

На правах рукописи

Минаев Яков Денисович



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ
ПЛАСТОВ С АНОМАЛЬНО НИЗКИМИ ДАВЛЕНИЯМИ
ПРИ ОСВОЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Двойников Михаил Владимирович

Официальные оппоненты:

Хузина Лилия Булатовна

доктор технических наук, профессор, государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Альметьевский государственный технологический университет "Высшая школа нефти", кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, заведующий кафедрой;

Верисокин Александр Евгеньевич

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений факультета нефтегазовой инженерии, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

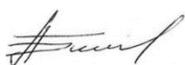
Защита диссертации состоится **01 июля 2025 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория №3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2025 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



БЛИНОВ

Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из основных проблем отечественной газовой отрасли на данный момент является истощение традиционных запасов газа и газового конденсата, сосредоточенных в крупных месторождениях севера Сибири. Новые месторождения, располагающиеся в Восточной Сибири и вводимые в разработку, отличаются сложными геологическими условиями, среди которых выделяются низкие естественные фильтрационно-емкостные характеристики и аномально-низкие пластовые давления (АНПД). Для повышения проницаемости разрабатываемых залежей активно применяют многостадийный гидроразрыв пласта (МГРП), позволяющий создать высокопроницаемую систему трещин для извлечения углеводородов. В условиях АНПД газовых и газоконденсатных месторождений особое внимание отводится технологии изоляции продуктивных пластов при их освоении. Использование традиционных способов проведения работ в рассматриваемых условиях приводит к невыходу скважин на режим вследствие снижения фильтрационно-емкостных характеристик пластов. Также повышается риск аварий ввиду поглощений технологической жидкости с последующими проявлениями пластовых флюидов.

Например, для продуктивных пластов Π_1 и Π_2 Парфеновского горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ) (коэффициент аномальности составляет от 0,7 до 0,9) процесс освоения предусматривает отработку скважины (отдувку газа) после проведения МГРП в течение месяца с целью удаления абразивного проппанта и остатков технологических жидкостей, а также проведения гидродинамических исследований (ГДИ). После проведения ГДИ с целью изоляции продуктивного пласта выполняется установка специализированного оборудования, представленного пакер-пробкой. Пакер-пробка спускается на гибких насосно-компрессорных трубах (ГНКТ), после спуска и активации пакер-пробки производится долив жидкости глушения до устья. Операция осуществляется через техническую колонну насосно-компрессорных труб (НКТ) с последующим её извлечением и спуском комплекса подземного оборудования

(КПО) для ввода скважины в эксплуатацию. Проведение данных мероприятий обеспечивает стабилизацию избыточного давления в скважине, что даёт возможность безопасного проведения работ на устье.

Анализ проведённых работ с установкой пакерующих устройств показывает низкую эффективность технологии, что обусловлено сложностью в обеспечении герметичности и надёжного разобщения в наклонном участке ствола работающей скважины с дебитом от 400 до 1500 тыс. м³/сут при устьевом давлении до 27 МПа. В дальнейшем это приводит к необходимости глушения скважины с катастрофическими поглощениями технологических жидкостей до 700 м³ при объеме скважины 120 м³, что снижает фильтрационно-емкостные характеристики пластов. Установлено, что глушение скважин с применением калий-хлористых растворов приводит к ухудшению производительности скважин от 67 до 91 % относительно результатов ГДИ.

В этой связи тема диссертации, посвящённая обоснованию и разработке новой технологии изоляции газовых и газоконденсатных пластов с АНПД, основанных на создании газо- и гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт за счёт оперативного контроля и управления забойным и устьевым давлениями в процессе закачки технологических жидкостей, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Проблемой освоения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД занимались многие отечественные и зарубежные учёные: Аммян В.А., Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Глушенко В.Н., Зозуля Г.П., Кустышев А.В., Мардашов Д.В., Нифантов В.И., Рябонь С.А., Тагиров К.М., Телин А.Г., Al-Sharji Н.Н., Atkinson G., Bridges K.L., Caenn R., Chesser B.G., Dyke G.G., Jia H., Leerlooijer K., Maly G.P., Skauge A., van Velzen J.F.G., Wojtanowicz и другие. Достаточно подробно изучен механизм повреждения пласта-коллектора при глушении. Для разных горно-геологических условий специалистами разработаны и внедрены рецептуры блокирующих составов, позволяющих изолировать продуктивный пласт и обеспечить его надёжную защиту. Однако проектированию гидравлической про-

граммы, контролю давления в системе скважина-пласт и технологическим методам обеспечения надёжного глушения в условиях АНПД посвящено ограниченное число научных трудов.

Объект исследования - процесс освоения горизонтальных газовых и газоконденсатных скважин с АНПД.

Предмет исследования - одно- и двухфазные режимы течения технологических жидкостей, газа и газового конденсата в скважинах с АНПД.

Цель работы – повышение качества освоения горизонтальных газовых и газоконденсатных скважин за счёт применения технологии изоляции продуктивных пластов с АНПД.

Идея заключается в создании и поддержании газо- и гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт за счёт контроля сплошности закачиваемых технологических жидкостей, использовании возникающего при подъеме ГНКТ разрежения и компенсации скачков давления дросселированием на устье.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проанализировать и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации. Выделить факторы, определяющие забойное давление в газовой скважине при глушении и методы их контроля.

2. Составить математическое описание механизма формирования забойного давления при глушении газовых и газоконденсатных скважин для поддержания газо- и гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт. Получить математические зависимости, описывающие неустановившийся режим течения технологических жидкостей при закачивании в интервал продуктивных пластов с АНПД. Разработать экспериментальный стенд для изучения сплошности потока при различных условиях. Разработать математическую модель глушения газовых и газоконденсатных скважин в условиях АНПД.

3. Провести экспериментальные исследования. Сопоставить полученные результаты с теоретическими. Провести вычислительные эксперименты для скважинных условий. Верифицировать разра-

ботанные математические модели на промысловых данных. Определить удельное влияние факторов на эффективность глушения, их оптимальный диапазон и алгоритм вычисления в произвольный момент времени.

4. На основе выведенных теоретических положений, верифицированных на практическом опыте, разработать и обосновать технологию изоляции продуктивного пласта для освоения газовых и газоконденсатных скважин в условиях АНПД.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность создания газо- и гидродинамического равновесия в системе «горизонтальный ствол скважины – призабойная зона пласта», на основе контроля сплошности прокачиваемых технологических жидкостей, позволяющего обеспечить минимальное воздействие избыточного давления при освоении скважин с АНПД.

2. Разработанный алгоритм выполнения процесса освоения скважины, основанный на контроле и управлении напорным и безнапорным режимами течения жидкостей и компенсации поршневых эффектов в процессе замещения газа с учётом термобарических условий, включает в себя математические модели, позволяющие определить режимы глушения горизонтальной скважины с АНПД.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин по пунктам:

7. «Физико-химические процессы в объёме технологических жидкостей. Составы, свойства и технологии применения технологических жидкостей, химических реагентов для бурения и освоения скважин. Фильтрационные процессы в скважине»;

10. «Моделирование, автоматизация и роботизация процессов бурения и освоения скважин, включая ремонтно-восстановительные работы, предупреждение и ликвидацию осложнений».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Научно обоснован механизм создания газо- и гидродинамического равновесия в интервале вскрытия продуктивного пласта

горизонтальным стволом скважины с учётом термобарических условий, составлено математическое описание процесса освоения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД.

2. Разработана технология изоляции газовых и газоконденсатных пластов с АНПД.

3. Разработана методика определения оптимальных параметров закачки технологических жидкостей при освоении газовых скважин с АНПД на основе газо- и гидродинамического равновесия.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность ООО «ВЭЛ ИНЖИНИРИНГ» (акт внедрения от 14.03.2025).

Методология и методы исследования. Изучение неустановившихся режимов и двухфазных течений в условиях газовых и газоконденсатных скважин с АНПД. Экспериментальное исследование и математическое моделирование изучаемых процессов, проведение вычислительных экспериментов и анализ графических и числовых результатов. Использование качественных и количественных методов, в том числе система теоретических, эмпирических методов с включением механистического (численного) моделирования. Оценка результатов исследований и достоверность осуществляется с использованием дисперсионного и регрессионно-корреляционного анализа.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Контроль и управление газо- и гидродинамическим равновесием в интервале вскрытия продуктивного пласта горизонтальным стволом скважины обеспечиваются безнапорным режимом течения за счёт создания разрежения в нагнетательной линии ниже давления насыщенных паров технологической жидкости и позволяют избежать поглощений при освоении скважин с АНПД.

2. Разработанная технология изоляции горизонтального участка, основанная на поддержании газо- и гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт за счёт регулирования сплошности потока закачиваемой технологической жидкости, компенсации поршневых эффектов при спуске и подъеме инструмента снижением устьевого и нагнетаемого давлений, обеспечивает повышение эффективности освоения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью, оценкой полученных данных методами математической статистики; применением современного оборудования и средств измерения, а также апробацией полученных результатов на международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов диссертации проведена на 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (15-16 ноября 2022, г. Санкт-Петербург); Региональная научно-техническая конференция молодых специалистов ООО «РН-Сервис» (14 марта 2023, г. Самара); Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (22-25 мая 2023, г. Тюмень); V Международная научно-практическая конференция «Инновации для повышения эффективности сопровождения нефтегазовых активов» (18-20 октября 2023 года, г. Пермь); IX Международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (20 декабря 2024 года, г. Альметьевск).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; математическом описании механизма формирования забойного давления и получении математических зависимостей, описывающих неустановившийся поток технологических жидкостей при закачивании в скважину с АНПД; разработке экспериментального стенда; проведении лабораторных и численных экспериментов; разработке методики проектирования изоляции газовых и газоконденсатных пластов; разработке способа глушения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 107 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 22 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю, д.т.н., профессору Двойникову Михаилу Владимировичу за неоценимую помощь в работе, наставления и поддержку; к.т.н., Ламосову Михаилу Евгеньевичу, к.х.н., Камбулову Евгению Юрьевичу, к.т.н., Кузнецовой Наталье Юрьевне за помощь, консультации и ценные указания, а также коллективам кафедры Бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и центра компетенций в области техники и технологий освоения месторождений в Арктических условиях за содействие при проведении диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

В первой главе представлен анализ проблем, возникающих при глушении газовых и газоконденсатных скважин с АНПД. Описаны процессы, характерные для закачки технологических жидкостей в скважины с недостатком пластовой энергии. Проанализированы и обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации. Выделены

факторы, определяющие забойное давление в газовой скважине при глушении и методы их контроля.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе составлено математическое описание физического механизма формирования забойного давления при глушении газовых и газоконденсатных скважин, установления и поддержания гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт. Получены математические зависимости, описывающие состояние потока технологических жидкостей при закачивании в интервал продуктивных пластов с АНПД. Разработан экспериментальный стенд для изучения сплошности потока при различных условиях. Разработана математическая модель глушения газовых и газоконденсатных скважин в условиях АНПД.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований. Произведена верификация полученных зависимостей, определяющих состояние потока. Произведено моделирование операций по глушению скважин для нескольких характерных случаев. Полученные в выведенных моделях результаты сопоставлены с промысловыми данными. Определено качество полученных математических моделей. Определено удельное влияние факторов на эффективность глушения, выделены их оптимальные диапазоны и механизм вычисления в произвольный момент времени.

В четвертой главе представлен разработанный на основе выведенных и верифицированных на практическом опыте теоретических положений способ глушения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД. С целью обоснования эффективности произведено математическое моделирование процесса. Также разработано программное обеспечение для проектирования работ и контроля операций.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Контроль и управление газо- и гидродинамическим равновесием в интервале вскрытия продуктивного пласта горизонтальным стволом скважины

обеспечиваются безнапорным режимом течения за счёт создания разрежения в нагнетательной линии ниже давления насыщенных паров технологической жидкости и позволяют избежать поглощений при освоении скважин с АНПД.

В ходе проведения анализа проблем, возникающих при глушении газовых скважин в условиях АНПД, было установлено, что процесс закачивания жидкости в трубное пространство в рассматриваемых условиях не подчиняется базовым зависимостям скважинной гидравлики ввиду нарушения сплошности потока. С целью подробного экспериментального изучения явления была разработана экспериментальная установка следующей конструкции (рисунок 1). Через насос 1 подаётся вода с максимальным расходом $Q = 19,7$ л/мин под давлением $P_n = 320$ кПа. Текущий расход в нагнетательной линии замеряется расходомером 2. Ниже расходомера на небольшом отдалении, выполненном из прозрачной трубы диаметром 20 мм, расположен кран 3, позволяющий регулировать расход в установке. За краном расположен манометр 4. Нагнетательная линия от манометра до приёмной ёмкости-баллона 9 соединена прозрачной трубой диаметром 20 мм и длиной $H_{тр} = 1,8$ м. В верхнюю часть приёмной ёмкости-баллона подаётся воздух под давлением до $P_{изб} = 800$ кПа от компрессора 6. Для регулирования подачи газа на линии установлен кран 5. Замер избыточного давления газа в приёмной ёмкости-баллоне замеряется манометром 7. Для спуска избыточного давления газа установлен кран 8. Отведение воды с установки осуществляется через сливную линию с краном 10.

На основе анализа литературных источников установлен следующий механизм разрыва потока технологической жидкости при закачивании в скважину с АНПД (рисунок 2А). Высота столба жидкости над избыточным давлением $H_ж$ в какой-то момент достигает критической высоты $H_{кр}$, при которой в нижней его точке давление равно избыточному давлению в скважине $P_{изб}$, а в верхней, на выходе из насоса, падает ниже давления насыщенных паров для технологической жидкости $P_{нас.пар.}$, вследствие чего начинается интенсивное парообразование – кавитационное расширение. Таким образом сплошность потока в трубном пространстве нарушается, он становится безнапорным. В идеальных условиях при 20 градусах

Цельсия давление насыщенных паров воды составляет 2,34 кПа, однако это значение в реальности больше ввиду наличия в технологической жидкости примесей и растворенного газа.

На экспериментальной установке процесс разрыва потока смоделирован следующим образом. Подачей жидкости при расходе 8 л/мин и атмосферном давлении в баллоне формируется напорный поток. Далее расход снижается до 0,9 л/мин, в верхней точке потока формируется разрежение. Наблюдается произвольное образование пузырьков по трубе с их последующей коагуляцией и всплытием в точку максимального разрежения (рисунок 2Б-2В). В точке максимального разрежения формируется единая газовая каверна, по которой происходит разрушение напорного потока (рисунок 2Г).

Процесс формирования напорного потока при увеличении расхода, зафиксированный при атмосферном давлении, происходит следующим образом. При минимальном фиксируемом расходе $Q = 0,9$ л/мин поток занимает небольшую часть сечения, в нем визуальное наблюдаются пузырьки воздуха. С увеличением расхода происходит увеличение занятого сечения и исчезновение пузырьков, поток при $Q = 5,5$ л/мин характеризуется однородностью и имеет с воздухом четкую границу раздела. При достижении критического значения расхода $Q_{cr} \approx 6$ л/мин начинается формирование сплошного потока, оставшиеся каверны дробятся и либо схлопываются, либо уносятся потоком вниз. Поток ускоряется, повышается его внутреннее давление.

С целью определения состояния закачиваемой жидкости в трубном пространстве в зависимости от текущих расхода и избыточного давления газа $P_{изб}$ выведено условие разрыва потока в трубах (формула 1). Избыточное давление газа в скважине $P_{изб}$ вычисляется с помощью аналитического решения Г.А. Адамова по осредненным по глубине скважины коэффициенту сверхсжимаемости газа $z_{ср}$ и температуре $T_{ср}$ или численными методами.

$$P_{изб} = \rho g H_{ж} - \Delta P_{тр} + P_{нас.пар.} \quad (1)$$

где ρ – плотность закачиваемой жидкости, $\frac{кг}{м^3}$; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\Delta P_{тр}$ – сумма местных и линейных потерь

давления в заполненной части трубного пространства при расходе Q за вычетом давления нагнетания P_n , Па.

Физический смысл, заложенный в уравнение 1, формулируется следующим образом. Падение давления внутри потока жидкости ниже давления насыщенных паров и последующее парообразование с кавитационным разрывом потока происходит по причине превышения гидростатической составляющей, а, следовательно, силы тяжести, обусловленной разностью плотностей жидкости и газа и действующей на жидкость, над суммой избыточного давления газа, удерживающего столб жидкости от разрыва и свободного падения, и потерь давления на трение, характеризующих сцепление жидкости с поверхностью трубы. Образовавшийся безнапорный поток характеризуется отсутствием гидростатического давления.

Для разных значений избыточного давления экспериментально были зафиксированы критические граничные значения расхода, при которых визуально виден переход в напорный режим потока (рисунок 3Б). Доказано, что при увеличении избыточного давления газа в приёмной ёмкости-баллоне критический расход снижается. Результаты замеров представлены на графике (рисунок 3А). По выражению 1 была рассчитана граница перехода между режимами – на графике она представлена пунктирной линией. Как видно из графика, расчётная граница корректно разделяет режимы потока в зависимости от расхода.

Верификация выведенного уравнения для скважинных условий (1) также произведена на промысловых данных, снятых при глушении газоконденсатных пластов на Ямбургском месторождении. Результаты верификации представлены в сводной таблице (таблица 1). Среднее отклонение расчётных значений от фактических составляет 4,49 %.

Таблица 1 - Сравнение расчётных и фактических глубин разрыва потока

№скв	Расход, л/с	$P_{изб}$, МПа	$H_{кр}$ расчёт, м	$H_{кр}$ факт, м	Отклонение, %
**011	12	5,066	935,53	963,87	2,94 %
**009	15	7,6	1059,46	1122,86	5,65 %

Продолжение таблицы 1

**010	14	11	1469,64	1526,96	3,75 %
**410	10	12,9	1509,89	1599,83	5,62 %

Выведенное уравнение для определения разрыва потока демонстрирует хорошую точность в рамках решаемой задачи и позволяет производить контролируемое закачивание технологических жидкостей на безнапорном режиме.

2. Разработанная технология изоляции горизонтального участка, основанная на поддержании газо- и гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт за счёт регулирования сплошности потока закачиваемой технологической жидкости, компенсации поршневых эффектов при спуске и подъеме инструмента снижением устьевое и нагнетаемого давлений, обеспечивает повышение эффективности освоения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД.

Для контроля газо- и гидродинамического равновесия была разработана математическая модель. Общее условие газо- и гидродинамического равновесия при закачивании технологических жидкостей на безнапорном режиме определено как (2):

$$\Delta P_{\text{гс}}(t) - \Delta P_{\text{СПО}}(t) - \Delta P_{\text{др}}(t) = 0 \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{гс}}(t)$ – изменение давления при закачке технологических жидкостей, Па; $\Delta P_{\text{СПО}}(t)$ – дополнительное давление, возникающее при поршневании/свабиривании, Па; $\Delta P_{\text{др}}(t)$ – изменение давления при дросселировании, Па. Значения величин определяются как (3):

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{гс}}}{dt} = Q \frac{4\rho g}{\pi(d_{\text{ОК}}-d_{\text{н}})^2} \\ \frac{dP_{\text{СПО}}}{dt} = \left(\frac{12 \cdot 10^3 v}{d_{\text{ОК}}-d_{\text{н}}} \cdot \frac{2n+1}{3n}\right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-3} K v}{d_{\text{ОК}}-d_{\text{н}}}\right) \\ \frac{dP_{\text{др}}}{dt} = \rho_{\text{газ}} \mu A_{\text{др}} \sqrt{\frac{2(P_{\text{у}}-P_{\text{атм}})}{\rho_{\text{газ}}}} \frac{4g}{\pi(d_{\text{ОК}}-d_{\text{н}})^2} \end{cases} \quad (3)$$

где $d_{\text{ОК}}$ – внутренний диаметр обсадной колонны, м; $d_{\text{н}}$ – внешний диаметр ГНКТ, м; v – скорость спуска/подъёма ГНКТ, м/с; K – коэффициент консистенции, Па·с; n – показатель нелинейности; $\rho_{\text{газ}}$ – плотность газа, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; μ – коэффициент расхода дросселя; $A_{\text{др}}$ – площадь сечения дросселя, м²; $P_{\text{у}}$ – устьевое давление, Па; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па.

Данная модель верифицирована на производственных данных, записанных во время глушения газоконденсатной скважины **011 Ямбургского месторождения. Среднее значение отклонения расчётных данных, полученных в модели, от фактических значений в характерных точках, составило 8,84 % (рисунок 4А). Моделирование позволило выявить резкое повышение забойного давления при закачке блокирующего состава, повлекшее за собой поглощение и осложнения при глушении (рисунок 4Б-4В).

Расчёт оптимальных режимов закачивания для условий Ковыктинского месторождения производился для операций динамического глушения скважины с одновременным спуском ГНКТ, плавным снижением расхода до перехода на безнапорный режим по мере снижения устьевого давления и приближения к забою, а также для установки блокирующего состава в интервале продуктивного пласта с одновременным подъемом инструмента. В качестве блокирующей пачки рассматривается состав на основе газового конденсата. Реологическая характеристика состава исследована на вискозиметре FANN (рисунок 5).

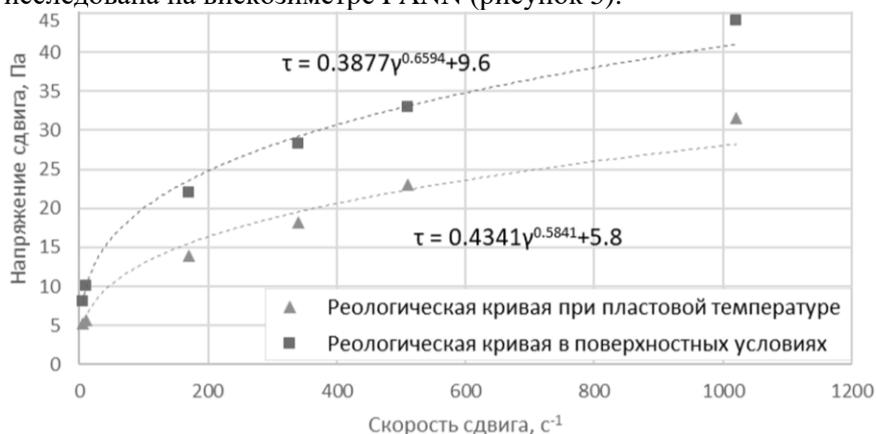


Рисунок 5 – Реологические кривые блокирующего состава

В качестве жидкости глушения используется 2 % раствор КС1 (ньютоновская жидкость) с динамической вязкостью 1,19 мПа·с. В результате расчёта получены следующие кривые критических расходов (рисунок 6):

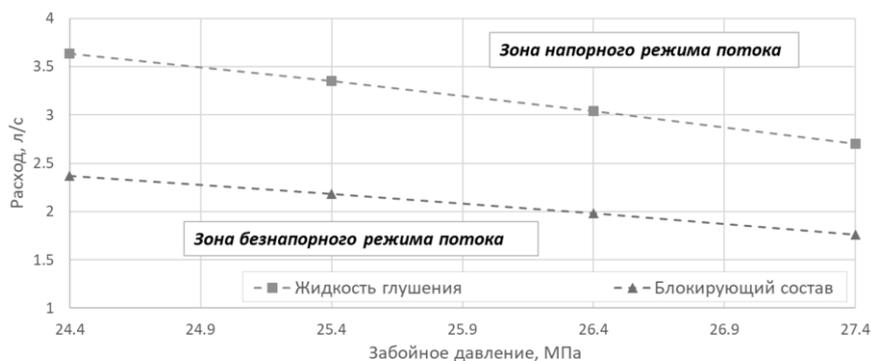


Рисунок 6 – Кривые критического расхода технологических жидкостей в зависимости от фактического забойного давления

Технологией предусматривается, что закачивание жидкости глушения должно производиться на напорном режиме, а блокирующего состава – безнапорном. Таким образом, закачивание жидкости глушения должно начинаться на расходе 5 л/с и плавно снижаться до 3 л/с по мере снижения устьевого давления и приближения к забою. Блокирующий состав должен закачиваться на расходе не более 2,2 л/с – в данном режиме закачивание будет происходить в безнапорном режиме и передачи гидростатического давления на забой происходить не будет.

Скорость подъема ГНКТ в зависимости от расхода (рисунок 7) подбирается исходя из обеспечения:

- полного заполнения пространства под инструментом – допустимые значения располагаются ниже синей линии;
- компенсации роста уровня жидкости в межтрубном пространстве (в районе хвостовика межтрубное и затрубное пространство) возникающим при подъеме инструмента разрежением – допустимые значения располагаются левее серой линии.

Разработанная технология изложена в патенте RU2813414C1 «Способ глушения горизонтальных газовых скважин». После монтажа колтюбинговой установки и других подготовительных работ технологию реализуют в следующем порядке (схема приведена на рисунке 8):

1. Производится снижение устьевого давления до минимально возможного (оценивается в 20 МПа);

2. Производится спуск ГНКТ с одновременной промывкой с расходом 5 л/с. В процессе спуска, по мере снижения устьевого давления, расход плавно уменьшают до значения 3 л/с в интервале подвески хвостовика. Также производится постепенное поджатие дросселя с целью сохранения запаса по избыточному давлению на компенсацию поршневого эффекта при спуске ГНКТ до забоя;

3. По достижении ГНКТ подвески хвостовика в скважине устанавливается равновесие между пластовым и забойным давлением. Далее производят спуск ГНКТ в горизонтальный участок ствола со скоростью 10 м/мин и промывкой 2 л/с, плавно открывая дроссель для компенсации поршневого эффекта. Давление в нагнетательной линии при этом должно упасть ниже атмосферного – это показатель установления безнапорного режима потока;

4. Одновременно со спуском начинают закачку блокирующего состава, не изменяя расход. При этом по достижении забоя блокирующий состав должен вытеснить из трубного пространства жидкость глушения;

5. После этого производится подъем ГНКТ с одновременной закачкой блокирующего состава с расходом 2,2 л/с и скоростью подъема 12 м/мин. Подъем инструмента создает дополнительное разрежение, позволяющее предотвратить поглощение состава;

6. После заполнения всего горизонтального ствола и подъема ГНКТ до интервала подвески хвостовика производится закачка жидкости глушения с целью установления уровня на устье и образования противодействия на пласт;

7. Инструмент извлекается из скважины, производится технологический отстой. После этого фиксируется уровень жидкости в скважине, производится долив.

Моделирование динамического глушения производится с помощью математической модели, разработанной на базе модели двухфазного течения Kabir&Hasan и модифицированной расчётом температуры потоков в трубах и в межтрубном пространстве. Результаты моделирования работ по разработанной технологии представлены на графиках (рисунок 9 и 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи - повышение качества освоения горизонтальных газовых и газоконденсатных скважин с АНПД за счёт применения технологии изоляции продуктивных пластов. Проведены экспериментальные и теоретические исследования, научно обоснован механизм создания газо- и гидродинамического равновесия в интервале вскрытия продуктивного пласта горизонтальным стволом скважины. Составлено математическое описание процесса. На основе выведенных и верифицированных на практическом опыте теоретических положений разработаны методика определения оптимальных параметров закачки технологических жидкостей и технологии изоляции газовых и газоконденсатных пластов с АНПД.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Установлены основные факторы, влияющие на формирование забойного давления в газовых и газоконденсатных скважинах при изоляции пластов, включая: давление и температуру продуктивного пласта, свойства пластового флюида, профиль и конструкцию скважины, технологию изоляции и применяемое оборудование, технологические параметры закачивания, скорость СПО и темпы дросселирования. Проведён анализ существующих методов управления данными факторами.

2. Составлено математическое описание механизма формирования забойного давления для процесса изоляции газовых и газоконденсатных пластов. Научно обоснован механизм создания газо- и гидродинамического равновесия в системе скважина-пласт с учётом термобарических условий. Получены математические зависимости, описывающие неустановившийся поток технологических жидкостей при закачивании в скважину с АНПД. Разработана лабораторная установка для изучения сплошности потока при различных параметрах избыточного давления и расхода жидкости, позволяющая исследовать процесс формирования напорного потока, условия возникновения разрыва потока, а также зависимость критического расхода от избыточного давления.

3. Проведены лабораторные и численные эксперименты, в которых подтверждена обоснованность теоретических моделей. Получено хорошее совпадение между экспериментальными данными

и численным моделированием. Выделены критические диапазоны параметров, при которых происходит потеря сплошности потока, образование разрежения и неэффективное вытеснение газа. Проведена верификация математической модели по данным промысловых операций на газовых и газоконденсатных скважинах с АНПД, в том числе с использованием блокирующих составов. Получены профили давления и температуры, совпадающие с данными геофизических исследований. Оценена степень влияния различных факторов на забойное давление и режим течения. Разработана методика проектирования изоляции газовых и газоконденсатных пластов с АНПД, включающая подбор технологических жидкостей, режима закачивания, рекомендации по профилированию потока, дросселированию и контролю противодействия. Предложены критерии оценки режима закачивания и условий достижения гидродинамического равновесия.

4. На основе выведенных и верифицированных на практическом опыте теоретических положений разработан способ глушения газовых и газоконденсатных скважин с АНПД. Для применения в условиях Ковыктинского ГКМ с помощью разработанной методики подобраны оптимальные технологические параметры – расход и скорость СПО для каждого используемого состава. С целью обоснования эффективности произведено математическое моделирование процесса с помощью разработанных и верифицированных моделей закачивания на безнапорном режиме и динамического глушения.

Перспективы дальнейшего развития исследований в области изоляции газовых и газоконденсатных продуктивных пластов с АНПД при освоении горизонтальных скважин заключаются в разработке методов контроля технологических параметров с помощью забойных датчиков, передающих информацию по кабельному каналу связи внутри ГНКТ, разработке цифрового двойника по полученным математическим зависимостям, а также в изучении ранее не рассмотренных гидродинамических эффектов, позволяющих повысить качество проводимых работ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Двойников, М.В. Методика определения параметров щадящего глушения после МГРП / М.В. Двойников, **Я.Д. Минаев** // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2023. – № 3(135). – С. 28-32.

2. Двойников, М.В. Разработка технологии освоения газовых и газоконденсатных скважин на регулируемом давлении / Н.Ю. Кузнецова, **Я.Д. Минаев**, Е.В. Крюков // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2022. – № 1. – С. 23-29.

3. Двойников, М.В. Обоснование возможности и оценка эффективности применения технологии бурения скважин на депрессии с регулируемым давлением / М.В. Двойников, Н.Ю. Кузнецова, **Я.Д. Минаев** // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021. – № 9(345). – С. 5-9. – DOI: 10.33285/0130-3872-2021-9(345)-5-9.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Dvoynikov, M.V. Mathematical Model of Non-pressurized Flow for Calculating Killing of Gas Wells with Abnormally Low Reservoir Pressures. / M.V. Dvoynikov, **Y.D. Minaev** // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2025. – Vol. 38, Issue 7. – pp. 1677-1684. DOI: 10.5829/ije.2025.38.07a.18

5. Технология глушения газовых скважин на регулируемом давлении / М.В. Двойников, **Я.Д. Минаев**, В.В. Минибаев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 1. – С. 7-18. – DOI 10.18799/24131830/2024/1/4315.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент №2813414 Российская Федерация, МПК E21B 43/12 (2006.01); СПК E21B 43/12 (2024.01). Способ глушения горизонтальных газовых скважин. Заявка №2023116506 : заявл.23.06.2023; опубл. 12.02.2024 / **Я.Д.Минаев**, М.В. Двойников; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». - 20с.

Цифрами на схеме обозначены:

- 1- насос;
- 2- расходомер;
- 3- кран для регулирования расхода жидкости;
- 4- манометр;
- 5- кран для регулирования подачи воздуха;
- 6- компрессор;
- 7- манометр;
- 8- кран для сброса давления;
- 9- ёмкость-баллон;
- 10-кран сливной линии.

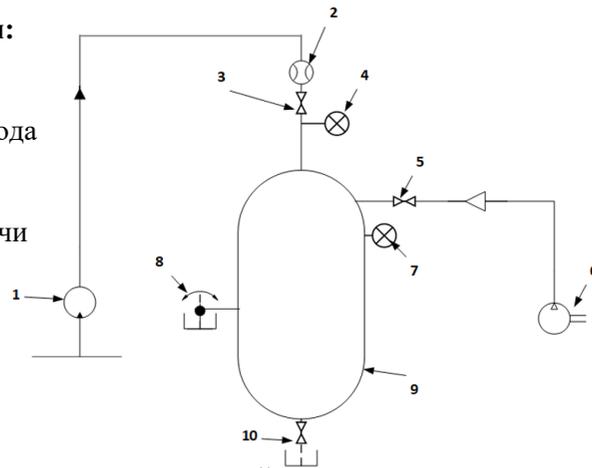


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

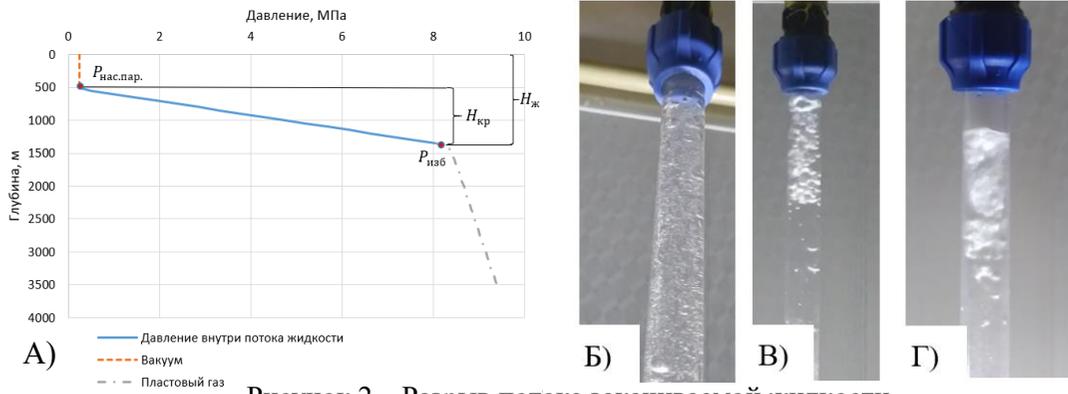


Рисунок 2 – Разрыв потока закачиваемой жидкости

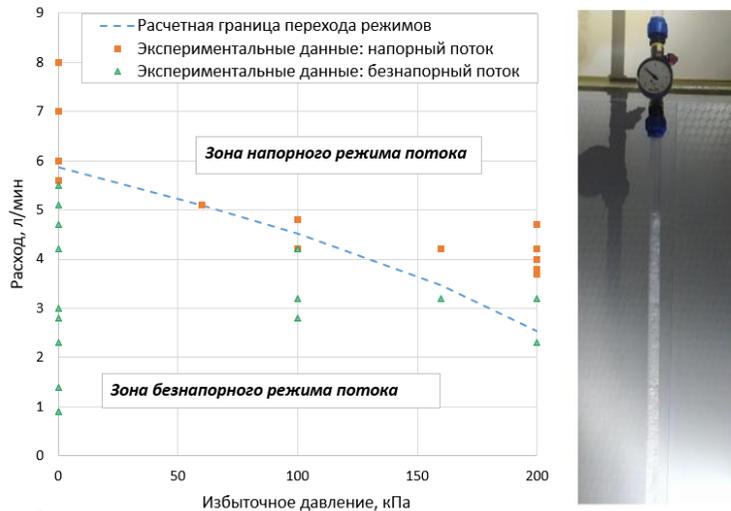


Рисунок 3 - Сравнение расчётных и экспериментальных данных (А) и переход потока в напорный режим при избыточном давлении 200 кПа (Б)

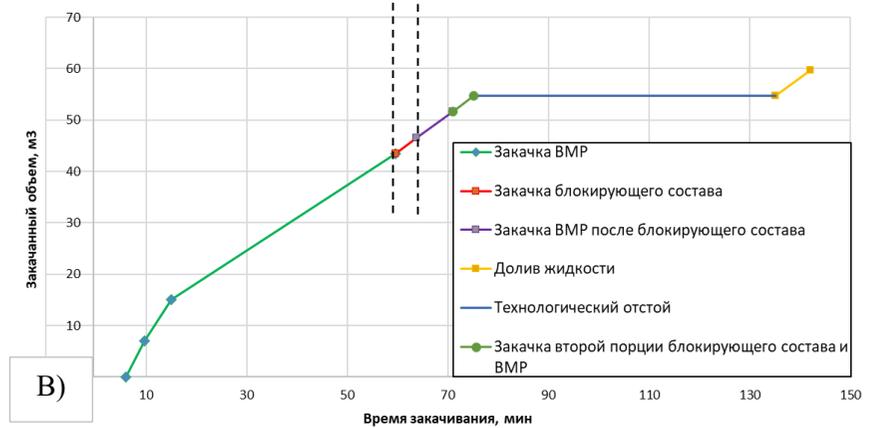
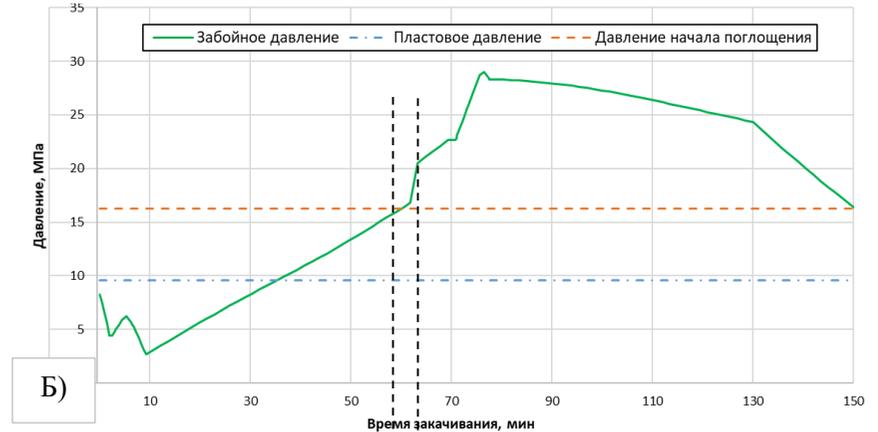
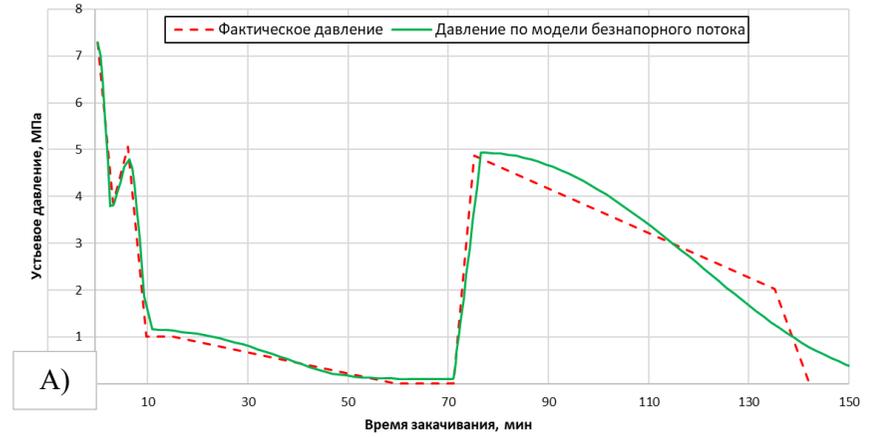


Рисунок 4 - Устьевое давление (А), забойное давление (Б) и закачиваемые пакеты технологических жидкостей (В) при глушении скважины **011 Ямбургского месторождения

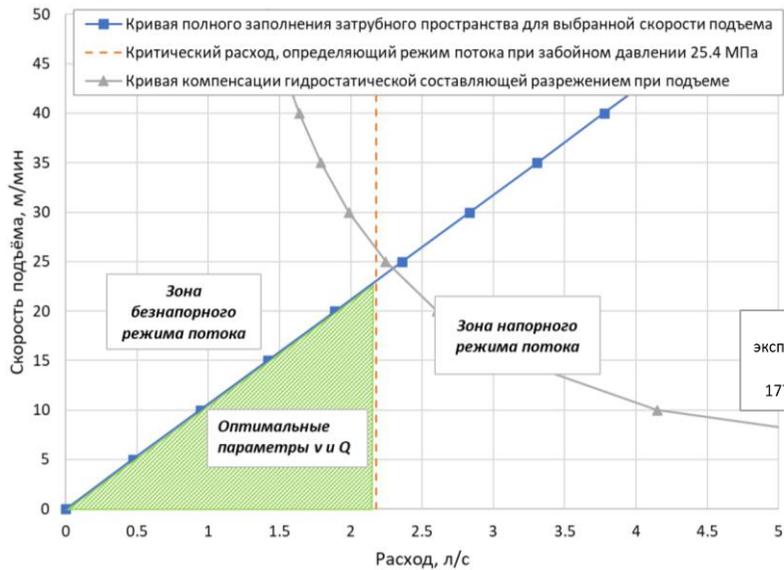


Рисунок 7 - Оптимальные параметры для установки блокирующей пачки

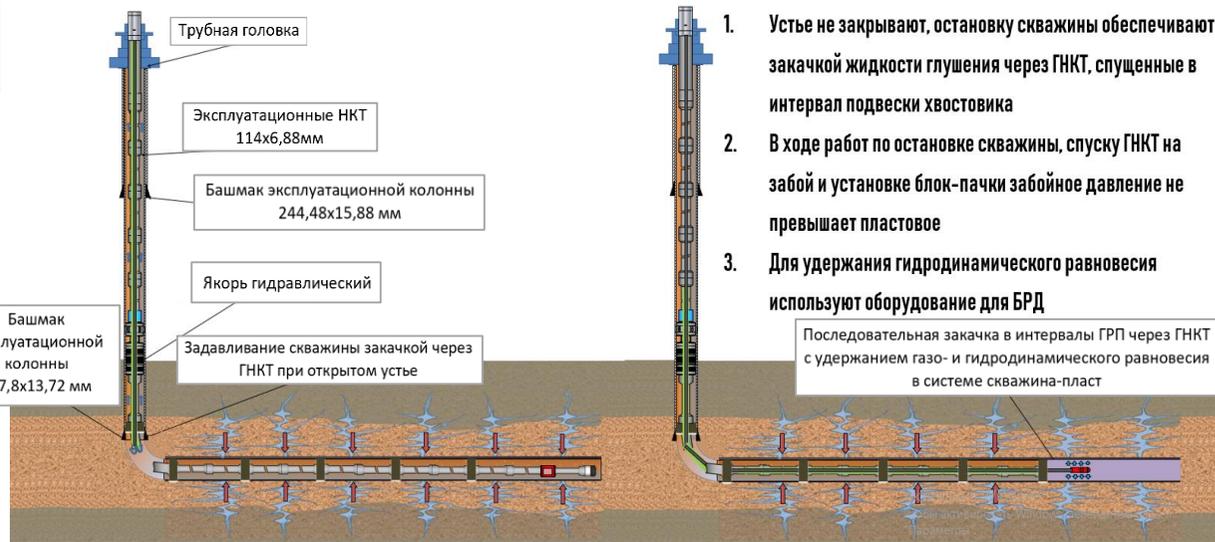


Рисунок 8 – Схема проведения работ по глушению газовой скважины с регулированием забойного давления

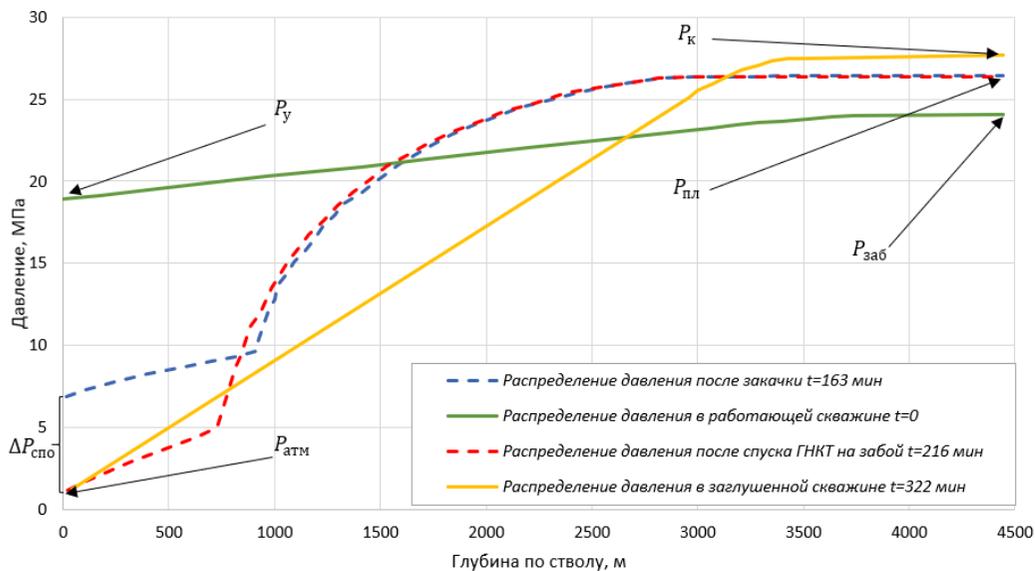


Рисунок 9 - Распределение давления по стволу скважины в ходе технологических операций

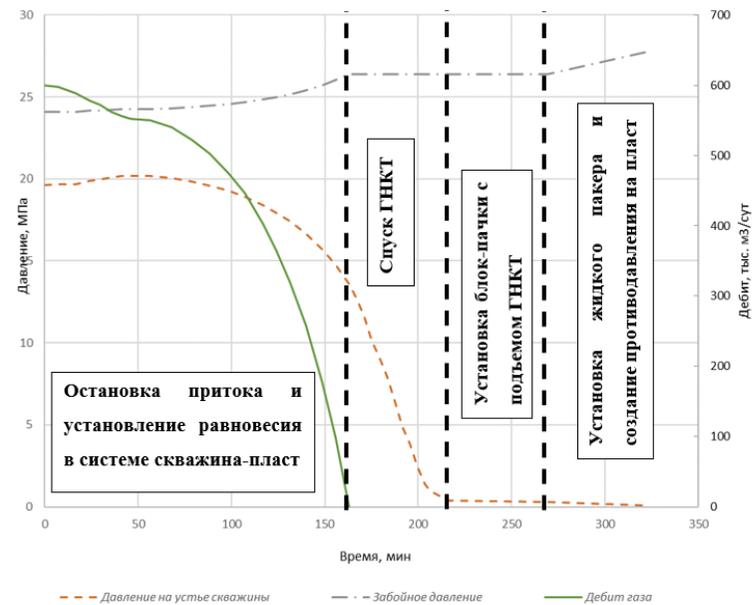


Рисунок 10 - Изменение забойного и устьевого давлений, а также притока из скважины в ходе технологических операций