

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Бузанов Кирилл Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
БЕЗАВАРИЙНОГО БУРЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ПОД НАПРАВЛЕНИЯ И
КОНДУКТОРЫ РАЗВЕДОЧНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН
НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВОСТОЧНО – СИБИРСКОГО РЕГИОНА
(НА ПРИМЕРЕ КУЮМБИНСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

Специальность: 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Боярко Юрий Леонтьевич

ТОМСК – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ БУРЕНИЯ ВЫСОКОАВАРИЙНЫХ ИНТЕРВАЛОВ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВОСТОЧНО – СИБИРСКОГО РЕГИОНА	13
1.1. Анализ процесса бурения интервалов под направление и кондуктор на месторождениях Восточно-Сибирского региона.....	13
1.1.1. Характеристика процесса строительства секций направлений и кондукторов на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении и Чайнинском нефтегазоконденсатном месторождении	13
1.1.2. Исследование условий ведения буровых работ интервалов под направления, кондукторы и технические колонны на Ковыктинском газоконденсатном месторождении	24
1.1.3. Анализ геолого-технических условий проходки интервалов под направления и кондукторы на Куёмбинском нефтяном месторождении	30
1.2. Обзор современных способов ликвидации поглощений промывочной жидкости в аварийных интервалах, применяемых на скважинах месторождений Восточно-Сибирского региона	34
1.3. Современное состояние и перспективы развития технологии ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом (ГЖС) и анализ имеющегося опыта работ	46
1.4. Исследование и разработка технологии бурения с очисткой забоя воздухом для безаварийной проходки интервалов под направления и кондукторы скважин Куёмбинского нефтяного месторождения	55
1.4.1. Исследование характеристик воздуха как рабочего агента при ударно-вращательном бурении	56
1.4.2. Анализ основных особенностей очистки забоя воздухом при вскрытии поглощающих и водопроявляющих пластов.....	65
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	71
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И МЕТОДОЛОГИЯ СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ	73
2.1. Буровая установка для проведения опытно-промышленных работ на геологоразведочных и эксплуатационных скважинах Куёмбинского месторождения	73
2.2. Компонировка низа буровой колонны и компрессорное оборудование для исследования процессов очистки забоя воздухом на скважинах Куёмбинского месторождения	76

2.3. Методика проведения производственного эксперимента в условиях проходки интервалов скважин под кондукторы на скважинах Куюмбинского месторождения	84
2.4. Методика обработки результатов исследований	87
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	89
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА БУРЕНИЯ С ОЧИСТКОЙ ЗАБОЯ ВОЗДУХОМ ДЛЯ УСЛОВИЙ КУЮМБИНСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	90
3.1. Анализ современных методов расчета воздухоснабжения при бурении геологоразведочных и эксплуатационных скважин с очисткой забоя воздухом ...	90
3.2. Исследование влияния шероховатости затрубного пространства, качества продуктов разрушения забоя и арифметической формулы коэффициента аэродинамического трения на величину расчетного рабочего давления на компрессоре	103
3.3. Разработка критерия безаварийности бурения проблемных интервалов с очисткой забоя воздухом	110
3.4. Моделирование процесса очистки забоя скважин с целью определения темпа повышения давления на компрессоре с учетом динамической ситуации в системе «скважина – пласт»	113
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	117
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НА КУЮМБИНСКОМ НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ	119
4.1. Анализ производственных показателей бурения интервалов скважин под направления и кондукторы на Куюмбинского месторождения	119
4.2. Оценка экономической эффективности внедрения ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом	121
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127
Приложение 1. Акт внедрения методики ООО «Интес»	137
Приложение 2. Акт передачи модифицированной методики ООО «Коралайна Инжиниринг»	138
Приложение 3. Заключение ООО «Газпром ВНИИГАЗ»	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность.

На протяжении многих лет нефтегазодобывающая промышленность была и остается ключевой народнохозяйственной отраслью в структуре как внешнеэкономической деятельности, так и внутренней экономики нашей страны. Вектор развития промышленности неуклонно смещается на Восток, где крупные нефтегазовые месторождения и месторождения-сателлиты вовлекаются в сеть освоения. Масштабы производственной деятельности в совокупности со сложными горно-геологическими условиями залегания углеводородов, неизменно, ставят перед специалистами нефтегазовой отрасли новые проблемы, требующие, часто, нестандартных путей решения.

Острейшей производственной проблемой, требующей научно–практического подхода решения при бурении интервалов под направления и кондуктор на скважинах месторождений Восточно-Сибирского региона, является потеря циркуляции промывочного агента. Причины массовых поглощений бурового раствора кроются в особенностях горно-геологического строения разреза скважины, вызванных сейсмической активностью, метаморфическими процессами, и несоответствием традиционной технологии бурения эксплуатационных и разведочных скважин условиям ведения работ. Одним из перспективных решений в области повышения эффективности строительства эксплуатационных и разведочных скважин на месторождениях Восточной Сибири является широкое внедрение при проходке проблемных интервалов скважин технологии очистки забоя воздухом или газожидкостными рабочими агентами (далее ГЖС).

Мировой и отечественной практикой бурения скважин сформирована рациональная область применения воздуха в качестве очистного агента. Это, как правило, бурение в условиях залегания многолетнемерзлых пород, прохождение интервалов пород высоких категорий твердости, строительство скважин для дегазации угольных месторождений и т.д. С начала 30-х годов прошлого столетия

и до сегодняшнего дня продолжается использование воздуха в качестве очистного рабочего агента в горнорудной промышленности. Значительным технологическим прорывом стало использование газожидкостных очистных агентов при реализации бурения с контролем давления (Managed Pressure Drilling), в том числе для вскрытия низко проницаемых продуктивных сланцевых пластов углеводородов. Необходимо заметить, что проходка скважин с очисткой забоя воздухом может осуществляться как при наличии погружного пневмоударника в составе КНБК (ударно-вращательный способ), так и при его отсутствии (вращательное бурение с приводом от ротора).

Значительный вклад в теорию и практику бурения скважин с использованием газообразных рабочих агентов внесли исследователи Б.Б. Кудряшов, А.И. Кирсанов, А.С. Бронзов, И.В. Куликов, М.Н. Климентов, В.И. Тиль, А.М. Магурдумов, М.В. Меркулов, Л.К. Горшков, Д.А. Юнгмейстер, В.А. Пивнев, А.Т. Лактионов, А.С. Межлумов, Н.С. Макурин, Я.А. Гельфгат, Ю.С. Лопатин, Б.Ю. Данюшевский, А.О. Межлумов, Я.Ю. Ахмедов, Р.С. Газарян, Х.И. Юсифова, О.В. Зорэ, William C. Lyons, Boyun Guo, Reuben L. Graham, Greg D. Hawley, Chen Guang, Chen Xingyuan, Liu Desheng, Cheng Xiaonian, Kenneth P. Malloy, George H. Medley, и др.

Выполненные исследования позволили создать научную основу технологии ведения буровых работ с использованием воздуха и газожидкостных очистных агентов. Вместе с тем, несмотря на опыт, отечественный и зарубежный, достаточную систематизированность и широкий спектр научных исследований, ряд аспектов данного технологического направления изучен недостаточно глубоко. О целесообразности таких исследований свидетельствуют, в частности, нерешенный вопрос о влиянии водопритока из вмещающих пород в скважину на методику расчета воздухообеспечения. Актуальными остаются вопросы научно-обоснованного подхода к определению допустимого количества транспортируемого с забоя шлама, процесса приращения механической скорости бурения и требуемого давления на компрессоре в условиях бурения эксплуатационных и разведочных скважин на углеводородные ископаемые. В

контексте возрастающего интереса со стороны отечественных нефтегазодобывающих предприятий к данному методу сформулированные вопросы являются актуальными и требующими решения.

Цель работы.

Исследование и разработка новой методологии безаварийного бурения интервалов под направления и кондукторы при использовании воздуха в качестве очистного агента в цикле строительства эксплуатационных и разведочных скважин на Куюмбинском нефтяном месторождении (Восточная Сибирь).

Идея работы.

На основе предложенного автором использования в методике расчета циркуляционной системы скважины с воздухом определенного вида зависимости для вычисления коэффициента аэродинамического трения и новых параметров – объемной доли продуктов разрушения забоя, предела допустимой массовой концентрации шлама – разработать рациональную технологию бурения под направления и кондуктор, решающую задачу предотвращения ситуаций с разрывом горных пород и катастрофическими поглощениями на примере Куюмбинского нефтяного месторождения.

Предметом исследования является процесс углубления интервалов под направления и кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения.

Задачи исследования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Систематизация и анализ отечественного и зарубежного опыта бурения скважин с очисткой забоя воздухом, углубление знаний на базе данных исследований;
2. Анализ геологического строения исследуемого месторождения, условий и причин возникновения катастрофических поглощений промывочной жидкости;
3. Выбор и обоснование методов исследований технологических процессов бурения с очисткой забоя воздухом;
4. Проведение опытно–промышленных работ (ОПР) на конкретном месторождении с целью обеспечения достоверности результатов исследований;

5. Дополнение существующей методики расчета воздухообеспечения критериальными оценками эффективности проведения буровых работ;

6. Математическое моделирование и формирование научно–методологических основ регулирования параметров режима бурения при углублении проблемных интервалов на скважинах Куюмбинского месторождения.

Методика исследований.

Для решения поставленных задач принят комплексный метод исследования, сочетающий в себе:

1. Обобщение, систематизация и анализ литературных источников;
2. Сочетание теоретических исследований, математического моделирования на базе основных положений теории пневмотранспорта, движения дисперсных частиц в несущем потоке воздуха и опытно–промышленных работ в реальных производственных условиях;
3. Статистическая обработка результатов исследований.

В процессе исследования использовались программные продукты Mathcad 15.0, MS Excel, MS Word.

Личный вклад автора состоит в обзоре и анализе литературных источников по тематике бурения с очисткой забоя воздухом, систематизировании выбора основных положений теории пневмотранспорта и аэродинамике дисперсных частиц в потоке воздуха для отражения реалий процесса очистки забоя скважины, формулировании критериальной оценки безаварийности процесса углубления скважины, участии в проведении и обработке результатов опытно-промышленных работ, а также в формулировании защищаемых научных положений.

В работе защищаются следующие положения:

1. Решение задачи воздухообеспечения и выбора компрессорного оборудования для целей качественной очистки забоя скважины и выноса выбуренной породы необходимо осуществлять на основе модифицированной методики расчета циркуляционной системы с учетом влияния шероховатости

затрубного пространства, содержания объемной доли продуктов разрушения забоя, а также вида зависимости для вычисления коэффициента аэродинамического трения, обеспечивающей объективное отражение технологического процесса углубка скважины.

2. Для исключения прихватоопасных ситуаций при бурении под направление и кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения в процессе проектирования технологии бурения необходимо применять критерий расходной массовой концентрации продуктов разрушения забоя (критерий РМК), предложенный в диссертационной работе.

3. Для исключения ситуации пластового разрыва в процессе бурения под направление и кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения при проектировании технологии бурения на повышенных расходах газообразного очистного агента целесообразно использовать выявленные закономерности динамической системы «скважина – пласт», учитывающие темп приращения рабочего давления в скважине по мере её углубления.

Научная новизна:

1. Установлена реальная значимость влияния объемной доли продуктов разрушения забоя в воздухе на коэффициент аэродинамического трения потока в затрубном пространстве и необходимость отражения данного фактора на конечный результат расчета требуемого давления на компрессоре.

2. Сформулирован критерий безаварийности процесса бурения с очисткой забоя воздухом, основанный на выявленной предельно-допустимой расходной массовой концентрации (критерий РМК) продуктов разрушения забоя в несущем потоке воздуха для уникального сочетания горно-геологических условий и технико-технологических параметров процесса на скважинах Куюмбинского нефтяного месторождения.

3. Разработана методика проведения проектных расчетов ожидаемого рабочего аэродинамического давления в циркуляционной системе скважины, позволяющая установить закономерность регулирования параметров работы

компрессорного оборудования для предотвращения ситуации пневморазрыва горных пород.

4. Выявлены закономерности роста давления на компрессоре, влияющие на состояние и стабильность процесса углубления скважины и позволяющие модифицировать действующую методику расчета воздухообеспечения для условий бурения скважин на Куломбинском нефтяном месторождении.

5. Определены закономерности взаимосвязи величины механической скорости бурения и требуемого расхода воздуха в циркуляционной системе, позволяющие качественно и эффективно проходить проблемные интервалы скважин на Куломбинском месторождении.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается проведением производственного эксперимента непосредственно на объекте работ с использованием реально применяемой системы контроля процесса углубления скважины, достаточным объемом исследований, позволяющим сделать вывод о представительности и надежности их при обработке общепринятыми методами математической статистики.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработанной технологии оптимизации процесса строительства скважин на Куломбинском месторождении, позволяющей эффективно производить бурение проблемных интервалов катастрофических поглощений промывочной жидкости.

2. В формировании модифицированной расчетной методики воздухообеспечения циркуляционной системы скважины, применимой для проведения проектных расчетов на ее безаварийное бурение.

3. В значительном снижении компонентов для приготовления очистного агента и возможности проведения буровых работ в интервалах под направление и кондуктор в условиях дефицита технической воды.

Реализация результатов исследований:

1. Выводы и рекомендации проведенного исследования были использованы компаниями ООО «Интес» и ООО «Коралайна Инжиниринг» при проведении буровых работ на Куюмбинском месторождении.

2. Модифицированная методика расчета воздухообеспечения скважин были использованы компаниями ООО «Рус-КР» и ООО «Восточная буровая компания» при составлении технико-технического предложения по реализации программы работ опережающего строительства секций направлений и кондукторов в ходе проведения конкурсных процедур на соответствующие виды работ для нужд компаний-Заказчиков.

3. Полученные результаты использовались при проведении учебных занятий в Национальном исследовательском Томском политехническом университете по дисциплине «Технология бурения нефтяных и газовых скважин».

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры бурения скважин НИ ТПУ, в докладах на XVIII–XX Международных симпозиумах имени академика М.А. Усова студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, НИ ТПУ, 2014, 2015, 2016 годы), на Всероссийской научно-технической конференции с Международным участием, посвященной 60-летию кафедры бурения скважин НИ ТПУ «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин» (Томск 2014), на XI Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (нефть, газ и энергетика). (Москва, ПАО «Газпром», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015 год.), на X Научно-технической конференции молодых специалистов и молодых работников ООО «Газпром добыча Ноябрьск» (Ноябрьск, 2015 год), на I Международной научно-практической конференции «Бурение в осложненных условиях» (СПГУ, Санкт-Петербург, 2016 год). Многократно основные тезисы и практические аспекты работы докладывались на выездных производственных совещаниях, научно-технических советах, научно-практических семинарах с участием специалистов таких компаний как ООО «Русь Ойл», ООО «Газпром

добыча Ноябрьск», ПАО «Газпром», Краснодарский филиал ООО «Газпром бурение», ООО «Газпром бурение», ООО «Рус-КР KERUI GROUP», ООО «ТюменНИИгипрогаз».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 5 в журналах из списка ВАК.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 89 наименований; содержит 139 страницы машинописного текста, 29 рисунков, 26 таблиц, 3 приложения.

Авторская благодарность и признательность.

Автор выражает искреннюю признательность генеральному директору ООО «Интес» А.В. Петрову, а также руководителю отдела бурового оборудования ООО «Коралайна Инжиниринг» А.А. Лаврову за совместное внедрение наукоемкой идеи диссертации в производственный процесс.

Автор выражает глубокую благодарность специалистам сервисного подразделения ООО «Русь Ойл» С.К. Бочкарёву, к.т.н. А.А. Ларину, В.В. Фееру, Д.И. Лебедеву, Г.Г. Синебрюхову, начальнику Управления ПАО «Газпром» Д.Г. Бельскому, руководителям блока бурения ООО «Газпром добыча Ноябрьск» М.А. Кемпфу, Н.Г. Еськину, А.Д. Громову, А.А. Киселеву, главному инженеру краснодарского филиала ООО «Газпром бурение» Д.А. Бурбе, главному инженеру ООО «Восточная буровая компания» Л.Л. Лушникову за ценные практические советы при обсуждении отдельных результатов работы. Особую благодарность автор выражает руководству компании ООО «Рус-КР KERUI GROUP» и куратору деятельности на территории РФ г-ну Wang Haijiao за предоставленную возможность анализа опыта работы коллег из Китая.

Автор признателен д.ф-м.н., профессору Г.Р. Шрагеру, за оказанную методическую помощь при проведении исследований закономерностей движения частицы в потоке воздуха, систематизации положений теории пневмотранспорта

Искренние слова благодарности автор выражает научному руководителю, профессору кафедры бурения скважин НИ ТПУ, Ю.Л. Боярко, а также сотрудникам кафедры на момент обсуждения результатов работы, В.И. Рязанову,

М.А. Самохвалову, Л.Н. Нечаевой, А.В. Пахареву, В.Д. Евсееву, С.Я. Рябчикову,
А.В. Ковалёву за ценные рекомендации и замечания при выполнении работы.

ГЛАВА 1. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ БУРЕНИЯ ВЫСОКОАВАРИЙНЫХ ИНТЕРВАЛОВ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВОСТОЧНО – СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Бурение скважин всех категорий на месторождениях полезных ископаемых Якутии, Иркутской области, Красноярского края объединяет общий фактор – проблема поглощений промывочной жидкости при бурении интервалов под направление и кондуктор. Ниже представлен уникальный статистический материал об обозначенной проблеме, являющийся результатом научно-практической исследовательской работы на различных площадях ведения буровых работ в Якутии, Иркутской области и Красноярском крае. Также приведен анализ современного состояния технологии бурения с очисткой забоя воздухом и особенности данной технологии, как перспективной меры по предотвращению поглощений промывочной жидкости в интервалах бурения скважин под направление и кондуктор.

1.1. Анализ процесса бурения интервалов под направление и кондуктор на месторождениях Восточно-Сибирского региона

1.1.1. Характеристика процесса строительства секций направлений и кондукторов на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении и Чайядинском нефтегазоконденсатном месторождении

Современное состояние технологии бурения скважин предполагает неизбежность встречи различного рода осложняющих факторов в процессе строительства скважины. Одним из таких факторов, часто переходящим из категории осложнений в категорию аварий является поглощение промывочной жидкости. На борьбу с поглощениями и их ликвидацию в ряде регионов до сих пор тратятся значительные средства. Примерами таких регионов является Красноярский край и Восточная Сибирь. В течение 2012 – 2018 гг. нами были проведены глубокий анализ и систематизация геологических данных, имеющихся

производственных отчетов о строительстве скважин месторождений Красноярского края и Восточно-Сибирского региона. Результаты проведенных исследований и системного анализа свидетельствуют о значительной важности выявленной общей проблемы для всех исследуемых нами условий ведения буровых работ – поглощения промывочной жидкости в интервале до 1000 метров. Как правило, этот интервал включает в себя секции направления, кондуктора и технической колонны в зависимости от конструкции скважин на каждом конкретном месторождении.

Дулисьминское нефтегазоконденсатное месторождение (ДНГКМ) расположено в Катангском районе Иркутской области в 80 км. северо–западнее магистрального нефтепровода ВСТО. По состоянию на 01.01.2014 геологические запасы составили по сумме категорий 81,5 млн. тонн нефти и конденсата и 80 млн. м³ газа. По запасам месторождение является одним из крупных в Иркутской области [1]. Близость к магистральному трубопроводу и приведенная количественная оценка геологических запасов делают ДНГКМ одним из системообразующих для нефтегазодобывающего комплекса Иркутской области.

Опыт ведения буровых работ показал, что процесс углубки геологоразведочных и эксплуатационных скважин в интервале 0 – 1000 м на Дулисьминском месторождении ведется при системном наличии несовместимых условий бурения, которые являются следствием распространения экзогенной трещиноватости в интервалах Усть-кутской, Литвинцевской и Верхоленской свит [2]. Геологическое строение ДНГКМ в интервале от 0 до 1000 м приведено в таблице 1.

В геологическом отношении Верхоленская и Литвинцевская свиты имеют очень сложное строение, обусловленное, в частности, переслаиванием контрастных по проницаемости пород. В литологическом описании пород Верхоленской свиты отмечается общая загипсованность пачки. Верхняя часть объединенной пачки более запесочена. В основании Верхоленской свиты преобладают мергели и глинистые доломиты.

Таблица 1 – Геологическое строение аварийного интервала поглощений промывочной жидкости Дулисьминского нефтегазоконденсатного месторождения

Название стратиграфического подразделения	Интервал по вертикали		Описание горной породы
	от (верх)	до (низ)	
Четвертичные отложения	0	5	Отложения представлены супесями, суглинками и галечниками. Породы выходят на дневную поверхность
Макаровская свита	5	30	Переслаивание песков серых и желтовато-серых, мелкозернистых, аргиллитов серых и алевролитов
Чертовская свита	30	90	Аргиллиты зеленовато-серые, желто-зеленые с прослоями известковистых песчаников и известняков
Криволуцкая свита	90	155	Алевролиты, аргиллиты грязно-зеленые, желтовато-серые, буро-желтые, реже бурые с прослоями песчаников кварцевых, разнозернистых светло-серых с розовым оттенком
Усть-кутская свита	155	190	Доломиты водорослевые, пестроцветные, мелкозернистые с прослоями песчаников
Верхоленская свита	190	580	Мергели, алевролиты, аргиллиты красно-бурые, шоколадно-коричневые, слабослюдистые с редкими прослоями розовых кварц-полевошпатных песчаников, зеленовато-серых глинистых доломитов, темно-серых с фиолетовым оттенком, в подошве свиты – гипсов розовых и белых
Литвинцевская свита	580	720	Верхнелитвинцевская подсвита сложена доломитами серыми, мелкозернистыми с прослоями серых, глинистых доломитов и гипсов белых. Присутствует глинисто-сульфатно-карбонатный брекчий голубовато- и темно-серый, реже известняки серые. Нижнелитвинцевская подсвита сложена известняками доломитизированными светло-серыми, серыми, разно-зернистыми, в кровле – кавернозными, в подошве – с прослоями доломитов глинистых, запесоченных, темно-серых, гипсов белых.
Ангарская свита	720	1190	Доломиты коричневатые-серые с прослоями каменных солей прозрачных, розовых, грязно-серых, известняков серых, доломито-ангидридов пепельно-серых, доломитов глинистых темно-серых, редко – калийных солей прозрачных с голубоватым оттенком и оранжевых. Каменные соли участками замещены глинисто-сульфатно-карбонатными брекчиями, темно- и голубовато серыми, гипсами белыми и розовыми. Нижняя часть свиты сложена ангидридами, доломито-ангидридами пепельно-серыми с тонкими прослоями доломитов серых, доломитов темно-серых глинистых

С.М. Замараев [3] предполагает формированием так называемой «доломитовой муки» при несогласном залегании пород Верхоленской свиты на отложениях Литвинцевской свиты. Геофизические свойства пород объединенных свит – маркирующее высокие значения природной радиоактивности и однородно низкие кривые сопротивления (КС). Общая мощность толщи до 455 м., преобладающая мощность 360 – 390 м. [4].

Осадочные породы, отнесенные к Литвинцевской свите, представлены образованиями морской мелководной фации – доломитами, известнякам, их переходными и брекчированными разновидностями. В верхней части отмечены запесоченные доломиты, окремненные и водорослевые разности. Геофизические свойства пород – низкая гамма-активность, однородно высокое сопротивление. Мощность свиты по данным съемочных работ до 130 м.; уточненная по поисково-разведочному бурению на углеводороды колеблется от 65 до 90 м [4].

Приуроченные к Верхоленской и Литвинцевской свитам разрывные тектонические нарушения относятся к сбросам и взбросо-сдвигам северо-восточного плана протяженностью от 10 до 50 км. и амплитудой до 200 м. Явно не зафиксированные, оперяющие или сопровождающие крупные разрывы зоны тектонической трещиноватости более высоких порядков, могут быть встречены при проходке скважин и являются осложняющим фактором бурения [5]. Приведенный выше тезис подтверждается на практике. Именно интервал Верхоленской свиты подразумевает наиболее высокие риски возникновения поглощений промывочного агента.

Н.Я. Семенов дал достаточно обстоятельное описание природы возникновения поглощений промывочной жидкости, в том числе в породах Ордовикских отложений Усть-кутской свиты. В данной структуре преобладающим является субмеридиальное направление макротрещин I порядка. Эти трещины имеют протяженность по вертикали до нескольких десятков метров, иногда 100 м, крупные, всегда широкие, зияющие, как правило вертикальные или слабо наклонены, иногда заполнены брекчией, состоящей из обломков окружающих пород. Изображение трещины I порядка приведено на рисунке 1.

Направление трещин I порядка в Усть-кутской свите совпадает с общим простиранием основных структур района. Углы падения 80 – 90 градусов. Трещины широтного и субширотного простирания менее развиты, связывая участки пласта и объединяя их в одну гидродинамическую систему [6].



Рисунок 1 – Фотография вертикальной трещины протяженностью 15 метров, секущей полость скважины

Генезис формирования общей тектонической структуры, вероятнее всего, носит многообразный характер, включая колебания блоков фундамента по глубинным разломам, соляную тектонику, конседиментационное складкообразование. Избирательная реакция разнородной осадочной толщи обусловила достаточно сложнодислоцированное строение изучаемой площади, благоприятное для формирования и локализации водопроявлений подземных вод и водовмещающих пород. Собственно говоря, зоны поглощений бурового раствора и приурочены к плоскостям контакта несогласного залегания стратиграфических подразделений. Породы, располагающиеся непосредственно под поверхностью в некоторый исторический период подвергались процессам эрозии (выветриванию, растрескиванию, разъеданию, выщелачиванию), размыву. В результате указанных процессов вдоль поверхности контакта образовалась некоторая толща проницаемой среды, состоящая из обломочного материала,

имеющая некоторый вертикальный размер и занимающая достаточно большую площадь [6]. В этой толще и происходят поглощения промывочной жидкости. Указанные выше факторы по своей совокупности с высокой степенью вероятности являются причиной системно возникающих катастрофических поглощений бурового раствора при проходке интервалов под кондуктор скважин Дулисьминского месторождения.

Н. Я. Семенов полагает, что вследствие широко развитой неоднородности пород в вертикальном направлении с высокой долей вероятности можно полагать, что водоносный пласт представляет собой совокупность пропластков, разделенных друг от друга прослоями пород различной проницаемости, включая непроницаемые. Их количество даже в соседних скважинах может быть разным. В целом такое строение свидетельствует о его неоднородности как по толщине, так и по простираанию. По этой причине водоносный пласт может себя не проявлять из-за низкой его проницаемости в окрестности конкретной скважины [6]. Именно поэтому большинство геологоразведочных водозаборных скважин на исследуемом месторождении оказываются малодебитными или «сухими», создавая дефицит технической воды при строительстве эксплуатационных скважин. Данное обстоятельство существенно осложняет проходку проблемных интервалов скважин в условиях поглощений промывочной жидкости.

Текущими проектными решениями по строительству скважин на Дулисьминском НГКМ предусмотрен спуск секции кондуктора на глубину 900 – 950 метров с целью ликвидации несовместимости условий бурения в интервале Усть-кутской и Верхоленской свит и верхних пачек пород слагающих Литвинцевскую свиту при строительстве следующих секций скважин [1]. Нами был проанализирован опыт строительства секций кондукторов геологоразведочных и эксплуатационных скважин на Дулисьминском месторождении за период с 2013 по 2017 год. В среднем, на каждой третьей скважине бурение интервала кондуктора проходило в условиях поглощений промывочной жидкости различной степени интенсивности, вплоть до катастрофических. В таблице 2 приведена информация о количестве скважин,

при строительстве интервала кондуктора которых были зафиксированы поглощения промывочной жидкости за период 2013 по 2017 годы.

В балансе календарного времени строительства скважин ДНГКМ время на ликвидацию поглощений составляет 10 – 12% от общего времени строительства скважин.

Таблица 2 – Количество скважин, пробуренных на Дулисьминском НГКМ за период 2013 – 2017 годы

Период	Общее количество скважин	Пробурено в условиях поглощения промывочной жидкости в интервале под кондуктор
2013 год	32	11
2014 год	35	12
2015 год	31	9
2016 год	28	10
2017 год	32	11

Так, например, на скважине №1106 катастрофическое поглощение бурового раствора началось при забое 50 метров. Борьба с таким типом поглощения, и на такой глубине, облегчением бурового раствора технически не представилось возможным. Закачивание кольматационного материала в трещиноватые пласты также не принесли требуемого эффекта. Как результат, срок сооружения секции кондуктора на данной скважине Дулисьминского месторождения составил 20 суток [2]. И таких примеров, согласно данным в таблице 2, десятки.

Существенно усугубляет аварийную ситуацию поглощений при бурении под кондуктор на скважинах ДНГКМ необходимость обеспечения достаточно высоких расходов промывочной жидкости. В текущем состоянии программой на бурение интервала под кондуктор скважин ДНГКМ рекомендован диапазон расхода промывочной жидкости 37 – 50 л/с. Границы данного диапазона обоснованы применением современных винтовых забойных двигателей с заходностью 5х6 в компоновке низа бурильной колонны, а также требованиями обеспечения выноса шлама с забоя скважины и охлаждением породоразрушающего инструмента. При развитии и поддержании таких расходов промывочного агента неизбежным следствием является возникновение

значительных гидродинамических давлений в скважине, инициируя тем самым процессы ухода промывочной жидкости в пласт. Комплекс применяемого оборудования в КНБК не позволяет эффективно производить углубление с меньшими расходами промывочной жидкости, поскольку невозможно обеспечить работу применяемого ВЗД в рабочем режиме, рекомендуемым заводом – изготовителем. Применением ВЗД с меньшей заходностью не принесло желаемого результата.

Бурение интервала под кондуктор на геолого-разведочных и эксплуатационных скважинах Дулисьминского месторождения с приводом от ротора обеспечит возможность развития расходов очистного агента ниже значений 37 – 50 л/с, однако, с применением такого способа бурения скважин значительно снижается механическая скорость бурения. Это заведомо влечет за собой невыполнение производственной программы бурения скважины. Фактически, планирование производственных показателей деятельности бурового предприятия в горно-геологических условиях ДНГКМ уже само по себе подразумевает риск возникновения поглощений промывочной жидкости, с которыми впоследствии специалистам приходится бороться.

Еще более важной задачей, государственного масштаба, является освоение Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения (ЧНГКМ), располагающего на территории Ленского и Мирнинского улусов Республики Саха (Якутия). Приурочено к Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области Непско-Пеледуйского тектонического свода в зоне сочленения его с Мирнинским выступом. По состоянию на 1 января 2014 года запасы газа Чаяндинского НГКМ по категории С1 составляют – 708,2 млрд. м³, по категории С2 – 738,4 млрд. м³; нефти (извлекаемые): по категории С1 – 52,5 млн. т, С2 – 15,1 млн. т; конденсата (извлекаемые): по категории С1 – 11,1 млн. т, по категории С2 – 11,0 млн. т. [7]. Данное месторождение относится к уникальным по объему геологических запасов полезных ископаемых и является базовым для создания Якутского центра газодобычи.

Академик РАН А.Н. Дмитриевский в своем докладе [8] отмечает, что по своему геологическому строению Чаяндинское НГКМ является одним из самых сложных в России. За период 2008 – 2013 годов на Чаяндинском месторождении пробурено 34 разведочные скважины. К настоящему моменту завершены бурением 113 эксплуатационных скважин.

Геологическое строение интервала скважин ЧНГКМ, осложненного поглощениями промывочной жидкости приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Геологическое строение аварийного интервала поглощений промывочной жидкости Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения

Стратиграфическое подразделение	Глубина залегания, м		Описание горной породы:
	от	до	
Четвертичная системы	0	12	Аллювиальные суглинки, пески и галечники различного петрографического состава
Бордонская свита	12	35	Мергели доломитовые, аргиллиты, глинистые доломиты. Породы содержат тонкие прослои и линзы гипса и ангидрита
Метегерская свита	35	79	Доломиты неравномерно глинистые, местами окремненные и загипсованные с прослоями аргиллитов и мергелей, внизу кавернозные и трещиноватые с прослоями аргиллитов
Ичерская свита	79	126	Доломиты с прослоями известняков. Часто кавернозные и трещиноватые
Чарская свита	126	467	Доломиты, соли плотные, местами трещиноватые, кавернозные, с прослоями известняков и аргиллитов. Пластовые интрузии, представленные габбро-долеритами и диабазами темно-серого цвета с зеленоватым оттенком
Олекминская свита	467	587	Известняки, известковые доломиты, участками окремненные, ангидритизированные, глинистые, трещиноватые
Толбачанская свита (верхняя подсвита)	587	838	Соль, доломиты, известняки массивные прослоями глинистые и ангидритизированные с пропластами аргиллитов
Толбачанская свита (нижняя подсвита)	838	941	Доломиты и известняки массивные, участками трещиноватые, глинистые, ангидритизированные, засоленные
Эльгянская свита	941	1004	Доломиты и известняки плотные, массивные глинистые, ангидри-тизированные, участками окремненные с прослоями аргиллитов

Наибольшие трудности для реализации стандартных решений при бурении

представляют катастрофические поглощения промывочной жидкости в интервалах бурения Бордонской, Метегерской, Чарской и Ичерской свит [7]. Проектными решениями на строительство эксплуатационных, разведочных и оценочных скважин ЧНГКМ предусмотрен спуск секции кондуктора на глубину 900 метров для перекрытия пород трещиноватых пород среднего кембрия, склонных к интенсивным поглощениям.

Анализ имеющегося опыта строительства разведочных и эксплуатационных скважин на исследуемой площади работ свидетельствует о наиболее высоких рисках возникновения ситуаций ухода промывочной жидкости в пласт в интервале 12 – 467 м. Несовместимость условий бурения обусловлена распространением интенсивной трещиноватости и закарстованности карбонатных пород Бордонской свиты, наличием гипсов, склонных к набуханию, Метегерской свиты и склонностью к образованию шламовых корок в интервалах Ичерской и Чарской свит, породы которых представлен кавернозно-поровыми доломитами. В таблице 4 приведена выборка разведочных скважин, пробуренных в условиях поглощений промывочной жидкости в обозначенном проблемном интервале.

Таблица 4 – Разведочные скважины ЧНГКМ, пробуренные в условиях поглощений промывочной жидкости в интервале 12 – 467 метров

Номер скважины	Глубина начала поглощения промывочной жидкости, м	Характеристика процесса поглощения
803	149	Интенсивность 50 м ³ /час. Ликвидировано спуском промежуточной колонны на глубину 598 м.
808	130, 260, 400	Интенсивность 35 – 40 м ³ /час. Ликвидировано вынужденным спуском кондуктора на глубину 194 м. Поглощение на глубине 400 м интенсивностью 20 м ³ /час ликвидировано установкой цементного моста.
843	14, 38 – 88,	Интенсивность 10 м ³ /час. Ликвидировано вынужденным спуском направления на глубину 17 м. Поглощение в интервале 38 – 88 катастрофическое, провалы инструмента. Ликвидация вынужденным спуском кондуктора на глубину 118 м.
129-2	10, 120	Интенсивность 1,5 – 2,5 м ³ /час. Применялся шлам – лигнин и резиновая крошка. Ликвидировано вынужденным спуском кондуктора на глубину 99 м. С глубины 120 м до забоя технической колонны 705м поглощение интенсивностью 3 – 5 м ³ /ч.

Также породы Чарской свиты характеризуется наличием пластовой интрузии, представленной габбро-долеритами и диабазами X категории по буримости [7].

Характерной особенностью осадочного разреза ЧНГКМ является закономерное увеличение терригенных отложений венда с северо-запада на юго-восток в сторону Предпатомского прогиба [7]. Средняя толщина в пределах Чайядинского месторождения около 200 м. Опыт бурения показывает, что характерным для площади проектируемых работ, как и для всего Юго-Западного региона ЧНГКМ является низкая буримость карбонатно-глинистых отложений венд-кембрия, а также наличие многочисленных зон поглощения промывочной жидкости.

Перечисленные особенности геологического строения обуславливают риск возникновения катастрофических поглощений промывочной жидкости при применении традиционных технологических решений. В случае возникновения катастрофических поглощений в верхней части разреза (чарская свита) в интервале 12 – 467 м, исключающих возможность углубления скважины до проектной глубины спуска кондуктора возможен спуск удлиненного направления [7]. Помимо приведенных результатов исследований характерным примером проблемности ликвидации поглощения промывочной жидкости в интервале под кондуктор скважин ЧНГКМ, зафиксированным нами во время проведения исследовательской работы, является производственная ситуация на скважине № 3022. При забое 111 метров открылось поглощение промывочной жидкости интенсивностью 17 м³/ч. Режим бурения при этом имел следующие параметры: частота оборотов ротора (N) составляла 31 об/м; осевая нагрузка на долото ($W_{\text{дол}}$) – 2 тонны; расход промывочной жидкости ($Q_{\text{вх}}$) составлял 40 л/с при давлении ($P_{\text{вх}}$) равном 7 МПа. Средняя механическая скорость бурения на момент вскрытия поглощающего пласта составляла ($V_{\text{ср.мех}}$) 14 м/ч. Борьба с поглощением промывочной жидкости длилась в течение 18 суток, в течение которых было проведено 8 операций по установке цементных мостов и прокачаны 2 кольматирующие пачки вязкоупругой смеси (ВУС). Проходка за 18 суток

составила 92 метра. Дальнейшие работы по расширению ствола скважины и спуску удлиненного направления на глубину 490 метров заняли 14 суток. В итоге согласно проведенному нами анализу срок строительства секции удлиненного направления составил 32 суток, $V_{\text{ср.мех}}$ составила $3,5 \div 4,2$ м/ч, а материальные затраты на бурение интервала скважины 111 – 490 м. составили $116,7 \text{ м}^3$ бурового раствора, 1629 м^3 технической воды и $71,2 \text{ м}^3$ дорогостоящей ВУС.

1.1.2. Исследование условий ведения буровых работ интервалов под направления, кондукторы и технические колонны на Ковыктинском газоконденсатном месторождении

Ковыктинское газоконденсатное месторождение (КГКМ) расположено в Жигаловском районе Иркутской области. По размеру геологических запасов КГКМ относится к категории уникальных: извлекаемые запасы составляют $2,7$ трлн. м^3 газа и $90,6$ млн. тонн газового конденсата [9]. В данный момент на месторождении ведутся работы по бурению разведочных скважин. Ковыктинское ГКМ является базовым месторождением для формирования Иркутского центра газодобычи. Весь текущий опыт строительства скважин на КГКМ сопряжен с осложнениями: рапопроявления, проявления сероводорода, нестабильность ствола скважины в интервале солевых отложений и т.д. Одну из главных трудностей составляют поглощения промывочной жидкости в интервале Верхоленской, Илгинской и Литвинцевской свит. Проектными решениями в данном проблемном интервале предусмотрено крепление ствола скважины и изолирование пластов секциями направления, кондуктора и технической колонны. Геологическое строение скважины в интервале Верхоленской, Илгинской и Литвинцевской свит представлено в таблице 5.

По нашему мнению уточненный интервал несовместимости условий бурения $0 - 900$ м., где глубина 900 м. является подошвой Верхоленской свиты, целесообразно разбить на две зоны: $0 - 350$ м. и $350 - 900$ м. Данное деление

необходимо для обеспечения научно-методического подхода исследованию проблем поглощений промывочной жидкости.

Таблица 5 – Геологическое строение аварийного интервала поглощений промывочной жидкости Ковыктинского газоконденсатного месторождения

Стратиграфическое подразделение	Глубина залегания, м		Описание горной породы:
	от	до	
Ордовик	8,5	22,7	Песчаники, кварц-полевошпатовые белого, светло-серого, коричневого цвета, мелкозернистый, средней плотности, средней и слабой крепости, тип цемента – контактовый. Глины красно-коричневого цвета, мягкая, пластичная.
Верхоленская и Илгинская свиты	22,7	928	Свиты сложены преимущественно известняками глинистыми, алевроитовыми с включениями ангидритов. В подошве отмечаются доломиты глинистые, серые и светло-коричневого цвета, с включениями и прослоями белых ангидритов.
Литвинцевская свита	928	1148	Представлена: известняком красновато-бурого цвета мелко-среднекристаллический, средней плотности, слабой крепости, доломитом серого цвета, мелко-скрытокристаллический, средней плотности, слабой крепости, аргиллитом красновато-бурого цвета, перлитовым, мягким, вязким, ангидритом белого цвета, частично растворяющимся в воде

Как следует из проведенного анализа архивных дел пробуренных разведочных скважин на КГКМ, границы интервала 0 – 350 м. расположены полностью или частично в размытых отложениях Ордовика. Ордовикские отложения вскрыты 39 скважинами, при этом зафиксирован 31 случай поглощений промывочной жидкости, из которых 15 с неполной потерей циркуляции и 16 случаев с полной потерей циркуляции. Поглощения промывочной жидкости в верхней части илгинской и верхоленской свит документально зафиксированы на 56 скважинах. При этом зафиксировано 43 случая поглощения, из них 20 случаев – с частичной потерей циркуляции и 23 случая катастрофического поглощения. Породы, слагающие интервал поглощений, характеризуются низкими значениями эквивалентов градиентов пластовых давлений. Интенсивность поглощения от 4 – 10 м³/час до полной потери циркуляции. Статические уровни промывочного агента в скважинах на 3 –

10 м выше кровли поглощающих пластов или равны текущему забою скважины при проводке стволов скважин в Ордовикских отложениях. Вскрытые зоны поглощения характеризуются различной степенью сложности их ликвидации. Частичные поглощения ликвидировались, в основном, закачкой глинистых паст с набором наполнителей и тампонажом скважины. Проводку скважин с осложнениями – катастрофическими потерями рабочего агента – осуществляли на технической воде без выхода циркуляции или на пене (газожидкостной смеси) при подаче бурового насоса 2 л/сек, компрессора – 100 л/сек с последующим спуском кондуктора. В ордовикских отложениях Усть-кутского горизонта в районе реки Лена возможны карстовые образования. Например, Ботовская пещера – длиннейшая пещера России с суммарной протяженностью ходов более 66 км [10].

Верхоленская свита в интервале 350 – 900 м. характеризуется низкими значениями эквивалента градиента разрыва пласта в слагаемых пачках пород (кардинская, михайловская, устьталькинская, балаганкинская, осинская пачки) [11]. Из результатов проведенного анализа имеющегося опыта бурения разведочных скважин на КНКМ следует, что основными трудностями при бурении пород слагаемых пачек являются поглощения промывочной жидкости вследствие гидроразрыва ослабленных зон пачек. Низкая эквивалентная плотность гидроразрыва пород верхоленской свиты характерна для пород слагаемых пачек с текстурой «кливаж» (наблюдаемый эквивалент градиент гидроразрыва пород в ослабленных зонах достигает 1240 – 1280 кг/м³). Прочность пород в неослабленных зонах характеризуется эквивалентной плотностью гидроразрыва пород 1600 кг/м³. При прочих равных условиях поглощения бурового раствора вследствие гидроразрыва напрямую зависят от альтитуды скважины и гидравлической нагрузки на пласт. Поглощения в породах верхоленской свиты, которые возникают при прохождении пород слагаемых свиту пачек – кардинской, рютинской, михайловской, устьталькинской, балаганкинской, осинской, как правило не ликвидируются тампонажом скважин цементными растворами. Однако, наблюдались случаи эффективности

проведения операций по ликвидации поглощения промывочной жидкости в ослабленных зонах по технологии закупорки каналов поглощения не твердеющими и твердеющими растворами с набором фракций наполнителей, подобранными по технологии идеальной закупорки каналов трещинного типа (установка пачек с наполнителями объемом от 30 м³ до 160 м³ в интервал поглощения ослабленной зоны).

Проводка двух скважин осуществлялась с полным поглощением промывочной жидкости, расширением ствола скважины, установки в расширенный интервал осложненного участка ствола скважины оборудования для локального крепления скважин (ОКЛС). Способ ликвидации осложнения установкой ОКЛС применен на скважинах №№ 71, 68 Ковыктинского ГКМ [12].

В некоторых случаях осуществлялся переход на рабочий агент – пену, с дальнейшим перекрытием зоны поглощения обсадной колонной. К отличительным особенностям поглощений, вызванных созданием искусственных каналов ухода промывочной жидкости относятся:

- Неопределенность интервалов зон поглощений по разрезу скважины и отсутствие закономерности в расположении статического уровня (образование искусственных трещин возможно в любом сечении и носит случайный характер);
- Поглощения промывочного агента связаны с искусственно сформированной средой, свойство которой по данным исследования керна, ГИС, до гидроразрыва пласта определить нельзя и, как правило, тампонаж скважин цементным раствором приводит к дальнейшему развитию зоны искусственной трещиноватости;
- Отложения относятся к надсолевой гидрогеологической формации, которые в значительной степени дренируются долинами рек и имеют активный режим водообмена. Воды ордовикских, илгинских и верхоленских отложений относятся к пластовым и трещинным артезианским водам инфильтрационного генезиса. Как правило, они безнапорные или слабо напорные. Коэффициент аномальности давления в слабо напорных горизонтах верхоленской свиты не превышает 0,67 – 0,81. Пьезометрическая высота напора ниже устьев скважин на

100 – 300 м. и более, что является благоприятным условием для поглощения очистного агента при бурении [10].

Анализ статических уровней и напоров указывает на существование гидродинамической связи между горизонтами и возможность подземных перетоков вод. Движение вод в разрезе формации происходит по направлению к зоне разгрузки – долине реки Лена. Прочность пород в неослабленных зонах характеризуется эквивалентной плотностью гидроразрыва пород 1600 кг/м^3 .

Подводя итог вышесказанному, можно констатировать, что одной из основных причин поглощения промывочной жидкости или водопроявления служит наличие гидродинамической системы «скважина – пласт», включающей области питания и разгрузки пласта. Связь скважины областями питания и разгрузки осуществляется посредством связанных друг с другом пустот достаточного размера в пласте. Поглощение промывочной жидкости возникает при воздействии избыточного давления в направлении вглубь пласта или в сторону скважины, приложенного к системе «скважина – пласт».

Вторая зона неустойчивости расположена в разрезе осадочной толщи литвинцевской и ангарской свиты. В литвинцевской свите зафиксировано 34 случая поглощения промывочной жидкости. Из них 13 – с частичной потерей циркуляции и 11 катастрофических. Степень сложности ликвидации осложнения предусматривала нетрадиционные меры по организации дальнейшей проходки ствола скважины в осложненных условиях: переход на очистной агент – пену с дальнейшим перекрытием зоны поглощения обсадной колонной. Пластовая среда литвинцевской свиты характеризуется эквивалентной плотностью градиента пластового давления $630 \div 810 - 950 \text{ кг/м}^3$. В разведочной скважине № 14 в зоне полного поглощения в литвинцевской свите на глубине 1170 м., пьезоуровень по расчету поднимается до отметки 749 м., то есть 426 м. ниже устья скважины, в разведочной скважине № 12 на глубине 1301 м. – до отметки 878 м., то есть 244 м. ниже устья. Нижняя наблюдаемая граница эквивалента плотности градиента гидроразрыва пород в зонах развития трещиноватости, связанными с тектоническими напряжениями в период формирования надсолевой и соляной

формации, составляет 1500 – 1600 кг/м³. Отмечается, что литвинцевская свита является кровлей соляной формации, которая представлена переслаиванием сульфатно-карбонатных пород с породами каменной соли. Наблюдается рост плотности пластовых вод – 1050 кг/м³. Свободный режим водообмена пресных вод плавно перетекает в затрудненный.

Следует отметить, что поглощения промывочной жидкости в карбонатных образованиях литвинцевской свиты значительно осложняются до полной потери циркуляции промывочного агента в условиях, где избыточное давление бурового раствора в проницаемых слоях превышает на 7 МПа давление пластовое. Частичные поглощения раствора имеют место там, где избыточное давление циркуляции промывочной жидкости над пластовым колеблется в диапазоне от 3,5 МПа до 7 МПа [13, 14].

Исходя из проведенного системного анализа статистического материала, проводка ствола скважины на Ковыктинском месторождении в интервале 0 – 900 м ведется в условиях возникновения поглощения промывочной жидкости с вероятностью 80%. Характерным примером проявления перечисленных особенностей геологического строения Ковыктинского ГКМ, как осложняющего фактора поглощений промывочной жидкости, при бурении интервалов скважин под кондуктор и техническую колонну является производственная ситуация на разведочной скважине № 74р. Анализ данной ситуации приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Анализ производственной ситуации на скважине № 74р Ковыктинского ГКМ

Скважина, №	Забой на момент поглощения, м	Параметры режима бурения	Описание производственной ситуации
74р	30 м; 62 м; 98 м; 162 м; 183 м; 195 м; 291 м.	n = 60÷65 об/м; W _{дол} = 40÷50 – 120 кН; Q _{вх} = 28 – 18 л/с; V _{ср.мех} < 1 м/ч	При забое 195 м – катастрофическое поглощение, ρ = 1,08÷1,12 г/см ³ , более 20 операций закачивания кольматационных пачек под давлением (ГИМ-поршень), периодические прокачивания ВУС V _{общ} =56 м ³ .

В конечном итоге время бурения интервала 29 – 339 м. составило 35 суток.

1.1.3. Анализ геолого-технических условий проходки интервалов под направления и кондукторы на Куюмбинском нефтяном месторождении

Куюмбинское нефтяное месторождение (КНМ) расположено в Красноярском крае Эвенкийского муниципального района. Датой открытия месторождения является 1973 год. Географическая близость к магистральным трубопроводам, достаточно развитая инфраструктура района и доказанные геологические запасы углеводородов по категории С2 в размере 280 млн. тонн в совокупности делают КНМ перспективным для освоения.

Проблематика ухода промывочной жидкости в пласт характерна для геологического разреза Куюмбинского месторождения. Согласно исследованиям, проводимым в Сибирском Федеральном Университете (СФУ, г. Красноярск), [15, 16] поглощения очистного агента сопутствуют проходке скважины практически на всем протяжении её ствола. Не являются исключением секции направления и кондуктора, при строительстве которых исследователями СФУ отмечаются многочисленные факты осложнений бурения скважины поглощениями промывочной жидкости. Геологическое строение обозначенных интервалов приведено в таблице 7.

Таблица 7 – Геологическое строение аварийного интервала поглощений промывочной жидкости Куюмбинского нефтяного месторождения

Стратиграфическое подразделение	Глубина залегания, м		Описание горной породы:
	от	до	
Ордовик	0	105	Мергели известковистые, серые, с прослоями аргиллитов, известняков, алевроитов глинистых, зеленовато-серыми, песчаников мелкозернистых, светло-серых.
Эвенкийская свита (долериты)	105	200	Долериты серые и темно-серые, среднекристаллические, часто трещиноватые.
Эвенкийская свита	200	652	Доломиты темно-серые и зеленовато-серые, мелкозернистые, глинистые. Мергели красновато-коричневые, слоистые. Известняки темно-серые, мелкозернистые, глинистые.

Текущими проектными решениями на скважинах Куюмбинского месторождения предусмотрен спуск секции направления диаметром 426 мм на

глубину 35 метров и секции кондуктора диаметром 324 мм на забой 550 м. Значительно усложняет проходку интервала под кондуктор наличие интрузивных долеритов, относящихся к X категории пород по буримости. По своему генезису и геоморфологии Эвенкийская свита является аналогом Литвинцевской, характерной для месторождений Иркутской области, особенности геологического строения которой подробно изложены в предыдущих параграфах данной главы. Физико-механические свойства приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Физико-механические свойства пород исследуемого интервала Куюмбинского месторождения

Интервал по вертикали, м		Краткое название горной породы	Процентное содержание	Плотность, кг/м ³	Твёрдость кгс/мм ²	Абразивность	Категория пород по твердости
от	до						
0	105	мергели	15 – 100	2700	-	-	С
105	200	долериты	0 – 15	3080	9,0	8,0	К
200	652	доломиты	60 – 75	2730	-	-	С
		мергели	15	2550	-	-	С
		известняки	10	2700	-	-	С

Архивными документами, проектной документацией на строительство разведочных и эксплуатационных скважин отмечаются многочисленные случаи поглощений очистного агента при проходке Ордовикских отложений и пород Эвенкийской свиты. Одной из основных причин этого, детально рассмотренной Н.Я. Семеновым [6], является несогласное залегание пород при резкой их перемежаемости, а также контактные явления на границах Ордовикских отложений и долеритов Эвенкийской свиты. Обозначенными причинами также обусловлена и несовместимость условий бурения, на контактах перемежающихся пород. В таблицах 9, 10 приведены условия возникновения поглощений промывочной жидкости при бурении интервалов скважин под направления и кондукторы на Куюмбинском месторождении, а также, условия возникновения поглощений промывочной жидкости.

Таблица 9 – Градиенты давлений в интервале под кондуктор для скважин Куюмбинского месторождения

Стратиграфическое подразделение горных пород	Интервал, м		Градиенты давления:					
			Пластовое давление		Давление разрыва пород		Горное давление	
			МПа на м		МПа на м		МПа на м	
	от	до	от	до	от	до	от	до
Ордовик	0	105	0,0085	0,0085	0,0164	0,0164	0,0270	0,0270
Эвенкийская свита	105	652	0,0085	0,0085	0,0164	0,0176	0,0270	0,0270

Таблица 10 – Условия возникновения поглощений бурового раствора в интервале под кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения

Стратиграфическое подразделение горных пород	Интервал, м		Интенсивность поглощения, м ³ /ч	Глубина статического уровня, м	Градиент давления поглощения, МПа/м		Условия возникновения ухода промывочной жидкости
	от	до			при вскрытии зоны ухода жидкости	после изоляции зоны ухода жидкости	
Ордовик	0	105	до полного	84,2	0,0140	0,0164	В долеритах (105 – 200 м) и на контактах вмещающих пород с долеритами
Эвенкийская свита	105	652	до полного	522,7	0,0150	0,0176	

Исследуя природу несовместимости условий, в которых происходили поглощения бурового раствора, факторы, способствующие их возникновению, характер проявления, а также статистику ликвидаций, установлено [17]:

1. Катастрофические поглощения промывочной жидкости возникают в интервале залегания Эвенкийской свиты (105 – 652 метров), представленной долеритами в интервале 105 – 200 метром, далее по разрезу трещиноватыми доломитами (75%), слоистыми мергелями и глинистыми известняками (15% и 10% соответственно) со значительной степенью перемежаемости и неоднородности пород по разрезу.

2. Процесс углубления скважины в сопровождении поглощений промывочной жидкости начинается при необходимой для качественной очистки ствола скважины и стабильной работы винтовых забойных двигателей ДРУ-240 производительности буровых насосов в 36 л/с.

3. В исследуемом интервале бурения применение кольматационных материалов различной природы и фракций, профильных перекрывателей, снижения удельного веса промывочной жидкости, а также вязко-упругих составов не приносило положительных результатов. Результативны только периодически повторяющиеся установки цементных мостов (в среднем 3 – 5 на интервал), однако такой подход требует значительных временных, людских и материальных ресурсов.

Необходимость периодического повторения повторяющихся операций по установке цементных мостов научно обоснована и доказана в работах Н.Я. Семенова [6]. Задача по изоляции пластов усложняется и часто становится неразрешимой, если вскрыты два поглощающих пласта и более, независимо от того, существует ли между ними гидродинамическая связь или нет. При наличии перетоков трудности изоляции возрастают.

4. Как правило, углубление скважины при возникшем катастрофическом поглощении промывочной жидкости приводит к необходимости исключения ВЗД из компоновки низа бурильной колонны (КНБК) и осуществлению бурения с приводом от ротора. Следствием этого является использование породоразрушающего инструмента (ПРИ) дробяще-скалывающего действия и низкие механические скорости до 2 – 3 м/ч из-за перемежаемости пород по разрезу [17].

Систематический характер поглощений промывочной жидкости при проходке интервалов под направление и кондуктор делает невозможным применение традиционных технологических подходов строительства скважин на Куюмбинском нефтяном месторождении. Именно поэтому буровой компанией и оператором проекта на месторождении проводились опытно-промысловые исследования нестандартного подхода «опережающего строительства» секций скважины направлений и кондукторов с применением мобильного бурового комплекса и технологии ударно-вращательного бурения.

1.2. Обзор современных способов ликвидации поглощений промывочной жидкости в аварийных интервалах, применяемых на скважинах месторождений Восточно-Сибирского региона

Многообразие и сложность факторов, обуславливающих возникновение поглощений промывочной жидкости, в свою очередь рождает множество технологических решений их изоляции. Наиболее применяемыми можно отметить следующие:

- 1) Самозакупорка пласта механической взвесью промывочной жидкости;
- 2) Заливка цементным раствором с ускорителями схватывания;
- 3) Регулирование свойств промывочной жидкости (включая её аэрацию) и снижение гидродинамических давлений в скважине;
- 4) Ввод наполнителей в буровой раствор;
- 5) Продолжение бурения с поглощением с целью зашламования каналов, при необходимости с аэрацией;
- 6) Бурение водопроявляющей скважины при равновесном давлении с целью зашламования каналов;
- 7) Изоляция намывом наполнителей с последующим переходом на промывку глинистым раствором;
- 8) Закачка цементного раствора со структурообразователем (химические реагенты, гипс, глиноземистый и гипсоглиноземистый цемент, бентонит, водовпитывающие мелкие наполнители);
- 9) Закачка твердеющей смеси с технологическими паузами;
- 10) Закачка облегченной быстросхватывающейся смеси (БСС);
- 11) Закачка гелцементов цементных растворов с ускорителями и структурообразователями с добавлением наполнителей;
- 12) Забрасывание и затирание местной глины с последующим переходом на промывку глинистым раствором с наполнителями;
- 13) Закачка быстросхватывающейся смеси одной из буферных масс: пастой, пробкой, разогретым асфальтом, битумом, парафином;

14) Закачка твердеющих смесей с очень короткими сроками схватывания: гипсовых, гипсоцементных, цементных с сульфатом алюминия или алюмохлоридом с кальцинированной содой, соляроцементных;

15) Закачка латекса в виде пространственной решетки или в режиме промывки с последующей заливкой БСС;

16) Закачка БСС при расчетных режимах;

17) Закачка тампонажной смеси удельного веса, близкого к удельному весу пластовой воды;

18) Забрасывание кирпича, камня, рубленой древесины, веток, мешковины, резины и т.д., последующий намыв наполнителей;

19) Перекрытие при помощи ОЛКС, летучки, хвостовика и т.д.;

20) Обход пласта вторым стволом;

21) Бурение с поглощением или водопроявлением до глубины спуска очередной обсадной колонны с последующее двухстадийное крепление скважины.

Несмотря на многообразие используемых способов борьбы с поглощениями промывочной жидкости, затраты времени и средств на эти цели все еще велики: до 9 – 11% от общего времени строительства скважины [17].

Общей и, вероятно, главной проблемой при ликвидации поглощений промывочной жидкости в исследуемых интервалах скважин месторождений Восточно-Сибирского региона является малая изученность осложненных участков в сравнении с породами продуктивных пластов. Надлежащему выбору того или иного способа ликвидации поглощений предшествует проведение динамических, геофизических и камеральных исследований, которые, как правило, опускаются при проведении буровых работ в интервалах скважин под направление, кондуктор и техническую колонну. Другой сложностью является частое отсутствие на кустовой площадке необходимых ресурсов. Набор наполнителей или кольматантов, как правило, ограничен, несмотря на описанное их разнообразие в научной литературе, ввиду различных причин: от высокой стоимости до сложности решения логистических задач. Существенной проблемой

является крайняя ограниченность в технической воде ввиду непродуктивности водозаборных скважин, что характерно для Ковыктинского и Куюмбинского месторождений.

Этим можно объяснить многократное повторение типовых технологических приемов ликвидации поглощений и, относительно, невысокую их эффективность, следствием чего являются значительные во времени сроки строительства секций направлений, кондукторов и технических колонн.

Для скважины № 3022 Чайядинского месторождения схема ликвидации поглощения выглядела следующим образом: в интервал поглощения спускалась воронка и скважина переводилась на ВУС с кольматантом: опилки в концентрации 40 – 50 кг/м³, полиплаг-6А в концентрации 25 – 30 кг/м³ и полифибр – 8 – 12 кг/м³. Далее восстанавливалась циркуляция на ВУС и производилось ступенчатое увеличение производительности насосов до 35 л/с, с фиксацией интенсивности поглощения и давления на стояке. Осуществлялась промывка скважины, завершающаяся при поглощении ВУС более 15 м³. После прекращения промывки проводилась операция «ГИМ поршень» – ступенчатая продавка пачки ВУС с закрытым превентором и получение давления «Стоп». Далее проводился технический отстой.

Для исследуемого интервала скважин ДНГКМ под кондуктор, осложненного несовместимостью условий бурения, характерно проведение работ по ликвидации поглощений с использованием наполнителей ореховой скорлупы различной фракции и опилок по следующей схеме:

- готовится кольматационная пачка на основе используемого бурового раствора, обработанная наполнителем в следующих пропорциях: опилки – 50 кг/м³; орех мелкий – 50 кг/м³; орех средний – 50 кг/м³; орех крупный – 120 кг/м³. Концентрации наполнителей меняются в зависимости от интенсивности поглощения;
- производится спуск колонны бурильных труб (КБТ) с открытым концом до глубины поглощения, закачивается в скважину кольматационная пачка и

осуществляется продавка буровым раствором, с постоянным расхаживанием инструмента на длину ведущей бурильной трубы (ВБТ);

- восстанавливается циркуляция с минимальной производительностью и поэтапным выходом на рабочий режим. Во время промывки осуществляется контроль за поглощением промывочной жидкости, определяется производительность при которой отсутствует поглощение, а также потери рабочего агента;

- герметизируется устье скважины и ступенчато по 1 МПа с выдержкой в течение 10 минут производится задавка кольматационной пачки цементирующим агрегатом, не превышая расчетного давления. При наличии приёмистости скважины производится повторная продавка кольматационной пачки в расчетном объеме в зону поглощения;

- производится операция технического отстоя в течение не менее 1 часа и опрессовка скважины на расчетное давление. При отрицательном результате работы по прокачке ВУС с наполнителем повторяются;

- далее устье скважины разгерметизируется, производится промывка скважины в течение 1 цикла, ступенчатое восстановление циркуляции с выходом на 33 л/сек, во время промывки определяется интенсивность поглощения.

Для ликвидации поглощений при бурении интервалов под кондуктор скважин Куюмбинского месторождения используются вязкоупругие составы с такими наполнителями как органический кольматант различного фракционного состава, древесные опилки, экоцел А, глинопорошок ПБМА, мраморная крошка МК-600 (МК-800) [16]. Общая технологическая схема аналогична применяемой на скважинах ДНГКМ.

Многократные периодические закачки ВУС с наполнителями и установки цементных мостов характерны при бурении интервалов под кондуктор и техническую колонны на разведочных скважинах Ковыктинского месторождения, однако, как показывает анализ имеющегося опыта работ на месторождении, эффективность данных мер низкая.

Причины низкой эффективности использования наполнителей и операций по установке цементных мостов могут быть самые различные: от организационных и техногенных до объективно геологических, связанных с особенностью строения поглощающего горизонта.

Н. Я. Семенов [18] дал наглядное объяснение механизму закупоривания трещин, прежде всего разделяя трещины по структурным характеристикам: клиновидные щели и щели с параллельными стенками. Также им классифицировано многообразие существующих наполнителей по своим физическим свойствам и структуре. В таблице 11 приведен характеристика кольматантов, применяемых на исследуемых месторождениях.

Таблица 11 – Классификация наполнителей, применяемых на исследуемых месторождениях

Название наполнителя	Характеристика
Органический кольматант	нежесткий
Опилки	нежесткий
Мраморная крошка	жесткий
Экоцел А (измельченные продукты переработки древесины)	нежесткий
Полиплаг-6А (чешуйчатый и волокнистый наполнитель)	нежесткий
Полифибр (модифицированное полидисперсное волокно)	нежесткий
Ореховая скорлупа различной фракции	жесткий

При одинаковом раскрытии клиновидная щель и щель с параллельными стенками закупоривается частицами одного и того же размера. Однако, чешуйчатые материалы с частицами одинакового размера закупоривают клиновидные щели раскрытием примерно на 25% меньше, по сравнению с щелями с параллельными стенками. Отмеченная особенность объясняется способностью стенок клиновидной щели ориентировать плоские частицы так, что их широкие выстраиваются параллельно направлению течения жидкости, уменьшая вероятность их поперечного расположения, более способствующего закупорке трещины.

Общепринято, что фракционный состав наполнителя подбирается на основании исследования геометрических характеристик канала пустот и предельное условие закупорки пористой среды частицами сферической формы определяется по формуле:

$$d_{\text{н}} = (0,6 \div 0,7) \cdot d_{\text{суж}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{н}}$ – диаметр частиц наполнителя, мм; $d_{\text{суж}}$ – диаметр сферы, вписанной в наиболее суженный участок канала насыпной или кавернозной пористой среды, мм.

Напротив, условия проникновения в отдельные каналы будут иметь следующий вид:

$$d_{\text{н}} \leq 0,1 \cdot (d_{\text{суж}}, \delta_{\text{суж}}), \quad (2)$$

$$d_{\text{н}} = (0,1 \div 0,25) \cdot d_{\text{суж}}, \quad (3)$$

$$d_{\text{н}} = (0,17 \div 0,25) \cdot \delta_{\text{суж}}, \quad (4)$$

$$d_{\text{н}} = (0,23 \div 0,33) \cdot \delta_{\text{суж}}. \quad (5)$$

где $\delta_{\text{суж}}$ – толщина гибкой пластины, вписанной в наиболее суженный участок канала в однородной трещиноватой породе [18].

Формулой (2) описываются условия проникновения при намыве частиц путем осаждения в канале, формула (3) характеризует закупорку за счет образования пробки внутри наиболее узкого сужения – в гранулярной породе, зависимость (4) характерна для закупоривания трещин с параллельными стенками и для сферических частиц в клиновидной трещине, формулой (5) характеризуется процесс в клиновидной трещине при использовании чешуйчатых и пластинчатых частиц. Стоит отметить, что определение такой характеристики как $\delta_{\text{суж}}$ возможно лишь при камеральном исследовании кернового материала, которое не проводится для пород исследуемых интервалов.

Другой причиной низкой эффективности кольматирования трещин и вынужденного многократного её повторения следует отметить неустойчивость образующейся закупоривающейся пробки. В работе [18] приведены результаты исследований, свидетельствующих о том, что во всех испытаниях в щелях параллельными стенками раскрытием от 0,5 до 19 мм. после того как констатировалось наступление закупорки по величине давления, пробка из наполнителей не образовалась по всей длине, а обнаружилась только в начале

щели. На рисунке 2 изображена схема закупоривания пористой среды, полученная на основе результатов исследований шлифов кернового материала.

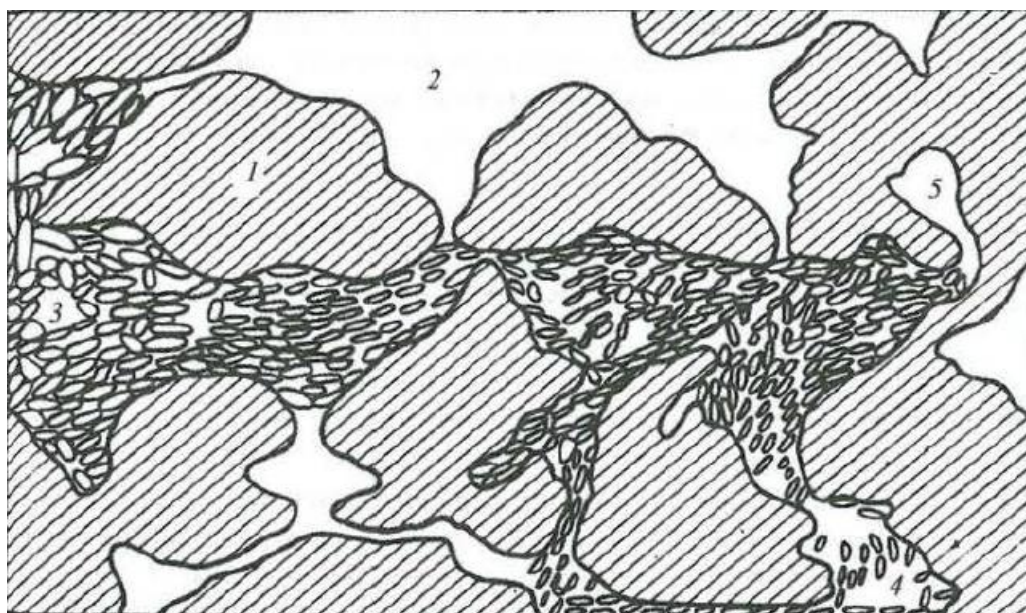


Рисунок 2 – Схема расположения закупоривающего материала в пористой среде
1 – скелет породы; 2 – поры, в которые не может проникнуть наполнитель; 3 – наполнитель; 4 – частицы, свободно двигающиеся в каналах породы; 5 – тупиковая пора.

Видно, что несмотря на сравнительно однородные образцы изученных шлифов целиком заполняется только часть пор. Во многие поры наполнитель не проникает из-за того, что закупориваются соединительные каналы, а некоторые поры оказываются тупиковыми.

В отличие от щелей с параллельными стенками, в тех случаях, когда закупорка клиновидной щели достигалась, жесткие и нежесткие наполнители заполняли её полностью. Однако с увеличением раскрытия щели на выходе возрастали трудности в ее изоляции. В исследованиях [19, 20] приведены следующие конкретные данные: древесное волокно при концентрациях 43 – 57 кг/м³ и комбинировании ее с ореховой стружкой по достижении общей концентрации 21,5 – 28,6 кг/м³ скапливались над устьем клиновидных щелей размерами 15,9x3,2 мм и 17,5x4,8 мм, где первая цифра – раскрытие на входе и раскрытие суженной части, соответственно, закупорка щелей не достигалась. Щель 17,5x4,8 мм удалось закупорить лишь с помощью набора из кедровой

стружки и волокон камыша с концентрациями по $21,5 \text{ кг/м}^3$, но наполнители скопились над устьем щели.

Также приводятся результаты исследований [21] о том, что пробки в клиновидных щелях выдавливались при перепадах давления менее 7 МПа. И, конечно, нет гарантии, что пробка выдерживающая в трещине перепады давления, например 4 МПа и даже 7 МПа не может быть вытолкнута при большем перепаде. Изоляция клиновидной щели малого раскрытия (1,6 мм) достигается преимущественно при применении мягких материалов: волокон камыша, льна, древесины, обрезков кожи, а щелей больших размеров – при сочетании мягких наполнителей (кроме волокна древесины) с ореховой стружкой. Древесная стружка обладает меньшей жесткостью, чем скорлупа ореха. Отсюда следует, что для клиновидных щелей предпочтением должны пользоваться полужесткие материалы, которые поддаются сдавливанию и уплотнению. Подтверждением данного тезиса служит пример, когда крупная скорлупа грецкого ореха в равном количестве со скорлупой средней крупности при концентрации сначала по $21,5 \text{ кг/м}^3$, затем по 43 кг/м^3 не закупорила клиновидную щель раскрытием на выходе ни 3,2 мм, ни 4,8 мм.

Низкой эффективности жестких наполнителей в клиновидной щели можно дать следующее объяснение. Если частицы закупоривающего материала выбраны в соответствии с условием закупорки узкого конца клиновидной щели, то оказывается, что вблизи этого конца практически отсутствует участок (площадка), на котором могло бы происходить заклинивание каркаса из наполнителей, только что образовавшегося перед выходом из нее. Для заклинивания требуется площадка определенной длины. При ее наличии наблюдалось бы следующее явление. В начале площадки частицы, испытывая прижимающие усилия, передаваемые друг от друга, упираются вершинами углов в стенки канала. Сразу после возникновения каркаса скачкообразно возрастает перед ним давление. Одновременно этому способствует заполнение каркаса частицами меньшего размера. Растущий перепад давления стремится сдвинуть каркас с места. На некотором малом участке площадки происходит движение каркаса с

торможением, сопровождающимся усилением заклинивания. Если на одном участке площадки пробка срывается, она может зацепиться или вновь образоваться на соседнем участке. Описанные благоприятные условия существуют в щели с параллельными стенками. Но у выхода из клиновидной щели такие возможности отсутствуют: малейший сдвиг каркаса приводит к его выдавливанию из щели с последующим рассыпанием. В реальной трещине это происходит вследствие попадания каркаса в ее расширенный участок или попадания за пределы трещины, т. е. в каверну. Следовательно, разрушение образовавшегося каркаса чаще всего характерно для трещиновато-кавернозного пласта. Именно описанному явлению обязаны, видимо, встречающиеся на практике случаи неудач при намыве наполнителей. В некоторые поглощающие пласты без особого успеха закачиваются большие объемы комбинированных наполнителей при неизменном давлении на устье скважины 4 – 5 МПа.

Н.Я. Семенов приводит следующие результаты исследований закупоривающей способности [18]:

- клиновидная щель размером 1,6 мм. закупоривается скорлупой орехов средней крупности, но утечка глинистого бурового раствора через щель не прекращается;
- аналогичная скорлупа в подобной щели размером 3,2 мм. не может образовать каркас; крупная скорлупа образует каркас, но пропускает глинистый раствор;
- через клиновидную щель раскрытием 4,8 мм крупная скорлупа грецких орехов проходит без задержки;
- измельченная льняная костра закупоривала клиновидную щель раскрытием 1,6 и 3,2 мм., но не могла закупорить подобную щель размером 4,8 мм.

Исследованиями, проводимыми на кафедре бурения нефтяных и газовых скважин в Сибирском федеральном университете, отмечаются факты ликвидации поглощений использованием оборудования локального крепления скважин (ОЛКС), а также перспективность применения быстросхватывающихся смесей, в

том числе для интервалов поглощений на скважинах Куюмбинского месторождения. По свидетельству результатов работ [15, 16] перечисленные меры могут быть применимы для интервалов поглощений на протяжении всего ствола скважины.

Заслуживает внимания опыт применения ОЛКС, разработанным научным институтом «ТатНИПИнефть», на разведочной скважине № 71 КГКМ [12]. Данная технология предусматривает перекрытие зоны ухода промывочной жидкости профильными обсадными трубами, их последующее выдавливание под действием гидравлической репрессии и развальцовывание шарошечным или роликовым развальцевателем. ОЛКС выпускается в двух исполнениях – с последующим уменьшением диаметра буримой скважины и с предварительным диаметром пробуренного ствола. Конструктивно оба исполнения аналогичны друг другу.

Типовая конструкция профильного перекрывателя ОЛКС представлена на рисунке 3, роликовый и шарошечный развальцеватели представлены на рисунках 4 и 5.

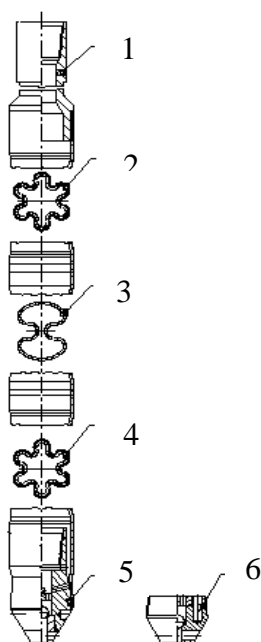


Рисунок 3 – Типовая конструкция профильного перекрывателя ОЛКС
1 – муфта посадочная; 2 – пакер верхний; 3 – труба профильная; 4 – пакер нижний; 5 – башмак подъемный; 6 – башмак разбуриваемый

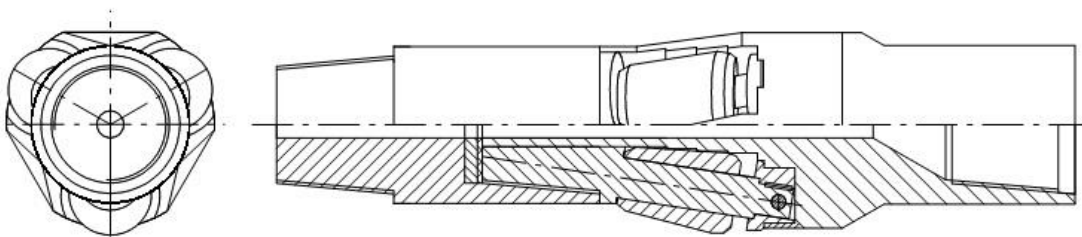


Рисунок 4 – Роликовый развальцеватель

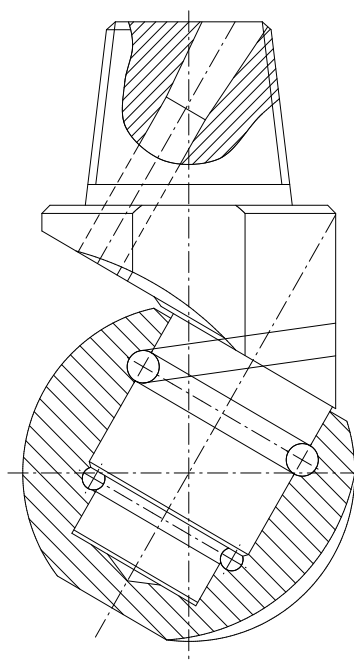


Рисунок 5 – Шарошечный развальцеватель

Сверху и снизу у профильного перекрывателя предусмотрены шестилучевые пакеры, герметизирующие затрубное пространство. Общая схема изоляции зоны поглощений с помощью ОЛКС такова:

- на основе данных геофизических и гидродинамических исследований скважин определяют интервал зоны поглощения и интервал установки перекрывателя;
- в зависимости от исполнения ОЛКС следует расширение ствола скважины;
- верхняя и нижняя границы перекрывателя должны выходить за пределы зоны поглощения вверх и вниз на 3 – 4 метра для расположения в плотных и некавернозных участках;

- перекрыватель в сборке спускают в скважину на сухую. Для улучшения эффекта изоляции зоны может применяться герметизирующая паста;
- цементирующим агрегатом нагнетается давление 10 – 12 МПа в колонне бурильных труб, выдерживают не менее 3-х минут, а затем снижают до нуля. Под действием гидравлической репрессии трубы выправляются и прижимаются к стенке скважины;
- далее осуществляют проверку устойчивости перекрывателя разгрузкой или натяжением инструмента. В случае фиксации перемещения повторяют операцию гидравлической репрессии;
- созданием натяжения 10 – 12 кН и вращением отсоединяют бурильный инструмент и производят СПО;
- спускают на бурильных трубах роликовый развальцеватель и производят операцию развальцовывания;
- при достижении развальцевателем разбуриваемого башмака выполняют их соединение путем свинчивания резьб. За счет правого вращения инструмента башмак отсоединяется от пакера;
- производят подъем развальцевателя вместе с башмаком;
- в зависимости от горно-геологических условий профильный перекрыватель может быть развальцован при помощи одношарошечного развальцевателя с последующим разбуриванием башмака.

В случае предварительного расширения ствола скважин далее продолжают бурением долотом прежнего типоразмера, в отсутствии работ по расширению – долотом меньшего типоразмера.

На скважине № 71р Ковыктинского ГКМ успешно была перекрыта зона поглощения промывочной жидкости в интервале 711 – 943 м [12].

Тем не менее применение ОЛКС не является панацеей, так как в случае протяженности зоны поглощения и установки ОЛКС в нее значительно снижается качество тампонажной крепи в интервале установки ввиду ограниченности поперечных размеров массива тампонажного камня и, как следствие,

неустойчивости к возникающему в стволе скважины гидродинамическим нагрузкам во время эксплуатации.

Ступенчатая установка цементного моста также является применимой мерой для борьбы с катастрофическими поглощениями промывочной жидкости на всех упомянутых месторождениях. Эффективность данного технологического подхода различна, однако, особенно низкая при бурении интервалов скважин под кондуктор и техническую колонны на Ковыктинском ГКМ. Сама по себе технология требует задействования дополнительных материальных, временных ресурсов, а также техники.

1.3. Современное состояние и перспективы развития технологии ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом (ГЖС) и анализ имеющегося опыта работ

Технология очистки забоя газообразными агентами имеет весьма широкий спектр применения: от сочетания с ударно-вращательным способом бурения с применением погружных пневмоударников до бурения скважин во льдах и вскрытия продуктивных пластов с низкими свойствами проницаемости и пористости. Значительный вклад в теорию и практику применения воздуха внесли Б.Б. Кудряшов, А.И. Кирсанов, А.С. Бронзов, И.В. Куликов, М.Н. Климентов, В.И. Тиль, А.М. Магурдумов, М.В. Меркулов, Л.К. Горшков, Д.А. Юнгмейстер, В.А. Пивнев, А.Т. Лактионов, А.С. Межлумов, Н.С. Макурин, Я.А. Гельфгат, Ю.С. Лопатин, Б.Ю. Данюшевский, А.О. Межлумов, Я.Ю. Ахмедов, Р.С. Газарян, Х.И. Юсифова, О.В. Зорэ, William C. Lyons, Boyun Guo, Reuben L. Graham, Greg D. Hawley, Chen Guang, Chen Xingyuan, Liu Desheng, Cheng Xiaonian, Kenneth P. Malloy, George H. Medley, и др.

Фундаментальные работы по изучению свойств воздуха, как рабочего агента в циркуляционной системе скважины, послужившие основой для последующих исследований, были выполнены выдающимся ученым, Заслуженным деятелем науки и техники, Борисом Борисовичем Кудряшовым.

В 1965 – 1971 гг. ВНИИБТ [22] проведены широкие промышленные испытания метода бурения скважин с очисткой забоя воздухом в различных геолого-технических условиях многих месторождений. Объем проведенных испытаний составил более 100 тыс. погонных метров бурения на месторождениях Саратовской, Самарской областей, республик Татарстан и Башкортостан, а также на территории современной Украины.

Источниками воздухоснабжения в основном служили передвижные компрессорные установки «Нуовэ-Пиньонэ 4 NO/2а» и «Нуовэ-Пиньонэ 4 NO/4» производительностью 40 и 18 м³/мин, давлением 1,2 и 8 МПа соответственно. Были использованы также образцы передвижных компрессорных станций КС-16/100 производительностью 16 м³/мин и 10 МПа, выпущенные Краснодарским компрессорным заводом. Для герметизации устья использовались устройства, разработанные ВНИИБТ и первые образцы вращающихся превенторов завода «Баррикады». В ходе испытаний были опробованы две основные разновидности метода, нашедшие широкое применение в зарубежной практике: бурение с продувкой воздухом как в условиях сухого разреза, так и в условиях водопритока.

Бурение скважин с продувкой воздухом осуществляли в основном из-под кондуктора с глубины 120 – 380 м. и серийными долотами диаметром 269 мм. или 295 мм. до глубины, при которой возникала необходимость на переход очистки забоя промывочной жидкостью. Максимальный интервал бурения с продувкой составил 1220 м, а достигнутая глубина – 1518 м. Около 75% бурения пришлось на сухой разрез, около 25% – в условиях водопритока, что потребовало введения в воздушный поток водного раствора ПАВ для технико-геологических условий ведения работ. При этом 80% скважин было пробурено с передачей энергии к забою от ротора, 20% – электробуром [22]. Сравнение балансов рабочего времени показывает, что время на механическое бурение при продувке снижается в 2 – 3 раза по сравнению с временем при бурении скважин с промывкой. Я.А. Гельфгатом и Ю.С. Лопатиным в работах [22, 23] отмечается, что переход на промывочную жидкость после продувки воздухом сопровождался технологическими трудностями, обусловленными прежде всего характером

проведения опытных работ и уровнем развития техники и технологии бурения с продувкой воздухом на момент проведения работ. Так отсутствовала быстросъемная специальная обвязка при переходе на бурение с промывкой, низкое качество самой промывочной жидкости вызывало кавернообразование и её вспенивание в интервале применения поверхностоактивных веществ (ПАВ). Упомянутые исследователи приводят данные о том, что применение более совершенной техники, такой как универсальная обвязка устья, более совершенные герметизирующие устройства, в сочетании с рядом технологических приемов (использование ПАВ для очистки скважины от глинистого раствора перед началом работ, снижение энергии воздушной струи на выходе из долота, правильный переход на применение другого очистного агента) позволят обеспечить увеличение в 2 раза коммерческой скорости бурения, по сравнению достигнутой в условиях проведения опытных работ [22].

Основной причиной прекращения бурения с продувкой воздухом является неустойчивость стенок скважины. В сухом разрезе это проявляется в большой кавернозности, невозможности качественно проработать ствол скважины и произвести наращивание бурильной колонны. В условиях водопритока причины ограничения глубины бурения с продувкой выражены в росте давления, образовании каверн, пробковом режиме циркуляции воздуха, появлении затяжек бурильной колонны, частых вынужденных проработок и прихватов.

Я.А. Гельфгатом и Ю.С. Лопатиным особенно отмечается тот факт, что на момент проведения опытных работ промышленностью серийно не выпускались передвижные компрессорные установки, отвечающие требованиям бурения с продувкой воздухом скважин диаметром 269 мм. и более.

Что касается погружных пневмоударных установок, то наиболее распространенные на открытых горных работах серийно-выпускаемые погружные пневмоударники П105 (П125), разработанные в 70-е годы на высшем техническом уровне своего времени, существенно не изменились и морально устаревали. Дело в том, что эти ППУ были спроектированы и доведены до оптимальных конструктивных и энергетических параметров при достаточно низком

номинальном рабочем давлении 0,5 МПа в расчете на лезвийную коронку [24]. Эти два фактора, по существу, явились тормозом в развитии пневмоударного бурения и роста технического уровня пневмоударников в частности.

Начиная с конца прошлого столетия отечественными учеными, а также США, Канады и Китая активно исследуются направления деятельности по увеличению эффективности пневмоударного бурения:

1. Повышение рабочего давления воздуха, создание дожимных компрессоров, новых конструкций буровых станков и пневмоударников;

2. Создание пневмоударников с повышенными энергетическими параметрами и ресурсом работы.

Как показывает анализ публикуемого материала по теме и текущего состояния [25, 26, 27, 28, 29, 30] технологии оба направления успешно отработаны.

Значительный вклад в совершенствование ударных буровых механизмов внесли работы Л. К. Горшкова, Д. А. Юнгмейстера, результаты которых на сегодняшний день успешно применяются при сооружении вспомогательных выработок шахт в Ленинградской области [28, 29].

За рубежом только за 20 лет там сменилось 2 поколения пневмоударников [30]. Менялись не только конструкции, но и принципиальные схемы, пересматривалась структура мощности, наращивалась энергия единичного удара, делался упор на штыревой инструмент. Перечислены только основные направления технического совершенствования пневмоударников за рубежом, не касаясь материала и технологии их изготовления за рубежом.

Компрессорная техника также прошла через этапы совершенствования, главными результатами которых являются повышение генерируемых объемов воздуха, надежности элементов конструкции, а также сам факт создания дожимных компрессор, позволяющих нагнетать воздух под значительным давлением. Такие компании как Atlas Copco, KERUI, ГРАСИС и другие с успехом используют результаты научно-технического прогресса в компрессорном

машиностроении. Результаты научных достижений нашли свое отражение и в производстве.

Значительное развитие технология бурения применением воздуха в качестве очистного агента получила в США, Канаде, Австралии. В контексте реализации ударно-вращательного бурения очистка воздухом является эффективным решением при строительстве скважин для добычи метана на месторождениях каменного угля; Аппалачский и Иллинойский бассейны, бассейн Скалистых гор в США, провинция Альберта в Канаде, Новый южный Уэльс в Австралии. С применением оборудования только лишь одной компании Atlas Copco пробурено свыше 42 000 погонных метров за 10 лет, а добыча угольного метана в 2010 году составила 51 млрд. м³ или 8% всей национальной добычи США [31]. В Китае добыча угольного метана приближается к 20 млрд. м³ в год, что составляет 7% национальной газодобычи. В Канаде объем добычи угольного метана из скважин в провинции Альберта, пробуренных ударно-вращательным способом с очисткой забоя воздухом, к 2019 году выходит на уровень 15 млрд. м³ в год или 20% всей добычи газа провинции [31].

Очень важен имеющийся опыт и результаты ударно-вращательного бурения с применением воздушного аэрозоля на Нарыкско-Осташкинской площади Кемеровской области [32]. Бурение на данной площади осуществлялось также для добычи метана из угольных пластов. Интервал бурения с очисткой воздухом составил 0 – 150 м.

Данный интервал полностью охвачен триасовой системой, породы которой представлены песчаниками с присутствием трещин, алевролитами мелкозернистыми, вторично сцементированным, трещины выполнены кальцитом со множеством зеркал скольжения и плоскостей претирания, аргиллитами туфогенными, тёмно-бурого до красного цвета, трещиноватыми, с неровным изломом, раковистыми, по изломам прослеживаются вкрапленники буро-красного цвета, с зеркалами скольжения, интервалом долеритов темно-серого цвета, до черного, мелкозернистый, плотный массивный, очень крепкий с редкими трещинами отдельности. По трещинам развиты плёнки окислов железа.

Исходя из характеристики литологического разреза Нарыкско-Осташкинской, породы триасовой системы можно классифицировать как устойчивые, поскольку для данного интервала не характерны осыпи и обвалы, а пропласток долеритов характеризуется IX категорией по буримости [32]. При бурении таких пород не требуется создавать противодействие на стенки скважины для предотвращения осypей и обвалов. Тем не менее, данный интервал осложнен зонами поглощений промывочной жидкости различной степени.

Анализ выявленных фактов: отсутствие осypей и обвалов стенок скважины, прогнозирование поглощений бурового раствора, наличие твердых и трещиноватых пород в разрезе, позволяет утверждать, что применение ударно-вращательного способа бурения скважины и воздуха в качестве рабочего агента на Нарыкско-Осташкинской площади обосновано с точки зрения соблюдения безаварийной технологии строительства скважины.

Касаясь технической стороны бурения с использованием воздушного аэрозоля, необходимо отметить следующие нюансы бурения интервалов под кондуктор на Нарыкско-Осташкинской площади. В компоновку бурильной колонны через каждые 54 м. были включены обратные клапаны для предотвращения выброса воздуха со шламом при развинчивании труб и во избежание зашламования долота. Согласно производственным данным, генерация воздуха и его последующая закачка в скважину производилась с помощью следующих компрессоров:

- палубного компрессора Ingersoll Rand с подачей 35,4 м³/мин и рабочим давлением 2,4 МПа;
- компрессора XRVS606 с производительностью 36 м³/мин и рабочим давлением 2,5 МПа;
- компрессора XRVS336 с производительностью 19,8 м³/мин и рабочим давлением 2,5 МПа; Максимальная суммарная подача трех компрессоров равна 91 м³/мин,. При данной подаче скорость восходящего потока с учетом возможного интенсивного водопритока (до 4 м³/час) равна 19 м/с [32].

Также, полевыми исследованиями установлено, что при вращательном способе бурения с продувкой аэрозолем учитываются три вида потерь давления [32]:

- на столб жидкости – 1,0 МПа;
- на долото – 0,4 МПа;
- в кольцевом пространстве и подводящих линиях – 0,4 МПа.

Итоговые суммарные потери давления при бурении с продувкой воздухом под кондуктор составляют 1,8 МПа.

В конечном счете, время бурения интервалов под кондуктор на скважинах № 13, № 15, № 17, № 19, № 25, № 27, № 29 составило, в среднем, 27 часов, т.е. чуть более суток. Бурение проходило в отсутствии каких-либо других нарушений технологического процесса.

Еще одним достижением науки и техники, напрямую связанным с использованием газообразных сред как циркулирующего скважинного агента, является технология бурения с контролем давления. Мировые флагманы нефтегазового сервиса Shlumberger, Halliburton, Weatherford, а также множество малых компаний, таких как ООО «Главнефтеснаб» предоставляют услуги по сопровождению данной технологии при вскрытии продуктивных отложений с низкими коллекторскими свойствами и предотвращении поглощений промывочной жидкости на различных глубинах. Технология вскрытия продуктивных горизонтов с контролем давления достаточно сложна и многообразна по своим вариациям, и нами не ставилась цель её рассмотрения в рамках данного диссертационного исследования. Однако, реализация упомянутой технологии – прямое следствие научного прогресса в вышеприведенных направлениях исследований.

Показателен опыт строительства скважин компании KERUI в провинции Сычуань КНР, для геологических разрезов которой характерны поглощения промывочной жидкости в интервале 0 – 500 м. и продуктивные пласты с низкими значениями проницаемости и пористости. В таблице 12 приведены характерные

примеры эффективного применения воздуха в качестве очистного агента при строительстве скважин в пров. Сычуань.

Таблица 12 – Характеристика применения продувки воздухом на скважинах в пров. Сычуань

Номер скважины	Очистной агент	Диаметр, мм	Интервал бурения, м	Затраченное время, ч	Суточная проходка, м
XX-1 скважина	Раствор на водной основе	311,2	30,00-138,46	13	8,36
	Воздух	311,2	138,46-518,00	5	75,91
Нэ Тао №1	Раствор на водной основе	444,5	0-18,25	9	2,03
	Воздух	444,5	18,25-300	8	35,22
Да Тянь №9	Раствор на водной основе	444,5	0-29,88	3	9,96
	Воздух	444,5	29,88-311,27	4	70,77
КУАН №2 скважина	Раствор на водной основе	311,2	1319-1522	50	4,06
	Сжатый воздух	311,2	1423,68-1901	14	34,09
Вэ Нан №1	Испытание на поглощение	311,2	30,11-115	16	5,3
	Сжатый воздух	311,2	115-485,5	7	52,93
Тянь Дон №1	Воздух/ГЖС	444,5	135,50-911,19	18	43,09

На рисунке 6 приведены данные по объему бурения с продувкой, выполненный компаний KERUI за период с 1999 по 2015 год.

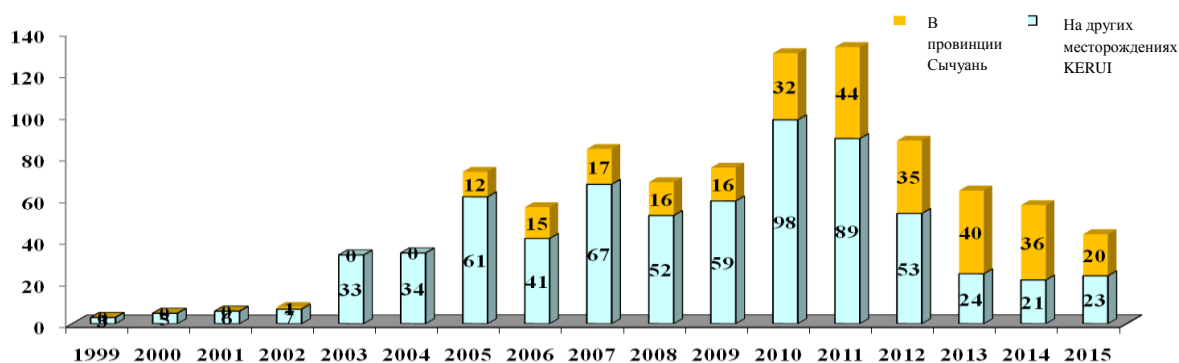


Рисунок 7 – Объем бурения с продувкой воздухом, выполненный компанией KERUI в 1999 – 2015 гг

Наличие разветвленной сети карстовых пещер в районе проведения буровых работ создало предпосылки для потери циркуляции во время бурения и загрязнения поверхностных водоемов, что показано на рисунке 7.

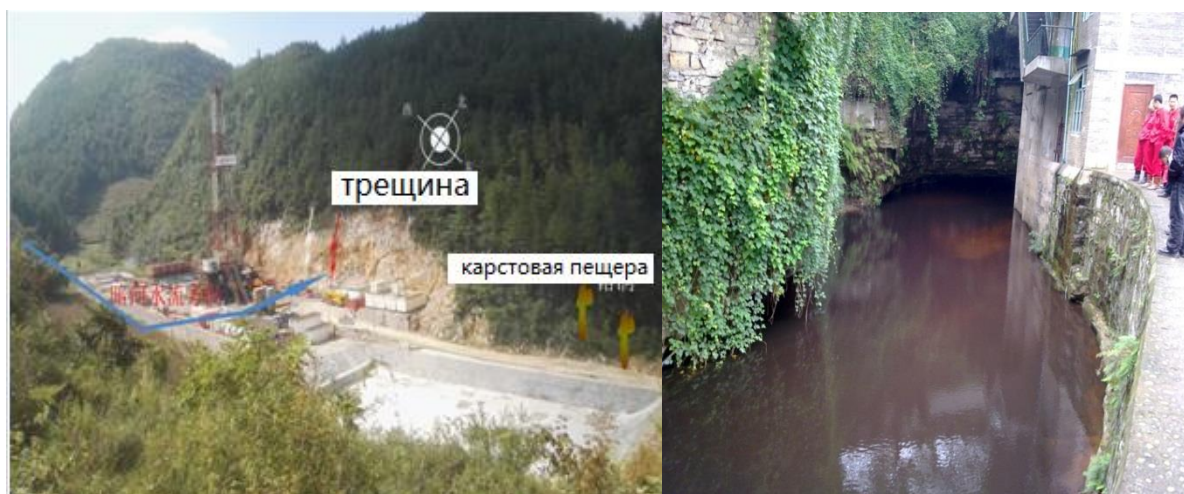


Рисунок 7 – Район ведения буровых работ в пров. Сычуань и последствия потери циркуляции жидкости во время бурения

Применение очистки забоя воздухом в данном районе работ позволило прекратить негативное воздействие на экосистему и предотвратить дальнейшие риски экологического ущерба в эквиваленте около 100 млн. юаней [33].

Исторической справедливости ради стоит привести сведения о промышленном опробовании метода вскрытия нефтяных пластов с продувкой воздухом на территории современной Украины в 1966 – 1968 гг., о чем свидетельствуют результаты исследований В. М. Дмитчука, В. П. Мазура и др. [34]. Продуктивные пласты на месторождении Спас б. характеризовались низкими коллекторскими свойствами, давлениями на уровне гидростатического и необходимостью длительного освоения скважин после вскрытия продуктивных пластов с промывочной жидкостью. Вскрытие с продувкой осуществлялось из-под башмака технической колонны диаметром 219 мм., который в свою очередь устанавливался в кровлю продуктивных отложений на глубине 1500 – 2000 м. Упомянутыми исследованиями отмечаются факты успешного вскрытия нефтяного пласта на Жирновском месторождении в 11 скважинах на глубине 700 м. Так, применение технологии продувки воздухом позволило увеличить дебит скважин в 2 – 4 раза по сравнению с вскрытыми с промывочной жидкостью. В

1969 году отечественная промышленность впервые зафиксировала факт вскрытия газоносного пласта на месторождении Великие Мосты, также находящегося на территории современной Украины. При этом из 25 скважин, пробуренных с промывкой, только 2 скважины дали свободный дебит газа 93 тыс. м³/сут., в то время как на первой же скважине со вскрытым продувкой продуктивным пластом свободный дебит составил 100 тыс. м³/сут. Таким образом, разработанная ВНИИБТ технология и освоенная производством отечественная техника обеспечили вскрытие с продувкой воздухом устойчивых продуктивных нефтяных и газовых пластов с низкими коллекторскими свойствами, при этом дебиты скважин существенно возросли до потенциально возможных.

Вышесказанное является лишь краткими обзором истории развития и современного состояния технологии очистки забоя скважин воздухом, однако само по себе является свидетельством высокой степени актуальности и применимости данного технологического решения при строительстве скважин различных категорий.

1.4. Исследование и разработка технологии бурения с очисткой забоя воздухом для безаварийной проходки интервалов под направления и кондукторы скважин Куюмбинского нефтяного месторождения

Использование воздуха в качестве очистного агента само по себе не является новшеством, однако, рациональное его использование возможно лишь при оптимальных параметрах. Эти оптимальные параметры газообразного агента должны обеспечить состояние динамического равновесия процессов, происходящих при углубке ствола скважины. При этом необходимо учесть уникальные особенности горно-геологических условий исследуемого интервала скважин Куюмбинского месторождения, в том числе возможность поступления водопритока в скважину интенсивностью 8 м³/час, согласно сведениям проектной документации.

1.4.1. Исследование характеристик воздуха как рабочего агента при ударно-вращательном бурении

Технология очистки забоя воздухом имеет ряд преимуществ перед традиционным использованием промывочных жидкостей, среди которых важными для целей данного исследования необходимо отметить:

- Ликвидация зависимости бурения скважины или её интервала от источников водоснабжения и затруднения, связанные с организацией водоснабжения на месте проведения буровых работ;
- В большинстве случаев возможна беспрепятственная проходка интервалов катастрофического поглощения промывочной жидкости. При этом нет необходимости привлечения дополнительных средств на борьбу с поглощением;
- Нивелируются расходы, связанные с приобретением дорогостоящих химических реагентов для промывочной жидкости;
- Закачка с разными режимами при разной глубине, вследствие сжимаемости. Отличие от горноразведочной деятельности в том, что условия не постоянны.

Широкое развитие применения воздуха в качестве циркулирующего скважинного агента отмечается при реализации технологии ударно-вращательного бурения скважин различных категорий как в отечественной промышленности, так и в зарубежной. В свою очередь ударно-вращательное бурение получило масштабное внедрение благодаря исключительной эффективности разрушения данным способом карбонатных, закарстованных и твердых пород и достижения высоких экономических показателей при строительстве геологоразведочных скважин. Безусловно, выявленные закономерности работы воздуха, а также способы и средства регулирования его работы как несущей среды и рабочего агента должны, быть учтены при проектировании буровых работ в конкретных горно-геологических условиях.

При проектировании ударно-вращательного бурения очень важно объективно обосновать предельно возможную глубину скважины в зависимости

от фактических геолого-гидрогеологических условий разреза и применяемого оборудования. К основному фактору, определяющему предельную глубину ударно-вращательного бурения в обводненных гидрогеологических скважинах, следует отнести гидростатическое давление, а в безводных скважинах – суммарное сопротивление движению подаваемого воздуха. Кроме того, глубина ударно-вращательного бурения может ограничиваться при наличии зон дробления, глинистых прослоев, которые часто осложняют нормальный процесс бурения и приводят к осложнениям в скважинах. Проведенные нами исследования, результаты которых будут представлены в экспериментальной части данной работы, показали, что возникающие расчетные давления на плановом забое кондуктора 550 м не представляют собой ограничительного фактора для реализации бурения интервала с очисткой забоя воздухом.

Давление воздуха является основной движущей силой в работе погружного пневмоударника. Регулируя давление в циркуляционной система мы тем самым регулируем его работу как очистного агента и как основного энергетического потока, приводящего в действие погружную пневмоударную установку. Именно давление воздуха определяет энергию и частоту ударов, при условии наличия объема воздуха, достаточного для поддержания давления. Процесс преобразования энергии потока воздуха в энергию ударов погружной пневмоударной установки схематично изображен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Превращение энергии потока воздуха в энергию ударов ППУ

Расход воздуха, прошедший через пневмоударник, выраженный в м³/мин, определяется как произведение некоторого количества ударов в минуту на рабочий объем пневмоударника.

Обязательным условием при выборе производительности воздушного компрессора является, минимально необходимая эквивалентность генерируемого компрессором объема воздуха расходу воздуха пневмоударника при требуемом давлении на выходе.

Отличие от классической теории пневмотранспора заключается в том, что при бурении с продувкой нельзя пренебречь аэростатическим давлением и при определении правильного давления на выходе и объема компрессора необходимо принять во внимание последствия эксплуатации на большой высоте, где воздух более разрежен. Характерным примером учета данного факта на практике являются практические рекомендации компании Halso [35] по корректированию генерируемого компрессором расхода относительно нормальных условий. Поправочные коэффициенты для расхода воздуха в зависимости от превышения над уровнем моря и окружающей температуры приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Поправочные коэффициенты для генерируемого компрессорами расхода, рекомендуемые компаний Halso

Температура, С°	Глубина, м								
	Уровень моря	305	915	1524	2134	2774	3354	3963	4573
-40	0,805	0,835	0,898	0,968	1,043	1,127	1,217	1,317	1,426
-34,4	0,824	0,855	0,92	0,991	1,068	1,154	1,246	1,349	1,460
-28,9	0,844	0,875	0,941	1,014	1,092	1,18	1,275	1,38	1,494
-23,3	0,863	0,895	0,962	1,037	1,117	1,207	1,304	1,411	1,528
-17,8	0,882	0,915	0,984	1,06	1,142	1,234	1,333	1,443	1,562
-12,2	0,901	0,935	1,005	1,083	1,167	1,261	1,362	1,474	1,596
-6,7	0,92	0,954	1,026	1,106	1,192	1,288	1,391	1,506	1,63
-1,1	0,939	0,974	1,048	1,129	1,217	1,315	1,42	1,537	1,664
4,4	0,959	0,994	1,069	1,152	1,241	1,341	1,449	1,568	1,698
10	0,978	1,014	1,091	1,175	1,266	1,368	1,478	1,6	1,732
15,6	0,997	1,034	1,112	1,198	1,291	1,395	1,507	1,631	1,766
21,1	1,016	1,054	1,133	1,221	1,316	1,422	1,536	1,662	1,8
26,7	1,035	1,074	1,155	1,244	1,341	1,449	1,565	1,694	1,834
32,2	1,055	1,094	1,176	1,267	1,365	1,475	1,594	1,725	1,868
37,8	1,074	1,114	1,198	1,29	1,390	1,502	1,623	1,756	1,902
43,3	1,093	1,133	1,219	1,313	1,415	1,529	1,652	1,783	1,936
48,9	1,112	1,153	1,24	1,336	1,44	1,556	1,681	1,819	1,97

То есть при высоте 915 м и температуре 10 °С поправочный коэффициент составляет 1,091, следовательно, в этих условиях паспортный расход через пневмоударник умножается на величину 1,091, тем самым увеличивая минимально необходимый расход, генерируемый компрессором. Если объем воздуха выбранного компрессора меньше объема, требуемого пневмоударнику при заданном давлении, то давление воздуха на выходе будет ниже.

Для твердых пород и известняков, которыми характеризуется геологический разрез Куюмбинского месторождения, повышение давления воздуха обеспечит более высокие скорости проходки, особенно по твердой породе. На рисунках 9 и 10 приведены типовые зависимости давления и развиваемой механической скорости бурения при ударно-вращательном бурении для известняков и твердых пород, соответственно, рекомендуемые компаний Halco [35].

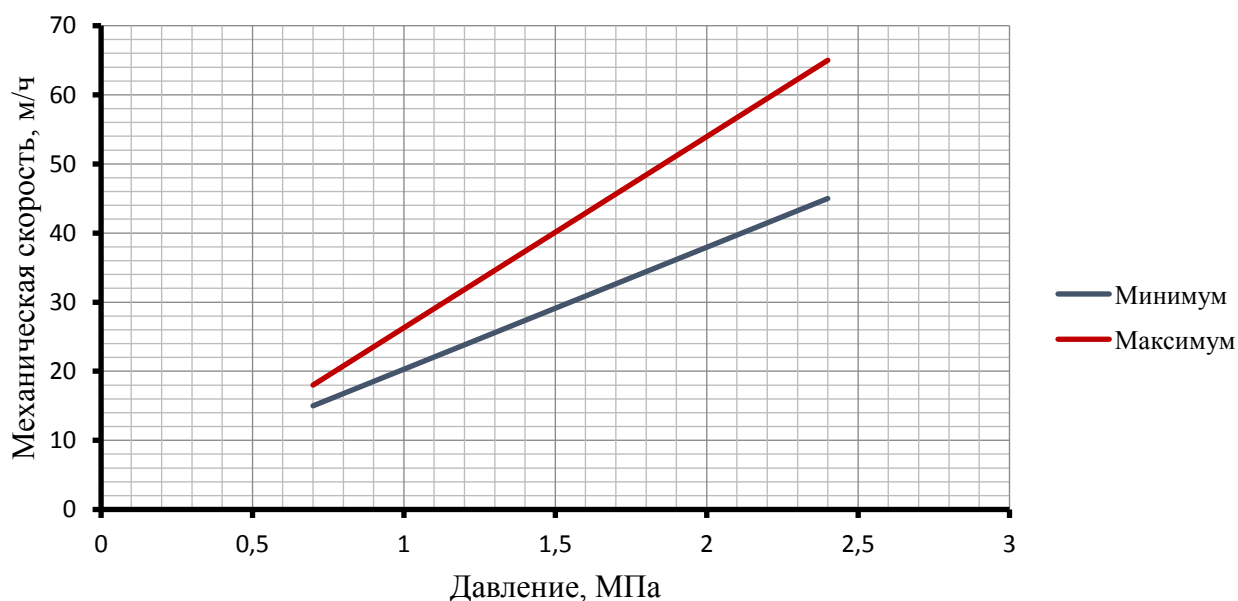


Рисунок 9 – Зависимость механической скорости бурения от давления для известняка

Более высокое давление в условиях мягкой породы не всегда обеспечивает увеличение скорости, если объем вытяжных газов является недостаточным для поддержания скважины чистой, при этом возникает перебуривание обломков породы.

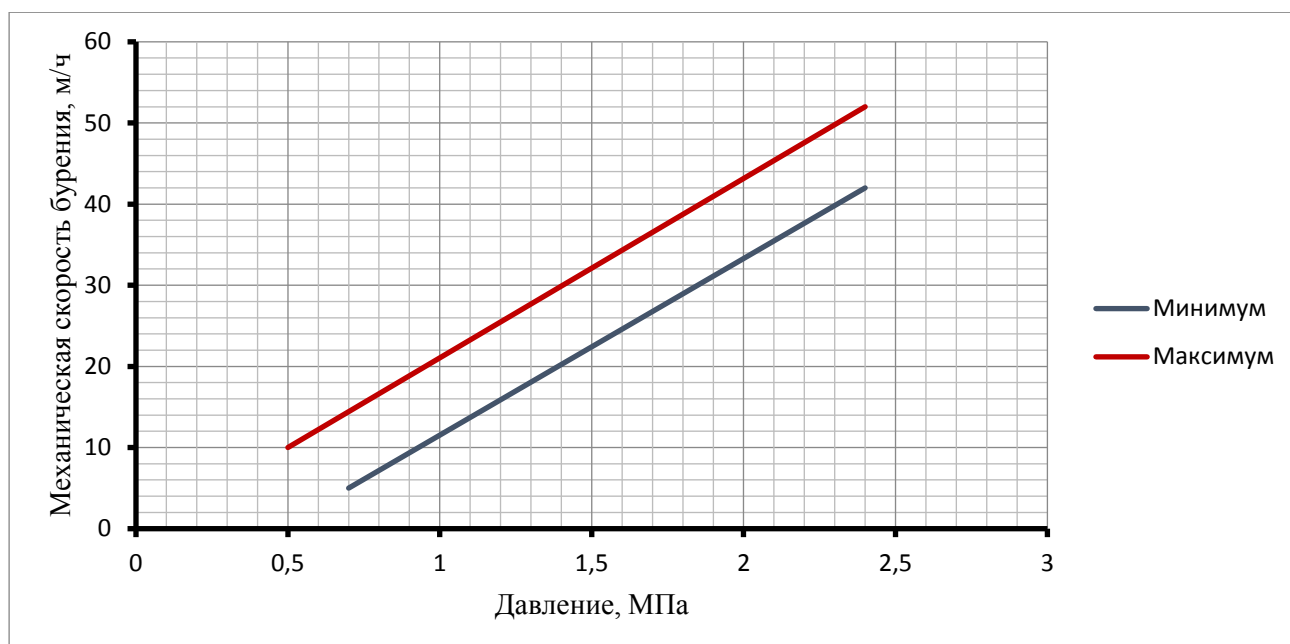


Рисунок 10 – Зависимость механической скорости от давления для твердых горных пород

Увеличение давления воздуха будет способствовать преодолению внешнего противодействия воды. Давление в 0,1 МПа столба оказывает соответствующее противодействие на пневмоударник. Если теоретическое рабочее давление пневмоударника с учетом глубины воды упадет ниже минимального рекомендованного давления, то пневмоударник может остановиться. При этом контролируемое повышение давления воздуха позволит пневмоударнику продолжить работать.

С ростом давления воздуха в скважине в прямой зависимости увеличивается скорость восходящего потока в кольцевом пространстве, где она является недостаточной для очистки ствола скважины. Повышение давления воздуха приведет к соответствующему увеличению объема воздуха при условии, что компрессор имеет достаточный объем. В большинстве случаев необходимо, чтобы любое увеличение давления воздуха компрессора сопровождалось увеличением объема воздуха, иначе, за исключением случаев преодоления противодействия воды, фактическое рабочее давление на пневмоударнике не вырастет.

Контролируемого повышения давления воздуха можно достичь путем замены пневмоударника установкой, которая для поддержания заданного

давления потребляет меньше воздуха. Это применяется в условиях, когда давление на выходе используемого компрессора не может быть поддержано, поскольку его объем недостаточен для использования с исходным пневмоударником. Также эффект достигается одновременным вводом в действие второго компрессора с таким же давлением на выходе, в случае бурения скважин большего диаметра, когда скорость восходящего потока в кольцевом пространстве очень маленькая. Это позволит большому пневмоударнику поддерживать более высокое давление, так как увеличенный объем воздуха будет способствовать этому.

Ранее уже было отмечено, что горные породы в исследуемом интервале скважин Куюмбинского месторождения характеризуются перемежаемостью по разрезу, поэтому при проходке мягкой породы, когда скважина продувается вытяжным воздухом повышение давления воздуха производить не следует.

При забурке скважины или начале проходки ударно-вращательным способом в начальный момент возможна потеря устойчивости стенок скважины под высоким давлением воздуха. В этих условиях не применяют временное уменьшение давления воздуха до обеспечения устойчивости устья скважины.

В случае если скорость бурения настолько высока, что вытяжной воздух не может удалить обломки породы из скважины и происходит зарывание пневмоударника, давление воздуха в циркуляционной системе скважины необходимо снизить.

В определенных условиях может возникнуть нежелательное уменьшение или падение давления воздуха, приводящее к нарушению стабильности процесса углубки. Это можно определить путем сравнения фактического давления на выходе компрессора с давлением, отображаемым в данный момент на воздушном манометре буровой установки. Ряд исследователей [36, 37, 38, 39] основными причинами падения давления отмечают следующие:

- Поступление воды в скважину;
- Недостаточный объем компрессора для поддержания требуемого рабочего давления пневмоударника;

- Изношенные или поврежденные компоненты компрессора;
- Объем воздуха, прокачанный непосредственно на выпуск, через штуцеры или вентиляционные каналы настолько значительный, что оставшегося объема воздуха компрессора недостаточно для поддержания требуемого рабочего давления пневмоударника;
- Нарушена поточная схема циркуляции, то есть воздух для бурения с продувкой и обратный поток воздуха, проходящий через штуцеры/вентиляционные отверстия, выходит из одних и тех же отверстий. Это может привести к возникновению противодействия и падению давления воздуха на пневмоударнике;
- Утечки воздуха в линии подачи сжатого воздуха и звеньях бурильных труб;
- Пустоты или трещины в породе, приводящие к потере воздушной циркуляции;
- Работа на больших высотах над уровнем моря, где плотность воздуха меньше.

Принимая, что в большинстве случаев чем выше давление воздуха, тем быстрее будет разбуривать пневмоударник, необходимо учесть, что существуют также другие приоритетные задачи для рассмотрения, которые в определенных ситуациях более важны, нежели скорости проходки при прямом бурении.

- Разрушение скважины в результате чрезмерного давления. Уменьшение давления воздуха может обеспечить получение более надежной и пригодной к использованию скважины;
- Чрезмерный износ основания пневмоударника, при котором в условиях сильноабразивной породы наряду со скоростями бурения необходимо учесть затраты на замену расходных материалов;
- Для предотвращения непрерывной работы двигателя компрессора на полной скорости, что может сократить срок его службы и увеличить затраты на техническое обслуживание.

В случае необходимости увеличения подачи воздуха, возможно её периодическое увеличение, то есть при поднятии пневмоударника от поверхности забоя ударное действие будет прекращаться, при этом высвобождающийся объем воздуха, который может до двух раз превышать объем во время долбления, будет проходить через пневмоударник для очистки скважины при условии, что компрессор имеет достаточный запас объема. Это наиболее простой, однако не самый надежный метод.

Использование штуцера или вентиляционный канал в пневмоударнике также позволит повысить подачу воздуха. В зависимости от конструкции пневмоударника, штуцер может являться либо заглушенным дроссельным отверстием в поршне, либо прокачным приспособлением в клапане одностороннего действия, нижней втулке или удерживающих кольцах коронки.

Для целей увеличения подачи воздуха также можно использовать вспомогательный переходник перепуска воздуха над пневмоударником. В переходнике механически вырезаются два отверстия, направленные вверх, через которые добавочный воздух поднимается для увеличения скорости восходящего потока в кольцевом пространстве, хотя этот воздух обходит торец буровой коронки, где он мог бы быть наиболее эффективным.

Важно обеспечить, чтобы при использовании вспомогательных переходников перепуска воздуха, штуцеров или вентиляционных каналов применяемый компрессор вдобавок имел достаточный запас объема воздуха, который необходим для поддержания давления на выходе с выбранным пневмоударником. В противном случае, помимо действия противодействия, вызванного использованием вентиляционного канала или штуцера, уменьшится давление.

Еще одним средством регулирования работы воздуха в скважине является струйный переводник, представленный на рисунке 11 [40]. Это устройство с обводным дросселирующим отверстием, которое направляет дополнительный поток, необходимый для очистки скважины, непосредственно в затрубное пространство. В отличие от обычного обводного канала, струйный переводник

подает этот поток через верхнюю часть, исключая тем самым создание в пневмоударнике противодействия. В этих условиях струйный переводник не только обеспечивает максимальную производительность пневмоударника, но и улучшает очистку скважины и снижает износ наружных деталей пневмоударника.



Рисунок 11 – Струйный переводник

Струйный переводник включает в себя модифицированную верхнюю часть и отверстие для регулирования количества воздуха в обводном канале, а также и большое уплотнительное кольцо, которое выполняет функцию обратного клапана. В представленной ниже таблице 14 показаны расходы воздуха для различных диаметров отверстий.

Таблица 14 – Обводной поток в струйном переводнике в зависимости от диаметра отверстий

Давление, МПа	Размер отверстия (шесть отверстий одинакового диаметра), мм					
	0,094	0,125	0,156	0,188	0,219	0,250
Обводной поток в струйном переводнике, м ³ /мин						
1,4	3,1	5,6	8,7	12,7	17,2	22,4
1,575	3,5	6,2	9,7	14,1	19,2	25,0
1,75	3,9	6,9	10,8	15,6	21,2	27,6
1,925	4,3	7,5	11,8	17,1	23,2	30,2
2,1	4,6	8,2	12,8	18,5	25,2	32,8
2,275	5,0	8,8	13,8	20,0	27,2	35,4
2,45	5,4	9,5	14,8	21,5	29,1	38,0
2,625	5,7	10,2	15,8	23,0	31,2	40,6
2,8	6,1	10,8	16,8	24,4	33,2	43,2

Проведение опытно-промышленных работ на Куломбинском месторождении подтвердило целесообразность регулирования работы воздуха в скважине с использованием рассмотренных средств.

1.4.2. Анализ основных особенностей очистки забоя воздухом при вскрытии поглощающих и водопроявляющих пластов

В направлении исследований технологии очистки забоя воздухом при вскрытии поглощающих и водопроявляющих пластов к настоящему времени проведена значительная работа отечественными учеными, которая с высокой степенью достоверности может служить основой проектирования технологии очистки забоя воздухом в горно-геологических условиях Куюмбинского месторождения.

А.С. Бронзов, Б.Б. Кудряшов и А.И. Кирсанов в своих работах [41, 42, 43] одним из основных лимитирующих факторов применения воздуха в качестве очистного агента при реализации процесса ударно-вращательного бурения отмечают наличие водопритоков различной степени интенсивности. А.С. Бронзов приводит следующую градацию:

1. Незначительные – до 8,5 л/мин (0,5 м³/час);
2. Средние – 8,5 – 10 л/мин (0,5 – 0,6 м³/час);
3. Сильные – 120 л/мин (1,2 м³/час).

Он рекомендует при наличии средних водопритоков отказываться от использования воздуха.

Б.Б. Кудряшов в своих исследованиях говорит [41] о том, что в большинстве случаев зоны малых водопроявлений могут быть замечены при бурении только через некоторое время после их встречи, так как очень малое количество воды не вызывает при достаточном расходе воздуха быстрого образования сальников.

При прохождении зон малых водопроявлений растут крутящий момент и давление воздуха, количество выносимого шлама уменьшается, а размеры его частиц увеличиваются в результате их агрегирования. Крупные частицы шлама могут при этом накапливаться на отдельных интервалах, налипать на стенках, образуя пробки. Обычно это происходит, если при бурении встречать каверны или крупные трещины, в зоне которых резко падает скорость потока воздуха, что способствует отложению и скапливанию мокрого шлама. В этом

случае резкий подъем снаряда может привести к его затяжке и обрыву. Снаряд следует извлекать осторожно, с расхаживанием.

При вскрытии водоносного горизонта, а следовательно, увеличенном водопритоке, шлам интенсивно слипается, образуя сальники как на стенках скважины, так и на инструменте. При этом ствол сужается ствол скважины, что влечет за собой повышение давления на компрессоре до максимального и нередко прекращение циркуляции воздуха. Вследствие этих нарушений возможны прихваты снаряда, прижоги ПРИ. Повторяющиеся затяжки снаряда при подъеме часто делают продолжение бурения с продувкой воздухом нецелесообразным. Образование сальников зависит от характера проходимых пород. Особенно трудно разбуривать липкие глины с влажностью 10 – 12% и более. Количество глины, вызывающей слипание шлама разрушенных пород, различными исследователями оценивается по-разному.

Б.Б. Кудряшов оперирует к результатам исследований, проведенных во Всероссийском научно-исследовательском институте методики и техники разведки (ВИТР) которыми установлено, что наилучшие условия для слипания частиц шлама различных пород создаются при поступлении в скважину в объеме 10 – 35% от массы шлама, образующегося в единицу времени [44]. По данным ВИТР, липкость шлама различных пород в наибольшей мере проявляется при влажности порядка 10%. Для предупреждения сальникообразования и борьбы с ним в условиях малых водопритоков применяют следующие способы [44]:

1. Осушение скважин действием циркулирующего теплого воздуха непосредственно от компрессора. Эта операция требует значительных непроизводительных затрат энергии и времени и дает положительные результаты лишь в отдельных случаях при бурении в зонах слабопросачивающихся пород. При бурении пород с отрицательной температурой, имеющих в своем составе замерзшую влагу, этот способ не только не приводит к успеху, но, напротив, может вызвать ещё большие осложнения;

2. Нагнетание в поток воздуха воды для разжижения сальников. Добавление воды не рекомендуется, когда в разрезе скважины имеются глинистые и другие

породы, склонные к набуханию и разрушению при смачивании их водой, а также при бурении в зоне многолетнемерзлых пород, когда введение воды в скважину может явиться причиной затяжной аварии из-за замерзания инструмента. Периодическое введение воды в скважину дает кратковременное улучшение процесса бурения, но к полному устранению осложнений не приводит;

3. Добавление в поток воздуха порошкообразных водоотталкивающих веществ (стеарат кальция, стеарат цинка) для предотвращения слипания частиц;

4. Введение в поток воздуха водных растворов ПАВ, способствующих разжижению шлама и удалению его с забоя (бурение с туманом). Этот метод дает наилучшие результаты;

При средних водопритоках сальники образуются когда в скважину поступает ограниченное количество воды (начало вскрытия водоносного горизонта). При увеличении притока шлам эмульсируется в жидкости, и процесс бурения (при наличии дожимных компрессоров) осуществляется без особых затруднений по принципу эрлифта. В этом случае наиболее трудно удалить воду со скважины, скопившуюся, в перерыве между рейсами. Осложнения наблюдаются тогда, когда в незакрепленной части ствола имеются неустойчивые или разрушающиеся от действия воды породы.

Как уже отмечалось ранее, выбор компрессоров в отечественной практике геологоразведочного бурения был ограничен. Подавляющее большинство из них имело рабочее давление не более 0,8 МПа. Без применения специальных мер по снижению пусковых давлений бурить с помощью таких компрессоров не удавалось более чем на 70 м ниже статического уровня.

Для решения этой проблемы отечественной промышленностью использовались следующие методы снижения пусковых давлений:

- ступенчатый спуск буровой колонны с промежуточными выбросами воды из скважины;
- применение пусковых отверстий для частичного выброса воды из скважины, для чего в состав бурильной колонны включают муфты с калиброванными отверстиями;

- применение пусковых клапанов, устанавливаемых на месте пусковых отверстий и перекрывающих отверстие после окончания выброса воды.

Более поздние результаты исследований Я.Ю. Ахмедова, В.А. Вареника, Р.С. Газаряна и Х.И. Иосифова [45] свидетельствуют о том, что наиболее склонны к сальникообразованию пылевые фракции шлама. При этом была выявлена устойчивая связь между критической скоростью витания частиц и их влажностью, определяемая по формуле (6):

$$w = w_0 + aB, \quad (6)$$

где w_0 – скорость витания сухой частицы в м/с; $a = 0,06$ – эмпирический коэффициент; $B = 0 \div 20\%$ – весовая влажность шлама.

Наличие в скважине некоторого количества влаги способствует образованию сальников, что вызывает сужение ствола скважины и, как следствие, затяжки и прихваты бурильной колонны. Исследованиями, проводимыми коллективом авторов во ВНИИБТ [45], доказано, что наличие 10% влаги от веса шлама приводит к слипанию частиц глины размером 0,25 мм. Такое количество воды может содержаться в виде паров в потоке в потоке нагнетаемого воздуха и конденсироваться в скважине. Сконденсировавшаяся влага тем более опасна, что она может служить уже добавочной влагой к естественной влажности пород. Следовательно, при определении естественной влажности породы для образования сальника потребуется значительно меньше воды, чем для слипания сухих частиц. Если влажность газообразного агента больше влажности, предельной для данных пород, необходимо принимать меры по снижению содержания влаги в потоке сжатого воздуха.

Анализ результатов опытов Я.Ю. Ахмедова и др. [45] показывает, что диаметр частиц увеличивается в 1,6 – 2,4 раза с ростом влажности от 0 до 12 % от веса сухой частицы. Это приводит к повышению скорости витания в 2,6 – 5,8 раза. Диаметр частиц увеличивается вследствие слипания некоторых мелких частиц в одну более крупную. Результаты опытов также свидетельствуют, что частицы размером более 1 мм менее опасны для образования сальников, чем пылевая фракция шлама. Однако, при бурении глубоких скважин с продувкой

наблюдались случаи полного прекращения выноса шлама из скважины. Это свидетельствует о том, что вся выбуренная порода связывалась с поступающей водой, т.е. приток был выше предельного для частиц размером 5 мм.

В скважине № 711, буримой на территории современного Прикарпатья, на глубине 1084 – 1124 м был вскрыт водоносный горизонт. Выноса пыли не наблюдалось, а в конце рейса прекратился вынос крупных частиц, давление на стояке возросло с 0,7 МПа до 1,5 МПа [45]. При подъеме бурильной колонны произошла затяжка. Электробур, УБТ и 18 свечей были покрыты слоем пульпы, при этом признаков свободной воды не было. Дебит пластовой воды с учетом предельных значений влажности по экспериментальным данным скорости проходки и других параметров рассчитали по формуле (7):

$$Q = \frac{B \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot v \cdot \gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{в}}} \quad (7)$$

где B – предельное значение влажности в долях единицы, D – диаметр скважины, м; v – механическая скорость проходки, м/ч; $\gamma_{\text{п}}$ и $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес соответственно горных пород и пластовой воды, кгс/м³.

Таким образом был вскрыт водоприток интенсивностью 3,6 – 6,4 л/мин. Опыт бурения скважины № 18 на этой же площади показывает, что интенсивность притока в 2,17 – 3,8 л/мин была достаточной, чтобы шлам при бурении не выносился. Механическая скорость была на 68% меньше, чем при бурении скважины № 711 [45]. Это явилось причиной образования сальника при меньшем водопритоке. На рисунке 12 представлена расчетная зависимость интенсивности водопритока от механической скорости бурения проходки для аргиллитов стрыйской свиты Прикарпатского региона.

Линия 1 относится к нижнему пределу, а линия 2 – к верхнему пределу опасной интенсивности водопритока. Между ними – диапазон значений водопритока, при которых происходит переход всей массы выбуренной породы в сальник. Водоприток, интенсивность которых находится выше линии 2, вызовут образование пульпы на забое, что приведет к повышению давления на компрессоре.

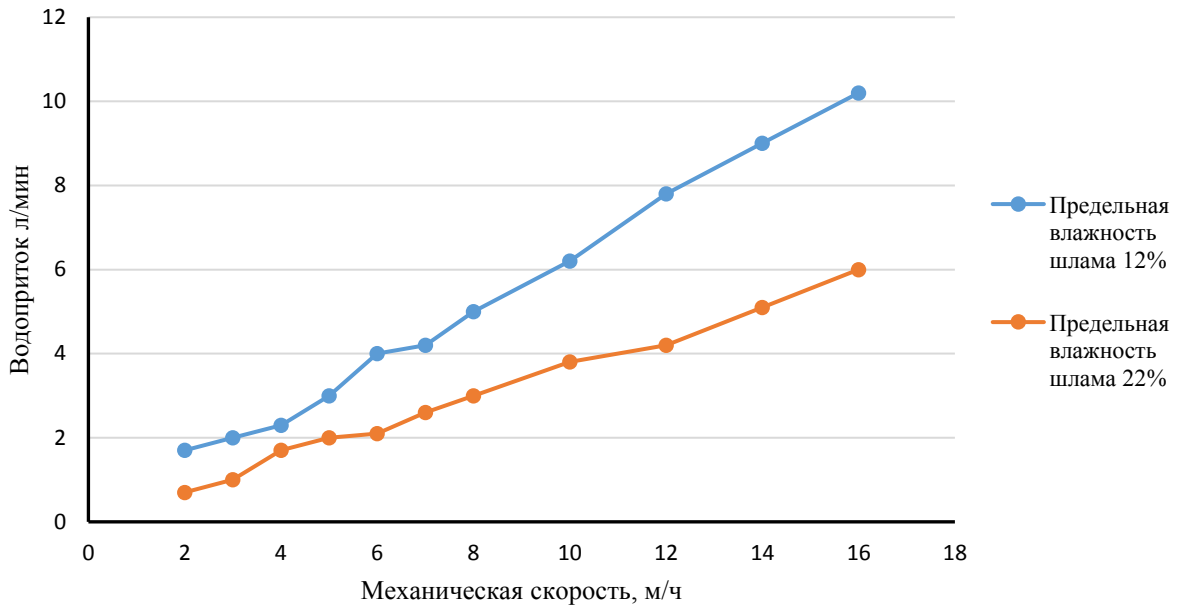


Рисунок 12 – Зависимость величины водопритока, ведущей к образованию сальника в скважине диаметром 295 мм от механической скорости проходки по результатам исследований коллектива ВНИИБТ

Линия 1 ограничивает сверху область водопритоков, при которых объема воды, поступающей в скважину, недостаточно для смачивания всей массы выбуренной породы. При этом имеют место два крайних случая: поступающая вода, равномерно распределяясь на частицах, удаляется из скважины, либо часть шлама пылевой фракции связывается в сальник поступающей водой.

Таким образом, основываясь на анализе результатов исследований коллектива ВНИИБТ можно сделать заключение, что для шлама горных пород существует предельная весовая влажность, при которой начинается образование сальника. Величина этой влажности для фракций менее 0,25 мм составляет 0 – 14% от веса самой фракции и увеличивается до 19 – 24% для частиц размером 3 мм. Литологическая характеристика шлама мало влияет на величину предельной влажности, однако, наименьшая предельная влажность у глин. Увеличение же влажности шлама приводит к существенному росту скорости витания частиц фракций менее 0,25 мм, особенно, глинистых пород.

М.Н. Климентов и В.И. Тиль в своем анализе результатов исследований ударно-вращательного бурения геологоразведочных скважин в условиях водопритока приводят данные об опасности образования сальников в диапазоне

водопритока 0,22 – 0,4 м³/час, давлении 0,6 – 0,7 МПа при подаче воздуха 10,5 – 12 м³/мин. Положительный эффект в борьбе с сальникообразованиями дают разовые доливы воды в скважину (60 – 100 л/мин) [46]. В случае же бурения в присутствии водопритока 0,4 – 5,4 м³/час образование сальников не наблюдается, ввиду проявления характерных признаков бурения с эрлифтом.

При прохождении зон средних водопритоков в процессе строительства геолого-разведочных скважин в отечественной практике применяли следующие способы:

- бурение с туманом или переход на бурение с очисткой забоя пеной;
- применение азрированной жидкости;
- бурение с очисткой забоя по принципу эрлифта, если этот метод в конкретном случае целесообразен и экономически оправдан.

Глубина бурения в этом случае ограничивалась положением статического уровня и дебитом, которые могут потребовать высоких расходов воздуха и больших пусковых давлений, превышающих возможности имевшегося компрессорного оборудования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Приведенный выше анализ текущего состояния бурения интервалов скважин под направление, кондуктор и техническую колонну на месторождениях Восточной Сибири, Якутии и Красноярского края, современного уровня развития и применения технологии очистки забоя воздухом, а также технологических особенностей использования воздуха как рабочего циркуляционного агента при строительстве скважин различных категорий, выполненный для формулирования и постановки исследовательских задач, позволяет сделать следующие выводы:

1. При бурении исследуемых интервалов скважин одной из главных проблем является уход промывочной жидкости в поглощающие пласта. Выявленная проблема аварийности бурения характерна для широкого спектра горно-геологических условий.

2. Анализ применяемых способов ликвидации поглощений промывочной жидкости показывает высокую степень трудоемкости их реализации, а также различную, но, относительно, низкую степень результативности мероприятий по ликвидации данного вида аварий. При этом предпринимаемы по устранению аварии меры иногда носят характер отрицательной эффективности.

3. На фоне усугубления ситуации проходки исследуемых интервалов скважин, с учетом современных достижений техники и технологии, перспективной мерой по предотвращению поглощений рабочего агента является применение технологии очистки забоя воздухом.

4. Результаты исследований технико-геологических условий ведения буровых работ на Куюмбинском нефтяном месторождении, основ регулирования работы воздуха как циркулирующего скважинного агента, а также особенностей и закономерностей прохождения зон катастрофических поглощений и притока воды в скважину дают основания с высокой степенью вероятности успешного применения исследуемого технологического решения при строительстве скважин различных категорий на Куюмбинском нефтяном месторождении.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И МЕТОДОЛОГИЯ СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой экспериментальных исследований данной диссертации являются опытно-промышленные работы по ударно-вращательному бурению с очисткой забоя воздухом на разведочных и эксплуатационных скважинах Куюмбинского месторождения (Красноярский край). Мощностями компаний ООО «Интес» и ООО «Коралайна инжиниринг» впервые в России была внедрена научная идея очистки забоя воздухом при строительстве секции скважин диаметром 324 мм в конкретных горно-геологических условиях нефтяного месторождения. Объемами опытно-промышленных работ было предусмотрено строительство четырех секций кондуктора диаметром 324 мм с проектным забоем 550 метров и двух водозаборных скважин.

Ниже приведено описание методики проведения экспериментальных работ в условиях действующей буровой, а также характеристики используемого при этом набора наземного и подземного оборудования.

2.1. Буровая установка для проведения опытно-промышленных работ на геологоразведочных и эксплуатационных скважинах Куюмбинского месторождения

В качестве материальной базы для реализации опытно-промышленных работ выступил комплекс оборудования, применяющийся компанией ООО «Интес» для строительства разведочных и эксплуатационных скважин в конкретных технико-геологических условиях месторождения. Основным наземным оборудованием явились следующие комплексы:

- Буровая установка COOPER LTO-550 г/п – 100 тнс;
- Три компрессора SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL с развиваемой общей подачей воздуха до 96 м³/мин и рабочим давлением 3,5 МПа;
- Дожимной компрессор HURRICANE B15-62/2175;
- Дивертор 1300 Series Rotaring Control Heads.

Перечень комплексов, выступивших в качестве вспомогательного оборудования, приведен ниже:

- Ротор механический 17RT005;
- Блок дозировочный для бурения на воздухе;
- Вертлюг буровой «King Oil Tools» 10 MB;
- Передвижная воздухонагревательная установка;
- Дизельгенераторные станции GEN 275 Perkins;
- Дизельгенераторная станция ДЭС 110кВА Olympian;

На рисунке 13 изображен эскиз буровой установки COOPER LTO-550 с обозначением габаритных размеров.

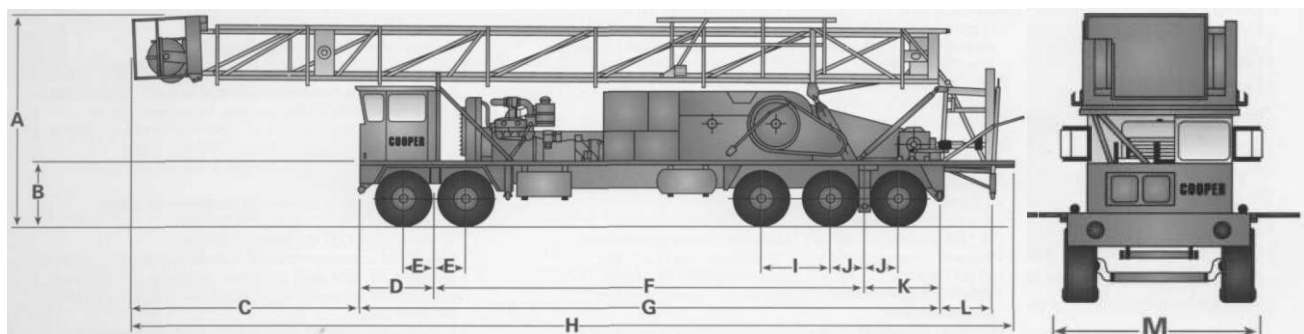


Рисунок 13 – Компонка буровой установки COOPER LTO-550 на пятиосном транспортном средстве

Все размеры приведены в метрах.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
4,22	1,27	6,07	1,50	0,63	8,58	11,56	19,73	1,37	0,69	1,47	1,03	2,87

Согласно пункту 135 Правил безопасности нефтяной и газовой промышленности [47] критериями выбора буровой установки является выполнение условий:

$$P_{ок} \leq 0,9 \cdot Q_{max} \quad (8)$$

$$P_{бк} \leq 0,6 \cdot Q_{max} \quad (9)$$

$$P_{бк} \cdot k_{прих} \leq Q_{max} \quad (10)$$

где $P_{ок}$ – нагрузка от массы обсадной колонны, $P_{бк}$ – нагрузка от массы бурильной колонны, Q_{max} – допускаемая нагрузка на крюке буровой установки, $k_{прих}$ – коэффициент прихвата бурильной колонны (примем $k_{прих} = 1,5$).

Проектными решениями Для крепления ствола скважины в интервале под направление в соответствии с проектными документами используется обсадная колонна диаметром 323,9 мм, толщиной стенки 11 мм, марки прочности Д, номинальным диаметром муфты 351 мм, соединительная резьба ОТТМ. Длина обсадной трубы 11 м; вес одного погонного метра при выбранной толщине стенки – 84,8 кг, вес муфты – 23,4 кг [48].

Во время спуска обсадной колонны, состоящей из 50 труб, при достижении забоя 550 м максимальный вес на крюке будет составлять:

$$P_{ок} = 50 \cdot 11 \cdot (84,8 + 23,4) \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 583 \text{ кН.}$$

Согласно паспортной характеристике БУ COOPER LTO-550 позволяет работать с обсадными трубами, длиной до 15 м, и имеет проходное сечение в буровом столе 711 мм. Допускаемая нагрузка на крюке составляет 1108,53 кН [49]. Таким образом, БУ COOPER LTO-550 соответствует характеристикам обсадной колонны, включая допускаемой расчетной нагрузке на крюке от ее массы.

Герметизирующим устье скважины устройством являлся дивертор 1300 Series Rotaring Control Heads, изображенный на рисунке 14.

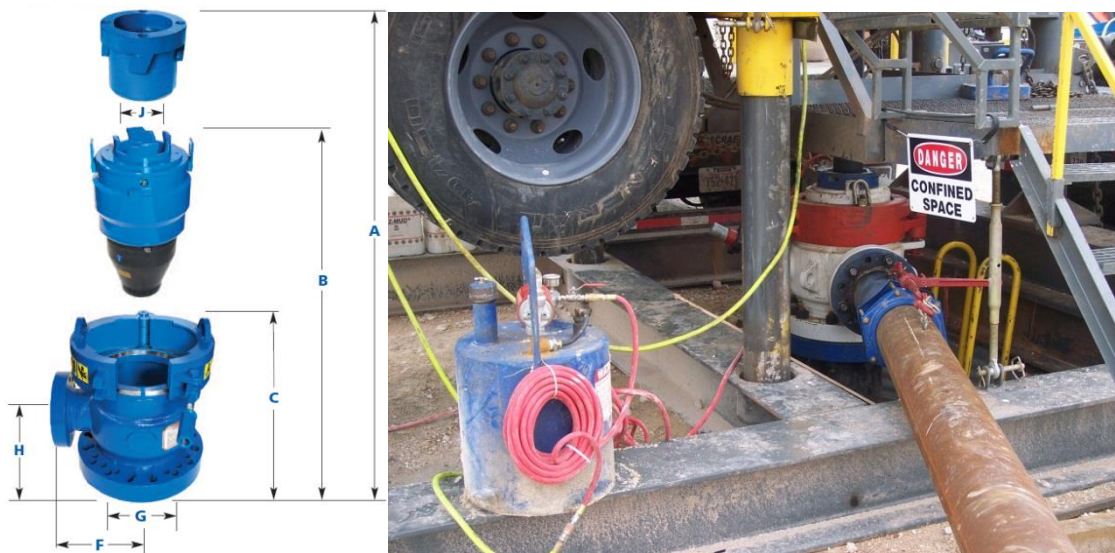


Рисунок 14 – Дивертор 1300 Series Rotaring Control Heads.

Все размеры даны в миллиметрах

Типоразмер фланца	A	B	C	E	F	G	H	J	Кольцевая прокладка	Выходной фланец
762	981	933	736	806	660	763	419	206,4	R – 95	279,4

Это техническое устройство, разработанное с целью непрерывно герметизировать устье скважины, сохраняя при этом возможность углубления скважины с вращением бурильной колонны, и направлять шлам в выкидную линию. Тестируемое динамическое давление дивертора составляет 2,41 МПа, статическое – 4,13 МПа. Дивертор позволяет вращать бурильный инструмент с частотой до 150 об/мин [50]. Технические характеристики данного дивертора полностью соответствовали условиям проведения опытно-промышленных работ.

2.2. Компоновка низа бурильной колонны и компрессорное оборудование для исследования процессов очистки забоя воздухом на скважинах Куюмбинского месторождения

Особое внимание при проведении производственного эксперимента было уделено проектированию компоновки низа бурильной колонны (КНБК) и комплектации компрессорного оборудования.

Проходка скважины осуществлялась с использованием определенного набора КНБК, в состав которого входили: долото CONCAVE SD 12 BIT диаметром 394 мм (длина 0,38 м), пневмоударник MACH 122 № 1100 диаметром 240 мм (длина 6,6 м), УБТ 229x80Д (длина 9,4 м), КЛСВ 374.6СТ-41 (длина 1,5 м). Колонна бурильных труб (КБТ) была представлена инструментом ТБПК 127x9,19D (длина одной трубы 9,45 м). В состав указанной КБТ через каждые 27 м включался обратный клапан для предотвращения пневмоудара в момент подачи воздуха во время спускоподъемных операций (СПО).

Методологию выбора типа ПРИ, представленную на рисунке 15, характеризуют известные закономерности конструкции породоразрушающего инструмента от свойств твердости буримых горных пород. Сервисное сопровождение породоразрушающего инструмента предоставляла компания Atlas Copco.

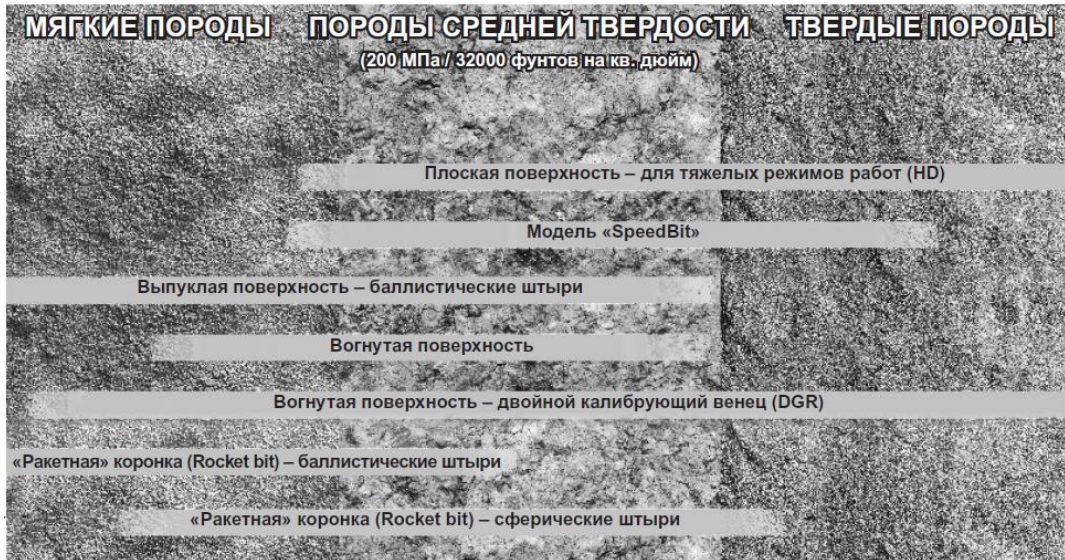


Рисунок 15 – Методология выбора типа долота, предлагаемая компанией Atlas Copco.

На основе анализа физико-механических свойств пород интервала бурения был произведен выбор в пользу долота с вогнутой поверхностью и куполообразными вставками, так как условия проведения опытно-промышленных работ были охарактеризованы как тяжелые, вследствие наличия крепких пород в разрезе. Поэтому решено было использовать долото CONCAVE SD 12 BIT диаметром 394 мм с вогнутым профилем рабочей части и куполообразными твердосплавными вставками (рисунок 16) [51].

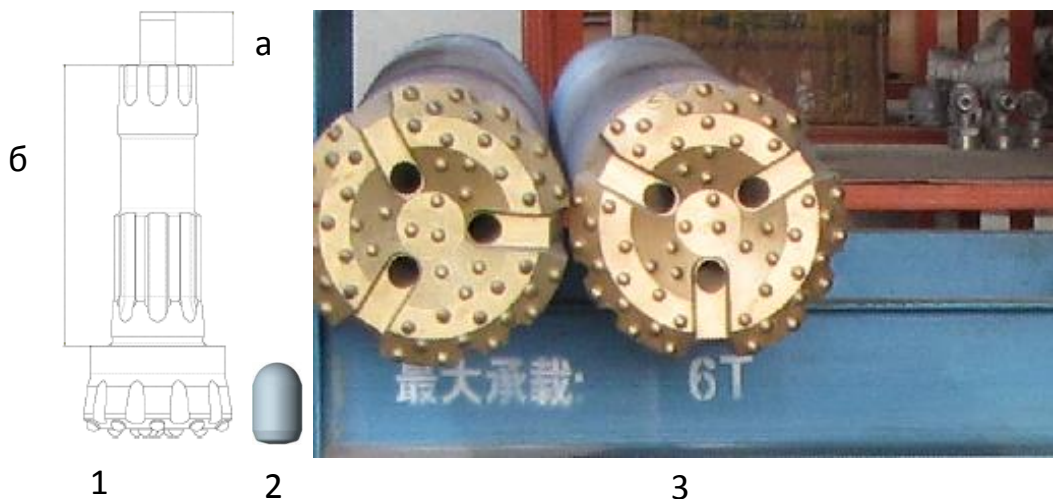


Рисунок 16 – Породоразрушающий инструмент, задействованный при проведении опытно-промышленных работ 1 – эскиз долота CONCAVE SD 12 BIT, где а и б – геометрические размеры в метрах 0,57 и 3,2 метра соответственно; 2 – куполообразная твердосплавная вставка; 3 – фото рабочей части ПРИ.

Выбор соответствующего пневмоударника регламентируется диаметром скважины, типом горных пород по разрезу скважины, а также сочетанием с типом породоразрушающего инструмента и диаметром бурильных труб. При проведении опытно-промысловых работ использовались погружные пневмоударные установки (ППУ) фирмы Halco [35]. В таблице 15 представлены рекомендации компании Halco по выбору погружного пневмоударника.

Исходя из диаметра формируемого ствола скважины 394 мм был выбран пневмоударник MACH 122. Обоснованием выбора данной модели также является назначение ППУ для тяжелого режима работы, которым характеризуются условия проведения опытных работ.

Таблица 15 – Рекомендации по выбору погружного пневмоударника в зависимости от диаметра скважины

Номинальный диаметр скважины, мм	Приблизительный наружный диаметр пневмоударника, мм	Рекомендованный диаметр бурильных труб, мм	Оптимальная модель пневмоударника Halco
85	77	70	MACH303
90 – 100	77	70 – 76	MACH303
90 – 104	81	70 – 76	DART350/DOM350
105 – 108	95/98	70 – 76	MACH44/S-DOM400
110 – 120	95/98	76 – 90	MACH44/S-DOM400
110 – 120	100,5	76 – 90	NT4
127	114/118	76 – 90	NT5/MACH50/S-DOM500/DOM500
135 – 146	114/118	90 – 114	NT5/MACH50/S-DOM500/DOM500
152	139	102 – 114	NT6/MACH60/S-DOM600/DOM600
165 – 178	139/146	114	NT6/S-DOM600/DOM600/650HD
203 – 279	182	114 – 127	DOM800/880
203 – 279	192	114 – 127	DOM850
254 – 300	230	114 – 127	DOM1000
311 – 381	273	114 – 127	MACH120/122/132
444 – 508	273	127 – 140	MACH142

Особенностями конструкции ППУ для тяжелого режима работы является наличие усиленного зажимного патрона, протектора для уменьшения износа, а также усилением верхнего переходника карбидвольфрамовыми штырями для защиты от износа в абразивных породах. Технические характеристики

использованного в эксперименте ППУ приведены в таблице 16, погружная пневмоударная установка МАСН 122 – на рисунке 17.

Таблица 16 – Технические характеристики ППУ МАСН 122

Минимальный расход воздуха при рабочем давлении 2,4 МПа, м ³ /мин	70,8
Размеры и масса	
Наружная соединительная резьба, мм	162,3
Наружный диаметр, мм	273
Длина без бурового долота, мм	1667
Минимальный диаметр долота, мм	300
Максимальный диаметр долота, мм	445
Вес, кг	614

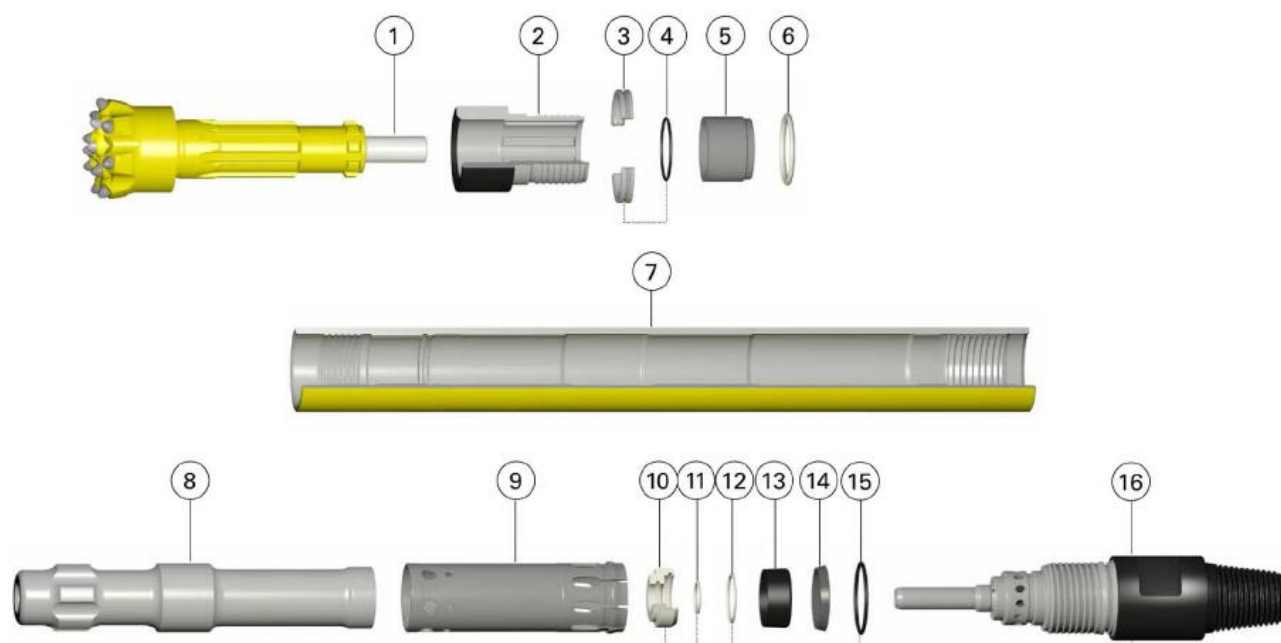


Рисунок 17 – Конструкция погружного пневмоударника МАСН 122

1 – нижний клапан для долота; 2 – поводковый усиленный патрон; 3 – стопорное кольцо долота; 4 – уплотнительное кольцо; 5 – подшипник долота; 6 – стопорное кольцо; 7 – корпус; 8 – поршень; 9 – внутренний цилиндр; 10 – клапан с уплотнительным кольцом; 11 – малое уплотнительное кольцо для клапана; 12 – большое уплотнительное кольцо для клапана; 13 – уплотнение обратного клапана; 14 – зажимной конус; 15 – уплотнительное кольцо для верхней гайки; 16 – ниппельное соединение в сборе.

Вес КНБК в сборке при условии глубины конечного забоя составил 286,3 кН. Определяя БУ COOPER LTO-550 на соответствие условию грузоподъемности при прихватоопасной ситуации по формуле (10), находим соответствие данной установки требуемому условию.

Давление и производительность ППУ зависят от потока воздуха, проходящего через пневмоударник, т.е. от расхода воздуха, производимого

компрессором, выражаемого, как правило, в м³/мин. Для генерирования объема воздуха использовались компрессорные установки фирмы Sullair [52]. Данная установка представляет собой двухступенчатый объемный ротационный винтовой компрессор, изображенный на рисунках 18 и 19. При вращении ротора воздух втягивается в первую ступень компрессорной установки. Здесь воздух сжимается, а затем нагнетается во вторую ступень, где он снова сжимается для получения более высокого давления. Масло впрыскивается в компрессорную установку на каждой ступени и смешивается непосредственно с воздухом по мере вращения ротора, который осуществляет сжатие воздуха. После того как воздух подвергается сжатию на обеих ступенях компрессорной установки, он нагнетается в виде смеси воздуха и масла. Эта смесь направляется через систему нагнетания, где происходит отделение масла от воздуха. В это время воздух подается на технологическую линию, а масло направляется через систему охлаждения и смазки, где она проходит подготовку к повторному впрыскиванию.

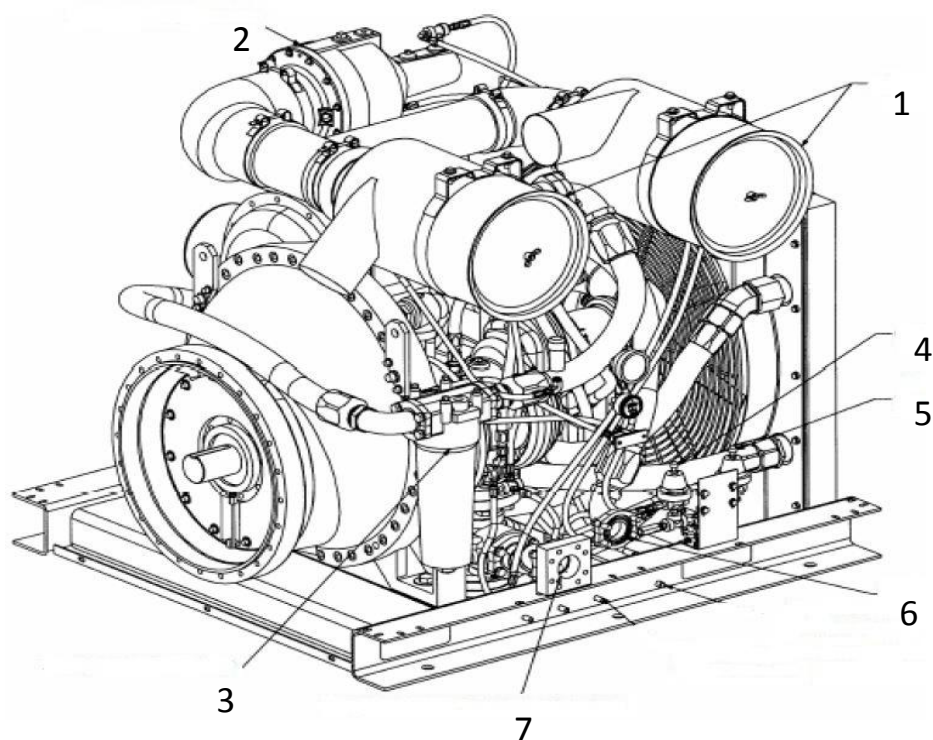


Рисунок 18 – Общая схема ротационного винтового компрессора SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL

1 – входные воздушные фильтры; 2 – тарельчатый клапан; 3 – масляный клапан; 4 – регулятор высокого давления; 5 – регулятор низкого давления; 6 – обратный трубопровод масла; 7 – подключение линии нагнетания.



Рисунок 19 – Компрессоры SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL на Куюмбинском месторождении при проведении производственного эксперимента

Важным аспектом в работе компрессорной установки является тот факт, что при подсчете генерируемого объема воздуха количество компрессорных установок, подключаемых последовательно, суммируется, а результирующее давление, в свою очередь, остается неизменным для одной установки. Задействованные для проведения эксперимента компрессорные установки являются двухрежимными, технические характеристики компрессоров SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL приведены в таблице 16 [52].

Таблица 17 – Технические характеристики компрессора SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL

Первый режим:	
Производительность, м ³ /мин	35,5
Рабочее давление, МПа	3,45
Минимальное давление, МПа	2,4
Максимальное давление, МПа	3,45
Второй режим:	
Производительность, м ³ /мин	38,6
Рабочее давление, МПа	2,4
Минимальное давление, МПа	1,7
Максимальное давление, МПа	2,4

Дожимной компрессор HURRICANE B15-62/2175 является компрессором поршневого типа и предназначен для нагнетания генерируемого винтовым компрессором объема воздуха с требуемым давлением. Максимальное развиваемое давление нагнетания 15 МПа, рабочий диапазон производительности 14 – 143 м³/мин. Шифр данной модели содержит в себе следующую информацию: В – поршневой бустер; 15 – объем двигателя в литрах; 6 – число цилиндров; 2 –

число ступеней бустера; 2175 – давление нагнетания в фунтах на квадратный дюйм. Внешний вид дожимного компрессора HURRICANE B15-62/2175 изображен на рисунке 20.



Рисунок 20 – Дожимной компрессор HURRICANE B15-62/2175 во время эксперимента на Куюмбинском месторождении

Для обеспечения вертикальности ствола скважины использовался технологический набор стандартных утяжеленных бурильных труб УБТ 229х80Д и стабилизатора КЛСВ 374.6СТ-41, обеспечивая необходимую жесткость КНБК и исключая возможность неконтролируемого искривления ствола скважины. Колонна бурильных труб (КБТ) была представлена инструментом ТБПК 127х9,19D. Технологическая схема процесса углубления интервала скважин под кондуктор на Куюмбинском месторождении приведена на рисунке 21.

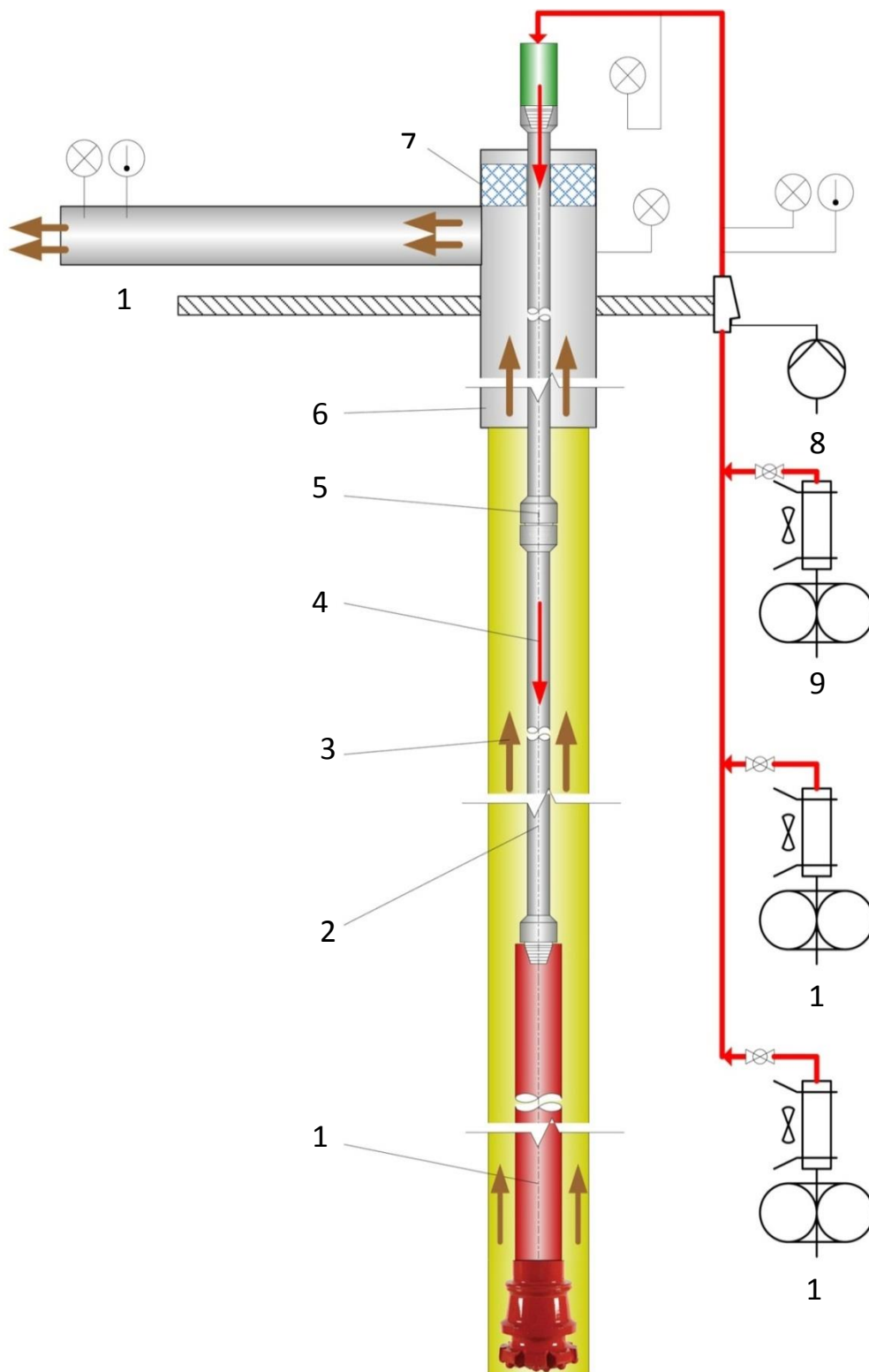


Рисунок 21 – Схема углубки интервала скважин под кондуктор при проведении опытно-промышленных работ на Куюмбинском месторождении

1 – пневмоударник MACH 122 с долотом CONCAVE SD 12 BIT; 2 – ТБПК 127x9,19D; 3 – восходящий поток воздуха по кольцевому пространству с продуктами разрушения забоя; 4 – нисходящий поток воздуха внутри буровой колонны; 5 – замок буровой трубы; 6 – обсадная колонна диаметром 426 мм установлена на глубину 35 м; 7 – дивертор; 8 – дожимной компрессор HURRICANE B15-62/2175; 9, 10, 11 – компрессоры SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL; 12 – выкидная линия и выброс шлама.

2.3. Методика проведения производственного эксперимента в условиях проходки интервалов скважин под кондукторы на скважинах Куюмбинского месторождения

Технология очистки забоя воздухом в контексте ударно-вращательного бурения была апробирована при строительстве трех секций кондуктора скважин Куюмбинского месторождения.

Углубление интервала под кондуктор на скважине № 401 производилось в одно долбление «с навеса» и периодическим снятием осевого усилия на ПРИ для продувки забоя и выноса выбуренной породы. Продувка без углубления продолжалась до достижения выхода на устье минимального количества продуктов разрушения забоя. Отбор выносимого шлама производился через встроенный в выкидную линию штуцер, изображенный на рисунке 22.



Рисунок 22 – Схема отбора продуктов разрушения забоя

С целью обеспечить стабильность условий проходки интервала механическая скорость бурения поддерживалась в интервале 9 – 11 м/ч при постоянной подаче воздуха 76 м³/мин. Подача воздуха была максимально возможной в условиях проведения опытно-промышленных работ. Оптимальная частота вращения ПРИ была определялась по эмпирическому правилу, согласно которому число 300 необходимо разделить на диаметр ПРИ в дюймах. Произведя данную операцию, мы получаем 20 оборотов в минуту. Параметры режима бурения фиксировались перед каждым снятием осевой нагрузки для продувки забоя. Результаты опытно-промышленных работ на скважине № 401 Куюмбинского месторождения приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Характеристика процесса углубления интервала под кондуктор скважины № 401 Куюмбинского месторождения

Интервал скважины, м	Нагрузка на долото (W _{дол}), кН	Частота вращения долота (n), об/мин	Подача воздуха (Q _{возд}), м ³ /мин	Давление на компрессоре (P _{комп}), МПа	Механическая скорость бурения (V _{мех}), м/ч	Время проходки (t _{бур}), ч
34 – 44	20	20	76	1,3	10	1
42 – 66	20 – 30	20	76	1,7	11	2,2
60 – 66	5	20	76	1,7	–	1,5
66 – 75	20 – 30	20	76	1,7	9	1
70 – 75	5	20	76	1,7	–	1,5
75 – 90	20 – 30	20	76	1,7	10 – 11	1,5
85 – 90	5	20	76	1,7	–	1,5
94 – 118	≈40	20	76	1,8 – 1,9	До 30 м/ч	1

До глубины 94 м проходка осуществлялась в штатном режиме. После увеличения нагрузки на долото до 40 кН и увеличения механической скорости бурения до 30 м/ч при неизменной подаче воздуха, равной 76 м³/мин, на скважине возникла ситуация прихвата КНБК. В предшествование этому произошел скачок давления порядка 0,1 – 0,2 МПа с прекращением выноса крупных частиц шлама. Далее проводились работы по ликвидации прихвата на скважине. Подъем бурильной колонны сопровождался периодическими затяжками порядка 250 кН свыше собственного веса. После освобождения КНБК и СПО до устья, осмотр бурильной колонны показал наличие слоя пульпы на УБТ и ППУ. При этом

соотношение времени углубления и продувки составило 6,7/4,5 часа. Углубление интервалов под кондуктор на скважинах №№ 404, 405 осуществлялось с ограничением осевой нагрузки на долото. Подача воздуха в циркуляционную систему также составила 76 м³/мин. С глубины 130 метров осуществлена корреляция скорости вращения бурильной колонны с ППУ с механической скоростью бурения. Было установлено, что оптимальным соотношением для данного набора КНБК является углубление 0,2 – 0,25 метра на каждый оборот бурильной колонны. Углубление замерялось путем нанесения мелом спирали на трубу во время бурения. Если расстояние между витками меньше 0,2 м, то частота вращения уменьшалась на один интервал регулирования ниже. В случае превышения проходки 0,25 м за оборот колонны, частота вращения увеличивалась, соответственно, на один интервал. Результаты производственного эксперимента на скважинах №№ 404, 405 приведены в таблицах 19 и 20, соответственно.

Таблица 19 – Характеристика процесса проходки интервала под кондуктор на скважине № 404

Интервал скважины, м	Нагрузка на долото ($W_{\text{дол}}$), кН	Частота вращения долота (n), об/мин	Подача воздуха ($Q_{\text{возд}}$), м ³ /мин	Давление на компрессоре ($P_{\text{комп}}$), МПа	Механическая скорость бурения ($V_{\text{мех}}$), м/ч	Время проходки ($t_{\text{бур}}$), ч
97 – 102	0,5 – 1	20	76	1,5	5	1
102 – 130	1 – 1,5	20	76	1,7	7	4
130 – 164	4 – 4,5	40 – 60	76	1,85	9,7	3,5

Таблица 20 – Характеристика процесса проходки интервала под кондуктор на скважине № 405

Интервал скважины, м	Нагрузка на долото ($W_{\text{дол}}$), кН	Частота вращения долота (n), об/мин	Подача воздуха ($Q_{\text{возд}}$), м ³ /мин	Давление на компрессоре ($P_{\text{комп}}$), МПа	Механическая скорость бурения ($V_{\text{мех}}$), м/ч	Время проходки ($t_{\text{бур}}$), ч
81 – 97	0,5 – 1	20	76	1,5	8	2
97 – 112	1 – 2	20	76	1,55	10	1,5
112 – 135	2 – 3	20	76	1,7	11,5	2
135 – 141	≈4	40 – 60	76	1,85	12	0,5

При этом для интервала 97 – 164 м скважины № 404 время чистого бурения составило 8,5 часов, время продувки без бурения – 2 часа. Для интервала 81 – 141

м скважины № 405 время чистого бурения 6 часов, время продувки без бурения – 2 часа. В обоих случаях наблюдались стабильные условия процесса бурения.

На рисунке 23 проиллюстрирован вынос продуктов разрушения забоя в условиях стабильной проходки исследуемых интервалов на скважинах №№ 404, 405.



Рисунок 23 – Вынос продуктов разрушения забоя на скважинах №№ 404, 405

По приведенной формуле (7, глава 1) произведен количественный расчет водопритока, который составил 8 м³/час для условий проведения опытно-промышленных работ.

2.4. Методика обработки результатов исследований

В ходе экспериментальных исследований все значения наблюдений заносились в специальные журналы. По методу С.В. Башинского производилось исключение резко выделяющихся замеров.

На следующем этапе математической обработки очищенные от промахов исследуемые выборки проверялись на соответствие нормальному закону распределения случайных величин с помощью нормальной сетки [54, 55, 56]. Анализ расчетов показал, что все эмпирические распределения с большой точностью согласуются с нормальным законом распределения случайных величин.

Среднее арифметическое измеряемого параметра определялось по известной формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (11)$$

где A_i – значение измеряемого параметра в i -ой серии, n – число опытов.

Дисперсия рассчитывалась по формуле:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [A_i - \bar{A}]^2. \quad (12)$$

Среднее квадратичное отклонение определялось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (13)$$

Далее рассчитывался коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{A}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Необходимое число замеров параметров режима бурения рассчитывалось по найденному коэффициенту вариации v и допустимой для данного вида экспериментов погрешности $k_{\text{дон}}$ в процентах от среднего арифметического. По отношению $k_{\text{дон}} / v$ и табличным данным [55] с 95 % надежностью определялось необходимое число замеров параметров режима бурения до расчетного количества. Допустимая ошибка $k_{\text{дон}}$ была принята в пределах 15% для условий производственного эксперимента.

Критериальная оценка безаварийности с надежностью 95% определялась аналогичным образом. Существенность различий средних величин исследуемых параметров и показателей определялась с помощью t -критерия Стьюдента.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Экспериментальные исследования технологии очистки забоя воздухом были проведены на основе опытно-промышленных работ по ударно-вращательному бурению с применением очистного агента – воздуха, в условиях производственного процесса на Куюмбинском нефтяном месторождении.

2. Для фиксирования параметров режима бурения, а также обеспечения контроля за ходом экспериментальных работ использовались современные методики и средства измерений режимных параметров и показателей бурения исследуемого интервала.

3. Достоверность результатов, величину ошибки, существенность влияния полученных в результате эксперимента значений параметров режима бурения и, следовательно, выводов и рекомендаций обеспечена проведением эксперимента в реальных условиях технологического процесса, применением методов математической статистики и обработки.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА БУРЕНИЯ С ОЧИСТКОЙ ЗАБОЯ ВОЗДУХОМ ДЛЯ УСЛОВИЙ КУЮМБИНСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

3.1. Анализ современных методов расчета воздухообеспечения при бурении геологоразведочных и эксплуатационных скважин с очисткой забоя воздухом

Прежде чем приступить к анализу методов расчета воздухообеспечения циркуляционной системы скважины необходимо ввести очень важные определения, без оперирования которыми дальнейшая работа будет невозможна.

В классической теории пневмотранспорта транспортной скоростью воздуха называется минимальная скорость воздуха, обеспечивающая устойчивое перемещение материала во взвешенном состоянии. Величина транспортной скорости несущей среды зависит от концентрации смеси транспортируемого материала, его удельного веса, формы, геометрии и состояния поверхности частиц транспортируемого материала, а также плотности самой несущей среды [57].

Под скоростью витания частиц или критической скоростью транспортируемого материала понимают такую скорость воздуха в вертикальной трубе, при которой частица материала, помещенная в нее, находится в подвижном равновесии. Скорость витания характеризуется гидродинамическим взаимодействием твердых частиц с движущимся потоком несущей среды.

Физические процессы, которыми характеризуется транспортирование материала в кольцевом пространстве скважины, крайне сложны для моделирования и точное решение задачи моделирования движения частицы разрушенного забоя по затрубному пространству лежит в теории численных методов. Поэтому учеными-буровиками, как отечественными, так и зарубежными, в разное время предлагались и предлагаются инженерные методики расчета требуемого воздухообеспечения циркуляционной системы, позволяющие с той или иной степенью точности определить параметры

циркуляционной системы скважины и произвести выбор оборудования для её очистки.

Подавляющее большинство исследователей сходятся во мнении об отсутствии в настоящее время общепринятой методики расчета требуемого расхода воздуха для транспортирования шлама по кольцевому пространству скважины. Бронзов А.С. в своих исследованиях [43] существующие методы расчета классифицировал на две группы:

1. Методы, основанные на постоянном значении скорости восходящего потока воздуха при атмосферном давлении: Ф. Мак Лауфлина, И. Морриса и Р. Рамзая, фирмы «Юз Тул», Д. Роберга, Д. Скотта, Дж. Кэннона и Р. Ватсона, Р. Энджела, МГРИ.

2. Методы, основанные на определении скорости движения для наиболее крупной частицы шлама: К. Никольсона, Х. Хартмана, А.З. Романова, Г. Паскаля и М. Константинеску, К. Перро, Б.Б. Кудряшова, К. Грэй, Н. С. Макурина и Ю. Ф. Рыбакова.

Методы первой группы не полностью учитывают сложные процессы движения частиц шлама в потоке воздуха. В качестве исходного пункта расчета используется некоторое постоянное значение скорости восходящего потока (при атмосферном давлении), полученное по результатам бурения в конкретных условиях. Общим недостатком методов первой группы является ограниченность их применения теми конкретными условиями, в которых то или иное значение скорости было принято «оптимальным». Если же в зависимости от условий требуемая скорость меняется в 1,5 – 2 раза, то упрощающие расчетные таблицы и номограммы, используемые в данных методах, становятся непригодны.

По мнению А.С. Бронзова большинство методов, основанных на постоянном значении скорости (кроме методов Д. Скотта и МГРИ), приспособлено только для расчета требуемого расхода воздуха, оставляя нерешенным вопрос определения давления. Более того и расход в большинстве случаев устанавливается тоже ориентировочно. Практически всеми методами первой группы не учитывается влияние шлама, находящегося в потоке, на расход

воздуха. Помимо этого, даже уменьшение подъемной способности потока за счет сжимаемости воздуха этими методами учитывается весьма приближенно с помощью закономерностей, справедливых для горизонтальных газопроводов, или с помощью поправок, увеличивающих расход прямо пропорционально глубине скважины, тогда как действительная зависимость, по всей вероятности, значительно сложнее.

Методы второй группы основаны на закономерностях движения твердых частиц в воздушном потоке. Исходным пунктом расчета является определение скорости движения наиболее крупной частицы шлама. Это расширяет границы применения расчетов, но неточность определения скорости движения и учета факторов, влияющих на ее величину, снижает достоверность расчетов. В большей части методов второй группы при определении скорости витания используются формулы, основанные на грубом приближении к квадратичному закону, пригодному для расчетов в ограниченной области значений чисел Рейнольдса. Более того, в большинстве случаев для определения скорости витания необходимо знать число Рейнольдса, которое в свою очередь зависит от самой скорости витания.

Методикой Б.Б. Кудряшова [41] устранен этот недостаток и повышена точность определения скорости витания, поскольку она основана на обобщенной диаграмме П.В. Лященко. Смысл графического способа П.В. Лященко заключается в том, что он ввел безразмерный параметр ψRe , в определение которого критическая скорость не входит и предложил диаграмму, изображенную на рисунке 24, выражающую зависимость между ψRe^2 и числом Рейнольдса. Эта зависимость получена пересчетом классических опытных данных предшественников П.В. Лященко, и мы не будем подробно останавливаться на механизме её получения, приведя лишь саму диаграмму.

Впоследствии свои методики расчета воздухообеспечения предложили Н.С. Макурин [58] и Ю. Ф. Рыбаков [59], которые также основываются на диаграмме П.В. Лященко. Однако, в своих методиках Н.С. Макурин и Ю.Ф. Рыбаков

пренебрегают наличием шлама в движущемся потоке воздуха при определении давлений, ввиду его ничтожных концентрации.

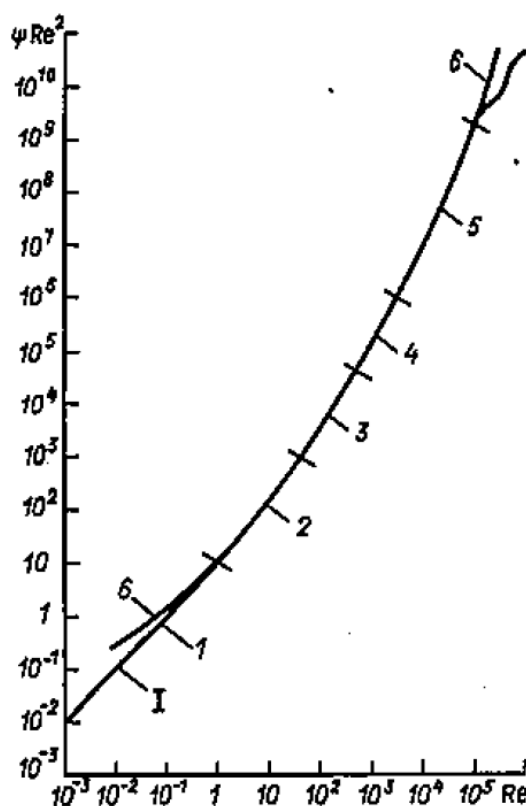


Рисунок 24 – Диаграмма П.В. Лященко

I – кривая Лященко; 1 – 5 – прямолинейные участки, соответствующие формула Олевского; 6 – расчетная кривая по логарифмической критериальной зависимости.

По мнению Б.Б. Кудряшова при определении критической скорости стесненность совместного движения частиц шлама не следует принимать во внимание, в случае если скорость восходящего потока среды становится равной или превышающей критическую скорость в этой среде для одиночной частицы в свободных условиях, но при определении давления в кольцевом канале затрубного пространства концентрация шлама должна быть учтена обязательно.

И все же основным недостатком методов второй группы остается сложность и малая точность определения скорости витания. Методы расчета второй группы, учитывающие транспортирование шлама, обладают преимуществами в сравнении с ограниченными по применимости и ориентировочными по результатам методами первой группы. Однако ни один из

существующих методов расчета не может считаться вполне совершенным ни по полноте и правильности учета основных факторов, влияющих на расход и давление воздуха, ни по универсальности применения к различным условиям бурения скважин с использованием воздуха.

Наличие различных методов расчета требуемого расхода сжатого воздуха можно объяснить сложностью поставленной задачи, при решении которой необходимо учитывать значительное число переменных факторов с большими диапазонами изменений. Все рассмотренные выше методы в той или иной степени упрощают задачу путем ряда допущений, т. е. исключением из расчета некоторых переменных факторов. Это приводит к различным результатам при расчете расхода, а следовательно и давления сжатого воздуха.

А.С. Бронзов приводит сравнительный анализ результатов расчетов воздухообеспечения по методам К. Никольсона, Д. Скотта, Д. Роберга, Р. Энджела и Н. С. Макурина для одинаковых геолого-технических условий. Значения составили, соответственно, 13,9; 6,0; 8,0; 6,0 и 5,3 м³/мин, т. е. максимальное значение превышает минимальное более чем в 2 раза [43].

Это позволяет сделать вывод о том, что значение переменных факторов очень велико и не учитывать один из них или несколько, как это сделано в рассмотренных методах расчета, нельзя, так как это приводит к нарушению взаимодействия их между собой и влияния каждого из них на процесс транспортирования шлама. Задача усложняется и потому, что реальные условия для каждой скважины и в каждой скважине в данный момент времени переменны.

Таким образом, каждые конкретные технико-геологические условия проведения буровых работ должны быть подвергнуты тщательному анализу как перед началом углубления, так и пристальному осмысленному контролю во время. Самым надежным способом верификации принятых решений и выработки рекомендаций и их экономической эффективности для конкретных условий является проведение опытно-промышленных работ перед тиражированием технологии.

При высоких скоростях рабочего агента и малых концентрациях шлама частицы его распределены в восходящем потоке сравнительно равномерно. При низких скоростях воздуха шлам такой же концентрации распределяется в восходящем потоке (в виде прядей и отдельных скоплений). Во всех случаях транспортирования следует ожидать зашламования скважины. При равномерном распределении частицы, двигаясь в осевом направлении за счет турбулентного потока, периодически сталкиваются со стенками и между собой, изменяют направление движения и, главное, изменяют форму и величину, это приводит к изменению аэродинамического сопротивления смеси «воздух – твердые частицы», так как на сопротивление решающее влияние оказывают крупность шлама и скорость его транспортирования.

Лабораторные исследования Б. Б. Кудряшова [41, 42] показали, что стесненность кольцевого канала можно не принимать во внимание, так как она начинает оказывать влияние лишь тогда, когда размер частиц составляет 8 мм и больше ширины кольцевого зазора, что в практике бурения встречается очень редко.

В настоящее время известен ряд формул, определяющих конечную скорость: Аллена, Риттингера, Прандтля, Блесса, Спиваковского, Козьмина, Никольсона, Перро – Эйфеля, Перро – Стокса и Недина, Гринева и других, но все они, как указывает Б. Б. Кудряшов, в силу принятых упрощающих допущений имеют ряд серьезных недостатков. Каждая из формул лишь приближенно справедлива в ограниченном интервале значений чисел Рейнольдса. Границы применимости формул неопределенны и зависят от допустимой погрешности расчетов. Заранее невозможно установить, какой из указанных формул в данном случае необходимо пользоваться, поскольку значение Re , соответствующее данному случаю, можно определить, зная конечную скорость, являющуюся искомой величиной. Существующие формулы конечной скорости даже для одних и тех же геолого-технических условий не дают однозначного решения. Так А.С. Бронзов приводит результаты расчета величины критической скорости по формулам К. М. Гринева, Б. Б. Кудряшова, Эйфеля, А. З. Романова, Б.

М. Мухолова, К. Никольсона, В. А. Успенского и Риттингера. Это, соответственно, 15,2; 16,0; 15,0; 10,5; 14,4; 7,8; 15,6; 10,0 м/с, таким образом результаты разнятся в 2 раза [43].

В соответствии с постулатами классической теорией пневмотранспорта стабильные условия транспортирования твердых частиц в канале обеспечивает превышение скорости движения среды над критической скоростью частиц в 1,3 раза [57].

Для облегчения определения транспортной скорости потока Б.Б. Кудряшовым была предложена номограмма, позволяющая определить требуемую транспортную скорость реальной частицы относительно экспериментально полученных значений транспортной скорости стеклянных сфер разного диаметра. В основу номограммы положена пропорциональная зависимость между критической скоростью сферических частиц и частиц реальной формы, а также экспериментально полученное Б.Б. Кудряшовым значение скорости потока несущей среды, превышающей критическую скорость частиц реальной формы в 1,2 раза [41]. Номограмма приведена на рисунке 25.

Таким образом, чтобы решить такую сложную многофакторную задачу по определению расхода и давления воздуха, при котором обеспечивается максимальная эффективность очистки скважины, необходимо знать следующие параметры: размер, форму, плотность и шероховатость частиц шлама; длину и кольцевое сечение пути, шероховатость стенок ствола скважины и бурильного инструмента; режимы движения восходящего потока и его стесненность и т. д. Они в свою очередь зависят от типа долота, режима бурения, физико-механических свойств горной породы, температуры и влажности атмосферного воздуха и других. Кроме того, необходимо установить взаимосвязь этих параметров и влияние каждого из них на процесс транспортирования шлама. Поставленная задача весьма трудна в решении. Решение ее путем изучения одного или нескольких факторов, в то время как другие факторы принимаются постоянными, неправомерно, так как их влияние на процесс транспорта нелинейное.

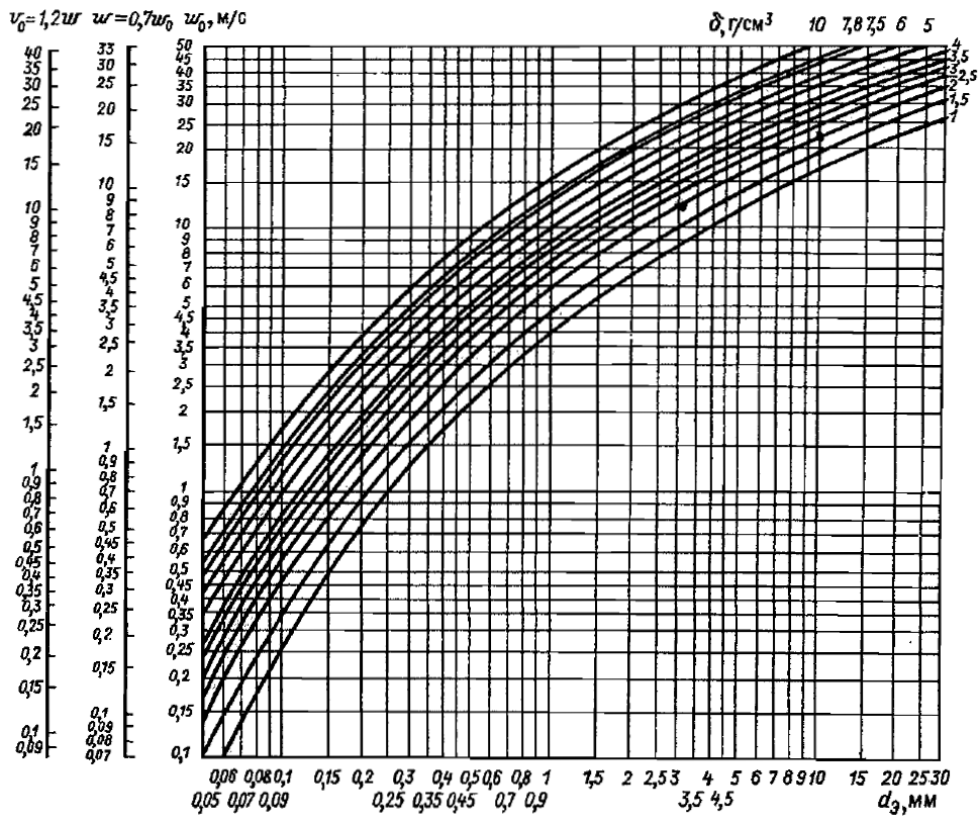


Рисунок 25 – Номограмма для определения требуемой скорости восходящего потока воздуха в нормальных условиях

w_0 – критическая скорость частиц сферической формы из опытов Б.Б. Кудряшова; $0,7 \cdot w_0$ – выражение для определения критической скорости окатанной частицы; v_0 – выражение для определения требуемой транспортной скорости потока несущей среды

Если же такая задача и будет решена, значение ее для практических расчетов будет носить частный характер ввиду принятия в расчете конкретных величин указанных факторов. Так как при углублении ствола значения факторов непрерывно меняются, то для каждого периода времени должны быть свои конкретные параметры расхода воздуха и давления. Поэтому, видимо, целесообразно расчет требуемого расхода воздуха и давления рассматривать не как теоретическую, а как инженерную задачу, в которой расход и давление воздуха следует выбирать из сравнительно небольшого диапазона рациональных параметров. Такая задача должна сводиться к нахождению параметров воздуха, при которых достигается экономическая эффективность.

С точки зрения практики бурения скважин расход должен быть достаточным для нормального процесса углубления ствола, а давление

нагнетания должно обеспечивать устойчивую его циркуляцию при заданных объемах сжатого воздуха.

Б. Б. Кудряшовым дан обстоятельный комментарий об адекватности методики воздухообеспечения, предложенной в 1957 году Р. Энджелом [41]. Данной методикой принимается величина скорости восходящего потока в затрубном пространстве 15 м/с, полученная в стендовых условиях. Итоговые дифференциальные выражения в предлагаемом методе весьма сложны и громоздки, поэтому Р. Энджел разумно посчитал возможным сформировать табличный вариант путем последовательных приближений.

Методика Энджела определения расхода воздуха такова. Необходимый расход воздуха определяется по формуле:

$$Q = Q_0 + HN, \quad (15)$$

где Q – искомый дебит, м³/мин; Q_0 – начальный дебит м³/мин; N – поправочный коэффициент; H – глубина скважины, м.

В таблице 21 приведены значения поправочных коэффициентов в зависимости от начального объема воздуха и механической скорости бурения.

Таблица 21 – Значения начального объема воздуха поправочных коэффициентов в методике Р. Энджела

Диаметр скважины, мм	Диаметры бурильных труб, мм	Объем воздуха, м ³ /мин	Значения N при механической скорости, м/ч			
			0	9,15	18,3	27,45
1	2	3	4	5	6	7
444,5	168,3	119,3	7,64	12,17	16,45	20,53
	139,7	125,5	7,4	11,7	15,86	19,78
	114,3	129,92	7,24	11,42	15,42	19,23
381	168,3	82,26	6,66	10,4	14,02	17,46
	139,7	88,46	6,38	9,94	13,28	16,54
	114,3	93,02	6,13	9,66	12,73	15,87
311,15	168,3	48,15	5,78	9,78	12,07	14,86
	139,7	54,31	5,38	8,31	11,06	13,56
	114,3	58,87	5,138	7,76	10,31	12,63
279,4	168,3	35,03	5,63	8,78	11,52	14,03
	139,7	41,23	5,09	7,78	10,25	12,54
	114,3	45,76	4,7	7,14	9,38	11,52
251	139,7	30,55	4,92	7,46	9,66	11,7
	127	32,93	4,67	7,014	9,69	11,15
	114,3	35,11	4,44	6,66	8,86	10,59

1	2	3	4	5	6	7
228,6	127	25,43	4,56	9,78	8,77	10,5
	114,3	27,61	4,28	5,36	8,22	9,94
	88,9	31,23	3,85	5,66	7,34	8,87
222,25	127	23,42	4,55	6,75	8,66	10,4
	114,3	25,57	4,27	6,29	8,11	9,7
	88,9	29,22	3,79	5,57	7,18	8,7
200	114,3	18,97	4,15	6,04	7,68	9,13
	88,9	22,6	3,64	5,27	6,74	8,07
187,32	88,9	19,14	3,57	5,11	6,48	7,73
171,45	88,9	15,17	3,46	4,9	6,14	7,25
158,75	88,9	12,18	3,43	4,78	5,2	6,94
	73	13,93	3,04	4,27	5,32	6,29
120,65	73	6,48	2,93	3,83	4,6	5,25
	60,3	7,67	2,58	3,45	4,16	4,7

По комментариям к методике самого Р. Энджела, его метод дает лишь минимально необходимые расходы воздуха, однако большинством американских компаний, в том числе крупным производителем пневмоударных установок «Halsco» метод Р. Энджела является основным при составлении рекомендаций по выбору компрессорных установок.

Практика использования данного метода, свидетельствует о необходимости увеличения полученных значений расхода воздуха на 10 – 20%.

В методике Б.Б. Кудряшова [41] формула для определения требуемого объема воздуха выглядит следующим образом:

$$Q = \left(K \cdot K_1 \cdot \frac{\pi(D_{\text{ок}}^2 - d_u^2)}{4} \right) \cdot V, \quad (16)$$

где K – коэффициент, учитывающий уменьшение подъемной силы воздуха вследствие потерь давления в кольцевом пространстве; K_1 – коэффициент неравномерности скорости из-за наличия каверн; V – скорость восходящего потока воздуха, м/с; $D_{\text{ок}}$ – диаметр скважины с учетом его увеличения вследствие разработки, м; d_u – диаметр бурильных труб, м.

Главными преимуществами данной зависимости перед формулой Р. Энджела являются учет таких факторов как наличие каверн и уменьшение подъемной силы воздуха, а также возможность варьирования значением

транспортной скорости потока воздуха против факта данности этого параметра у Энджела.

Определение потерь давления при движении воздуха в кольцевом пространстве и в бурильной колонне также является трудной задачей, решением которой занимались как отечественные так и зарубежные ученые. В 1954 г. К. Никольсоном были даны рекомендации по определению потерь давлений в циркуляционной системе скважины, бурение которой осуществлялось с использованием сжатого воздуха, применение которых было опровергнуто Межлумовым А.О в его исследованиях [60]. Спустя три года Д. Скотт предложил графики, которые применяются в зарубежной практике и до настоящего времени [43]. Расчеты потерь давления проведены по следующим формулам, полученным из уравнения баланса энергии в потоке сжимаемого газа:

а) для кольцевого пространства

$$L = \frac{R \cdot T}{2\mu} \ln \frac{P_{\text{заб}}^2 + \frac{2f \cdot G^2 \cdot R^2 \cdot T^2}{g \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \mu^2}}{P_{\text{а}}^2 + \frac{2f \cdot G^2 \cdot R^2 \cdot T_1^2}{g \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \mu^2}}, \quad (17)$$

б) для бурильных труб

$$L = \frac{R \cdot T}{2\mu} \ln \frac{P_{\text{заб}}^2 + \frac{2f \cdot G^2 \cdot R^2 \cdot T^2}{g \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \mu^2}}{P_{\text{б}}^2 + \frac{2f \cdot G^2 \cdot R^2 \cdot T_1^2}{g \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \mu^2}}, \quad (18)$$

где L – глубина скважины, м; R – газовая постоянная, кгс·м/кг·градус; T – температура воздуха в призабойной зоне, °К; μ – молекулярный вес воздуха; $P_{\text{заб}}$ – давление воздуха на забое, кгс/см²; f – коэффициент сопротивления; G – массовый расход воздуха, кг/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $D_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр канала движения воздуха, м; $P_{\text{а}}$ – давление воздуха на устье скважины, кгс/см²; $P_{\text{б}}$ – давление воздуха в верхней части бурильных труб, кгс/см²; T_1 – температура воздуха на устье скважины, К.

Здесь необходимо заметить, что методология западных исследователей базируется на косвенном определении давления в любой точке ствола скважины (на любой глубине) через расчет самой глубины, поскольку искомой характеристикой является расход воздуха. Затем, посредством проверочных

интегральных вычислений определяют достаточность выбранного давления путем сравнения двух результирующих глубин. По сути, это прямая и обратная задачи. Такой подход требует применения значительного количества громоздких формул, однако же, он достаточно широко используется учеными США и Китая при реализации технологии бурения с контролем давления [61, 62, 63].

В отечественной промышленности был предложен метод расчета потерь давления в циркуляционной системе скважины по ступеням, в основу которого была положена формула Дарси для несжимаемых жидкостей. Затем этот метод был несколько усовершенствован. А.С. Бронзов указывает на исследования Н. С. Макурина и В. С. Филатова, которые для получения расчетных формул потерь давления использовали уравнения баланса энергии в изотермическом потоке газа [43]. При этом ими был сделан ряд допущений: температура воздуха была взята средней для всей системы, не были учтены изменения кинетической энергии воздуха и увеличения потерь давления при наличии выбуренной породы в восходящем потоке воздуха.

Впоследствии В. Б. Кудряшов предложил формулу для определения потерь давления, основанную на дифференциальном уравнении энергии Бернулли для единичной струи и учитывающую процессы, происходящие при движении восходящего потока воздуха с выбуренной породой в кольцевом пространстве [41].

Для кольцевого пространства эта формула выглядит следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{p_1^2 + \lambda \cdot (1 + K_r \cdot \mu) \cdot a \cdot l + p_1 \cdot (1 + \mu) \cdot b \cdot l}}{1 - (1 - \mu) \cdot b \cdot l} \quad (19)$$

где p_1 – давление на предыдущей ступени расчета, Па; μ – расходная концентрация шлама в потоке воздуха, определяющаяся как соотношение удельной массы выносимых продуктов разрушения забоя к массовому расходу воздуха; K_r – безразмерный коэффициент Гастерштадта (для алмазного ПРИ и буровых коронок $K_2 = 1 \div 1,5$); l – текущая координата для восходящего потока от устья к забоя, м; λ – коэффициент аэродинамического трения;

$$a = \frac{G^2 \cdot R \cdot T}{D_{\text{вых}} \cdot F^2}, \quad (20)$$

$$b = \frac{g \cdot \sin \beta}{2 \cdot R \cdot T} \quad (21)$$

где $D_{\text{вых}}$ – внутренний диаметр канала движения воздуха, м; G – массовый расход воздуха, кг/с; R – газовая постоянная воздуха, Дж/кг \times °К; F – площадь сечения канала, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – зенитный угол скважины, град;

Для расчета потерь давления при движении потока воздуха внутри бурильной колонны Б.Б. Кудряшовым предложена формула:

$$p_{\text{бк}} = \frac{\sqrt{p_1^2 + \lambda \cdot a \cdot \left(l + \frac{D_{\text{эф}} \cdot \xi \cdot n}{\lambda} \right) - p_1 \cdot b \cdot l}}{1 + b \cdot l} \quad (22)$$

где n – количество замковых соединений в бурильной колонне; ξ – коэффициент местного сопротивления в соединении бурильного инструмента, определяющийся в свою очередь по формуле Б.С. Филатова:

$$\xi = a' \cdot \left[\left(\frac{D_{\text{эф}}}{d_3} \right)^2 - 1 \right]^2 \quad (23)$$

где a' – опытный коэффициент, для муфтово-замковых соединений принимается равным 2; d_3 – наименьший диаметр суженной части соединения, м.

Методика Б.Б. Кудряшова неоднократно апробирована буровыми компаниями при строительстве геологоразведочных скважин на месторождениях рудных полезных ископаемых, в том числе компаний ООО «Коралайна Инжиниринг» при оказании услуг сервисного сопровождения компрессорной техники.

3.2. Исследование влияния шероховатости затрубного пространства, качества продуктов разрушения забоя и арифметической формулы коэффициента аэродинамического трения на величину расчетного рабочего давления на компрессоре

Из анализа используемых методик расчета воздухообеспечения следует, важный вывод о многофакторности задачи проведения самого расчета. В том числе важны такие параметры, как шероховатость кольцевого пространства, особенно в случае её переменного значения, объемная доля продуктов разрушения забоя и сама формула для расчета коэффициента аэродинамического трения.

На основе проведенной исследовательской работы, самой адаптированной к применению в производстве с высокой степенью вероятности можно считать, методику Б.Б. Кудряшова, положения которой широко применяются при проектировании бурения во льдах, а также при реализации ударно-вращательного бурения на твердые полезные ископаемые. Однако, в связи с новыми открывающимися перспективами использования технологии очистки забоя скважины воздухом, используемая методика требует её модификации для учета следующих факторов:

1. Влияние водопритока в скважину на результирующее ожидаемое рабочее давление на компрессоре;

2. Влияние вязких сил, шероховатости канала движения, плотности взвеси на величину коэффициента аэродинамического трения, содержащего в своей структуре число Рейнольдса;

3. Возможность использования модифицированной методики расчета воздухообеспечения скважины при проектировании повышенных расходов очистного агента.

Учитывая приведенную информацию, методику Б.Б. Кудряшова следует дополнить функциональными зависимостями, отражающими шероховатость затрубного пространства, плотность и объемную концентрацию продуктов

разрушения забоя скважины, а также проанализировать возможность применения модифицированной методики в условиях современного развития машиностроения при нагнетании значительных объемов воздуха.

Из смежных областей науки, в частности из теории пневмотранспорта, при систематизации материала [57, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75] были взяты на вооружение некоторые зависимости, позволяющие существенно усовершенствовать методику расчета воздухообеспечения Б.Б. Кудряшова. Это формула кинематической вязкости, приведенная в работе А.С. Кондратьева и Т.Л. Нья [70], посвященной основам расчета гидродинамических параметров при движении несущей среды с монодисперсными частицами в вертикальных трубах:

$$v_p = v_g \cdot \left(1 - \frac{\mu_v}{0.65}\right)^{-1.675}, \quad (24)$$

где v_g – кинематическая вязкость несущего потока воздуха; μ_v – объемная концентрация горной породы (или притока воды); 0,65 и –1,675 – эмпирические коэффициенты из опыта А.С. Кондратьева и Т.Л. Нья; v_p – результирующая кинематическая вязкость двухфазного потока. Применение данной зависимости позволит отразить наличие дисперсной фазы в потоке воздуха при определении числа Рейнольдса, входящего в формулу для определения коэффициента аэродинамического трения.

Потери давления в реальных условиях в решающей степени зависят от фактических аэродинамических сопротивлений. Для расчета существенно важен правильный выбор коэффициента сопротивления. Б.Б. Кудряшов [41] для целей расчета аэродинамических сопротивлений рекомендует использовать формулу Веймаута в случае применения труб с ниппельным соединением:

$$\lambda_1 = \frac{0.009407}{\sqrt[3]{D_{\text{эф}}}}, \quad (25)$$

для труб с муфтово-замковыми соединениями – формулу Лобаева:

$$\lambda_2 = \frac{1.42}{\left[\left(\frac{D_{\text{эф}}}{e}\right) \cdot \lg(N_R)\right]}, \quad (26)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты аэродинамического трения; $D_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр канала; e – шероховатость канала; N_R – число Рейнольдса; 0,009407 и 1,42 –

эмпирические коэффициенты, характеризующие условия проведения эксперимента.

В теории бурения с контролем давления [75] для этих целей используют формулу Хэйланда:

$$f = \left(\frac{1}{-1.8 \cdot \lg \left(\left(\frac{e}{3.7 \cdot D_{\text{эф}}} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{N_R} \right)} \right)^2, \quad (27)$$

где f – коэффициент аэродинамического трения (символика автора); $-1,8$, $6,9$, $1,11$ и 2 – эмпирические коэффициенты, характеризующие условия проведения эксперимента.

В.И. Марон [65] в исследованиях движения двухфазных потоков в трубопроводах при значении числа Рейнольдса более 10^4 рекомендует использовать формулу И.Е. Ходановича:

$$\lambda_3 = 0,067 \cdot \left(2 \cdot \frac{e}{D_{\text{эф}}} + \frac{158}{N_R} \right)^{0.2}, \quad (28)$$

и формулу А.Д. Альтштуля:

$$\lambda_4 = 0,11 \cdot \left(\frac{e}{D_{\text{эф}}} + \frac{68}{N_R} \right)^{0.25}, \quad (29)$$

где λ_3 , λ_4 – коэффициенты аэродинамического трения.

На основе каждой отдельной зависимости по определению коэффициента аэродинамического трения нами была разработана математическая модель для расчета требуемого давления на компрессоре. Методологически за основу была взята методика Б.Б. Кудряшова, в том числе формулы 19 и 22 настоящей главы при определении расчетных давлений для каждого участка циркуляционной системы. Число Рейнольдса определялось по известной формуле с учетом дополнений при вычислении кинематической вязкости (см. формулу 24). При этом учтена шероховатость канала движения, принятая согласно справочным данным $0,0001524$ м, при обсаженном затрубном пространстве [76]. В случае необсаженного ствола шероховатость горной породы была принята равной $0,003048$ м в соответствии с результатами исследований W. C. Lyons., B. Guo, R.

L. Graham [75] для карбонатных и доломитизированных пород. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Сравнительная оценка расчетных давлений на компрессоре, полученных при использовании модифицированной методики расчета воздухообеспечения Б.Б. Кудряшова при бурении интервала 35 – 94 м скважины № 401 Куюмбинского месторождения

Характеристика объекта исследования	Расчетное давление на компрессоре при различных значениях коэффициента аэродинамического трения, МПа				
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	f
Выкидная линия	0,1037	0,1013	0,1053	0,1055	0,1054
Интервал скважины под направление глубиной 35 м	0,1041	0,1013	0,1059	0,1062	0,1061
Интервал скважины под кондуктор глубиной 94 м	0,1042	0,099	0,1079	0,1086	0,1087
На входе в бурильную колонну	1,577	1,55	1,59	1,61	1,66

Подача воздуха была принята равной 76 м³/мин, перепад давления на ПШУ принят согласно паспортной характеристике [35].

Объемная концентрация продуктов разрушения в потоке воздуха определялась по формуле:

$$\mu_v = \frac{Q_v}{Q_{air}}, \quad (30)$$

где μ_v – объемная концентрация фазы в потоке воздуха; Q_{air} – расход воздуха, генерируемый компрессором, м³/час; Q_v – объем фазы шлама, м³/час. В случае расчета объемной концентрации водопритока, Q_v принимается 8 м³/час, согласно характеристике геологических условий Куюмбинского месторождения [17]. При определении объемной концентрации горной породы в потоке воздуха используется формула:

$$Q_{гп} = \pi \cdot \frac{D_{скв}^2 \cdot ROP}{4}, \quad (31)$$

где $Q_{гп}$ – объём горной породы, выносимый с забоя, м³/час; $D_{скв}$ – формирующийся диаметр скважины, м; ROP – механическая скорость бурения, м/час.

В соответствии с приведенными зависимостями, объемная концентрация притока воды в скважину для условий опытно-промышленных работ равна $2,8 \cdot 10^{-3}$, объемная концентрация горной породы – $1,34 \cdot 10^{-4}$. Забой 94 м был принят как

фактически достигнутый в штатном режиме на скважине во время опытно-промышленных работ. Максимальный разброс полученных значений давлений составляет 7%. Однако, использование зависимости Лобаева λ_2 (см. формулу 26) для определения коэффициента аэродинамического трения дает нерелевантный результат при определении расчетного рабочего давления на компрессоре.

Далее был проведен анализ методики Б.Б. Кудряшова для горно-геологических условий, конструкций скважин Куюмбинского месторождения при повышенных расходах воздуха 166 м³/мин и 216 м³/мин и транспортировании различных продуктов разрушения забоя. С целью определения влияния плотности транспортируемого материала на расчетное рабочее давление на компрессоре математическое моделирование осуществлялось для двух случаев: с учетом нахождения только твердой фазы без водопритока и с учетом нахождения водопритока, но без наличия твердой фазы. Результаты проведенных исследований приведены в таблицах 23 и 24.

Таблица 23 – Результаты расчета ожидаемого рабочего давления на компрессоре при расходе воздуха равном 166 м³/мин

Характеристика объекта исследования	Расчетное давление на компрессоре при различных значениях коэффициента аэродинамического трения, МПа									
	Наличие твердой фазы без водопритока					Наличие водопритока без твердой фазы				
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	f	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	f
Выкидная линия	1,126	1,013	1,173	1,179	1,175	1,126	1,013	1,174	1,179	1,176
Интервал скважины под направление глубиной 35 м	1,14	1,013	1,196	1,2	1,197	1,14	1,013	1,196	1,201	1,197
Интервал скважины под кондуктор глубиной 94 м	1,356	0,947	1,684	1,744	1,775	1,354	0,947	1,684	1,744	1,775
На входе в бурильную колонну	3,313	3,121	3,485	3,547	3,629	3,311	3,121	3,485	3,547	3,629

Проектный забой кондуктора был принят равным 550 м. Значения расходов воздуха были получены, используя методику Б.Б. Кудряшова (формула 16 настоящей главы), с учетом основных положений пневмотранспорта по требуемой скорости витания частиц дисперсной фазы и транспортной скорости потока в затрубном пространстве, соответственно [57 64, 69].

Механическая скорость бурения принята 30 м/ч, объемная концентрация горной породы для данного варианта составила $3,6 \cdot 10^{-4}$, объемная концентрация водопритока – $6,14 \cdot 10^{-3}$, в соответствии с приведенными формулами 30 и 31. Максимальная разница между расчетными давлениями равна 0,32 МПа при определении коэффициента трения по формулам Лобаева и Хэйланда (формулы 26 и 27).

Таблица 24 – Результаты расчета ожидаемого рабочего давления на компрессоре при расходе воздуха равном 216 м³/мин

Характеристика объекта исследования	Расчетное давление на компрессоре при различных значениях коэффициента аэродинамического трения, МПа									
	Наличие твердой фазы без водопритока					Наличие водопритока без твердой фазы				
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	f	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	f
Выкидная линия	1,197	1,013	1,264	1,271	1,266	1,197	1,013	1,265	1,272	1,266
Интервал под направление глубиной 35 м	1,217	1,013	1,292	1,298	1,293	1,217	1,013	1,293	1,299	1,294
Интервал под кондуктор глубиной 94 м	1,51	0,948	1,912	1,984	2,022	1,49	0,948	1,912	1,985	2,023
На входе в бурильную колонну	4,225	3,989	4,464	4,546	4,654	4,202	3,989	4,464	4,546	4,654

Механическая скорость бурения принята 30 м/ч, объемная концентрация горной породы для данного варианта – $2,83 \cdot 10^{-4}$, объемная концентрация водопритока – $7,97 \cdot 10^{-3}$, определялись по аналогии с предыдущим вариантом.

Максимальная разница между расчетными давлениями равна 0,43 МПа при определении коэффициента трения по формулам Лобаева и Хэйланда.

Анализ полученных результатов показывает:

1. Расчетные значения рабочего давления на компрессоре, полученные в результате использования существующей методики расчета воздухообеспечения в существующем виде, для условий бурения скважин на Куюмбинском месторождении, равны 1,57 МПа и 1,55 МПа (использование коэффициентов трения λ_1 Веймаута и λ_2 Лобаева, формулы 25 и 26 настоящей главы) против полученного экспериментально 1,7 МПа (см. таблица 18, глава 2). Точность определения составляет 92,3% и 91,1% соответственно. Для условий бурения скважин на Куюмбинском месторождении данной точности недостаточно для определения требуемого рабочего давления на компрессоре без применения поправочных коэффициентов, так как нарушение технологического процесса было зафиксировано при росте давления на 0,15÷0,2 МПа.

2. Расчетное давление на компрессоре, полученное с использованием зависимости Хэйланда (см. формулу 27), для глубины 94 м составило 1,66 МПа против фактического 1,7 МПа (см. таблица 18, глава 2). Таким образом, наиболее адекватно, с точностью 97,6%, процесс бурения скважины в условиях ОПР на Куюмбинском нефтяном месторождении отражает математическая модель расчета рабочего давления, дополненная зависимостью Хэйланда.

3. При увеличении расхода воздуха до значений 166 м³/мин и 216 м³/мин расчетное рабочее давление на компрессоре составило 3,313 МПа и 4,225 МПа при использовании существующей методики расчета воздухообеспечения Б.Б. Кудряшова (таблицы 23 и 24, использование коэффициентов трения λ_1 Веймаута и λ_2 Лобаева, формулы 25 и 26 настоящей главы). В результате применения зависимости Хэйланда были получены значения 3,629 МПа и 4,654 МПа, соответственно (таблицы 23 и 24). Следовательно, с увеличением расхода воздуха существенно возрастает влияние модификации методики расчета рабочего давления на компрессоре на конечный результат.

3.3. Разработка критерия безаварийности бурения проблемных интервалов с очисткой забоя воздухом

В классической теории пневмотранспорта значительная роль отведена несущей способности воздуха, а также определению максимально допустимой концентрации транспортируемого материала [57]. Также исследованию аварийности при бурении с очисткой забоя газообразными агентами посвящены фундаментальные работы Г. С. Газаряна [81] и исследования О. В. Зорэ, В. П. Трутко [82].

В предлагаемой методике количественной оценкой транспортируемого материала служит величина расходной массовой концентрации, определяемая по формуле:

$$\mu_m = G_{\text{пв}}/G, \quad (32)$$

где μ_m – безразмерная величина расходной массовой концентрации; G – массовый расход воздуха, кг/с; $G_{\text{пв}}$ – массовый расход транспортируемых продуктов разрушения забоя: горной породы и притока воды, определяемый как сумма их удельных масс $G_{\text{пв}} = G_{\text{п}} + G_{\text{в}}$, кг/с.

В свою очередь массовый расход воздуха определяется соотношением:

$$G = \frac{Q \cdot p_0}{R \cdot T}, \quad (33)$$

где Q – расход воздуха, генерируемый компрессором, м³/час; p_0 – атмосферное давление, Па; R – газовая постоянная воздуха, Дж/кг×°К; T – средняя температура воздуха в скважине, °К.

Удельная масса транспортируемой горной породы определяется равенством:

$$G_{\text{п}} = Q_{\text{гп}} \cdot \rho, \quad (34)$$

где $G_{\text{п}}$ – удельная масса транспортируемой горной породы, кг/час; ρ – средняя плотность горных пород, кг/м³; $Q_{\text{гп}}$ – объем выносимой горной породы, определяемый по формуле (31), м³/час.

Удельная масса водопритока $G_{\text{в}}$ принимается в соответствии с проектной документацией на строительство скважины [17].

В работах [77, 78, 79, 80] приводятся результаты исследований влияния величины расходной массовой концентрации на расчетное рабочее давление на компрессоре. Анализ данных результатов позволяет сделать вывод о невозможности корректного математического отображения влияния величины расходной массовой концентрации продуктов разрушения забоя в потоке воздуха на расчетное рабочее аэродинамическое давления. Сравнение величин расчетного давления на компрессоре при расходной массовой концентрации шлама равной 0,7 и равной 3,5 не дает реального представления о состоянии физического процесса транспортирования, поскольку расчетные величины аэродинамических давлений в скважине отличимы незначимо. Сравнение расчетных данных рабочего давления на компрессоре в таблицах 23 и 24 при транспортировании разных фаз также служит подтверждением приведенному тезису.

Тем не менее, как показывает анализ результатов опытно-промышленных работ на скважине № 401 (таблица 18 глава 2), при повышении механической скорости проходки с 10 м/ч до 30 м/ч, был зафиксирован прихват КНБК, что характеризует углубление скважины аварийно опасным. Данная ситуация явилась причиной выработки критерия безаварийности бурения исследуемых интервалов, определяемого как критерий расходной массовой концентрации (критерий РМК).

Для формулирования критериальной оценки РМК шлама в несущем потоке очистного агента результаты опытно-промышленных работ на скважинах №№ 401, 404, 405, приведённые в таблицах 18, 19 и 20 главы 2, соответственно, были подвергнуты декомпозиционному анализу с применением формул 31,32,33,34 настоящей главы.

Моделирование расчетного давления при бурении интервала скважины № 401 под кондуктор произведено для глубин 94 и 118 м. До глубины 94 м механическая скорость бурения составила 10 м/ч, а значение РМК – 2,01. Интервал 94 – 118 м пройден с механической скоростью 30 м/ч и значением расходной массовой концентрацией шлама в потоке воздуха равном 3,15.

Для скважины № 404 значение РМК составило 1,86 при средней механической скорости 7,8 м/ч в интервале 97 – 164 м. Аналогично, для скважины

№ 405 расходная массовая концентрация равно 2,04 при средней механической скорости 10,4 м/ч на интервале 81 – 141 м. На рисунке 26 приведена зависимость величины расходной массовой концентрации шлама от механической скорости бурения при подаче воздуха 76 м³/мин.

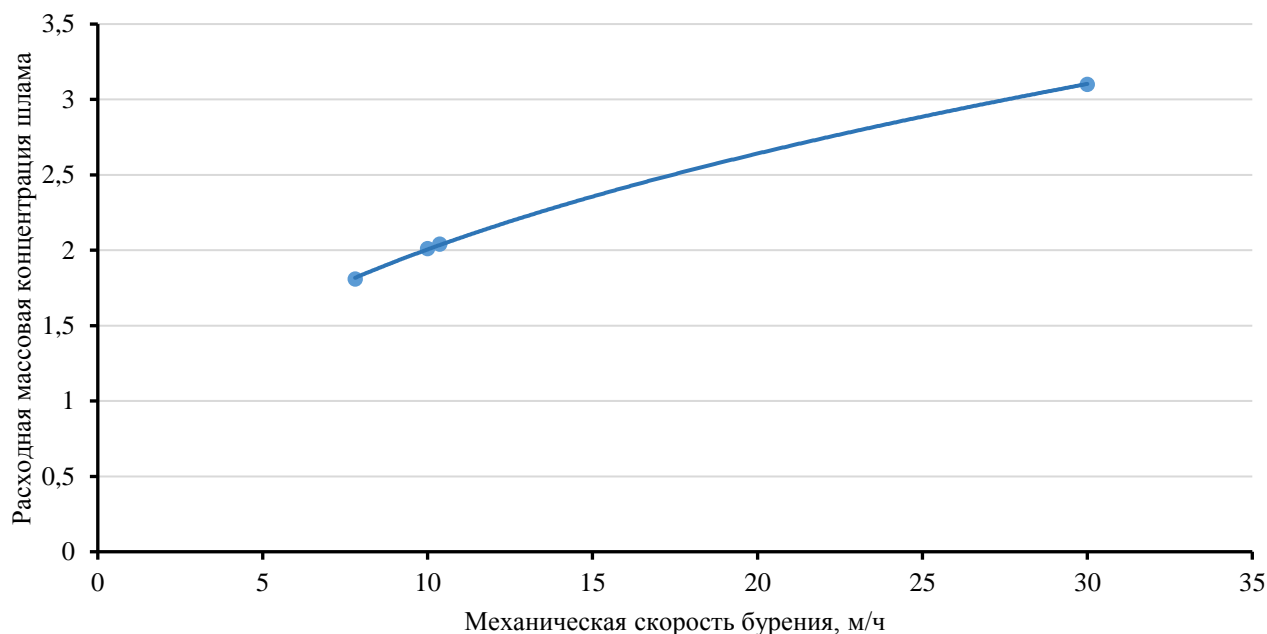


Рисунок 26 – Зависимость влияния механической скорости бурения под кондуктор скважин №№ 401, 404, 405 на величину показателя РМК

Данная зависимость имеет выраженный характер почти прямой пропорции и позволяет сделать вывод о наличии устойчивой связи между механической скоростью бурения, временем проходки интервала и показателе РМК при расходе очистного агента 76 м³/мин.

Проведенные наблюдения и анализ полученных данных дают нам возможность ввести критериальную оценку стабильности процесса проходки интервалов под кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения и разработать методические основы эффективного регулирования увеличения механической скорости на основе критерия безаварийности. Статистическая обработка результатов производственного эксперимента показывает, что обеспечение значения критерия РМК шлама равного 2, а также соотношения времени чистого бурения и продувки забоя 6,5 ч/3,5 ч с надежностью 95% характеризует стабильные условия проходки интервалов скважин под кондуктор с

очисткой забоя воздухом в условиях бурения Куюмбинского нефтяного месторождения. На рисунке 27 приведен график регулирования механической скорости бурения и величины расхода очистного агента на основании критерия РМК для исследуемых интервалов скважин Куюмбинского месторождения.

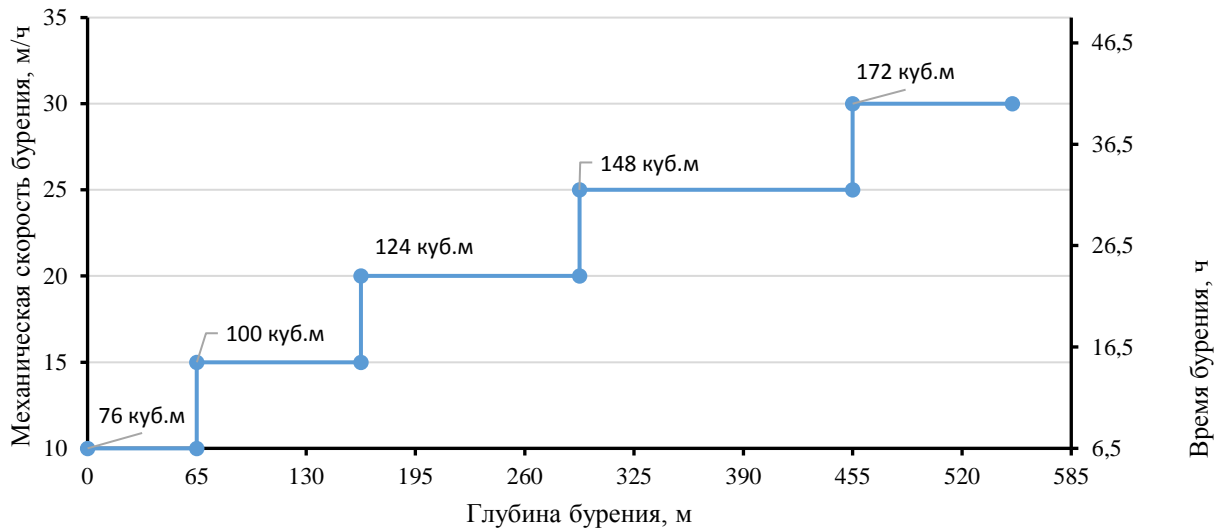


Рисунок 27 – График для регулирования $V_{\text{мех}}$ и Q в процессе проходки интервала под кондуктор на скважине № 401 Куюмбинского месторождения

Для целей выработки графических рекомендаций начальная механическая скорость проходки была принята равной 10 м/ч. Через каждые 6,5 часов бурения и 3,5 часа продувки происходит поэтапное увеличение механической скорости бурения на 5 м/ч за счет увеличения осевой нагрузки на долото. При этом повышается расход очистного агента. Приращение расхода воздуха отвечает условию минимально допустимого для обеспечения значения критерия РМК равного 2 при заданной $V_{\text{мех}}$. Конечный забой секции кондуктора составляет 550 м, расчетное время проходки 43,2 часа.

3.4. Моделирование процесса очистки забоя скважин с целью определения темпа повышения давления на компрессоре с учетом динамической ситуации в системе «скважина – пласт»

Предлагаемые методики расчета воздухообеспечения при реализации очистки забоя воздухом позволяют выполнять расчет параметров циркуляционной

системы, не учитывая при этом динамической картины в системе «скважина – пласт». Обстоятельство это весьма существенно, поскольку инициированный искусственный пневморазрыв грозит различными негативными последствиями: начиная с отсутствия выхода выбуренной породы на поверхность, скапливания её в призабойной зоне, заканчивая грифоном.

М.Н. Климентов, В.И. Тиль и А.С. Бронзов [43, 46] в своих исследованиях отмечают факты бурения геолого-разведочных скважин с очисткой забоя воздухом в отсутствии выноса шлама. Уход шлама в пласт в ряде случаев может оказывать на стабильность процесса углубления положительное влияние в случае значительной трещиноватости горных пород: шлам кольматирует трещины в горной породе, улучшая целостность ствола скважины и предотвращая возможные поглощения тампонажного раствора в процессе заканчивания секции скважины. Однако, данный положительный эффект проявляется неконтролируемо.

Как уже было приведено выше, предлагаемой методикой расход воздуха определяется по формуле (16). Руководствуясь приведенной зависимостью, расход воздуха можно определять лишь исходя из площади его канала движения и скорости витания. Однако, несложными расчетами для определения рабочего давления по формулам (19) и (22) мы получим величину, значительно превышающую пластовое давление даже на глубине 550 м (градиенты пластовых давлений для исследуемого интервала приведены в таблице 9 главы 1).

На фоне обеспечения возможности создания повышенных расходов очистного агента, как следствие – высоких аэродинамических давлений в скважине, важной задачей является формирование научно-методической основы для проведения проектных расчетов, позволяющих предотвратить искусственный пневморазрыв горных пород.

Результаты исследований геологического строения Куюмбинского месторождения, а также анализ опыта проведения буровых работ подтверждают наиболее вероятный риск разрыва пород и связанного с ним поглощения очистного агента в интервале 105 – 200 метров. В качестве граничных условий в

динамической модели системы «скважина – пласт» для интервалов направления и кондукторов скважин Куюмбинского нефтяного месторождения были приняты градиенты пластового давления, давления разрыва пород и давления поглощения. Величина репрессии на пласт обоснована в соответствии с пунктом № 210 Правил безопасности нефтяной и газовой промышленности [47] и техническими возможностями регулирования рабочей характеристики дожимного компрессора HURRICANE B15-62/2175 [53]. Правая граница до глубины 105 метров представляет собой линию градиента давления разрыва пород. После глубины 105 метров условием предотвращения пневморазрыва является репрессия на пласт ниже давления поглощения, которое в меньшую сторону отличается от давления разрыва. Приращение рабочего давления определялось с периодичностью каждые 50 метров проходки. Рабочая характеристика дожимного компрессора позволяет регулировать нагнетание объёма воздуха в скважину до 0,1 МПа без увеличения производительности генерирующего компрессора.

Определив минимальную реессию на пласт и выявив граничные условия, мы произвели обратную операцию опосредованного определения расхода воздуха и механической скорости бурения, следуя при этом выявленные ранее условия безаварийности. Для опосредованного определения расхода воздуха и механической скорости проходки использовались зависимости (19), (20), (21), (22), (23), (30), (31), (33), (34), приведенные в настоящей главе. При определении коэффициента аэродинамического трения использовалась формула (27) – зависимость Хэйланда.

Результатом модификации указанной методики расчета воздухообеспечения с учетом динамической картины в системе «скважина – пласт» является сформулированная научно-методическая основа для проектирования приращения рабочего аэродинамического давления и расхода воздуха. Результаты расчета по модифицированной методике приведены в таблице 25 и на рисунке 28.

Необходимо заметить, что сформулированной научно-методической основой предполагается определение лишь минимальной требуемой реессии.

Таблица 25 – Результаты расчета темпа приращения $P_{\text{раб}}$ с учетом предотвращения ситуации пневморазрыва для скважин Куюмбинского нефтяного месторождения

Глубина интервала скважины, м	Пластовое давление, МПа	Давление разрыва + давление поглощения, МПа	Расчетное рабочее давление, МПа	Определяемый расход воздуха, м ³ /мин	Определяемая механическая скорость проходки, м/ч
50	0,43	0,82	0,8	38	5
100	0,85	1,64	1,6	76	10
105	0,89	1,72	1,6	76	10
150	1,28	2,15	1,7	76	10
200	1,7	2,9	2,0	100	15
250	2,13	3,65	2,5	124	20
300	2,55	4,4	2,8	136	25
350	2,98	5,15	3,2	142	25
400	3,4	5,90	3,8	164	25
450	3,83	6,65	4,2	200	25
500	4,25	7,4	4,7	233	30
550	4,68	8,15	5,1	233	30

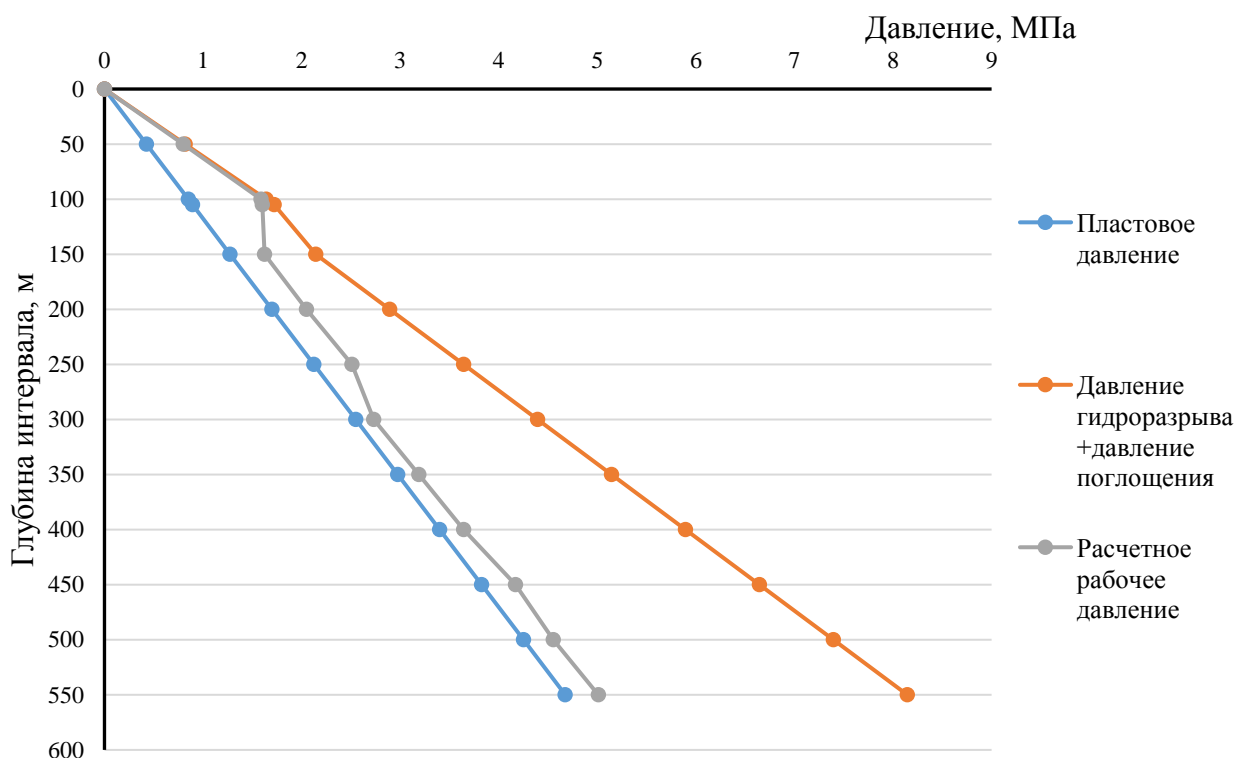


Рисунок 28 – Зависимость давления (пластовое, разрыва, расчетное рабочее) от глубины скважины с учетом приращения $P_{\text{раб}}$ при бурении под кондуктор на Куюмбинском месторождении

До глубины 105 метров расчетное рабочее давление практически равно давлению разрыва пород. Приведенная графическая зависимость свидетельствует о наличии запаса и смещении вправо величины репрессии, как следствие

увеличении расхода воздуха и механической скорости бурения при необходимости.

Регулирование темпа приращения рабочего давления на компрессоре в соответствии с разработанными рекомендациями обеспечивает необходимую репрессию на пласт и позволит предотвратить ситуацию пневморазрыва пород.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Приведенные выше результаты исследований позволяют сделать следующие выводы и рекомендации для дальнейшего тиражирования технологии очистки забоя воздухом:

1. Использование формулы Хэйланда при определении коэффициента аэродинамического трения позволяет наиболее точно определить расчетное рабочее давление на компрессоре, тем самым рационально осуществить выбор оборудования для реализации технологии.

2. Величина роста давления $0,15 \div 0,2$ МПа является количественной характеристикой стабильности углубки исследуемого интервала скважин для технико-геологических условий ведения буровых работ на Куёмбинском месторождении.

3. С увеличением расхода воздуха, генерируемого компрессором, возрастает существенность внесенных в методику Б.Б. Кудряшова модификаций.

4. Определение качественной характеристики транспортируемых несущем потоком воздуха продуктов разрушения забоя скважины возможно с помощью применения численных методов решения дифференциальных уравнений, однако определение кинематической вязкости аэрозоля в затрубном пространстве скважины позволяет учесть влияние сил вязкости при определении числа Рейнольдса потока, входящего в состав формулы для определения коэффициента аэродинамического сопротивления.

5. В технико-геологических условиях ведения буровых работ с продувкой воздухом на Куёмбинском месторождении оптимальным является значение

критерия расходной массовой концентрации равного 2 для предотвращения риска прихватоопасной ситуации при проходке исследуемых интервалов скважин.

6. Сформулированы рекомендации по регулированию рабочего давления на компрессоре, учитывающие сменяемость горных пород при проходке интервалов скважин под кондуктор, позволяющие исключить пневморазрыв слагающих пород.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НА КУЮМБИНСКОМ НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

На протяжении 2014 – 2015 компанией ООО «Интес» при участии ООО «Коралайна Инжиниринг» проводились опытно-промышленные работы по бурению с очисткой забоя воздухом в контексте применения мобильной буровой установки и реализации ударно-вращательного бурения интервалов скважин под направление и кондуктор на Куюмбинском нефтяном месторождении. Результаты проведенного производственного эксперимента показали применимость данного технологического подхода к строительству секций направлений и кондукторов на скважинах КНМ, дав импульс к развитию технологии. Так на момент написания данной диссертационной работы, компании-операторы ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз», АО «Верхнечонскнефтегаз», АО «Роспан интернешнл» инициировали тендерные процедуры по строительству секций направлений и кондукторов скважин различных категорий, а также на строительство водозаборных скважин на эксплуатируемых месторождения с применением технологии очистки ствола скважины. Также данная технология находится на экспертном рассмотрении компаниями ПАО «Газпром» и ООО «Газпром бурение» на предмет внедрения при строительстве скважин на Чаяндинском и Ковыктинском месторождениях.

4.1. Анализ производственных показателей бурения интервалов скважин под направления и кондукторы на Куюмбинского месторождения

В рамках опытно-промышленных работ технология очистки забоя воздухом была применена при строительстве секций кондуктора на трех скважинах и строительстве одной водозаборной скважин на Куюмбинском месторождении [83]. В таблице 26 приведены временные показатели бурения при реализации технологии продувки воздухом на Куюмбинском месторождении.

Таблица 26 – Временные показатели бурения интервалов скважин под кондуктор и водозаборной скважины на Куюмбинском месторождении

Номер скважины	Интервал бурения, м	Средняя механическая скорость на интервале, м/ч	Время проходки, ч
401	34 – 118	7,5	11,2
404	97 – 164	7,8	8,5
405	81 – 141	10,4	6
Водозаборная	6 – 108	14,5	7

Опыт ведения буровых работ на данном месторождении показал, что средняя механическая скорость проходки аналогичных интервалов на скважинах различных категорий в 2014 году составила 3,2 м/ч. Наглядно увеличение механической скорости бурения от применения технологии очистки забоя воздухом отображено на рисунке 29.

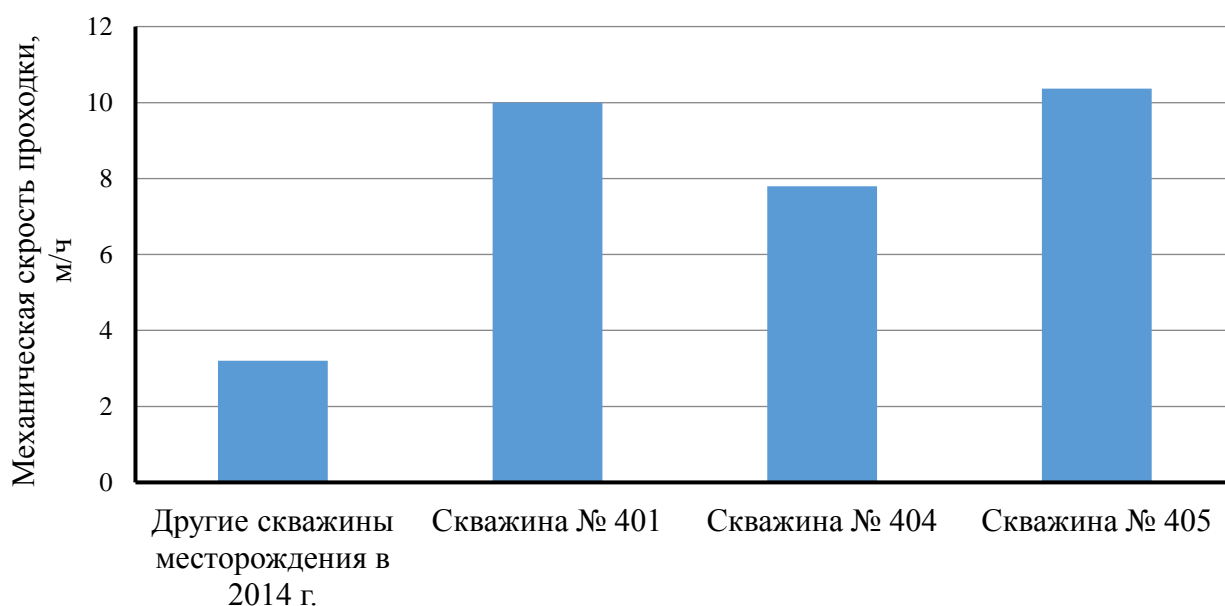


Рисунок 29 – Механическая скорость проходки интервалов скважин под кондуктор на Куюмбинском месторождении в 2014 году

Важным фактом, требующим освещения, является прохождение интервала долеритов в одно долбление без дополнительного СПО на смену породоразрушающего инструмента. Ресурс работы используемого при ОПР подземного оборудования позволил обеспечить проходку трех пробуренных интервалов под кондуктор одним комплектом погружного пневмоударника и долота. При строительстве водозаборной скважины использовался комплект оборудования меньшего типоразмера.

Модифицированная методика расчета воздухоснабжения, изложенная в научно-исследовательской работе, позволяет на стадии проектирования производить расчет оптимальных режимных параметров, а также выбирать необходимое технологическое оборудование. Результаты НИР были использованы при проектировании программы на бурение интервалов под направление и кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения при проведении опытно-промышленных работ по ударно-вращательному бурению с очисткой забоя воздухом указанных интервалов.

Выполненные в рамках НИР модификации методики воздухоснабжения циркуляционной системы при бурении с очисткой забоя воздухом имеют важное теоретическое и практическое значение для реализации процесса ударно-вращательного бурения интервалов под направления и кондукторы на эксплуатационных и геологоразведочных скважинах Куюмбинского нефтяного месторождения. Результаты проведенных исследований приняты ООО «Коралайна Инжиниринг» для проведения дальнейших производственных испытаний.

4.2. Оценка экономической эффективности внедрения ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом

Аспекты экономической оценки инвестиций при внедрении технологии очистки забоя воздухом в исследуемых интервалах изложены автором в работе [83]. Технико-экономическое обоснование внедрения упомянутой технологии базируется на следующих положениях:

- Сокращение планируемого времени на бурение интервала 0 – 550 метров до 3 суток;
- Значительное сокращение материальных и человеческих ресурсов, стоимостное выражение которых составляет себестоимость метра бурения;

- Сокращение времени на монтаж/демонтаж мобильной буровой установки в сравнении с временем монтажных работ на буровую установку эксплуатационного и разведочного бурения;

- Нивелирование затрат, связанных с простоем буровой установки и привлечением дополнительных материальных и технических ресурсов при ликвидации поглощения промывочной жидкости.

В случае привлечения специализированных компаний для оказания сервисных услуг по бурению исследуемых интервалов экономия достигается за счет следующих факторов:

- Снижения себестоимости метра бурения за счет привлечения мобильной буровой установки вместо БУ эшелонного или стационарного типа;

- Сокращение времени безметровых работ за счет лучшей монтажеспособности БУ;

- Увеличения механической скорости бурения при продувке воздухом в проблемных интервалах. Даже обеспечив величину механической скорости проходки 10 м/ч на протяжении всего исследуемого интервала углубления, коммерческая скорость бурения увеличится в 3,1 раза при прочих равных условиях для скважин Куюмбинского месторождения в данных 2014 года;

- Увеличение проходки на долото и ППУ, в сравнении с традиционными комплектами КНБК.

Это далеко неполный перечень факторов оптимизации бурения исследуемых интервалов скважин с очисткой забоя воздухом. В конечном итоге, мы достигаем увеличения цикловой скорости бурения, характеризующей темп работы по строительству скважин и определяющейся по формуле:

$$v_{\text{ц}} = \frac{H}{S_{\text{ц}}}, \quad (35)$$

$$S_{\text{ц}} = \frac{(T_{\text{м}} + T_{\text{п}} + T_{\text{б}} + T_{\text{и}})}{720} \quad (36)$$

где $v_{\text{ц}}$ – цикловая скорость бурения, м/ст. – мес.; H – объем проходки за месяц, м; $S_{\text{ц}}$ – цикл строительства скважины, ст. – мес.; $T_{\text{м}}, T_{\text{п}}, T_{\text{б}}, T_{\text{и}}$ – календарное время

соответственно монтажа оборудования, подготовительных работ к бурению, бурения и испытания, ч;

Практикой ведения буровых работ установлена ориентировочная стоимость суток простоя буровой установки для эксплуатационного и разведочного бурения порядка 750 тыс. рублей без НДС.

Основываясь на приведенной информации, проведены работы по технико-экономическому обоснованию создания сервисной службы в структуре компании-оператора и получены следующие данные расчета экономической оценки инвестиций [84, 85]:

1) Единовременные инвестиции для приобретения комплекта необходимого оборудования в ценах 2014 года – 180 млн. рублей [84, 86];

2) Стоимость проходки интервала под кондуктор единичной скважины силами собственного сервиса в ценах 2014 – 1,3 млн. рублей;

3) Планируемый суммарный фонд скважин на три года – 85;

4) Фактические затраты на бурение интервалов скважин под кондуктор, понесенные компанией-оператором, в 2013 году – 209 млн. рублей;

5) Фактические затраты на бурение интервалов скважин под кондуктор, понесенные компанией-оператором, в 2014 году (ноябрь) – 128 млн. рублей.

Исходя из полученных данных, срок окупаемости технологии и всего необходимого оборудования составил менее одного года. По итогам трех лет ведения буровых работ на Дулисьминском НГКМ прогнозируется экономия более 580 млн. рублей.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Достигнутая при проведении опытно-промышленных работ механическая скорость бурения как минимум в два раза превышает среднее значение данного показателя при реализации традиционной технологии бурения исследуемого интервала скважин.

2. Проведение опытно-промышленных работ выявило возможность прохождения интервала залегания долеритов в одно долбление без потери циркуляции рабочего агента.

3. Применение технологии очистки забоя воздухом в контексте реализации ударно-вращательного бурения исследуемых интервалов скважин с использованием мобильной буровой установки позволяет оптимизировать временные показатели на протяжении всего цикла строительства скважины, увеличивая цикловую скорость бурения.

4. Главной статьей экономии при определении технико-экономического обоснования технологии бурения с продувкой воздухом является ликвидация дополнительных затрат, связанных с дорогостоящим простоем буровой установки стационарного типа, а также с привлечением дополнительных материальных и технических ресурсов для изоляции зоны поглощения промывочной жидкости.

5. При определенном объеме фонда скважин экономически обоснованным является создание собственной сервисной службы, осуществляющей бурение исследуемых интервалов скважин с очисткой забоя воздухом, в структуре компании-недропользователя Восточно-Сибирского региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненный комплекс диссертационных исследований технологии бурения с очисткой забоя скважины воздухом позволил сформулировать основные результаты работы:

1. Впервые на территории РФ проведены опытно-промышленные работы по использованию воздуха в качестве очистного агента при реализации ударно-вращательного бурения интервалов под кондуктор на эксплуатационных и геологоразведочных скважинах нефтяного месторождения.

2. Сформулирована новая концепция методики расчета требуемого воздуходобывания, которая может быть использована для более совершенной технологии очистки забоя воздухом;

3. Получена количественная оценка влияния шероховатости затрубного пространства, плотности шлама, объемной концентрации продуктов разрушения забоя на расчетное рабочее $P_{\text{комп}}$;

4. Экспериментально подтверждено критическое значение роста давления, влияющее на стабильность процесса углубления;

5. Впервые получена критериальная оценка безаварийности процесса углубления скважины с очисткой забоя воздухом на основе предельно-допустимой расходной массовой концентрации шлама в несущем потоке воздуха для конкретных условий ведения работ;

6. Сформулированы методологические основы регулирования параметров режима бурения «механическая скорость бурения – требуемый расход воздуха» для конкретных горно-геологических условий Куюмбинского месторождения;

7. Даны рекомендации для проведения проектных расчетов ожидаемого рабочего давления на компрессоре, исходя из реальной картины давлений в системе «пласт – скважина».

8. Достигнуто сокращение срока строительства секции кондуктора в геолого-технических условиях Куюмбинского месторождения с получением

экономического эффекта и увеличением цикловой скорости бурения скважин для данного месторождения.

В целях дальнейшего повышения эффективности очистки забоя воздухом и тиражирования его как способа повышения эффективности строительства секций скважин в условиях рисков поглощений промывочного агента необходимо продолжить исследовательские и конструкторские работы в следующих направлениях:

1. Создание применимой в проектировании программы работ методики по расчету скорости движения каждой фазы из водовоздушной взвеси в структуре обратного потока;

2. Создание датчика скорости обратного потока, устанавливаемого на выкидной линии циркуляционной системы;

3. Проведение исследовательских работ по созданию технологии ориентированного бурения скважин погружным пневмоударником с очисткой забоя воздухом;

4. Разработка универсальной научно-практической методики регулирования параметров режима ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом для широкого спектра конструкций скважин и горно-геологических условий ведения работ для Восточно-Сибирского комплекса месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектно-сметная документация № 040-РП-023/14 на строительство наклонно-направленных скважин в продуктивных отложениях Ярактинского горизонта на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении : проектная документация / Кубин А. А. – Красноярск : ООО «КрасноярскНИПИнефтегаз», 2014. – 1. т.
2. Бузанов, К. В. Технология бурения пневмоударником как способ предупреждения катастрофических поглощений на Дулисьминском месторождении / К. В. Бузанов, К. И. Борисов // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – Москва, 2014. – №4. – С.28 – 31.
3. Замараев, С. М. Древняя структура земной коры Восточной Сибири / С. М. Замараев, Г. В. Рязанов, А. М. Мазукабзов; под ред. С. М. Замараева. – Новосибирск : АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т земной коры : Наука, 1975. – 185 с.
4. Проект на проведение комплекса гидрогеологических поисково-оценочных работ для решения вопроса обеспечения техническими водами на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении : проектная документация / Шестаков А. М. – Иркутск : ООО ГГК «Раздолье», 2012. – 81 с.
5. Геология СССР. Том XVII. Иркутская область / М. М. Одинцов, С. М. Ткалич; гл. ред. П. Я. Антропов. – М. : Министерство геологии и охраны недр СССР : Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охраны недр, 1962. – 524 с.
6. Семенов, Н. Я. Исследование и изоляция поглощающих и водопроявляющих пластов : пособие для инженера-технолога по бурению скважин в двух частях. Часть 1 / Н. Я. Семенов. – Уфа : ООО «БашНИПИнефть», 2010. – 329 с.
7. Оценочные скважины Чаяндинского НГКМ по стройке «Бурение на месторождении» : проектная документация / Теликова Р. С. – Москва : ООО «Красноярскгазпром Нефтегазпроект», 2014. – 358 с.

8. Дмитриевский, А. Н. О разработке Чаяндинского месторождения [мнение] / А. Н. Дмитриевский // Российские недра. – 2012. – № 10. – С. 7.

9. Ковыктинское месторождение [Электронный ресурс]. –
Официальный сайт ПАО «Газпром». – Режим доступа:
<http://www.gazprom.ru/about/production/projects/deposits/kovykta.html>.

10. Осложнения и риски строительства скважин в горно-геологических условиях сводового разреза Ковыктинского ГКМ : отчет о НИР / Кириллов В. В. – Иркутск : ООО «Газпром добыча Иркутск», 2008. – 21 с.

11. Илгинская – верхоленская свиты: осложнения при бурении и возможные меры по их предупреждению на Ковыктинском ГКМ : отчет о НИР / Кириллов В. В. и др. – Иркутск : Ангаро-Ленская разведочная экспедиция, 1997. – 56 с.

12. Тимкин, Н. Я. Ликвидация катастрофических поглощений с применением оборудования локального крепления скважин при строительстве скважины № 71 Ковыктинского месторождения / Н. Я. Тимкин // Специализированный журнал «Бурение и нефть». – 2016. – № 2. – С. 36.

13. Жадан, Г. Ю. Касательно аварий и осложнений при бурении нефтяных и газовых скважин Восточной Сибири / Г. Ю. Жадан, Р. Р. Тойб, Е. Е. Милосердов, А. А. Юровский // Наука. Образование. Личность. – 2013. – № 1. – С. 3 – 6.

14. Милосердов, Е. Е. Причины аварий и осложнений при бурении эксплуатационных скважин на месторождениях Восточной Сибири [статья из сборника материалов конференций] / Е. Е. Милосердов, Д. Ф. Ганиев, и др. // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса. – 2017. – № 1. – С. 156 – 160.

15. Харитонов, А. А. Бурение геологоразведочных и эксплуатационных скважин на Куюмбинском лицензионном участке [статья из сборника материалов конференций] / А. А. Харитонов, Н. Г. Квеско // Проблемы геологии и освоения недр. Том II. Труды XIX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 70-летию юбилею Победы советского народа над фашистской Германией – 2015. – 5 апреля.

16. Харитонов, А. А. Методы ликвидации осложнений при бурении скважин на Куюмбинском лицензионном участке / А. А. Харитонов, Н. Г. Квеско // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5. – С. 99 – 100.

17. Бузанов, К. В. Строительство вертикальных секций скважин с опережением в условиях Восточно-Сибирского региона с применением технологии ударно-вращательного бурения и очисткой забоя воздухом / К. В. Бузанов // Специализированный журнал «Бурение и нефть». – Москва, 2017. – №1. – С.25 – 32

18. Семенов, Н. Я. Исследование и изоляция поглощающих и водопроявляющих пластов : пособие для инженера-технолога по бурению скважин в двух частях. Часть 2 : монография / Н. Я. Семенов. – Уфа : ООО «БашНИПИнефть», 2010. – 454 с.

19. Грин, Б. К. Применение различных материалов для борьбы с поглощением: пер. с англ. / Б. К. Грин. – М. : ГОСИНТИ, 1959. – 35 с.

20. Исследование закупоривающей способности применяемых наполнителей, затворенных на растворах с различными реологическими свойствами (методика). – Уфа : БашНИПИнефть, 1986. – 12 с.

21. Повышение эффективности методов ликвидации поглощений и катастрофических уходов промывочной жидкости при бурении нефтяных и газовых скважин : отчет о НИР / А. С. Кувыкин, В. О. Белоруссов. – Уфа : УфНИИ, 1961. – 75 с.

22. Гельфгат, Я. А. Результаты промышленных испытаний метода бурения скважин с использованием сжатого воздуха : труды ВНИИБТ / Я. А. Гельфгат, Ю. С. Лопатин; под ред. Ю. С. Лопатина. – М. : Недра : ВНИИБТ, 1973. – 135 с.

23. Гельфгат, Я. А. Бурение скважин с продувкой забоя воздухом в стрыйских отложениях площади Делятин : труды ВНИИБТ / Я. А. Гельфгат, Ю. С. Лопатин и др.; под ред. Ю. С. Лопатина. – М. : Недра : ВНИИБТ, 1973. – 135 с.

24. Куликов, И. В. Пневмоударное бурение разведочных скважин / И.В. Куликов, В.Н. Воронов, И.И. Николаев. – М. : Недра, 1989. – 239 с.

25. Malloy, K. P. Air Drilling in the Presence of Hydrocarbons: A Time for Pause [электронный ресурс] / K. P. Malloy, G. H. Medley, C. R. Stone // IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. – 2007. – 28 – 29 March. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

26. ZHU, H. Influence of Relevant Parameters on Hole Cleaning and Pipe String Erosion [электронный ресурс] / ZHU Hongjun, Lin Yuanhua et al. // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. – 2010. – 20 – 22 January. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

27. Юнгмейстер, Д. А. Модернизация ударных буровых механизмов : монография / Д. А. Юнгмейстер [и др.] ; под ред. Л. К. Горшкова. – СПб. : Политехника-сервис, 2012. – 149 с.

28. Юнгмейстер, Д. А. Исследование модернизированных перфораторов-ударников для проведения вспомогательных выработок ОАО «Метрострой» / Д. А. Юнгмейстер // Научный журнал «Записки горного института». – 2016. – т. 218. – С. 281-288.

29. Пивнев, В. А. Разработка и исследование средств бурения с регулируемым ударным импульсом для шпуров и скважин : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.05.06 / Пивнев Владимир Анатольевич. – СПб., 2004. – 26 с.

30. Pletcher, J. Application of Air Percussion Drilling Improves Drilling Efficiency in Horizontal Sandstone Wells [электронный ресурс] / Joe Pletcher, Adam Scarr et al. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Florence. – 2010. – 19 – 22 September. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

31. Кудияров, С. Полезный попутчик / С. Кудияров // Эксперт. – 2017. – № 28. – 10 – 15 июля.

32. Бузанов, К.В. Разработка технико-технологических решений бурения проблемных интервалов под направления на Дулисьминском месторождении Иркутской области / К.В. Бузанов, К.И. Борисов // Научно-технический журнал «Вестник ассоциации буровых подрядчиков». – Москва, 2014. – №4. – С.45 – 48.

33. Wang, H. Итоги применения пневмоударного бурения в KERUI GROUP / Wang Haijiao // Доклад на 14-й Международной выставке «Нефть и Газ». – Москва. – 2017. – 30 июня.
34. Дмитчук, В. М. Бурение электробуром с продувкой воздухом с целью повышения коэффициента удельной продуктивности скважин : труды ВНИИБТ / В. М. Дмитчук, В. П. Мазур и др.; под ред. Ю. С. Лопатина. – М. : Недра : ВНИИБТ, 1973. – 135 с.
35. Hardy, C. Бурение с погружными пневмоударниками от А до Я: пер. с англ. / Chris Hardy, Martyn Doherty, Dean Hubbard, Chris Bond, John Clancy. – Malaga. Western Australia : TEREX Inc, 2007. – 74 с.
36. Куликов, И. В. Пневмоударное бурение разведочных скважин / И. В. Куликов, В. Н. Воронов, И. И. Николаев. – М. : Недра, 1989. – 239 с.
37. Киселев, А. Т. Вращательно-ударное бурение геолого-разведочных скважин / А. Т. Киселев, И. Н. Крусир. – М. : Недра, 1982. – 103 с.
38. Винниченко, В. М. Технология бурения геолого-разведочных скважин / В. М. Винниченко, Н. Н. Максименко. – М. : Недра, 1988. – 149 с.
39. Шкурко, А. К. Бурение скважин забойными ударными машинами / А. К. Шкурко. – Л. : Недра, 1982. – 169 с.
40. Техническое руководство при проведении буровых работ с погружными пневмоударниками. – М. : ЗАО «Атлас Копко», 2007. – 46 с.
41. Кудряшов, Б. Б. Бурение разведочных скважин с применением воздуха / Б. Б. Кудряшов, А. И. Кирсанов. – М. : Недра, 1990. – 263 с.
42. Шамшев, Ф. А. Технология и техника разведочного бурения / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов – М. : Недра, 1983. – 565 с.
43. Бронзов, А.С. Бурение скважин с использованием газообразных агентов / А. С. Бронзов. – М. : Недра, 1989. – 287 с.
44. Кирсанов, А. И. Определение потребных параметров сжатого воздуха при бурении скважин с продувкой / А. И. Кирсанов, Б. Б. Кудряшов. – Л. : Изд-во ВИТР, 1964. – 156 с.

45. Ахмедов, Я. Ю. О влиянии влажности шлама на процесс образования сальников при бурении скважин с продувкой : труды ВНИИБТ / Я. Ю. Ахмедов, В. А. Вареник и др.; под ред. Ю. С. Лопатина. – М. : Недра : ВНИИБТ, 1973. – 135 с.
46. Климентов, М. Н. Сооружение скважин ударно-вращательным способом бурения / М. Н. Климентов, В. И. Тиль. – М. : Недра, 1986. – 96 с.
47. Приказ Ростехнадзора № 101 от 12.03.2013 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» [электронный ресурс]. – М. : КонсультантПлюс, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
48. ГОСТ 632-80 Трубы обсадные и муфты к ним. – М.: Государственный комитет по стандартам СССР, 1980. – 50 с.
49. Техническая инструкция по эксплуатации МБУ «COOPER 550 LTO»: пер. с англ. – Хьюстон : COOPER Manufacture inc., 2002. – 74 с.
50. Техническая инструкция по эксплуатации дивертора 1300 Series Rotaring Control Heads: пер. с англ. – Вашингтон : Washington Rotating Control Heads inc., 2014. – 5 с.
51. Паспорт на долото CONCAVE SD 12 BIT. – М. : ЗАО «Атлас Копко», 2014. – 12 с.
52. Техническое руководство по эксплуатации бурового компрессора Sullair Combo1150XHH/1350XHDL. – М. : ЗАО «Атлас Копко», 2014. – 58 с.
53. Техническое руководство по эксплуатации дожимного компрессора HURRICANE B15-62/2175. – М. : ЗАО «Атлас Копко», 2012. – 62 с.
54. Квеско, Н. Г. Методы и средства исследований : учебное пособие / Н. Г. Квеско, П. С. Чубик. – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 112 с.
55. Бояршинова, А. К. Теория инженерного эксперимента : текст лекций / А. К. Бояршинова, А. С. Фишер. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 85 с.
56. Агапов, Е. Г. Обработка экспериментальных данных в MS Excel : методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов дневной

формы обучения / Под ред. Е. Г. Агапова, Е. А. Битехтина. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. – 32 с.

57. Клячко, Л. С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л. С. Клячко, Э. Х. Одельский, Б. М. Хрусталеv. – Мн. : Наука и техника, 1983. – 216 с.

58. Макурин, Н. С. Аэродинамические характеристики циркуляционной системы скважин при колонковом разведочном бурении с продувкой / Н. С. Макурин, Б. С. Филатов // Разведка и охрана недр. – 1961. – № 6. – С. 18 – 27.

59. Рыбаков, Ю. Ф. Определение потребного расхода и забойного давления газообразного агента при бурении скважин с очисткой воздухом или газом / Ю. Ф. Рыбаков // Нефть и газ. – 1961. – № 6. – С. 27 – 32.

60. Межлумов, А. О. Бурение скважин с применением воздуха, газа и аэрированной жидкости / А. О. Межлумов, Н. С. Макурин. – М. : Недра, 1967. – 232 с.

61. Vieira, P. Minimum Air and Water Flow Rates Required for Effective Cuttings Transport in High Angle and Horizontal Wells [электронный ресурс] / P. Vieira, S. Miska et al. // IADC/SPE Drilling Conference in Dallas. – 2002. – 26 – 28 February. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

62. Shifeng, T. Development of Hydrodynamic-Model-Based Air-Drilling Design Procedures [электронный ресурс] / T. Shifeng, M. A. Adewumi // SPE Drilling Engineering. – 1992. – December. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

63. Liu, H. Experimental Study on Carrying Capacity of Cuttings in Annulus for Air/Mist Drilling [электронный ресурс] / Liu Huixing, Fan Jun et al. // SPE/Iso TA Coiled Tubing Roundtable held in Houston. – 2001. – 7 –8 March. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

64. Дейч, М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 472 с.

65. Марон, В. И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах : учебное пособие / В. И. Марон. – СПб. : Издательство «Лань», 2012. – 256 с.

66. Лаптев, А. Г. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов. – Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – 342 с.

67. Чальцев, М. Н. Аналитический метод гидравлического расчета пневмотранспортных трубопроводов : сборник научных трудов Национального горного университета / М. Н. Чальцев. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – № 19. – С. 140 – 144.

68. Земерев, Е. С. Критическое истечение сыпучих материалов в пневмотранспортной система подачи порошков : дис. ... канд. техн. Наук : 05.17.08 / Земерев Евгений Сергеевич. – Пермь, 2017. – 116 с.

69. Стасенко, А. Л. Физические аспекты многофазных течений в аэродинамике, летательной технике и авиационной экологии / А. Л. Стасенко // Труды МФТИ. – 2011. – № 4. – С. 108 – 125.

70. Кондратьев, А. С. Основы расчета гидродинамических параметров при движении жидкости с монодисперсными крупными твердыми частицами в вертикальных трубах / А. С. Кондратьев, Т. Л. Нья // Научный журнал «Фундаментальные исследования». – М. : Академия Естествознания. – 2016. – № 9. – С. 35 – 42.

71. Новоселов, А. Г. Гидродинамика трехфазных потоков в вертикальных трубах при струйном диспергировании газовой фазы / А. Г. Новоселов, Ю. Л. Малахов, Т. С. Матевосов // Научный журнал НИУ ИТМО. – 2015. – № 4. – С. 106 – 115.

72. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

73. Min, Lu. Experimental and computational study of two-phase slug flow : A thesis submitted for degree of Doctor of Philosophy / Min Lu. – London, 2015. – 346 с.

74. Brennen, C. E. Fundamentals of Multiphase Flows / Christopher E. Brennen. – California : Cambridge University Press, 2005. – 410 с.

75. Lyons, W. C. Air and Gas Drilling Field Guide / William C. Lyons, Boyun Guo, Reuben L. Graham, Greg D. Hawley. – 3rd ed. – Oxford : Elsevier Press, 2009. – 776 с.

76. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями № 1, 2). – М. : Государственный стандарт союза ССР, 1973. – 5 с.

77. Бузанов, К. В. Обоснование и расчет параметров оборудования пневмоударного бурения интервалов под направления на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении / К. В. Бузанов, К. И. Борисов, А. А. Лавров // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – Москва, 2015. – №3. – С.30 – 38.

78. Бузанов, К. В. Обоснование и расчет параметров оборудования и распределения аэродинамических давлений при реализации пневмоударного бурения в геологических условия Чаяндинского месторождения / К. В. Бузанов, К. И. Борисов // Научно-технический журнал «Вестник ассоциации буровых подрядчиков». – Москва, 2015. – №4. – С.9 – 15.

79. Buzanov, K. V. Development of engineering solutions for air drilling at Dulisminskoye oilfield, Irkutsk oblast / K. V. Buzanov, Yu. L. Boyarko, O. S. Uljanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 27, conference 1. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012049/meta>

80. Buzanov, K. V. Vertical section construction of well at Kuyumbinsky oil field via percussive-rotary drilling with DTH hammer / K. V. Buzanov, L. N. Nechaeva, O. S. Uljanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 43, number 1. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012072>.

81. Газарян, Г. С. Безопасное ведение буровых работ с применением газообразных агентов / Г. С. Газарян. – М. : Недра, 1970. – 123 с.

82. Зорэ, О. В. Аварийность при бурении с использованием газообразных агентов : труды ВНИИБТ / О. В. Зорэ, В. П. Трутко; под ред. Ю. С. Лопатина. – М. : Недра : ВНИИБТ, 1973. – 135 с.

83. Бузанов, К. В. Анализ и итоги опережающего строительства вертикальных секций скважин на Куюмбинском нефтяном месторождении с применением технологии пневмоударного бурения / К. В. Бузанов // Проблемы

геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума студ., аспирантов и молодых ученых им. М.А. Усова. – Томск, 2016. – С. 705 – 710.

84. Бузанов, К. В. Экономическая эффективность технологии ударно-вращательного бурения с опережением интервалов под направление на Дулисьминском месторождении Иркутской области / К. В. Бузанов, К. И. Борисов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с Международным участием, посвященной 60-летию кафедры бурения скважин «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин» – Томск, 2014. – С.415 – 421.

85. Бузанов, К. В. Концептуальные положения по внедрению опережающего бурения интервалов под кондуктор с применением газообразного рабочего агента на Дулисьминском НГКМ / К. В. Бузанов, Г. Г. Синебрюхов, К. И. Борисов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума студ., аспирантов и молодых ученых им. М.А. Усова. – Томск, 2014. – С. 164 – 171.

86. Бузанов, К. В. Обоснование выбора оборудования для пневмоударного бурения интервалов под направления на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении / К. В. Бузанов, К. И. Борисов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIX Международного симпозиума студ., аспирантов и молодых ученых им. М.А. Усова. – Томск, 2015. – С. 329 – 331.

87. Maranuk, C. Unique System for Underbalanced Drilling Using Air in the Marcellus Shale [электронный ресурс] / Chris Maranuk, Ali Rodrigues, Joe Trapasso, Joshua Watson // SPE Eastern Regional Meeting held in Charleston USA. – 2014. – 21 – 23 October. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

88. Рябчиков, С. Я. Проектирование буровых машин и механизмов : учебное пособие / С. Я. Рябчиков. – 3-е изд. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 115 с.

89. Мехтиев, Э. Х. Бурение скважин с очисткой забоя азрированными жидкостями / Э. Х. Мехтиев. – М. : Недра, 1980. – 113 с.

Приложение 1. Акт внедрения методики ООО «Интес»



Общество с ограниченной ответственностью
«Инженерный Технологический Сервис»

628600, Россия, ХМАО-ЮГРА, Тюменская обл., г. Нижневартовск, ул. Кузоваткина д.5, строение 2.
ИНН 8603170350, КПП 860301001
Тел./ факс: (8-3466)491054; 491053; e-mail: info.nv@intes-llc.com



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ИНТЕС»

А.В. Петров

АКТ

внедрения модифицированной методики расчета воздухообеспечения скважин при проведении опытно-промышленных работ ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом интервалов под направления и кондукторы на эксплуатационных и геологоразведочных скважинах Куюмбинского нефтяного месторождения

Комиссия в составе генерального директора Петрова А.В., технического директора ООО «ИНТЕС» Пестова А.С. рассмотрела НИР аспиранта отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета Бузанова К.В. «Исследование и совершенствование технологии безаварийного бурения интервалов разведочно – эксплуатационных скважин под направления и кондукторы на месторождениях Восточно – Сибирского региона (на примере Куюмбинского нефтяного месторождения)», выполненную под руководством к.т.н. Боярко Ю.Л.

Модифицированная методика расчета воздухообеспечения, изложенная в научно – исследовательской работе, позволяет на стадии проектирования производить расчет оптимальных режимных параметров, а также выбирать необходимое технологическое оборудование. Результаты НИР были использованы при проектировании программы на бурение интервалов под направление и кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения при проведении опытно-промышленных работ по ударно-вращательному бурению с очисткой забоя воздухом указанных интервалов.

Технический директор ООО «ИНТЕС»

/ А.С. Пестов /

Приложение 2. Акт передачи модифицированной методики ООО «Коралайна Инжиниринг»



Общество с ограниченной ответственностью
«Коралайна Инжиниринг»
 Посланников пер., д. 5, стр. 1, Москва, 105005
 тел./факс: +7(495) 232-1002/03
 e-mail: info@coralina.ru, www.coralina.ru
 ОКПО 73840067 ОГРН 1047796550471
 ИНН/КПП 7702533250/770101001

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
 ООО «Коралайна Инжиниринг»



А.В. Чудновец

АКТ

передачи модифицированной методики расчета воздухообеспечения циркуляционной системы при проведении буровых работ на скважинах Куюмбинского нефтяного месторождения с целью проведения дальнейших испытаний

Комиссия в составе генерального директора А.В. Чудновеца, руководителя отдела бурового оборудования А.А. Лаврова составили настоящий акт о нижеследующем.

Бузановым К.В., аспирантом отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета выполнена НИР на тему «Исследование и совершенствование технологии безаварийного бурения интервалов разведочно – эксплуатационных скважин под направления и кондукторы на месторождениях Восточно – Сибирского региона (на примере Куюмбинского нефтяного месторождения)» под руководством к.т.н. Боярко Ю.Л. Выполненные в рамках указанной НИР Бузановым К.В. модификации методики воздухообеспечения циркуляционной системы при бурении с очисткой забоя воздухом имеют важное теоретическое и практическое значение для реализации процесса ударно–вращательного бурения интервалов под направления и кондукторы на эксплуатационных и геологоразведочных скважинах Куюмбинского нефтяного месторождения. Результаты проведенных исследований Бузанова К.В. приняты ООО «Коралайна Инжиниринг» для проведения дальнейших производственных испытаний.

Руководитель отдела бурового оборудования
 ООО «Коралайна Инжиниринг»

А.А. Лавров

Приложение 3. Заключение ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



ПАО «ГАЗПРОМ»

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ»**
(ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Заместителю генерального
директора – главному геологу
ООО «Газпром добыча Ноябрьск»
А.В. Колмакову

а/я 130, Москва, Российская Федерация, 115583
Тел.: (498) 657-42-08, факс: (498) 657-88-08
vniigaz@vniigaz.gazprom.ru, http://www.vniigaz.gazprom.ru
ОКПО 31323949, ОГРН 1025000851598, ИНН/КПП 5003028155/500301001
10 ФЕВ 2016 № 1-10/966
на № _____ от _____

факс: (3496) 36-85-14

*О применении технологии
пневмоударного бурения*

Уважаемый Алексей Владиславович!

Ознакомившись с Вашим предложением (письмо №45/9597-03 от 10.11.2015) об оптимизации технологии строительства скважин и проведя анализ строительства скважин при бурении на депрессии, отмечаем значительную перспективу применения технологии пневмоударного бурения с продувкой ствола газо-жидкостной смесью. Считаем возможным применение данной технологии в рамках проведения опытно-промышленных работ на скважинах одного из кустов Чаяндынского НГКМ при согласовании с Управлением 307/3 (Д.Г. Бельский). Бурение на стадии опережающего строительства проводить в интервале кондуктора с мобильной буровой установки.

ООО «Газпром ВНИИГАЗ» готов принять участие в разработке технических требований и корректировке проекта на строительство эксплуатационных скважин Чаяндынского НГКМ, а также провести предварительную оценку экономической эффективности применения технологии пневмоударного бурения.

**Заместитель Генерального
директора по науке**

А.Е. Рыжов

А.В. Сутырин
(700) 5-61-66