные залежи железной руды, что положило начало освоению Курской магнитной аномалии. Впервые магнитная аномалия была обнаружена в конце 18 века П.Б. Иноходцевым при составлении карт Генерального межевания. Большая работа по исследованию КМА была проведена профессором Московского университета Э.Е. Лейстом [4]. Изучение границ аномалии и выявление глубины залегания руды, с определенными успехами велись с 1896 года по 1918 год. Активное возобновление исследований на месторождении началось по указанию В.И. Ленина в 1919 году, а в 1920 году было принято специальное постановление о комплексном изучении КМА. С 1920 года начала работать Особая комиссия по исследованию КМА, возглавляемая И.М. Губкиным. После Великой Отечественной войны 1941-45 года работы были возобновлены в более широком масштабе. В 1950 году было открыто Михайловское железорудное месторождения. 3 августа 1957 года принято решение Совета Министров СССР о начале строительства горнорудного предприятия по добыче руды Михайловского месторождения. В сентябре 1957 года в карьере проведены первые вскрышные работы. К 1958 году геологи разведали громадное, около 20 квадратных километров по площади, железорудное месторождение, названное «Михайловским». 10 июня 1960 года был добыт первый ковш богатой железной руды и первый состав отправлен на Ново-Тульский металлургический завод. В октябре 1967 года началось строительство горно-обогатительного комплекса. В конце октября 1973 года получен первый железорудный концентрат. Добыча руд Михайловского месторождения ведётся в трёх карьерах (Южном, Центральном и Северном), имеющих общую протяженность около 6 км, и ширину около 4 км. Михайловскому месторождению присвоено звание «Жемчужина аномалии». МГОК является вторым в России по объёму производства железорудного сырья. К основным потребителям продукции комбината относятся Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК), Оскольский электрометаллургический комбинат, Челябинский электрометаллургический комбинат и другие. Основными странами импортерами руды являются страны Восточной Европы. В 1996 году ГОК прошёл процесс акционирования и получил наименование Открытое акционерное

общество «Михайловский ГОК». В 2005 году Михайловский ГОК вошёл в состав холдинга Металлоинвест. В 2015 году был запущен крупнейший в России комплекс Обжиговой машины – 3 (ОМ-3), который обеспечил, из полученного высококачественного железорудного концентрата [1], изготавливать окатыши и горячеприкатированное железо (ГБЖ), которое затем используется для выплавки стали. ГБЖ — один из видов прямовосстановленного железа (ПВЖ). Материал с высоким (>90 %) содержанием железа, полученный по технологии, отличной от доменного передела, используется в качестве сырья для производства стали и является высококачественным (с малым количеством вредных примесей) заменителем чугуна и металлолома. В отличие от чугуна, в производстве ГБЖ не используется угольный кокс. Процесс производства брикетированного железа базируется на обработке железорудного сырья (окатышей) высокими температурами, чаще всего посредством применения природного газа. В результате компания «Металлоинвест» стала ведущим производителем и поставщиком железорудной продукции и ГЖБ на мировом рынке. Однако, эффективная разработка месторождений КМА открытым способом с использованием внутрикарьерного автомобильного и железнодорожного транспорта, с глубиной снижается. В связи с чем, было принято решения о включении в транспортную структуру МГОКа конвейерного транспорта.



Рисунок 1. Крутонаклонный дробильно-конвейерного комплекса (ДКК-1)

В 2020 году на юго-восточном борту карьера был запущен крутонаклонный дробильно-конвейерный комплекс (ДКК-1) производительностью 15 миллионов тонн руды в год [2]. Металлоинвест инвестировал в этот проект около 6 млрд рублей.

ДКК-1 МГОКа включает в себя дробильно-перегрузочную установку (ДПУ), состоящая из надземной части и пяти подземных технологических этажей, которая будет принимать руду, доставляемую большегрузными самосвалами и измельчать ее в двух стадиях дробления, пока исходные куски в 1200 мм не уменьшатся до 150 мм. Две части конвейера, 130-метровая соединительная и 700-метровая крутонаклонная, перемещают дробленую горную массу с нижних горизонтов на самый верх карьера (высота подъема – 215 метров), угол наклона – 37 градусов.

В декабре 2024 года в центральной части карьера началась опытно-промышленная эксплуатация пологого дробильно-конвейерного комплекса (ДКК-2). Он позволит обеспечить ежегодное производство магнетитового концентрата в объеме не менее 35 млн. тонн в год. Общий объем инвестиций в проект составит порядка 11 млрд рублей. ДКК-2 предназначен для

дробления железистых кварцитов (руды) на нижних горизонтах центральной части карьера с доставкой дробленой руды бортовым ленточным конвейером на "дневную" поверхность северо-восточного борта карьера.

Дробильно-конвейерный комплекс позволит транспортировать руду с самых нижних горизонтов на поверхность, не вовлекая железнодорожный транспорт, что существенно повысит экономическую эффективность добычи руды. ДКК-2 будет транспортировать породу по более пологой траектории, которую можно условно сравнить с серпантином горной автотрассы. За счёт большей длины и перегрузочных узлов углы наклона конвейеров здесь меньше – от четырёх до 13 градусов.



Рисунок 2. Пологий дробильно-конвейерный комплекс (ДКК-2)

Переход на конвейерную транспортировку руды – стратегический шаг в развитии Михайловского ГОКа. Новая система сокращает экологическое воздействие, снижает объём вскрыши и себестоимость железорудного концентрата за счёт оптимизации схемы транспортировки. В переработку будут вовлечены дополнительные запасы руды с высоким содержанием железа, освобождённые от железнодорожной инфраструктуры.

Выводы

1. Михайловский горно-обогатительный комбинат сегодня занимает первое место в мире по запасам железной руды, второе место в России по производству ЖРС, первое место в России по производству окатышей и аглоруды, второе по производству концентрата. Высокое качество продукции признается как национальными так и иностранными производителями стали.
2. На производственных предприятиях МГОК внедрены передовые технологии обогащения и получения железорудного концентрата в виде окатышей и горячбрикетированного железа, что обеспечило разработку и внедрение технологий мирового уровня.
3. Дробильно-конвейерные комплексы на Михайловском ГОКе – самый важный и масштабный проект компании «Металлоинвест» сегодня. Технологический комплекс

обладает уникальными для российской горнодобывающей отрасли характеристиками. Он является частью масштабной программы, направленной на развитие производственных мощностей и радикальное повышение качества продукции Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева. Главная особенность строительства ДКК-1 и ДКК-2 в том, что оно проходило в действующем карьере МГОКа без остановки производства.

Библиография

1. Исмагилов Р.И., Козуб А.В., Гридасов И.Н., Шелепов Э.В. Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Журнал Горная промышленность № 4, 2018.
2. Макаров А.С., Телегин О.В. Перспектива установки крутонаклонного конвейера на Михайловском горно-обогательном комбинате и определение его главных характеристик. Горный информационно-аналитический бюллетень № 5, 2018.
3. Твердов А.А., Жура А.В., Никишечев С.Б. Современные системы транспортировки полезных ископаемых и вскрышных пород. Журнал Горная промышленность № 2, 2012.
4. Шевырёв И.А. КМА - железное богатство России. Москва, Журнал Наш современник № 4, 2019.

Подходы к определению хрупкости угольных пластов для оптимизации параметров проведения гидравлического разрыва пласта

**Енина Е.Д.* (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», froeze191@gmail.com),
Шишляев В.В. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», shishlyaev@yandex.ru)**

Аннотация

Хрупкость породы отражает способность твердого тела к разрушению без существенных пластических деформаций, которое влияет на выбор параметров проведения гидравлического разрыва пласта. Индекс хрупкости – ключевой параметр, определяющий способность угольного пласта формировать разветвленную сеть трещин при ГРП. В представленной работе рассмотрены подходы к определению индекса хрупкости углей, учитывающие различные влияющие факторы – упругие параметры, минеральный состав, прочностные параметры. Рассчитаны индексы хрупкости угольных пластов Кузбасса и на их основе определены рекомендации к проведению гидравлического разрыва угольных пластов.

Ключевые слова

Хрупкость, угольный пласт, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, гидроразрыв пласта

Теория

Хрупкость породы является одним из наиболее важных механических свойств горных пород, которая отражает способность твердого тела к разрушению без существенных пластических деформаций. На сегодняшний день исследователями предложены различные способы количественной оценки хрупкости горных пород, основанные на учете различных влияющих факторов – минерального состава, напряжений, параметров прочности и других. Величина хрупкости горной породы описывается индексом хрупкости.

Одним из часто используемых способов определения индекса хрупкости BI является зависимость, предложенная Рикманом [4]:

$$BI_1 = \frac{\frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + \frac{\nu - \nu_{max}}{\nu_{min} - \nu_{max}}}{2}$$

где E и ν – модуль Юнга, Па, и коэффициент Пуассона соответственно, E_{max} и E_{min} – максимальные и минимальные модули Юнга на интервале соответственно, Па, ν_{max} и ν_{min} – максимальные и минимальные коэффициенты Пуассона на интервале соответственно. Стоит отметить, что данная формула является эмпирической, и результаты вычислений могут иметь высокую погрешность вследствие большой разницы порядков E и ν . При расчетах обычно используют динамические модули Юнга и коэффициенты Пуассона, так как они могут быть получены на основе Р и S-волнового анализа, а получение статических модулей Юнга и коэффициентов Пуассона возможно только с помощью лабораторных исследований.

Модуль Юнга и коэффициент Пуассона отражают взаимное влияние напряжений и деформаций в горной породе, и, соответственно, позволяют более точно количественно определить ее хрупкость по сравнению с методиками, основанными на прямом использовании напряжений и деформаций.

На образование трещин больше влияет модуль Юнга, чем коэффициент Пуассона. Более широкая область эффективного напряжения вокруг вершин трещины трансформируется в растягивающее напряжение в пластах с более высоким модулем Юнга, что приводит к образованию большего количества микротрещин вокруг основной трещины. Коэффициент

Пуассона влияет на вероятность возникновения трещины косвенно через изменение начального напряженного состояния массива горных пород – чем выше коэффициент Пуассона, тем выше минимальное эффективное напряжение и тем меньше трещин образуется [5].

Поскольку угольные пласты могут содержать значительное количество минеральных включений, геомеханические характеристики этих минералов также оказывают влияние на формирование трещины разрыва. Увеличению хрупкости угля способствует наличие таких минералов, как кварц, карбонатные и силикатные минералы, обладающие более высокой хрупкостью, чем глинистые частицы [3]. Предложены различные способы расчета индекса хрупкости на основе минерального состава, суть которых состоит в нахождении отношения содержания хрупких минералов к общему содержанию минеральных включений. В отношении состава углей Кузбасса формула будет иметь следующий вид:

$$BI_2 = \frac{W_Q + W_C + W_S}{W_{Total}}$$

где W_Q – масса кварца, W_C – масса карбонатных минералов, W_S – масса сульфидов, W_{Total} – общая масса минеральных частиц. Следует отметить, что два образца угля с одинаковым составом минеральных включений могут иметь разные индексы хрупкости вследствие разной степени уплотнения, что не учитывается в приведенном соотношении. Рассмотрение только минералогического состава для прогнозирования хрупкости не является точным.

Еще одной важной характеристикой хрупкой горной породы является высокий угол внутреннего трения θ . Увеличение нормального напряжения приводит к уменьшению угла внутреннего трения, за счет чего уменьшается хрупкость горной породы. Согласно Huska and Das [2] хрупкость может быть выражена следующим образом:

$$BI_3 = \sin \theta$$

Результаты оценки индексов хрупкости для угольных пластов Кузбасса приведены на рисунке 1. Как можно заметить, индексы хрупкости угля BI_1 и BI_2 имеют схожую форму и в целом повторяют изменения в содержании витринита в углях разных пластов. Это объясняется тем, что мацералы имеют собственные значения хрупкости. Хрупкость витринита превышает хрупкость инертинита [1], поэтому в блестящих углях обычно образуется сложная система трещин, а в матовых формируется одиночная трещина.

Оценка способности угольных пластов образовывать сеть трещин при проведении гидроразрыва важна при разработке метана угольных пластов. При значениях индекса хрупкости 10-20% в процессе ГРП формируется единственная планарная трещина, а при высоких индексах хрупкости более 40% и больших расходах закачки жидкости разрыва более 6 м³/мин происходит формирование разветвлённой сети трещин с большой суммарной протяженностью [4]. Таким образом, изменение индекса хрупкости пород прямо пропорционально изменению общей длины формируемых трещин. Исходя из значений средней протяженности сети трещин ГРП на продуктивных пластах Кузбасса, приведенных на рисунке 1, можно сделать вывод о соответствии характера их изменения динамике изменения индекса хрупкости, рассчитанного по формуле Рикмана. Следовательно, индексы хрупкости BI_1 более применимы для оценки хрупкости угля при подборе оптимальных параметров проведения ГРП.

Индекс хрупкости, рассчитанный с использованием статических параметров, позволяет более точно оценить хрупкие свойства горного массива. Тем не менее, из-за трудности

определения статических характеристик, можно использовать динамические характеристики для расчета индекса хрупкости вследствие незначительного различия полученных значений.

При полученных индексах хрупкости угля BI_1 , составляющих 0,35 – 0,5, происходит формирование сети трещин, за счет чего значительно увеличивается объем дренируемого коллектора по сравнению с дренируемым объемом одиночной планарной трещины.

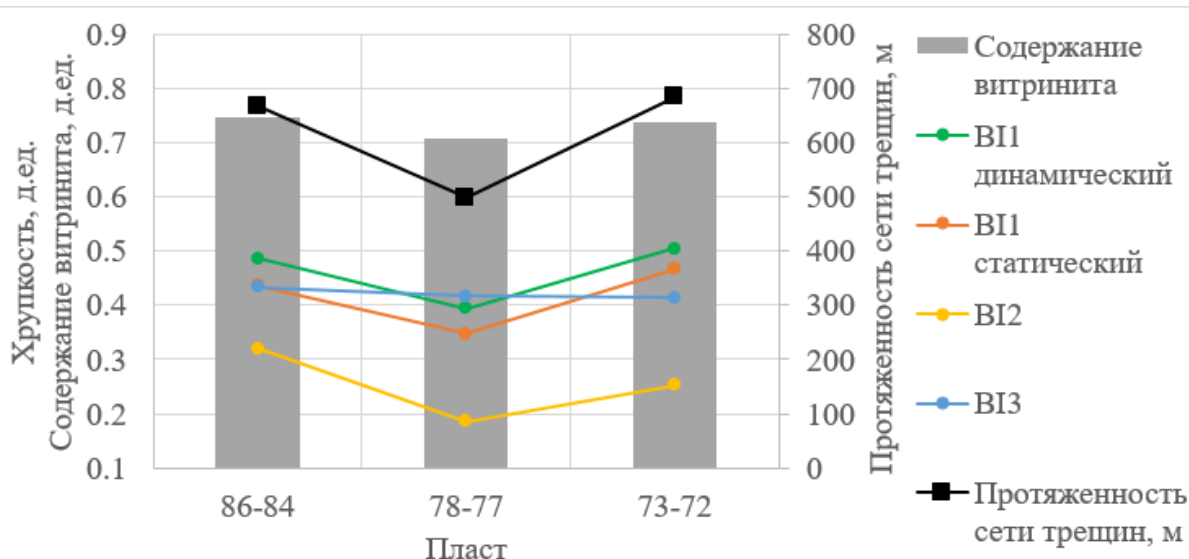


Рисунок 1. Оценка хрупкости углей Кузбасса

Согласно Рикману[4], при полученных значениях хрупкости в качестве жидкости разрыва рекомендуется использовать синтетические полиакрилатные или гибридные жидкости разрыва. Важно отметить, что их вязкость в зависимости от состава может быть достигать до 100 сПз. Увеличению вязкости способствует присутствие в жидкости различных модификаторов (в частности, гелей), которые могут адсорбироваться поверхностью угля. Также при увеличении вязкости жидкости разрыва увеличивается высота трещины, вследствие чего она будет распространяться в непродуктивную часть разреза. Таким образом, вязкость жидкости должна быть достаточно низкой (обычно для угольных коллекторов она не превышает 25 сПз).

Формируемая сеть трещин имеет меньшую степень раскрытости, чем основная трещина. Для крепления вторичных трещин необходимо использовать достаточно мелкий проппант (фракций 40/70, 30/50), который способен в них проникнуть. Оптимальным вариантом является закачка нескольких фракций проппанта: сначала более мелкого, затем более крупного. При этом крупный проппант должен обладать более высокой прочностью, чтобы удерживать в раскрытом состоянии основную трещину, подверженную значительному напряжению в области скважины. Использование закачки нескольких фракций позволяет лучше закрепить созданную трещину (рис. 2).

Так как угольные пласты имеют достаточно высокую хрупкость, давление разрыва пласта для них будет меньше, что облегчает процесс проведения гидроразрыва вследствие меньшей требуемой мощности используемых насосных агрегатов. Данный факт подтверждается результатами проведения гидравлического разрыва пласта при схожих параметрах и примерно на одинаковых глубинах для угольных пластов Кузбасса: пласт 78-77 имеет среднее давление разрыва 33,25 МПа, пласт 86-84 – 30,5 МПа, 73-72 – 30,2 МПа.

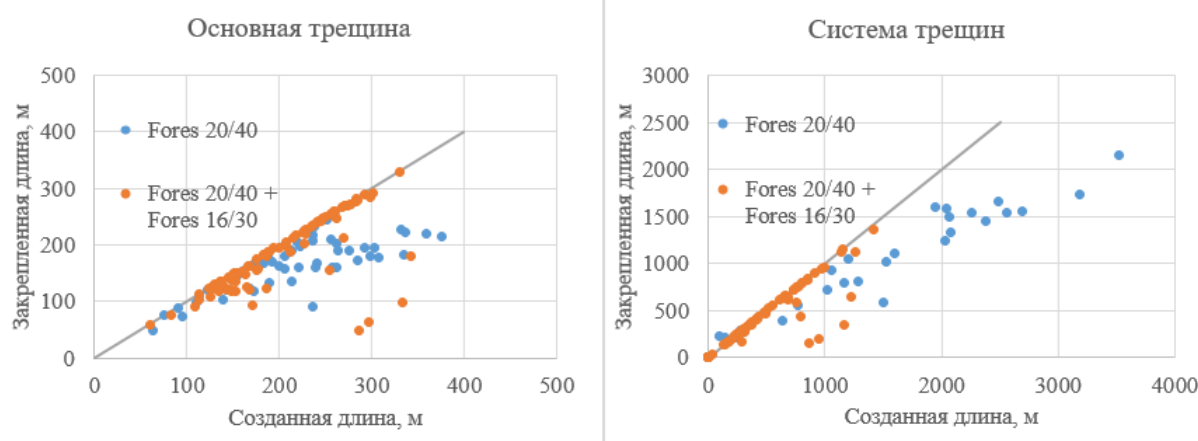


Рисунок 2. Соотношение закрепленной и созданной длины трещины

Выводы

1. Расчет индекса хрупкости угля может быть произведен различными способами – с учетом упругих и прочностных параметров, а также минерального состава. Оценку индекса хрупкости для проектирования гидравлического разрыва пласта следует проводить на основе статических модуля Юнга и коэффициента Пуассона по формуле Рикмана.

2. При индексах хрупкости углей Кузбасса 0,35 – 0,5 при проведении операции гидравлического разрыва пласта следует использовать синтетические полиакрилатные системы или гибридные жидкости разрыва с невысокими вязкостями. Закрепление трещины следует проводить проппантами нескольких фракций: мелкие проппанты необходимо использовать для крепления сети трещин, более крупные и прочные – для крепления основной трещины.

3. Чем выше индекс хрупкости пласта, тем меньшее давление разрыва необходимо для формирования трещины ГРП.

Библиография

1. Fang, X., Wu, C., Gao, B., Zhang, S., Zhou, D., & Jiang, X. (2023). Effects of active hydraulic fracturing fluid on the fracture propagation and structural damage of coal: phenomena and mechanisms. *Natural Resources Research*, 32(4), 1761–1775.
2. Hucka, V.; Das, B. (1974). Brittleness determination of rocks by different methods. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.* 1974, 11, 389–392.
3. Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J.-C., & Zhang, B. (2014). Fracability Evaluation in Shale Reservoirs - An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*.
4. Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W. V., & Kundert, D. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
5. Shimizu H, Ito T, Tamagawa T, Tezuka K (2018) A study of the effect of brittleness on hydraulic fracture complexity using a flow-coupled discrete element method. *J Petrol Sci Eng* 160, 372–383.

Подсекция 3.4. Технология и техника освоения континентальных, шельфовых и глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых

Учебный стенд подземного выщелачивания

**Салахов И.Н.* (МГРИ, salahovin@mgri.ru),
Некоз К.С. (МГРИ, nosovaks@mgri.ru)**

Аннотация

В статье описан разработанный учебный стенд подземного выщелачивания, приведены принципиальные схемы этого способа разработки, даны рекомендации по его использованию.

Ключевые слова

Подземное выщелачивание, учебный стенд, моделирование, Arduino

Теория

Как известно, подземное выщелачивание — это способ разработки рудных месторождений избирательным переводом полезного ископаемого на месте залегания в жидкую фазу, его подъема на поверхность и дальнейшую переработки полученных растворов с целью извлечения полезных компонентов.

Традиционная схема подземного выщелачивания (рис. 1) заключается в следующем: подготовленные выщелачивающие растворы нагнетаются в закачные (нагнетательные) скважины, где, проходя через рудный пласт, в следствие ионного обмена, насыщаются ценными компонентами. Полученный продуктивный раствор через откачные скважины поднимается на поверхность, где из него извлекают металлы. В полученных маточных растворах повышают концентрацию кислоты и снова повторяют процесс.

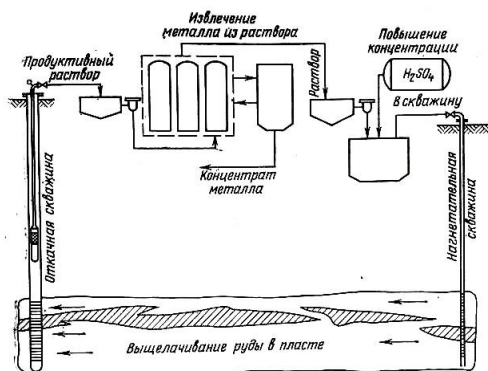


Рисунок 1. Принципиальная схема подземного выщелачивания

Для проведения лекционных и практических занятий, а также общеобразовательных мероприятий и дней открытых дверей, с целью повышения интереса абитуриентов к профессии горного инженера, сотрудниками кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ в рамках «Школьных проектов» был разработан интерактивный стенд подземного выщелачивания.

Схема разработанного стенда представлена на рис. 2.

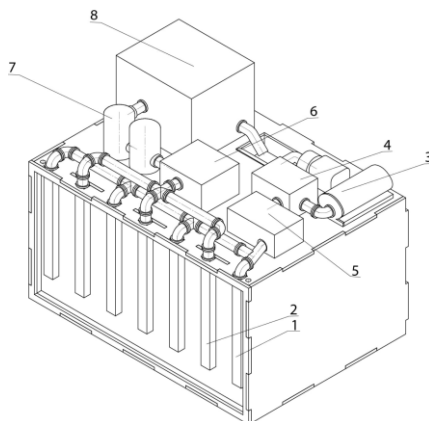


Рисунок 2. Схема стенда подземного выщелачивания. 1- нагнетательные скважины, 2- откачные скважины, 3- ёмкость хранения кислот, 4- ТУЗ (технический узел закисления), 5- УРВР (узел распределения выщелачивающих растворов), 6- УППР (узел приёма продуктивных растворов, 7- сборная ёмкость, 8- станция переработки

Модели поверхностной инфраструктуры скважин, трубопроводов и другого оборудования подготавливались в Компас 3D и печатались на 3D принтере.

Для симуляции движения растворов использовалась адресная светодиодная лента, управляемая микроконтроллером на базе Arduino. Для визуализации насыщения растворов ценными компонентами лента меняет цвет в области рудной залежи, а после отделения металлов (станций переработки) восстанавливает исходный цвет. Стенд предусматривает 7 скважин, которые чередуются (закачная - откачная) (рис. 3.).



Рисунок 3. Фото разработанного стенда

Выводы

Учебный стенд позволяет наглядно демонстрировать процесс подземного выщелачивания, что улучшает качество образовательного процесса и может привлечь внимание абитуриентов для поступления.

Библиография

1. Фазлуллин М. И. Кучное выщелачивание благородных металлов // -М.: Изд. Академии горных наук, 2001, -647 с.
2. Аренс В. Ж., Артушкевич В. А., Фазлуллин М. И., Хчеян Г. Х.,Шумилова Л. В. Технологии скважинного и кучного выщелачивания металлов// -М.: Дом НИТУ "МИСиС", 2018. -280 с
3. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Малухин Г. Н. Способ извлечения полезных компонентов выщелачиванием // патент № RU2095438 С1.
4. Гололобов В. Н. Arduino. Просто о сложном// - М.: НТЦ Микротех, 2024, -368 с.

Сравнительное исследования по кислотному выщелачиванию в пачуках и массообменных аппаратах

***Салахова К.Н.* (МГРИ, tlsh@bk.ru),
Вильмис А.Л. (МГРИ, vilmisal@mgri.rul),
Чеснова Е.С. (МГРИ, elizapreacher@yandex.ru)***

Аннотация

В статье рассматриваются и сравниваются различные способы выщелачивания. Проведён сравнительный анализ полученных проб горной массы после её обработки в пачуках и массообменных аппаратах.

Ключевые слова

Агитационное выщелачивание, массообменные аппараты, высокотурбулентные потоки, интенсификация массообмена

Теория

Для проведения исследований был отобран песок фракцией $-0,4+0,1$ мм. Оценка выщелачивания проводилась на примере железа, которое содержится в песках.

Очистка поверхности песков в кислотных растворах проводилась в двух принципиально различных конструкциях – пачуке (магнитной мешалке) и в массообменном аппарате.

Исследование по очистке песков в пачуке проводилось в специально подготовленном шкафу (1) (рис. 1), с активной вытяжкой (2, 3), отводящим и фильтрующим вредные испарения кислот за пределы лаборатории. На магнитную мешалку (8) устанавливалась емкость (4) с раствором (5). Диммером (9) регулировалась частота вращения устройства. После установления заданной скорости, в емкость с выщелачивающим засыпался песок (6). Исследование проводилось в течение 10 минут, после чего материал тщательно промывался, высушивался в муфельной печи в течение нескольких часов при температуре 105° и отдавался на анализ минерального состава.

Данные, полученные со спектрометра после выщелачивания ожелезненной пробы в пачуках представлены в табл. 1

Таблица 1

№ опыта	Выщелачивающий агент	Время опыта, минут	Концентрация Fe, ppm
1.	Исходное	10	21562
2.	HNO ₃	10	15394
3.	H ₂ SO ₄	10	11634
4.	HCl	10	13843
5.	C ₂ H ₂ O ₄ ·2H ₂ O	10	12843

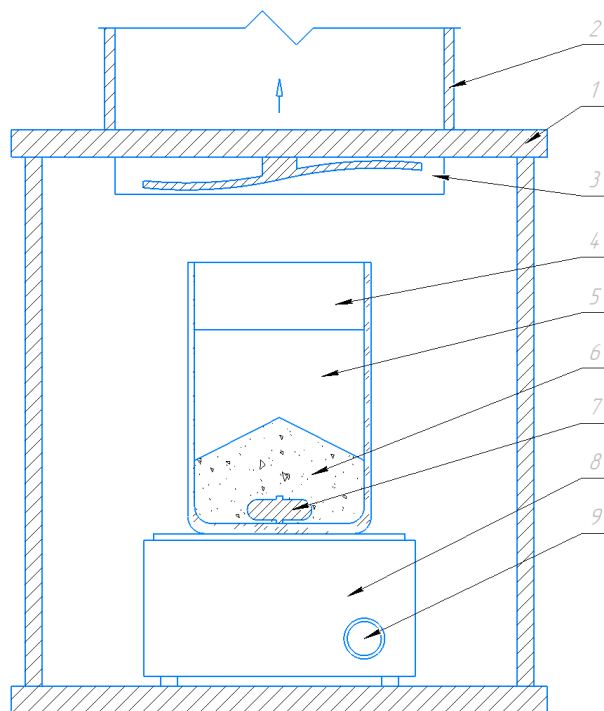


Рисунок 1. Схема лабораторной установки. 1 – вытяжной шкаф; 2 – гофрированная отводящая труба; 3 – вентилятор; 4 – емкость; 5 – кислота; 6 – песок; 7 – магнитный якорь, покрытый фторопластовой оболочкой; 8 – магнитная мешалка; 9 – регулятор оборотов

Реактором для выщелачивания служил массообменный аппарат (рис. 2.), который обеспечивает интенсивное перемешивание твердых частиц в растворах и массообмен за счет тангенциальной подачи напорной жидкости (кислоты) от насоса. В кольцевом зазоре генерируются коаксиально-закрученные струи, формирующие зону псевдооживления с высокой турбулентностью потока гидросмеси. При подаче жидкости (кислоты) в емкость, тангенциальный подвод жидкости в камере завихрения с коаксиальным кольцевым зазором формирует закрученный поток, который вызывает локальное псевдооживление и высокотурбулентные вихри при взаимодействии с твердым материалом [1,2].

Интенсификация выщелачивания основана на загрузке материала в массообменные аппараты совместно с реагентом. При этом, для пульпоприготовления применяются коаксиально-закрученные кольцевые струи жидкости. Реагент вводится непосредственно в аппарат, и растворение протекает в условиях интенсивного массопереноса, обусловленного взаимодействием твердых частиц материала с закрученными струями кислотных растворов. Высокая насыщенность гидросмеси, а также избыточное давление и постоянная рециркуляция реагента способствуют ускорению процесса. Высокотурбулентный режим перемешивания обеспечивает значительное увеличение поверхности контакта между твердыми частицами и раствором, а также уменьшение толщины диффузионного слоя, сопровождаемое градиентом давления. Это минимизирует ограничения, связанные с внешней диффузией, и инициирует процессы внутренней диффузии в порах обрабатываемого материала, что значительно интенсифицирует процесс выщелачивания. Герметичность системы обеспечивает экологическую безопасность. Таким образом, растворение протекает в условиях полного контакта и взаимодействия каждой частицы (куска) с раствором реагента [3,4].

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2



Рисунок 2. Процесс выщелачивания песчаных пород в массообменном аппарате

В связи с невозможностью проведения множественных исследований по выщелачиванию песков в массообменных аппаратах из-за материала их изготовления – оргстекла, на которое кислоты действуют агрессивно, нами было принято решение проводить опыты только с серной кислотой для прямого сравнения, которая показала наилучшие результаты при предварительных исследованиях.

Результаты спектрального анализа после выщелачивания песков в массообменных аппаратах и пачуках серной кислотой представлены в таблице 2.

Таблица 2

Показатели	Остаточное содержание Fe	
	ppm	%
Исходное содержание	21562	100,0
После обработки в пачуке	11634	54,0
После обработки в массообменном аппарате	4880	22,6

Выводы

Как показал анализ полученных результатов, наиболее эффективным способом выщелачивания горной массы определено растворение в массообменном аппарате.

Библиография

1. Салахов И. Н. Совершенствование технологии формирования штабеля на основе гидромеханизированного способа намыва для кучного выщелачивания // дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Москва, 2022, 139 с.
2. Дробаденко В. П., Луконина О. А., Малухин Н. Г. Устройство для классификации и обогащения полезных ископаемых // патент № RU 2055624 С1.
3. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Вильмис А. Л., Ребриков Д. Н., Козлов М. Ю. Способ ведения массообменных процессов и устройство для его осуществления // патент № RU 2558594 С1.
4. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Малухин Г. Н. Способ извлечения полезных компонентов выщелачиванием // патент № RU2095438 С1.

Разработка континентальных, шельфовых погребенных россыпей методом скважинной гидродобычи

Родомысльский Д.В.* (ООО «Морские платформы», info@searigs.ru),

Сурин С.Д.* (ООО «Морские платформы», stepan.surin@gmail.com),

Грызлов А.М.* (ООО «Морские платформы», grizlov@list.ru),

Чулкова В.В. (ООО «Морские платформы», chulkova_vv@mail.ru)

Аннотация

При освоении любых погребенных россыпей требуются значительные капитальные затраты на вскрышные работ. Применение технологии скважинной гидродобычи (СГД) позволит начать добычу с первого года и существенно снизить капитальные затраты на освоение месторождения.

В статье представлены основные принципы разработки континентальных и шельфовых погребенных россыпей полезных ископаемых через скважины. Описаны основные процессы скважинной гидродобычи и факторы, влияющие на эффективность добычи полезных ископаемых.

Множество участков погребенных россыпей находятся в зонах приливов и отливов шельфа внутренних морей РФ (зона предельного мелководья), дельтах рек, участках, где необходимо применение специальных морских или речных мобильных установок.

Ключевые слова

Скважинная гидродобыча, погребенные россыпи, золото, алмазы, фосфориты, янтарь, добыча на шельфе, морские платформы

Источники финансирования

Не требуется

Теория

В настоящее время на балансе государства находится значительное количество запасов полезных ископаемых, находящихся в россыпях. При этом ведущаяся разработка данных запасов ведется с постоянно увеличивающимся коэффициентом вскрыши и разработкой глубоко залегающих выработок. Для этого необходимо обустраивать глубокие карьеры или проходить шахты с сопутствующими затратами на вскрышу, водоотведение и крепеж. Актуальной задачей горного дела является поиск эффективных решений по отработке погребенных россыпей [1].

В последней четверти XX века получила развитие скважинная гидродобыча как отдельное направление науки и техники, направленное на отработку подземного пространства без ведения вскрышных и горнопроходческих работ. Данная технология применима к добыче россыпного золота и алмазов, фосфоритов, песков, содержащих редкие металлы, янтаря, разработки асфальтитов и битумов, создания устойчивых подземных выработок [2, 3].

Основой процесса скважинной гидродобычи является механическое воздействие воды на массив горной породы. Вода под значительным давлением способна разрушать структурные связи в грунте и перемещать разрушенный материал на значительные расстояния. В процессе скважинной гидродобычи выделяют три основных процесса: разрушение, доставку до скважины и подъем на поверхность.

В зависимости от геологических и гидрогеологических условий месторождения процесс разрушения может происходить в затопленных или незатопленных условиях. Воздействие воды на массив грунта в затопленных условиях требует более сложной

конструкции скважинного оборудования для подвода действующей струи к разрушаемой стенке. Незатопленные условия позволяют отрабатывать подземные выработки значительно большего радиуса с максимальной производительностью, но могут потребовать отдельных геологических условий.

Параметры гидромониторного разрушения мерзлых глинистых пород были определены при проведении опытных работ.

Дальность и производительность размыва мерзлых суглинистых пород определяются по формулам:

$$L_{\text{мвкс}} = 8,55 \frac{P^{0,25} \cdot d^{0,5} \cdot T^{0,5}}{G^{0,35} \cdot t^{0,5}} = 8,55 \cdot \frac{0,625^{0,25} \cdot 30^{0,5} \cdot 18^{0,5}}{200^{0,35} \cdot 6^{0,5}} = 10 \text{ м}$$

$$\Pi = 25,45 \cdot \frac{d \cdot P^{0,65} \cdot T}{G \cdot t} = 25,45 \cdot \frac{30 \cdot 0,625^{0,65} \cdot 18}{200 \cdot 6} = 8,4 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

$P=0,625$ МПа; $d=30$ мм; $G=200$ кг/м³; $T = 18$ °С воды; $t = -6$ °С грунтов.

Исходя из параметров разрушения можно определить расход воды через гидромонитор и плотность поднимаемой на поверхность гидросмеси (рисунок 1).

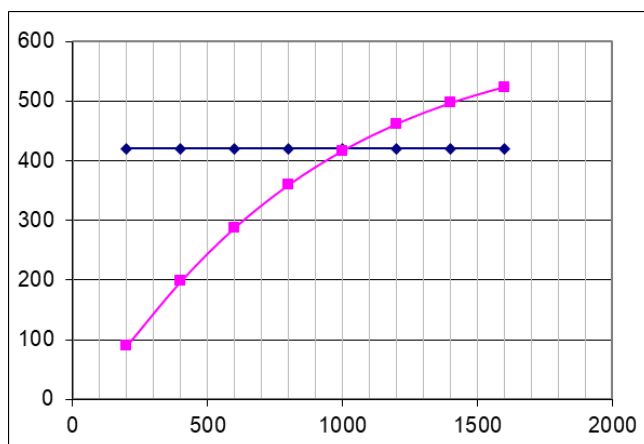


Рисунок 1 – Расчет параметров гидроэлеваторно-эрлифтного снаряда в интервале 15-35 м (синим – производительность снаряда, розовым – подача воздуха от компрессора; точка пересечения – оптимальный режим работы снаряда)

Подъем гидросмеси на поверхность из незатопленной подземной камеры может осуществляться двумя способами: гидроэлеваторным и гидроэлеваторно-эрлифтным.

Например, при высоте подъема 55 м давление воды на гидроэлеваторной насадке должна быть $55 \times 4 = 220$ м.в.с. или 2,2 МПа.

При использовании гидроэлеваторно-эрлифтного снаряда возможно использование насоса 8 НДС (100-400) с высотой подъема гидроэлеватором до 25 м и компрессором ВК 25 (1,2 МПа, 1500 м³/час). Подача воздуха осуществляется от компрессора в эжекторную трубку гидроэлеваторной насадки. Производительность снаряда 420 м³/час. Интервал строительства 15-35 м.

Доставка разрушенного материала к скважине осуществляется либо под действием гравитации при образовании угла естественного откоса у стенки выработки, либо водой, специально подаваемой в скважинный снаряд. Добыча материала с большой плотностью (например, золота) ведется исключительно при принудительном смыве разрушенного

материала к поднимающей скважине. Однородные пласты полезных ископаемых (например, угля или асфальтита) могут доставляться до скважины без принудительной подачи, что существенно упрощает конструкцию оборудования.

Подъем на поверхность осуществляется либо гидроэлеватором, либо эрлифтом. Гидроэлеватор используется на небольших глубинах в незатопленных условиях. Эрлифт может работать в незатопленных условиях и на больших глубинах [4].

К факторам, влияющим на выбор технологической схемы, можно отнести две основные группы: геологические и технологические. Геологические факторы – это, прежде всего, глубина залегания и мощность продуктивного пласта, его обводненность, наличие мерзлых и дисперсных грунтов в разрезе, их связность. Мерзлые породы позволяют держать устойчивую кровлю в процессе работы. Глинистые грунты плохо разрушаются в незатопленных условиях. Наличие валунов в продуктивном пласте требует решений по их разрушению или перемещению от технологических скважин. Наличие водоносных горизонтов влияет на выбор технологической схемы отработки.

Технологические факторы – это возможность обеспечения процесса соответствующим оборудованием. Прежде всего к ним относится расход и давление воды на выходе из скважинного снаряда, применение воздуха для работы эрлифта, диаметры труб в скважинном снаряде. Технологические схемы со скважинами большого диаметра позволяют вести добычу с максимальной производительностью, но требуют применения дорогостоящего оборудования, позволяющего подавать воду и воздух с большим расходом.

По сравнению с существующими аналогами методы скважинной гидродобычи обладают рядом существенных преимуществ:

1. Малая материалоемкость. Для начала работ требуется незначительное количество трубной продукции. Нет необходимости завоза значительного количества крепи или других материалов.
2. Использование достаточно простого оборудования. Для обеспечения работы необходимы серийно выпускаемые насосы и компрессоры.
3. Минимальное количество персонала. В процессе добычи задействовано малое количество персонала, а в призабойной зоне люди в принципе не появляются. Данное решение является сильным преимуществом с точки зрения промышленной безопасности и охраны труда.
4. Экологичность. Работы ведутся без необходимости размещения на поверхности терриконов вскрышных пород. При глубоком заложении россыпи или устойчивости ее кровли может не возникать просадочных явлений на поверхности.
5. Экономичность. Выход на операционную прибыль с минимум затрат в течение первого года.

Примерами использования технологии скважинной гидродобычи может являться добыча следующих полезных ископаемых: асфальтитов в Оренбургской области с глубины около 400 м; фосфоритов на ТАРЕ; россыпного золота в Якутии и на Чукотке с глубины до 40 м; янтаря в Калининградской области; железистых кварцитов на КМА и т.д.

Учитывая большое количество погребенных россыпей, особенно в зоне предельного мелководья, приливно-отливных зонах шельфа Чукотского моря, Восточно-Сибирского моря, дельтах рек, старых русел, а также для проведения инженерных изысканий, разведки на твердые полезные ископаемые (ТПИ) существует потребность в мобильном, плавучем основании, которое имеет возможность быстрой мобилизации, монтажа, установки на нем любого унифицированного оборудования для проведения вышеуказанных работ. Опыт нашей компании в применении СПУ «Федор Ушаков» представлен в презентации, учитывая его успешность как проекта мы изготовили новое мобильное плавучее основание, отвечающее вышеуказанным требованиям.

Выводы

Технология скважинной гидродобычи в настоящее время развивается не только в России, но и в других странах (США, Австралия, Канада). Существующие наработки позволяют определить векторы развития и сформировать ключевые показатели, достижение которых позволит выйти на рентабельное внедрение скважинной гидродобычи, перевести ее из разряда альтернативных в наилучшие доступные технологии Российской Федерации.

Наиболее перспективными направлениями в настоящее время является добыча тяжелых метаморфизированных нефтей (битумы и асфальтиты), золота и строительство подземных резервуаров различного назначения.

Безусловно вектор разведки и добычи будет смещаться в труднодоступные зоны и зоны с тяжелыми условиями и коротким благоприятным периодом для выполнения работ. Востребованность в комплексе технических и технологических решений будет возрастать, и мы доказали практическим опытом работ, что метод СГД является оптимальным, а иногда и единственным лучшим методом при добыче погребенных россыпей ТПИ. Морское оборудование существенно расширяет охват труднодоступных территорий, требует масштабируемости.

Благодарности (на ваше усмотрение)

Оргкомитету XVII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» ФГБОУ ВО «МГРИ».

Библиография

1. Россыпные месторождения России как источник стратегических видов минерального сырья. Лаломов А.В., Бочнева А.А. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2024. № 3 (188). С. 5-18.
2. Аренс В.Ж., Фазлуллин М.И., Хрулёв А.С., Хчаян Г.Х. Опыт разработки погребенных многолетнемерзлых россыпей золота скважинной гидродобычей Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 1. С. 26-35.
3. Сурин С.Д., Шипилов С.В., Савич О.И. Захоронение отходов бурения в подземных резервуарах в многолетнемерзлых породах. Сергеевские чтения. Научная конференция в рамках IX Международного форума «Экология»: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Том Выпуск 20. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. 2018 г.
4. Хрулев А.С., Сурин С.Д., Родомысльский Д.В. Патент на изобретение RU 2807619 C2, 17.11.2023. Заявка № 2022103912 от 16.02.2022.

Планирование разработки месторождений на основе анализа картограммы коэффициентов вскрыши

***Чопенко В.А.* (ООО «Экопроекткарьер», valchop3@gmail.com),
Тушов А.И. (ООО «Экопроекткарьер», tushov53@mail.ru)***

Аннотация

В данной работе представлено программное обеспечение, разработанное для оптимизации плана разработки месторождений на основе анализа картограммы коэффициентов вскрыши. Программа позволяет автоматически выбирать оптимальные участки для разработки, учитывая их значения и соседние элементы. Основной алгоритм включает поиск участков с минимальным коэффициентом вскрыши, а также обработку конфликтов при наличии нескольких участков с одинаковыми значениями.

Программа реализована на языке Python с использованием библиотеки Tkinter для создания графического интерфейса. Она поддерживает загрузку данных из текстовых файлов, визуализацию матрицы в виде карты из ячеек, а также сохранение результатов в формате, удобном для дальнейшего анализа. Разработанное решение может быть использовано для повышения эффективности планирования разработки месторождений.

Ключевые слова

Оптимизация, разработка месторождений, коэффициент вскрыши, картограмма, Python

Источники финансирования

Источников финансирования не имелось.

Теория

Разработка месторождений полезных ископаемых требует тщательного планирования, особенно при выборе участков для добычи [1, 2]. Одним из ключевых параметров, влияющих на эффективность разработки, является коэффициент вскрыши, который отражает соотношение объема пустой породы к объему полезного ископаемого. Чем меньше значение коэффициента, тем выгоднее разработка данного участка [3, 4].

В данной работе предложен алгоритм автоматического выбора ячеек для разработки на основе анализа картограммы (матрицы) коэффициентов вскрыши. Матрица представляет собой двумерный массив, где каждая ячейка соответствует участку месторождения. Значения ячеек могут быть как положительными (коэффициент вскрыши), так и отрицательными (непригодные для разработки участки).

Алгоритм включает следующие этапы:

1. Поиск ячейки с минимальным значением коэффициента вскрыши.
2. Выбор соседних ячеек с учетом их значений.
3. Обработка конфликтов при наличии нескольких ячеек с одинаковыми значениями.

Программа реализована на языке Python с использованием библиотеки Tkinter для создания графического интерфейса. Пользователь может загружать матрицу из текстового файла, визуализировать её в виде карты и выбирать ячейки для разработки в автоматическом или ручном режиме.

Пример работы программы

На рис. 1 представлен пример работы программы. Матрица коэффициентов вскрыши визуализирована в виде карты, где каждая ячейка окрашена в зависимости от её значения.

Программа автоматически выбирает ячейки для разработки, начиная с участков с минимальным коэффициентом.

Результат работы программы создается в формате txt-файла, где будет исходная матрица, но в значениях участков будет номер в порядке их отработки, а также таблица участков с номером отработки, «весом» участка и его условными координатами.

Таблица специально строится так, чтобы её можно было легко редактировать с помощью MS Excel (рис.2).

Анализ данных картограммы

Автоматический выбор Ручной выбор Подтвердить выбор Продолжить Автоматически решать все конфликты

Все конфликты будут решены автоматически.

	0.5	0.48	0.54	0.68	0.92		
0.5	0.48	0.39	0.38	0.59	0.86	1.01	
	0.8	0.81	0.81	0.87	0.96	1.1	
		0.84	1.02	1.05	1.07	1.1	0.77
	0.7	0.81	0.79	0.8	0.83	0.85	0.78
		0.65	0.6	0.56	0.59	0.6	0.54
		0.56	0.43	0.36	0.35	0.35	
	0.62	0.52	0.43	0.38	0.41	0.39	
	0.8	0.59	0.49	0.54	0.61		
1.0	0.81	0.67	0.61	0.72	0.71		
	0.88	0.67	0.61	0.72			
	0.84	0.62	0.48				
			0.38				

Рисунок 1. Пример работы программы для выбора оптимального плана разработки месторождений. Зеленым цветом выбран участок с наименьшим коэффициентом вскрыши

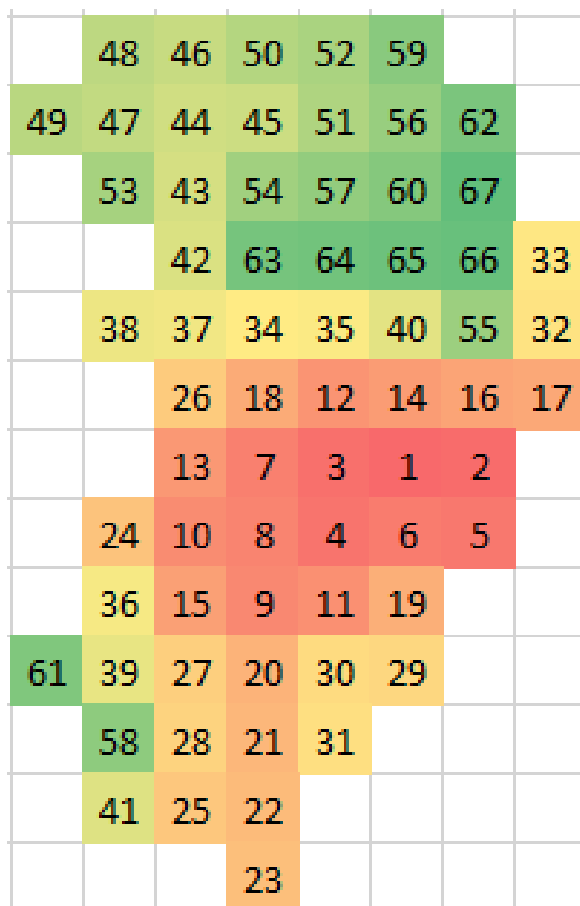


Рисунок 2. Пример работы программы для выбора оптимального плана разработки месторождений. Номера тут - это порядок отработки участков с матрицы на рис. 1, полностью составленный программой и, для наглядности, раскрашенный с помощью MS Excel

Преимущество данного ПО

Наше программное обеспечение имеет несколько уникальных особенностей:

1. Простота использования: Программа реализована на Python с использованием библиотеки Tkinter, что делает её доступной для широкого круга пользователей.
2. Автоматический выбор ячеек: Алгоритм автоматического выбора ячеек на основе анализа матрицы коэффициентов вскрыши является уникальным и может быть полезен для специалистов в области геологии и горного дела.
3. Гибкость: Программа поддерживает загрузку данных из текстовых файлов и сохранение результатов в удобном формате, что делает её гибким инструментом для анализа.

Перспективы развития нашей программы

На данный момент программа создавалась исключительно для решения конкретной задачи внутри нашей компании. Если программа вызовет общественный интерес, то она будет дорабатываться по многим аспектам:

1. Улучшение стабильности работы.
2. Оптимизация поиска наилучшего пути развития горных работ и оптимизация программы под большие базы данных.
3. Улучшение графического интерфейса.
4. Добавление новых сценариев использования. Сейчас она работает лишь от минимального значения к максимальному, а в дальнейшем планируется и обратный процесс – от максимального к минимальному.

5. Добавление «ручного» режима работы на всех этапах выбора участков, что делает программу более гибкой.
6. Добавление возможности работы с большим количеством форматов данных. Сейчас это только «.txt», но планируется как минимум «.xlsx», а возможно и даже «.dwg».
7. Перевод программы на английский язык.
8. Создание исполняемых файлов типа «.exe» и «.apk» для корректной работы в ОС «Windows» и «Android» соответственно, что позволит обходиться без установки Python и его библиотек. Также сейчас программа запускается только либо через компилятор кода, либо командную строку, а создание исполняемого файла уберет эти неудобства.
9. Добавление анализа базы данных скважин и автоматическое построение плана горных работ на её основе с учетом заданных границ.

Выводы

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс выбора оптимальных участков для разработки месторождений на основе анализа матрицы коэффициентов вскрыши. Программа может быть использована для повышения эффективности планирования разработки месторождений, а также для обучения специалистов в области геологии и горного дела.

Библиография

1. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1. Производственные процессы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
2. Чирков А.С. Добыча и переработка строительных горных пород: Учебник для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 623 с.
3. Курехин, Е.В. Процессы открытых горных работ: учебное пособие для обучающихся направления подготовки 21.05.04 «Горное дело» специализации «Открытые горные работы» очной и заочной форм обучения / сост. Е.В. Курехин, С.И. Протасов. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2023. – 169 с.
4. Синьковский, В.Н. Технология открытых горных работ: учебное пособие для вузов по специальности "Открытые горные работы" направления подготовки "Горное дело" / В. Н. Синьковский, В. Н. Вокин, Е. В. Синьковская; Сиб. федер. ун-т. - 2-е изд., перераб. и доп. - Красноярск: ИПК СФУ, 2009. - 507 с.