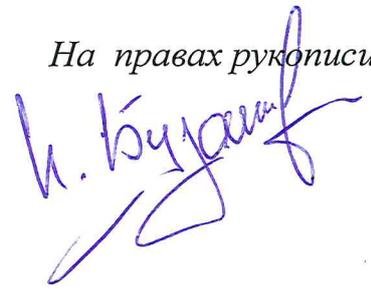


*На правах рукописи*

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

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на отделении нефтегазового дела

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Боярко Юрий Леонтьевич**

**Официальные оппоненты:**

**Горшков Лев Капитонович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» (ВКА им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург), профессор кафедры теоретической механики и теории механизмов и машин, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

**Пушмин Павел Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ, г. Иркутск), доцент кафедры нефтегазового дела.

**Ведущая организация:**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ, г. Красноярск).

Защита диссертации состоится 18 декабря 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, дом 30 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
к.г.-м.н.



Л.В. Жорняк

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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 кондукторы 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 горных 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 низкопроницаемых продуктивных сланцевых пластов углеводородов. Необходимо заметить, что проходка скважин с очисткой забоя воздухом может осуществляться как при реализации ударно-вращательного способа бурения скважин, так и при вращательном бурении 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 увеличения 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 при бурении с воздухом оптимальной зависимости для вычисления коэффициента аэродинамического трения и новых показателей процесса бурения (объемной доли продуктов разрушения забоя, предела допустимой массовой концентрации шлама) разработать рациональную технологию бурения под направление и кондуктор, позволяющую решать задачу предотвращения разрыва горных пород и катастрофического поглощения рабочего агента.

**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.

#### **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 проходки скважин на Куюмбинском нефтяном месторождении.

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 Куюмбинском 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 Куюмбинском 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 Куюмбинском 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 расхода 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 Курумбинском месторождении.

2. Модифицированная методика расчета воздухообеспечения скважин была использована 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 страниц 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 «Русь 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.

## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

**ПОЛОЖЕНИЕ 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 установленной оптимальной зависимости для вычисления коэффициента аэродинамического трения, обеспечивающей объективное отражение технологического процесса углубки скважины.**

В настоящее время при проектировании разведочных и эксплуатационных скважин используется ряд методик расчета требуемого воздухообеспечения и определения параметров компрессорного оборудования для реализации бурения с очисткой забоя воздухом. Самой адаптированной к применению в производстве является методика, разработанная Б.Б. Кудряшовым, 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, 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 воздухообмена скважины при проектировании повышенных расходов очистного агента.

А.С. Бронзов, Б.Б. Кудряшов и А.И. Кирсанов 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 м<sup>3</sup>/час);
2. Средние – 8,5 – 10 л/мин (0,5 – 0,6 м<sup>3</sup>/час);
3. Сильные – 120 л/мин (1,2 м<sup>3</sup>/час).

Он рекомендует при наличии средних водопритоков отказываться от использования воздуха.

Б.Б. Кудряшов в своих исследованиях говорит 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.

Более поздние результаты исследований Я.Ю. Ахмедова, В.А. Вареника, Р.С. Газаряна и Х.И. Иосифова 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 как:

$$w = w_0 + aB,$$

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

Основные выводы этого исследования:

1. Для шлама горных пород существует предельная весовая влажность, при которой начинается образование сальника. Величина этой влажности для тонких (менее 0,25 мм) фракций составляет 10 – 14% от веса и увеличивается до 19 – 24% для частиц размером 3 мм. Литологическая характеристика шлама мало влияет на величину предельной влажности, однако, наименьшую предельную влажность имеют глины.

2. Увеличение влажности шлама приводит к существенному росту скорости витания частиц тонких фракций, особенно, для 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 м<sup>3</sup>/час, давлении 0,6 – 0,7 МПа при подаче воздуха 10,5 – 12 м<sup>3</sup>/мин. Положительный эффект в борьбе с сальникообразованиями дают разовые доливы воды в скважину (60 – 100 л/мин). В случае же бурения в присутствии водопритока 0,4 – 5,4 м<sup>3</sup>/час образование сальников не наблюдается, ввиду проявления характерных признаков бурения с эрлифтом.

При прохождении зон средних водопритоков в процессе строительства геологоразведочных 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 (отсутствие технической воды, необходимость получения высокого выхода керна и т.д.).

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.

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 удастся более чем на 70 м ниже статического уровня жидкости в скважине. Приведенный тезис в полной мере раскрывает причины торможения развития технологии очистки забоя воздухом, в том числе, для реализации ударно-вращательного бурения.

С конца прошлого века в странах США, Канаде, Австралии, Китае активно разрабатываются направления деятельности по увеличению эффективности ударно-вращательного бурения:

1. Повышение рабочего давления воздуха до 8 МПа и более, создание дожимных компрессоров, новых конструкций буровых станков и пневмоударников;
2. Создание пневмоударников с повышенными энергетическими параметрами и ресурсом работы.

На сегодняшний день, оба направления отработаны достаточно успешно.

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 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, посвященной основам расчета гидродинамических параметров при движении несущей среды с монодисперсными частицами в вертикальных трубах:

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

где  $v_g$  – кинематическая вязкость несущего потока воздуха, Па·с;  $\mu_v$  – 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, Па·с. 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 для целей расчета

аэродинамических сопротивлений рекомендует использовать формулу Веймаута в случае применения труб с ниппельным соединением:

$$\lambda_1 = \frac{0,009407}{\sqrt[3]{D_{\text{эф}}}}, \quad (2)$$

для труб с муфтово-замковыми соединениями – формулу Лобаева:

$$\lambda_2 = \frac{1,42}{\left[\left(\frac{D_{\text{эф}}}{e}\right) \cdot \lg(N_R)\right]}, \quad (3)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты аэродинамического трения;  $D_{\text{эф}}$  – эффективный диаметр канала, м;  $e$  – шероховатость канала, м;  $N_R$  – число Рейнольдса; 0,009407 и 1,42 – эмпирические коэффициенты, характеризующие условия проведения эксперимента.

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

$$f = \left( \frac{1}{-1,8 \cdot \lg \left( \left( \frac{e}{3,7 \cdot D_{\text{эф}}} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{N_R} \right)} \right)^2, \quad (4)$$

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

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

$$\lambda_3 = 0,067 \cdot \left( 2 \cdot \frac{e}{D_{\text{эф}}} + \frac{158}{N_R} \right)^{0,2}, \quad (5)$$

и формулу А.Д. Альтштуля:

$$\lambda_4 = 0,11 \cdot \left( \frac{e}{D_{\text{эф}}} + \frac{68}{N_R} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где  $\lambda_3, \lambda_4$  – коэффициенты аэродинамического трения.

На основе каждой отдельной зависимости по определению коэффициента аэродинамического трения нами была разработана математическая модель для расчета требуемого давления на компрессоре. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – 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				
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$f$
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

Методологически за основу была взята методика Б.Б. Кудряшова. Число Рейнольдса определялось по известной формуле с учетом дополнений при вычислении кинематической вязкости (см. формулу 1). При этом учтена шероховатость канала движения, равная 0,0001524 м, при обсаженном затрубном пространстве. В случае необсаженного ствола шероховатость горной породы была принята равной 0,003048 м в соответствии с результатами исследований William C. Lyons., Boyun Guo, Reuben L. Graham.

Подача воздуха была принята равной 76 м<sup>3</sup>/мин, объемная концентрация водопритока в потоке воздуха принята в соответствии с геологическими условиями Куюмбинского месторождения и равна 2,8·10<sup>-3</sup>, объемная концентрация горной породы – 1,34·10<sup>-4</sup>. 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  $\lambda_2$  (см. формулу 3) для определения коэффициента аэродинамического трения дает нерелевантный результат при определении расчетного рабочего давления на компрессоре.

На геологоразведочных и эксплуатационных скважинах Куюмбинского месторождения были проведены экспериментальные исследования при ударно-вращательном бурении интервалов под направления и кондукторы с очисткой забоя воздухом. Производственные мощности для проведения эксперимента были представлены следующим оборудованием:

- Буровая установка COOPER LTO-550 г/п – 100 тнс;
- 3 компрессора SULLAIR Combo1150XHH/1350XHDL с развиваемой общей подачей воздуха до 96 м<sup>3</sup>/мин и рабочим давлением 3,5 МПа;
- Блок дозировочный для бурения на воздухе;
- Дивертор 1300 Series Rotaring Control Heads;
- Ротор механический 17RT005;
- Вертлюг буровой «King Oil Tools» 10 MB;
- Передвижная воздухонагревательная установка;
- Дизельгенераторные станции GEN 275 Perkins;
- Дизельгенераторная станция ДЭС 110кВА Olympian;
- Дожимной компрессор HURRICANE B15-62/2175.

Проходка скважины осуществлялась с использованием определенного набора компоновки низа бурильной колонны (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 СПО. Результаты опытно-промышленных работ на скважине № 401 Куюмбинского месторождения приведены в таблице 2.

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 м<sup>3</sup>/мин, на скважине возникла ситуация прихвата КНБК.

Таблица 2 – Характеристика процесса углубления интервала под кондуктор скважины № 401 Куюмбинского месторождения

Интервал скважины, м	Нагрузка на долото ( $W_{\text{дол}}$ ), кН	Частота вращения долота (n), об/мин	Подача воздуха ( $Q_{\text{возд}}$ ), м <sup>3</sup> /мин	Давление на компрессоре ( $P_{\text{комп}}$ ), МПа	Механическая скорость бурения ( $V_{\text{мех}}$ ), м/ч	Время проходки ( $t_{\text{бур}}$ ), 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

Далее был проведен анализ методики Б.Б. Кудряшова для горно-геологических условий, конструкций скважин Куюмбинского месторождения при повышенных расходах воздуха 166 м<sup>3</sup>/мин и 216 м<sup>3</sup>/мин и транспортировании различных продуктов разрушения забоя. Проектный забой кондуктора был принят равным 550 м. Значения расходов воздуха были получены с учетом основных положений пневмотранспорта по требуемой скорости витания частиц дисперсной фазы и транспортной скорости потока в затрубном пространстве, соответственно. 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 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты расчета ожидаемого рабочего давления на компрессоре при расходе воздуха равном 166 м<sup>3</sup>/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				
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$f$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$f$
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

Механическая скорость бурения принята 30 м/ч, объемная концентрация горной породы  $3,6 \cdot 10^{-4}$ , объемная концентрация водопритока равна  $6,14 \cdot 10^{-3}$ . Максимальная разница между расчетными давлениями равна 0,32 МПа при определении коэффициента трения по формулам Лобаева и Хэйланда.

Таблица 4 – Результаты расчета ожидаемого рабочего давления на компрессоре при расходе воздуха равном 216 м<sup>3</sup>/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				
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$f$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$f$
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 –  $2,83 \cdot 10^{-4}$ , объемная концентрация водопритока равна  $7,97 \cdot 10^{-3}$ . 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 методики расчета воздухообеспечения в существующем виде, для условий бурения скважин на Куюмбинском месторождении, равны 1,57 МПа и 1,55 МПа (см. формулы 2 и 3) против полученного экспериментально 1,7 МПа. 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  $0,15 \div 0,2$  МПа.

2. Расчетное давление на компрессоре, полученное с использованием зависимости Хэйланда (см. формулу 4), для глубины 94 м составило 1,66 МПа против фактического 1,7 МПа. 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 м<sup>3</sup>/мин и 216 м<sup>3</sup>/мин расчетное рабочее давление на компрессоре составило 3,313 МПа и 4,225 МПа при использовании существующей методики расчета воздухообеспечения Б.Б. Кудряшова. В результате применения зависимости Хэйланда были получены значения 3,629 МПа и 4,654 МПа, соответственно. Следовательно, с увеличением расхода воздуха

существенно возрастает влияние модификации методики расчета рабочего давления на компрессоре на конечный результат.

**ПОЛОЖЕНИЕ 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.

Анализ результатов производственного эксперимента на скважине № 401 показывает существенное влияние величины роста  $P_{\text{комп}}$  ( $0,15 \div 0,2$  МПа) на стабильность технологического процесса ударно-вращательного бурения с очисткой забоя воздухом для конкретного набора КБТ и условий ведения буровых работ на Куюмбинском нефтяном месторождении. Причиной, вызвавшей рост давления, является закупорка кольцевого пространства выбуренной породой вследствие резкого возрастания массы транспортируемых продуктов разрушения забоя вследствие повышения  $V_{\text{мех}}$  и  $W_{\text{дол}}$  при постоянном значении  $Q_{\text{возд}}$ . Содержание продуктов разрушения забоя в потоке очистного агента в соответствии с методикой Б.Б. Кудряшова оценивается следующими соотношениями:

$$\mu = G_{\text{п}}/G, \quad (7)$$

$$G = \frac{Q \cdot p_o}{R \cdot T}, \quad (8)$$

$$G_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{бк}}^2 \cdot \rho \cdot V_{\text{мех}}}{4}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – расходная массовая концентрация шлама в потоке воздуха;  $G_{\text{п}}$  – удельная масса выносимой горной породы, кг/с;  $G$  – массовый расход воздуха, нагнетаемого в скважину, кг/с;  $Q$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $p_o$  – атмосферное давление, Па;  $R$  – газовая постоянная воздуха, Дж/кг×°К;  $T$  – средняя температура воздуха в скважине, К;  $D_{\text{бк}}$  – диаметр формируемого ствола скважины, м;  $\rho$  – средняя плотность горных пород, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{мех}}$  – планируемая механическая скорость бурения интервала под направление, м/с.

В результате обработки экспериментальных данных выявлен факт увеличения показателя расходной массовой концентрации (далее РМК) продуктов разрушения забоя в потоке воздуха с 2 до 3,15 при увеличении  $V_{\text{мех}}$  от 10 м/ч до 30 м/ч и  $Q_{\text{возд}} = 76$  м<sup>3</sup>/мин. При этом через 1 час ведения работ по углублению в таких условиях был получен уже упомянутый рост давления, послуживший первым признаком прихвата/прижога КНБК.

Далее была проведена оценка влияния повышения РМК на значение  $P_{\text{комп}}$  на основе методики Б.Б. Кудряшова с использованием коэффициентов аэродинамического трения Веймаута и Хэйланда (см. формулы 2, 6). Результаты проведенных исследований приведены в таблице 5.

Подача воздуха была принята равной 76 м<sup>3</sup>/мин. Моделирование расчетного давления при бурении под кондуктор произведено для глубин 94 и 118 м. До глубины 94 м механическая скорость бурения составила 10 м/ч, а значение РМК – 2,02. Интервал 94 – 118 м пройден с механической скоростью 30 м/ч и значением расходной массовой концентрацией шлама в потоке воздуха равном 3,15.

Таблица 5 – Сравнительная оценка расчетных давлений на компрессоре на основе методики расчета воздухообеспечения Б.Б. Кудряшова при механических скоростях бурения 10 м/ч и 30 м/ч

Показатели технологического процесса при бурении скважин	Значения технологических показателей при использовании коэффициента аэродинамического трения, полученные по формулам:			
	зависимость Веймаута		зависимость Хэйланда	
Интервал бурения, м	35 – 94	94 – 118	35 – 94	94 – 118
Механическая скорость бурения, м/ч	10	30	10	30
Давление на выкидной линии, МПа	0,1037	0,1037	0,1054	0,1054
Давление на забое направления (35 м) МПа	0,1041	0,1041	0,1061	0,1061
Давление при бурении под кондуктор, МПа	0,1042	0,1043	0,1087	0,1089
Давление на компрессоре, МПа	1,577	1,596	1,66	1,692

Сравнительный анализ полученных 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. Для формулирования критериальной оценки РМК шлама в несущем потоке очистного агента рассмотрим результаты опытно-промышленных работ на скважинах №№ 404, 405 и водозаборной скважине № 1, приведённые в таблицах 6, 7 и 8, соответственно.

Таблица 6 – 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 <sup>3</sup> /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

Значение показателя РМК шлама в потоке воздуха составило 1,86. Время чистого бурения при этом – 8,5 часов, время продувки без бурения – 2 часа. Наблюдались стабильные условия процесса бурения.

Таблица 7 – 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 <sup>3</sup> /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

Значение показателя РМК шлама в потоке воздуха составило 2,04. Время чистого бурения при этом – 6 часов, время продувки без бурения – 2 часа. Наблюдались стабильные условия процесса бурения.

На рисунке 1 приведена зависимость величины расходной массовой концентрации шлама от механической скорости бурения при подаче воздуха 76 м<sup>3</sup>/мин. 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 м<sup>3</sup>/мин.

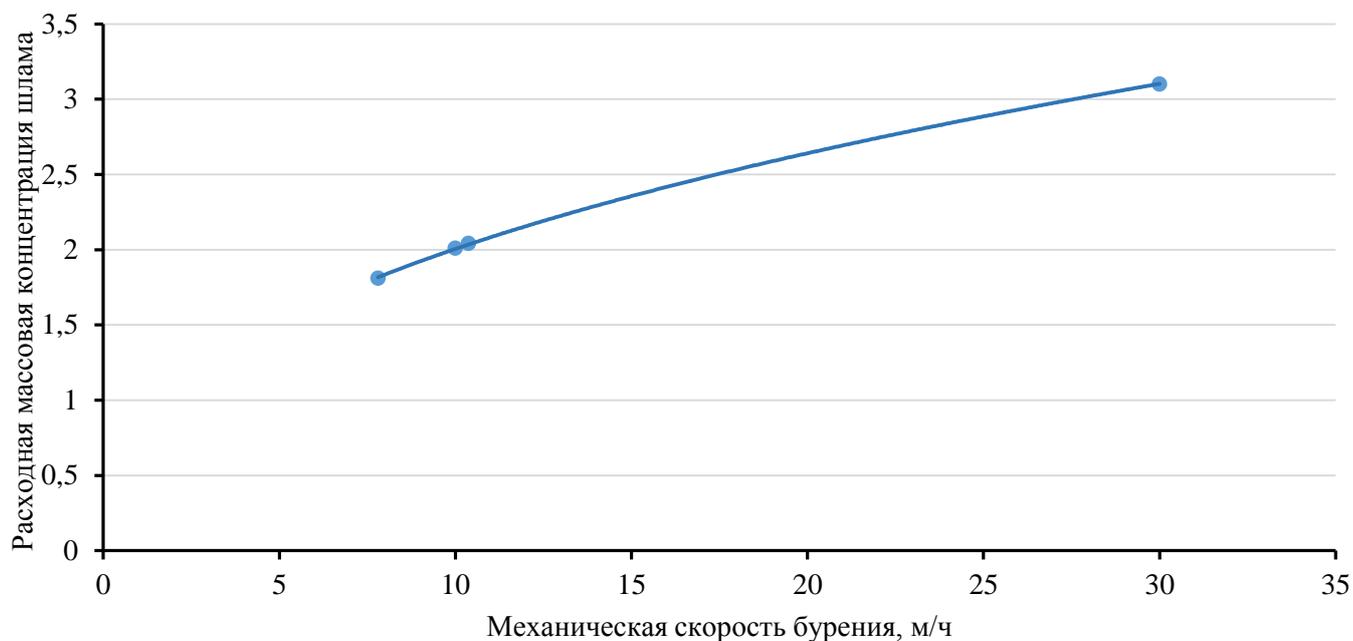


Рис. 1 – Зависимость влияния механической скорости бурения интервала под кондуктор скважин №№ 401, 404, 405 на величину показателя РМК

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 с очисткой забоя воздухом в условиях бурения Куюмбинского нефтяного месторождения. На рисунке 2 приведен график регулирования механической скорости бурения и величины расхода очистного агента на основании критерия РМК на примере скважины № 401 Куюмбинского месторождения.

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.

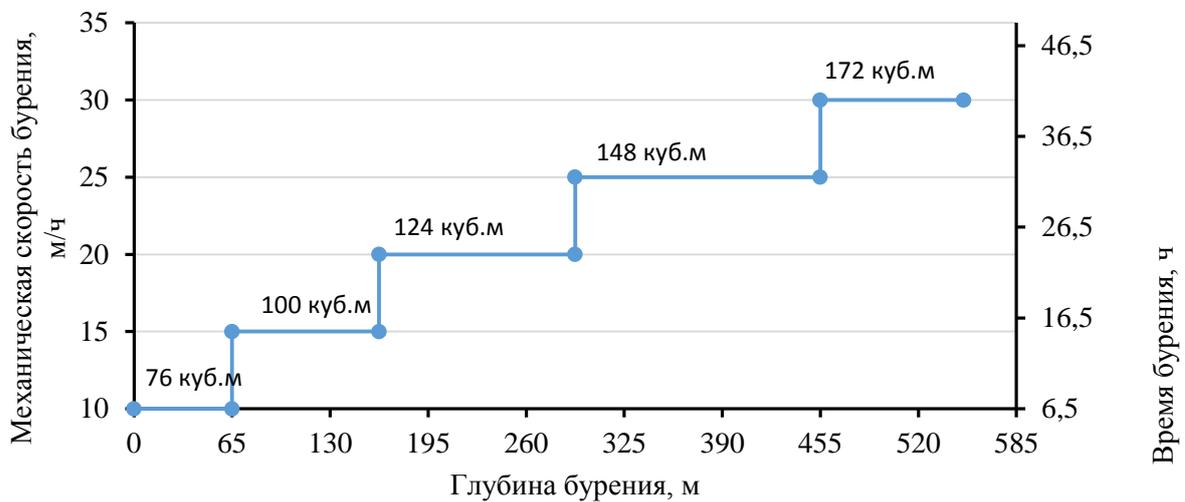


Рис. 2 – График для регулирования  $V_{\text{мех}}$  и  $Q_{\text{возд}}$  в процессе проходки интервала под кондуктор на скважине № 401 Куюмбинского месторождения

**ПОЛОЖЕНИЕ 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.

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 грифом.

М.Н. Климентов, В.И. Тиль и А.С. Бронзов в своих исследованиях отмечают факты бурения геолого-разведочных скважин с очисткой забоя воздухом в отсутствие выноса шлама. Уход шлама в пласт 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.

Ниже приведена зависимость для расчета требуемого расхода воздуха, предлагаемая в методике Б.Б. Кудряшова:

$$Q_{\text{возд}} = \left( K \cdot K_1 \cdot \frac{\pi(D_{\text{бк}}^2 - d_u^2)}{4} \right) \cdot V, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{возд}}$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $K$  – 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;  $D_{\text{бк}}$  – диаметр скважины с учетом его увеличения вследствие разработки, м;  $d_u$  – диаметр бурительных труб, м.

В таблицах 9, 10 приведены градиенты давлений для исследуемого интервала скважины Куюмбинского нефтяного месторождения и, соответственно, условия возникновения поглощений бурового раствора.

Таблица 9 – Градиенты давлений в интервалах под направление и 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 интервалах под направление и кондуктор на скважинах Куюмбинского месторождения

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

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 кондукторы 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 и техническими возможностями регулирования рабочей характеристики дожимного компрессора HURRICANE B15-62/2175. 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.

Результатом модификации указанной методики расчета воздухопоснабжения с учетом динамической картины в системе «скважина – пласт» является сформулированная научно-методическая основа для проектирования приращения рабочего аэродинамического давления и расхода воздуха. Итоги расчета по модифицированной методике приведены в таблице 11 и на рисунке 3.

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

Таблица 11 – 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 <sup>3</sup> /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

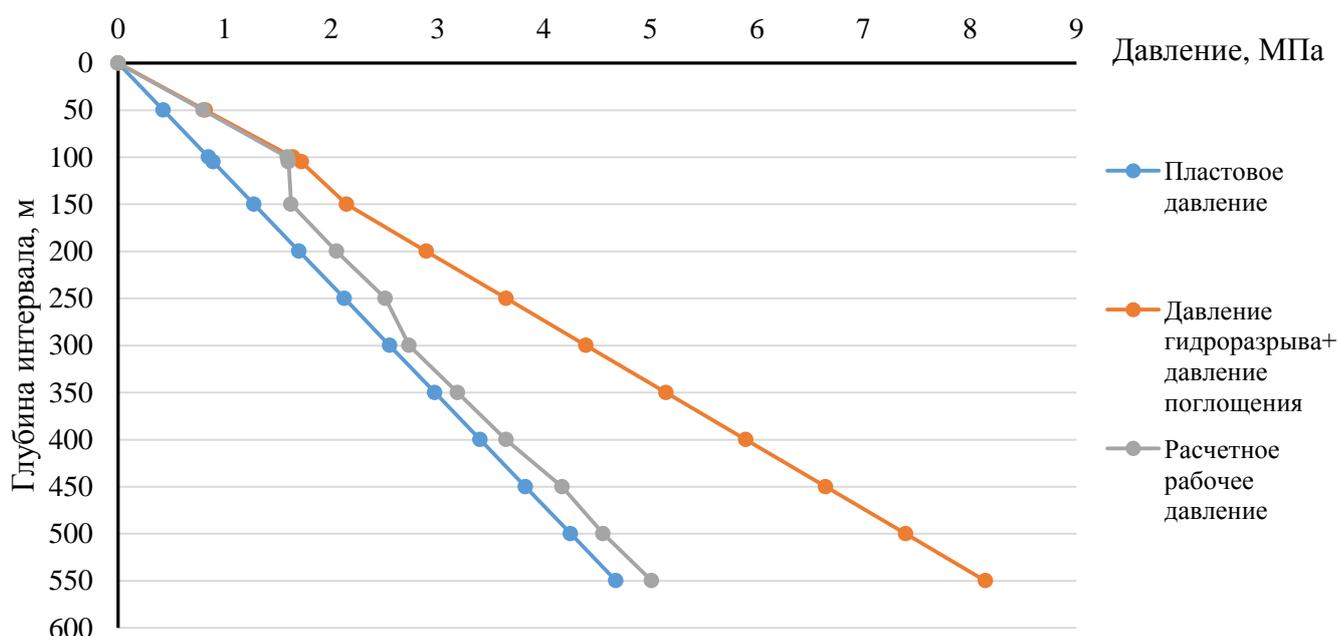


Рис. 3 – Зависимость давления (пластовое, разрыва, расчетное рабочее) от глубины скважины с учетом приращения  $P_{\text{раб}}$  при бурении под кондуктор на Куюмбинском месторождении

До глубины 105 метров расчетное рабочее давление практически равно давлению разрыва пород. Это связано с отсутствием рисков поглощения очистного агента в данном интервале, а также особенностями геологического строения пород Ордовикских отложений.

В качестве эксперимента, с применением технологии очистки забоя воздухом на скважинах Куюмбинского нефтяного месторождения было пробурено 3 интервала под кондуктор и 1 водозаборная скважина. Применение данного технологического подхода и положений диссертационной работы обеспечило эффективную проходку высокоаварийных интервалов с сокращением используемых материальных ресурсов и срока строительства секции кондуктора.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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 воздухообеспечения, 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:*

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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

*Статьи в журналах, рецензируемых в международных базах данных Scopus*

6. 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>
7. 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>.

*Статьи в прочих изданиях*

8. Бузанов, К.В. Разработка технологии борьбы с катастрофическими поглощениями при бурении под кондуктор на Дулисьминском нефтегазоконденсатном месторождении на основе применения газообразного промывочного агента / К.В. Бузанов, Г.Г. Синебрюхов,

К.И. Борисов // Материалы VII Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – Пермь, 2014. – С.95 – 99.

9. 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.

10. Бузанов, К.В. Оптимизация технологии бурения интервалов под направления 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.157 – 164.

11. 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.

12. 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.

13. Бузанов, К.В. Оптимизация технологии сооружения секций направления и кондуктора при строительстве скважин на месторождениях, относящихся к якутскому центру газодобычи / К.В. Бузанов // Тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (нефть, газ и энергетика). – ПАО «Газпром», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – Москва, 20 – 23 октября 2015. – С. 118.

14. Buzanov, K.V. Development of technical and technological solutions for surface casing drilling in Dulisminskoye oilfield (Irkutsk region) / K.V. Buzanov, K.I. Borisov, O.S. Uljanova // Problems of geology and Subsurface Development: Proceedings of the 19th International Scientific Symposium of students, postgraduates and young Scientists M.A. Usova. – Tomsk, 2015. – P. 787 – 789.

15. Бузанов, К.В. Разработка методики расчета требуемого давления на компрессоре при бурении интервалов под направление с очисткой забоя воздухом для геологических условий Дулисьминского месторождения / К.В. Бузанов, Ю.Л. Боярко, Л.Н. Нечаева. // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеологии Евразии: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Томск, 2015. – С. 567 – 575.

16. Бузанов, К.В. Анализ и итоги опережающего строительства вертикальных секций скважин на Курумбинском 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.

17. Бузанов, К.В. Оптимизация технологии сооружения секций направления и кондуктора при строительстве скважин на Чайядинском НГКМ / К.В. Бузанов, Л.Н. Нечаева // Бурение в осложненных условиях: Материалы Международной научно-практической конференции. – СПбГУ – СПб, «ЛЕМА», 20 – 23 октября 2016. – С. 14 – 15.