На правах рукописи

**ХАФИЗОВ РУСЛАН ИЛЬДАРОВИЧ**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ЗАЛЕЖЕЙ СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ГАЗА НА ОСНОВЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Бугульма – 2018

Работа выполнена в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИНефть) ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина и в ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
**Низаев Рамиль Хабутдинович**

Официальные оппоненты: **Владимиров Игорь Вячеславович**
доктор технических наук, профессор,
Закрытое акционерное общество «Конкорд»,
заместитель генерального директора

**Афанаскин Иван Владимирович**
кандидат технических наук,
Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), группа моделирования нефтяных и газовых месторождений, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «СамараНИПИнефть», г. Самара

Защита диссертации состоится «24» мая 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 222.018.01 в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, д. 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти: http://www.tatnipi.ru.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Львова Ирина Вячеславовна

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Рост уровня добычи нефти обеспечивается увеличением извлекаемых запасов за счет применения новых технологических решений, позволяющих достичь увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН) на месторождении, и вовлечением в разработку новых залежей и месторождений.

В настоящее время в условиях истощения запасов нефти на большинстве месторождений каменноугольных и девонских отложений Республики Татарстан все более актуальным становится освоение трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья, добыча которых традиционными способами нерентабельна.

Неблагоприятные геолого-физические условия (особенности геологического строения пласта, низкое пластовое давление, высокая вязкость нефти) предопределили довольно низкую эффективность ввода в разработку месторождений сверхвязкой нефти (СВН) с вязкостью более 10000 мПа·с с использованием вертикальных скважин. Разработка таких залежей термическими методами осложнена опасностью прорыва рабочего агента, пластового газа и газов горения, а также неравномерным распространением поверхности водонефтяного контакта (ВНК).

Для эффективной разработки месторождений СВН требуется применение новейших технологий воздействия на продуктивный пласт. Теория и мировая практика разработки данных месторождений, а также добыча СВН на территории Республики Татарстан доказали, что наиболее перспективными являются термические методы.

Освоение месторождений СВН в Республике Татарстан с применением тепловых (термических) методов разработки требует значительных инвестиций в обустройство промыслов и организацию добычи нефти.

Одним из современных путей решения проблемы поиска и создания оптимальных методов эксплуатации залежей СВН является предварительная оценка технико-экономических показателей разработки с использованием термогидродинамических моделей, в основу которых заложены дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие процесс фильтрации флюидов в пласте.

В связи с этим исследование тепловых методов разработки месторождений СВН, создание новых технических и технологических решений являются актуальными научными и практическими задачами.

**Степень разработанности темы**

Высокопроизводительные вычислительные средства, позволяющие расширять технологические возможности для создания и оценки эффективности методов управления при разработке залежей СВН путем моделирования геолого-гидродинамических процессов, связанных с разведкой и эксплуатацией месторождений, получили существенное развитие. Значительный вклад в развитие теоретических основ разработки

месторождений СВН внесли такие ученые и специалисты, как Р.Г. Абдулмазитов, М.И. Амерханов, Д.Г. Антониади, Н.К. Байбаков, А.А. Боксерман, И.М. Бакиров, Г.Г. Вахитов, Р.Н. Дияшев, Ю.П. Желтов, А.Т. Зарипов, Р.Р. Ибатуллин, Р.Д. Каневская, В.И. Кудинов, А.А. Липаев, М.М. Мусин, Р.Х. Муслимов, А.В. Насыбуллин, А.И. Никифоров, К.А. Оганов, А.В. Петухов, А.М. Рузин, М.Л. Сургучев, А.Х.Фаткуллин, Р.С. Хисамов, Н.И. Хисамутдинов, Т.В. Хисметов, З.А. Янгуразова, T.C. Boberg, R.M. Butler, S.A. Mehta, R.G. Moore, S.D. Joshi, J.C. Schaffer и другие.

В условиях истощения запасов легкой нефти на большинстве месторождений каменноугольных и девонских отложений Республики Татарстан проблема рентабельной добычи СВН становится все более актуальной. В работе рассмотрены основные эффективные направления разработки залежей СВН с применением тепловых методов в условиях влияния газа. Проведение опытно-промышленных работ (ОПР) на залежах СВН Республики Татарстан и применение опыта повышения технологических показателей разработки позволят увеличить уровень ее добычи.

**Целью диссертационной работы** является разработка эффективных технологических решений для добычи СВН с применением тепловых методов в условиях влияния газа, основанных на использовании термогидродинамического моделирования.

**Задачи исследований:**

1. Анализ и оценка эффективности существующих технологий разработки месторождений СВН на основе литературных и промысловых данных.
2. Оценка технологической эффективности применения метода парогравитационного дренирования и его совершенствование на залежах СВН с наличием газонасыщенного интервала.
3. Оценка эффективности применения различных вариантов расстановки скважин при реализации метода внутрипластового горения, способствующих снижению прорыва закачиваемого воздуха и газов горения.
4. Создание новых технологических решений для увеличения охвата пласта с использованием метода внутрипластового горения.

**Методы решения поставленных задач и достоверность результатов**

Поставленные задачи решались на основе научного анализа ОПР и эксплуатации залежей СВН Татарстана.

Достоверность полученных результатов подтверждена промысловыми данными разработки залежей СВН, воспроизводимыми на основе сертифицированных лицензионных программ для термогидродинамического моделирования, а также сходимости результатов моделирования с реальными промысловыми данными разработки залежей СВН.

**Научная новизна**

Для залежей СВН шешминского горизонта с наличием газонасыщенного интервала, расположенного ниже кровли пласта:

1. Определена зависимость КИН от расстояния между параллельными горизонтальными стволами нагнетательной и добывающей скважин для

элемента одной пары разработки месторождения при парогравитационном дренировании.

2. Установлена зависимость изменения конечного показателя паронефтяного отношения от коэффициента газонасыщения и толщины газонасыщенного пласта при парогравитационном дренировании.

3. Получена зависимость КИН от расположения пары горизонтальных скважин по вертикали относительно газонасыщенного интервала при парогравитационном дренировании.

**Защищаемые научные положения:**

1. Оценка эффективности технологических показателей разработки в зависимости от расстояния между нагнетательными и добывающими скважинами для условий шешминского горизонта с газонасыщенными интервалами.

2. Оценка влияния изменения паронефтяного отношения от коэффициента газонасыщения и толщины газонасыщенного пласта при реализации процесса парогравитационного дренирования.

3. Оценка влияния КИН от расположения пары горизонтальных скважин по вертикали относительно газонасыщенного интервала при парогравитационном дренировании.

4. Технологические решения для повышения нефтеотдачи терригенных коллекторов, насыщенных СВН, и снижения негативного влияния газа за счет усовершенствования метода внутрипластового горения.

**Практическая ценность результатов работы:**

1. Автором исследованы особенности процесса разработки залежей СВН с наличием газонасыщенного интервала и предложены технологии разработки, позволяющие увеличить добычу нефти и подобрать оптимальные параметры закачки теплоносителя с использованием горизонтальных скважин.

2. Результаты исследований влияния газонасыщенного интервала на технологические показатели разработки использованы на этапе выполнения темы ПАО «Татнефть» «Анализ геологического строения, оптимизация и сопровождение разработки залежей СВН посредством 3D моделирования» (отчетный документ ТатНИПИнефть, Бугульма, 2017, 286 с.).

3. В ходе выполнения работы предложен ряд новых технических и технологических решений (патенты на изобретения РФ №№ 2578141, 2597041, 2578140, 2597040, 2581071, 2615554, 2605993, 2626500, 2626497, 2603795, 2604073, 2627795, 2630330), которые могут использоваться для повышения нефтеизвлечения на месторождениях СВН в терригенных коллекторах.

**Апробация результатов работы**

Основные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований, выводы и рекомендации работы докладывались на внутривузовских, республиканских, всероссийских и международных форумах, семинарах, выставках и конференциях: Татарстанском нефтегазохимическом форуме (Казань, 2016); Международной научно-практической конференции молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии»,

приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан (Альметьевск, 2016); II Республиканской молодежной геологической конференции, посвященной 25-летнему юбилею Академии наук Республики Татарстан и 15-летнему юбилею «Хартии Земли» (Казань, 12-14 октября 2016 г.); Всероссийской конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений высоковязкой нефти и битумов» (Ухта, ноябрь 2016 г.), Международной научно-практической конференции молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии-2017» (Альметьевск 28 сентября 2017 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, 13 патентов на изобретения РФ на способы разработки месторождений СВН и 8 статей в научно-технических журналах, сборниках научных трудов и конференций.

**Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы, включающего 112 наименований. Материал диссертации изложен на 126 страницах, включает 19 таблиц и 72 рисунка.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность руководителю работы – доктору технических наук Р.Х. Низаеву за методическую помощь при выполнении работы, доктору технических наук И.А. Гуськовой, кандидату технических наук Е.Ф. Захаровой, доктору технических наук А.Т. Зарипову, младшему научному сотруднику Д.К. Шайхутдинову – за ценные консультации и содействие в выполнении диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновываются актуальность темы исследования, её цель, определены основные задачи исследования и пути их решения, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** выполнен обзор литературы, посвященной разработке месторождений СВН тепловыми методами, описаны основные процессы, происходящие в продуктивном пласте при воздействии тепловыми методами, а также представлены основные выводы по отечественным и зарубежным исследованиям по вытеснению нефти как паром, так и горячей водой.

На Мордово-Кармальском месторождении с 1979 г. проводились масштабные работы по применению метода внутрипластового горения. ОПР позволили оценить эффективность использования метода внутрипластового горения для воздействия на залежи и определить следующие проблемы:

– применение вертикальных скважин не позволяет достичь высоких технологических показателей в связи с низкой приемистостью скважин относительно агентов воздействия (водяной пар, воздух, горячие продукты сгорания, горячая вода) вследствие существенной (2–5-кратной) изменчивости

вязкости нефти как по площади, так и по разрезу залежи, приводящей к языкообразованию. Значительное фильтрационное сопротивление продуктивного пласта не позволяет производить закачку теплоносителя в объёмах, способствующих оптимальному (для добычи нефти) прогреву продуктивного пласта;

– в разрабатываемых элементах результативно эксплуатируются только расположенные вблизи нагнетательной скважины две–три добывающие скважины, остальные в разработке не участвуют;

– высокое содержание кислорода в некоторых эксплуатируемых скважинах указывает на то, что нагнетаемый в продуктивный пласт кислород прорывается преимущественно по выработанным участкам пласта, рассеивается и практически не расширяет зоны прогрева продуктивного пласта;

– высокая обводненность продукции добывающих скважин указывает на наличие пропластков с содержанием свободной воды.

Анализ результатов ОПР позволил сделать следующие выводы:

– продвижение фронта горения происходит по наиболее нефтенасыщенной части продуктивного пласта;

– неравномерность продвижения фронта усиливается при отсутствии гидродинамической связи между скважинами.

Также на Мордово-Кармальском месторождении проводились ОПР по технологии паровоздушного воздействия. На результативности опытных работ сказались отклонения от заданного технологического режима. Закачка производилась нерегулярно парогенератором, вырабатывавшим насыщенный пар с низкой степенью сухости (0,2), воздействие которого привело к обработке продуктивного пласта практически горячей водой (вместо пара), что стало причиной низкой эффективности проведения испытаний.

Наиболее эффективными технологиями, применяемыми на Ашальчинском нефтяном месторождении на данный момент, являются парогравитационное дренирование и пароциклическая обработка с применением горизонтальных скважин.

Основное преимущество использования горизонтальных скважин на залежах СВН по сравнению с традиционными вертикальными заключается в том, что они позволяют вовлечь в разработку большую часть продуктивного коллектора, увеличить производительность скважин и дебиты нефти, а также снизить вероятность конусообразования и обводнение скважин.

После проведения ОПР началось активное разбуривание Ашальчинского месторождения парными одноустьевыми горизонтальными скважинами. За все время эксплуатации двухустьевых пар горизонтальных скважин среднее паронефтяное соотношение составило 2,6. Накопленная добыча на 2016 г.– более 222 тыс. т СВН.

Проведенный анализ эффективности применения термических методов разработки на Ашальчинском месторождении показал, что парогравитационное дренирование является наиболее эффективной технологией добычи, рекомендуемой для применения на аналогичных месторождениях.

Необходимо проведение оценки технологической эффективности применения метода парогравитационного дренирования на залежах СВН с наличием газонасыщенного интервала Республики Татарстан.

**Во второй главе** проводится анализ геологического строения шешминского горизонта, требующий учета всех особенностей при вовлечении в разработку залежей СВН Республики Татарстан. Представлены основные геологические и гидрогеологические особенности залегания шешминских отложений разрабатываемых залежей СВН.

Потенциальные возможности коллекторов песчаной пачки уфимского яруса достаточно высоки, но часть порового пространства коллекторов заполнена связанной и свободной водой. Среди интенсивно нефтенасыщенных песков и песчаников с массовой нефтенасыщенностью 7,5 % и более в залежах по разрезу выделяются прослои с пониженным массовым нефтесодержанием (менее 4,5 – 5,0 %). Эти прослои сложены недонасыщенными нефтью и, следовательно, в бóльшей степени водонасыщенными песчаниками.

Татарским геологоразведочным управлением проведены исследования по составу попутного газа на примере Нижне-Кармальского поднятия Черемшанского месторождения с содержанием метана более 84 %. Толщина газонасыщенного интервала на Нижне-Кармальском поднятии изменяется от 2 до 5 м.

Из проведенного анализа шешминских отложений СВН можно отметить следующее:

1. Залежь СВН Ашальчинского месторождения небольшая по размерам и запасам, приурочена к сводовой части песчаной пачки шешминского горизонта уфимского яруса верхнепермского отдела пермской системы. Залежь литологически практически однородна, нефтенасыщенные коллекторы отличаются улучшенными фильтрационно-емкостными характеристиками.
2. На Нижне-Кармальском поднятии по диаграммам гамма-гамма-каротажа и нейтронного гамма-каротажа выделены газонасыщенные интервалы.
3. В составе попутного газа Нижне-Кармальского поднятия Ашальчинского месторождения содержится более 84 % метана.
4. На залежах СВН газонасыщенные интервалы развиты локально, в ряде случаев наблюдается нерегулярный характер газонефтяного контакта.

Анализ геологического строения шешминских отложений показал сильную изменчивость ВНК, приводящую к усложнению проводки горизонтальных скважин в продуктивном пласте, а также наличие газонасыщенных интервалов в пласте, которые необходимо учитывать при разработке залежей СВН Республики Татарстан.

**В третьей главе** анализируются основные проблемы разработки месторождения, предлагаются технологии рентабельной эксплуатации мелкозалегающих залежей сверхвязкой нефти с наличием газонасыщенных интервалов.

При бурении вертикальных разведочных скважин на залежах СВН Республики Татарстан возникает проблема оконтуривания газонефтяного контакта (ГНК) и толщины газонасыщенного интервала по залежи.

Определение границ и объемов газонащенного интервала позволит учесть влияние газонасыщенного интервала на технологические показатели эсплуатации при разработке залежей СВН с газонасыщенными интервалами. Поэтому была поставлена задача исследования технологической эффективности применений тепловых методов на залежах СВН с наличием газонасыщенного интервала.

Для эффективной разработки таких залежей необходимо оценить технологии добычи с использованием горизонтальных скважин. Для оценки эффективности применения разработки было рассмотрено 4 варианта:

1) парогравитационное дренирование;

2) парогравитационное дренирование с отбором метана до начала этапа разработки;

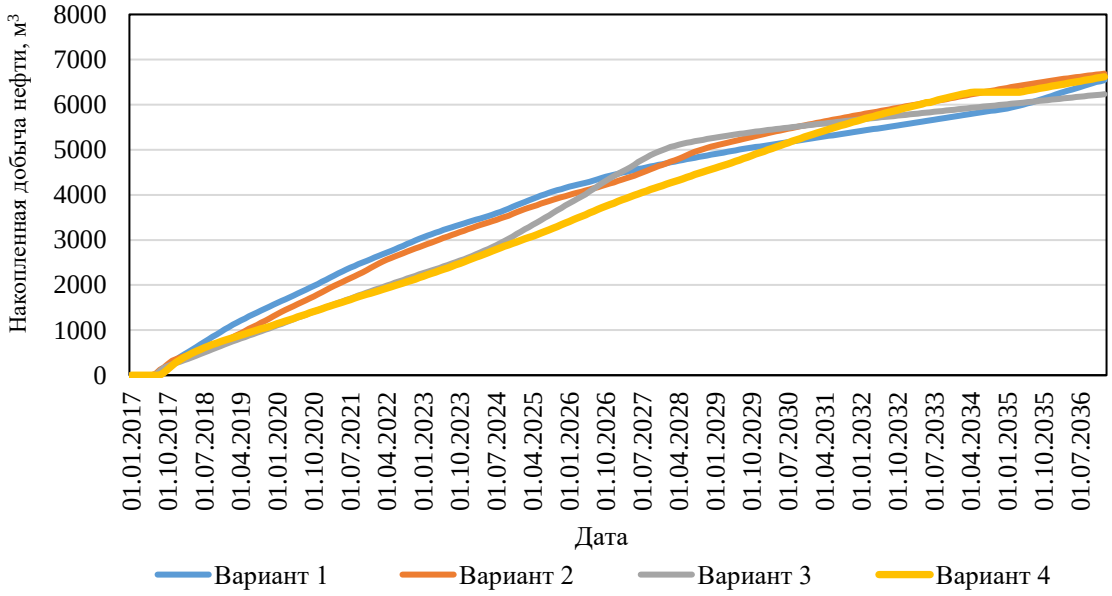
3) парогравитационное дренирование с закачкой газа метана;

4) парогравитационное дренирование с закачкой глиносодержащего агента над горизонтальными скважинами на границе ГНК.

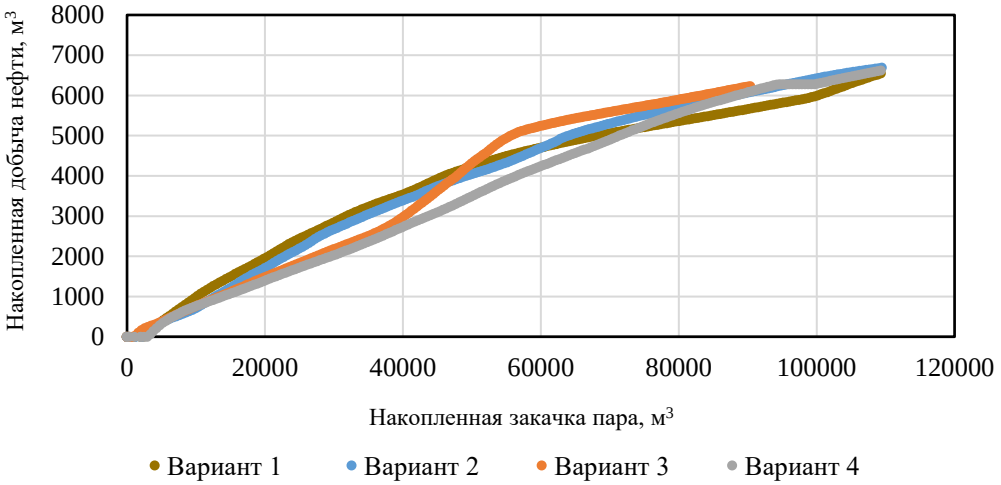
Термогидродинамические расчеты и сравнение результатов технологических показателей разработки приведены на рисунке 1.

На основе проведенных исследований выявлено, что наиболее эффективным по технико-экономическим показателям является метод парогравитационного дренирования. Поэтому необходимы исследования влияния газонасыщенного интервала на технологические показатели разработки при применении метода парогравитационного дренирования на залежах СВН.

Термогидродинамическими расчётами определялись оптимальные для эксплуатации месторождения расстояния между горизонтальными скважинами при разработке залежей с наличием газонасыщенных интервалов.




а)




б)

Рисунок 1 – Технологические показатели разработки
а) накопленная добыча нефти, б) график закачки пара и отбора нефти

На основе проведенных исследований была выявлена зависимость КИН от расстояния по вертикали между горизонтальными добывающей и нагнетательной скважинами (рисунок 2).

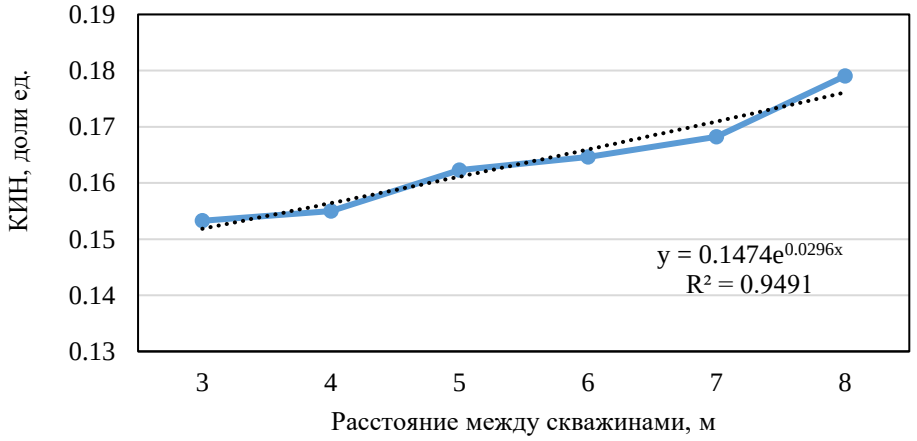



Рисунок 2 – Зависимость КИН от расстояния скважин между стволами горизонтальных скважин

Средняя толщина на залежах СВН шешминского горизонта с наличием газонасыщенного интервала достигает 10 м, так как скважины располагают выше над подошвой пласта на 2 м, рассматриваемый диапазон расстояния между стволами горизонтальных скважин составляет 3–8 м.

При расстоянии 7 и 8 м газ прорывается к добывающей скважине по границе паровой камеры в зону пониженного давления. Происходит отбор газа, приводящий к снижению влияния газонасыщенного интервала на КИН при дальнейшей эксплуатации горизонтальных скважин. Размер паровой камеры в случае максимального рассмотренного расстояния наиболее эффективный для разработки залежи сверхвязкой нефти с наличием газонасыщенного интервала, так как увеличивается зона прогрева разрабатываемого пласта более легкой нефти за расчетный период времени по сравнению с остальными вариантами разработки залежи. Максимальный технологический КИН при расстоянии 7 и 8

м – 0,17 доли ед. Наибольший экономический КИН при расстоянии 5 и 6 м – 16,5 доли ед. Для сохранения пластового давления, при котором не происходит прорыва газа к добывающей скважине, выдерживается расстояние между горизонтальными скважинами 5 и 6 м. Для оценки влияния газонасыщенного интервала на технологические показатели разработки было выбрано расстояние между горизонтальными скважинами 5 м, которое позволяет быстрее выйти на режим эксплуатации по сравнению с расстоянием, равным 6 м.

На термогидродинамической модели исследовалось влияние положения парных горизонтальных скважин относительно газонасыщенного интервала на технологические показатели разработки по 5 вариантам расположения горизонтальных скважин в пласте. На основе проведенных расчетов была выявлена зависимость изменения КИН от расположения пары горизонтальных скважин (рисунок 3).

При разработке залежи СВН с газонасыщенным интервалом методом парогравитационного дренирования у скважин, расположенных у подошвы продуктивного пласта, показатели накопленной добычи СВН существенно возрастают. Происходит стекание нефти к забою добывающей скважины, поэтому за счет расположения скважин у подошвы нефтенасыщенной части пласта вовлекаются в разработку наибольшее количество подвижных запасов.

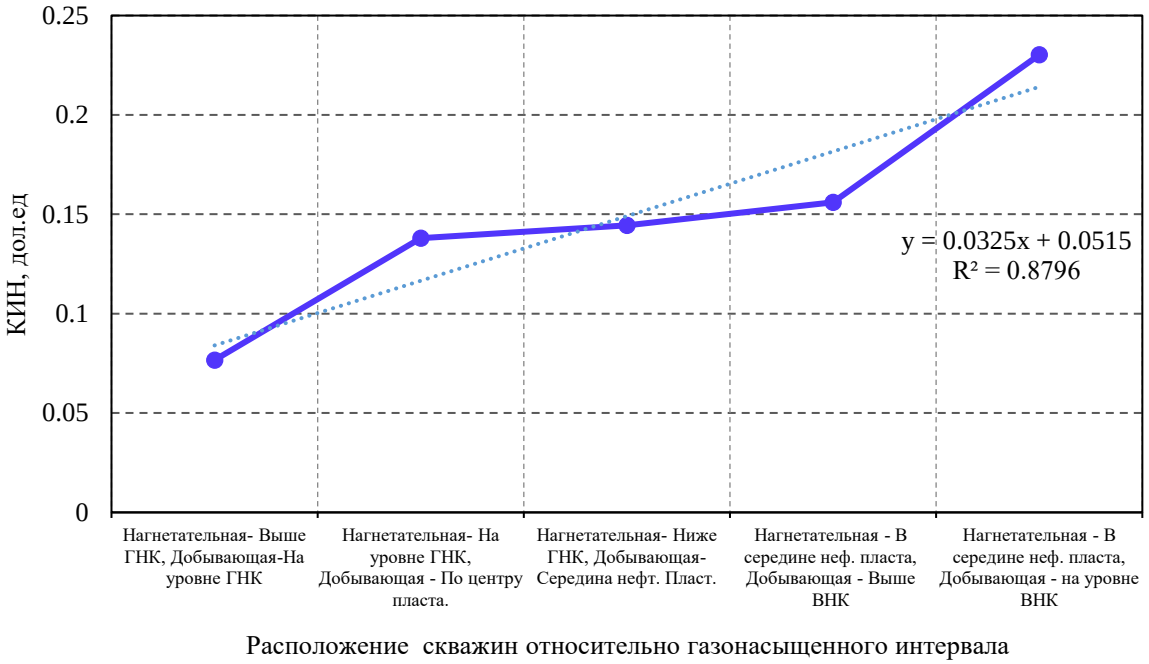



Рисунок 3 – Зависимость КИН от расположения скважин относительно газонасыщенного интервала

Необходимо отметить, что на разных залежах СВН толщина газонасыщенного интервала различна и достигает от 5 до 21 м (Чумачкинское поднятие).

Для оценки влияния толщины газонасыщенных интервалов в продуктивных пластах на показатели работы горизонтальных скважин были исследованы диапазоны толщин 2, 5, 10 и 15 м.

Выявлена зависимость КИН от толщины газонасыщенного интервала, которая представлена на рисунке 4.

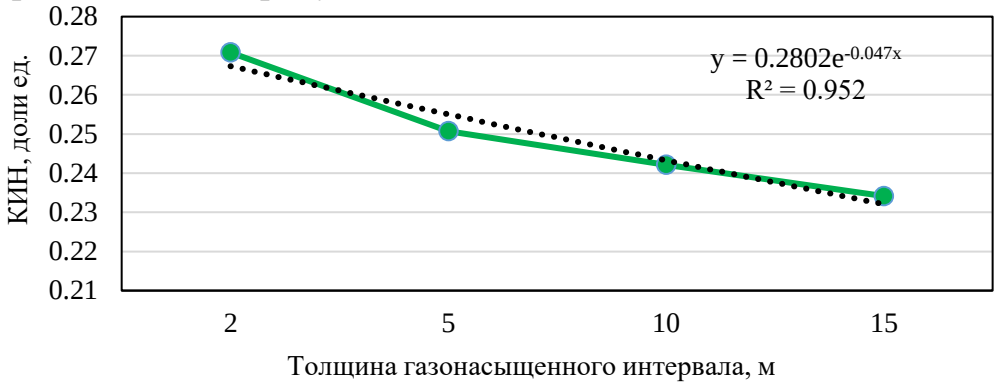
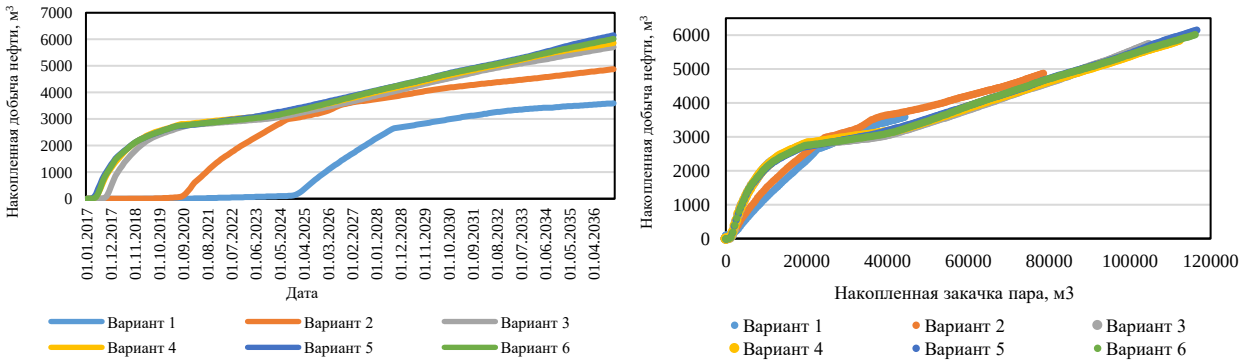



Рисунок 4 – Зависимость КИН от толщины газонасыщенного интервала

По результатам проведенных термодинамических расчетов с различными толщинами газонасыщенного интервала установлено, что при увеличении толщины газонасыщенного интервала происходит конусообразование, негативно влияющее на расширение паровой камеры в процессе эксплуатации горизонтальных скважин при использовании технологии парогравитационного дренирования.

Для оценки влияния давления нагнетания пара на динамику добычи СВН в продуктивных пластах на показатели работы горизонтальных скважин был исследован диапазон давлений нагнетания: 700, 1000, 1300, 1500, 1800 и 2000 кПа. Увеличение давления выше 2000 кПа может привести к разрушению целостности породы покрышки.

Результаты исследований приведены на рисунке 5.




а) б)

Рисунок 5 – Результаты исследований влияния давления нагнетания пара на динамику добычи СВН:
а) накопленная добыча нефти; б) график закачки пара и отбора нефти

При первом и втором вариантах разработки при низких значениях давления нагнетания 700, 1000 кПа в начале процесса нагнетания незначительно увеличивается пластовое давление, что приводит к низким показателям закачки. При эксплуатации более 3 и 5 лет происходит освоение призабойной зоны нагнетательной скважины, что выводит скважину на режим

эксплуатации. Нагнетание под давлением 1800 и 2000 кПа позволяет добыть больше нефти по сравнению с первым, вторым и третьим вариантами. Применение давления нагнетания на уровне 1800 кПа оказывает меньшее воздействие на покрышку продуктивного пласта, при этом исключается гидравлический разрыв пласта и повышается эффективность применения метода парогравитационного дренирования на залежах СВН с наличием газонасыщенного интервала.

Для определения оптимального компенсационного отбора при эксплуатации парных горизонтальных скважин смоделированы 6 режимов эксплуатации скважин по аналогии объема закачки пара на Ашальчинском месторождении СВН с объемом закачки 15 $м^3$/сут на 100 м и компенсационным отбором жидкости 15, 20, 30, 45, 60, 75 $м^3$/сут на 100 м горизонтального ствола.

На основе проведенных исследований и анализа результатов можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение компенсационного отбора жидкости по сравнению с объемом закачки не дает увеличения дебита нефти, и наибольшая эффективность добычи отмечается при увеличении на 25 % отбираемой жидкости от объема нагнетаемого пара в продуктивный пласт.

2. При разработке залежи СВН с наличием газонасыщенных интервалов в процессе эксплуатации происходит воздействие газа на технологические показатели скважин. Рассматривались различные толщины газонасыщенного интервала – 2, 5, 10 и 15 м – с различным коэффициентом газосодержания: 0,1; 0,25; 0,5 и 1 доли ед.

Результаты термогидродинамических исследований с различным газонасыщением и толщиной газонасыщенного интервала были оформлены в объёмную диаграмму (рисунок 6).

Результаты анализа технологических показателей метода парогравитационного дренирования позволили установить, что наиболее перспективными для добычи являются зоны с показателями паронефтяного отношения до 8 $м^3/м^3$, отмеченные зеленым цветов. Увеличение газонасыщения и толщины газонасыщенного интервала приводит к высокому показателю паронефтяного отношения при разработке залежей СВН Республики Татарстан.

Для оценки эффективности применения метода парогравитационного дренирования на залежах с газонасыщенными интервалами необходимо определить подвижные запасы СВН, коэффициент газонасыщения и толщину газонасыщенного пласта.

Результаты исследований показали эффективность применения парогравитационного метода на моделях с толщиной газонасыщенного интервала от 5 до 15 м при величине газонасыщения в интервале 0,1 и 0,25 доли ед, а для толщин от 10 до 15 м – с газонасыщением, не превышающим 0,6 доли ед.

На основе термогидродинамических исследований и учета влияния газонасыщенного интервала на технологические показатели разработки были

проведены исследования по применению метода парогравитационного дренирования на опытном участке Нижне-Кармальского поднятия Черемшанского месторождения СВН с наличием газонасыщенного интервала, которые показали увеличение накопленной добычи нефти на 60 тыс. т с учетом влияния газонасыщенного интервала по сравнению с традиционным методом парогравитационного дренирования.

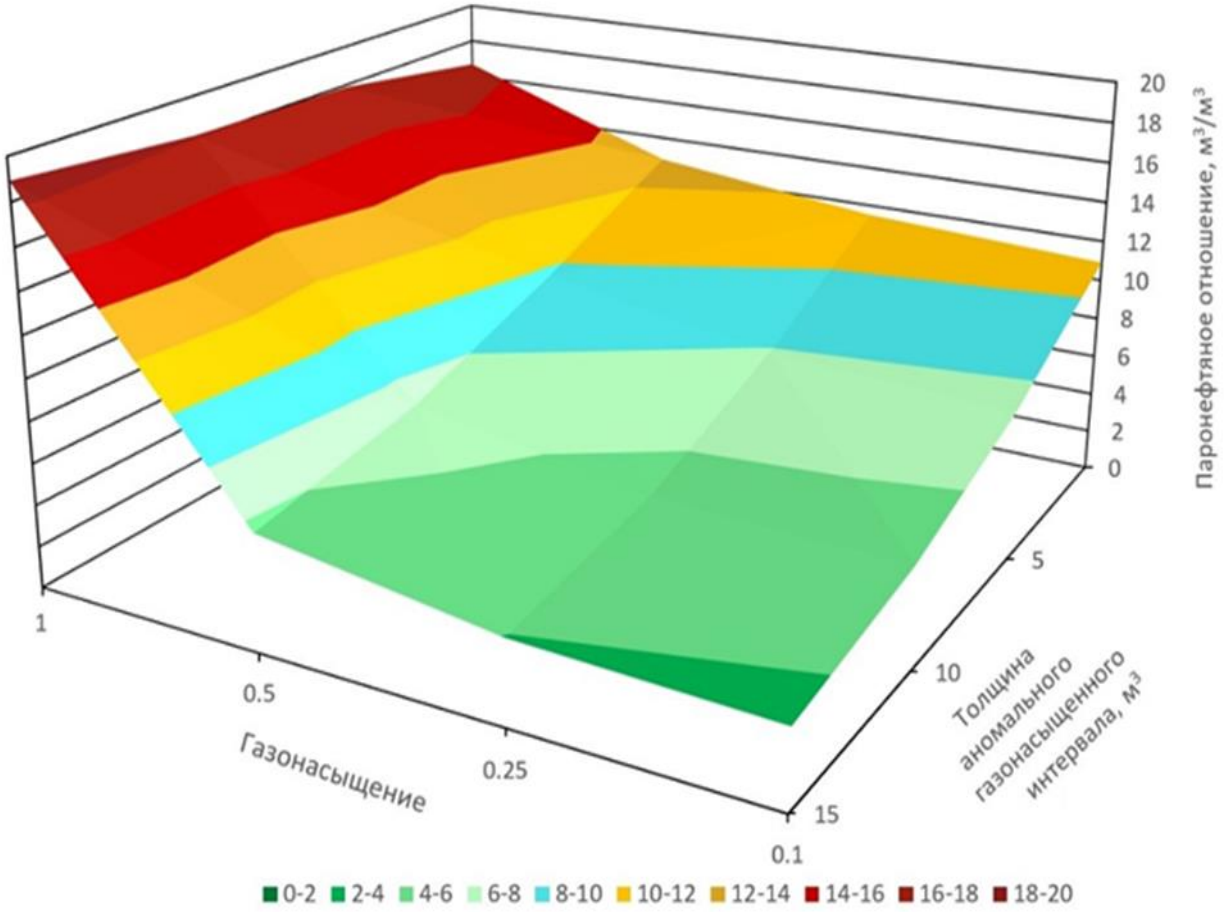



Рисунок 6 – Результаты исследований применения парогравитационного метода на залежах с различным газонасыщением и толщиной газонасыщенного интервала

В ходе анализа результатов исследований применения рассмотренных методов добычи СВН было выявлено, что наиболее эффективным является метод парогравитационного дренирования. Его применение с рекомендуемыми параметрами добычи позволит снизить негативное влияние газонасыщенного интервала на технологические показатели разработки залежи СВН.

**В четвертой главе** исследуется метод внутрипластового горения применительно к разработке месторождений СВН на основе анализа выполненных работ по внутрипластовому горению на Мордово-Кармальском поднятии.

Основная доля СВН (96 %) добыта с использованием технологии внутрипластового горения – применение других технологий оказалось малоэффективным ввиду влияния характеристик продуктивных коллекторов и физико-химических свойств добываемой продукции. Технология

внутрипластового горения в условиях анизотропии геолого-физических и фильтрационно-емкостных свойств остается пока единственным эффективным скважинным способом добычи СВН на Мордово-Кармальском поднятии.

Однако, как показала практика, в процессе длительной разработки залежей СВН эффективность применяемой технологии добычи с использованием внутрипластового горения неуклонно снижается.

Общая тенденция разработки Мордово-Кармальского поднятия – это снижение добычи на фоне увеличения текущей закачки агента, что является признаком снижения эффективности технологии внутрипластового горения.

Уровень добычи СВН снижается, что требует существенного критического пересмотра применяемой технологии.

Низкие дебиты и высокая обводненность добываемой продукции с использованием вертикальных скважин для отбора СВН в сочетании с внутрипластовым горением ставит задачи по разработке эффективных способов добычи СВН с использованием горизонтальных скважин.

Для повышения рентабельности применения внутрипластового горения были проведены термогидродинамические исследования при различных системах расстановки скважин.

Использовалась термогидродинамическая модель, которая характеризуется входными компонентами: СВН, легкая нефть, пластовая вода, углекислый газ, кокс, кислород и азот.

Применение горизонтальных скважин при использовании метода парогравитационного дренирования на залежах СВН Республики Татарстан показало их высокую эффективность. Для оценки технологической эффективности применения горизонтальных технологий для процесса внутрипластового горения рассматривалось 5 проектов расстановки скважин (рисунок 7)

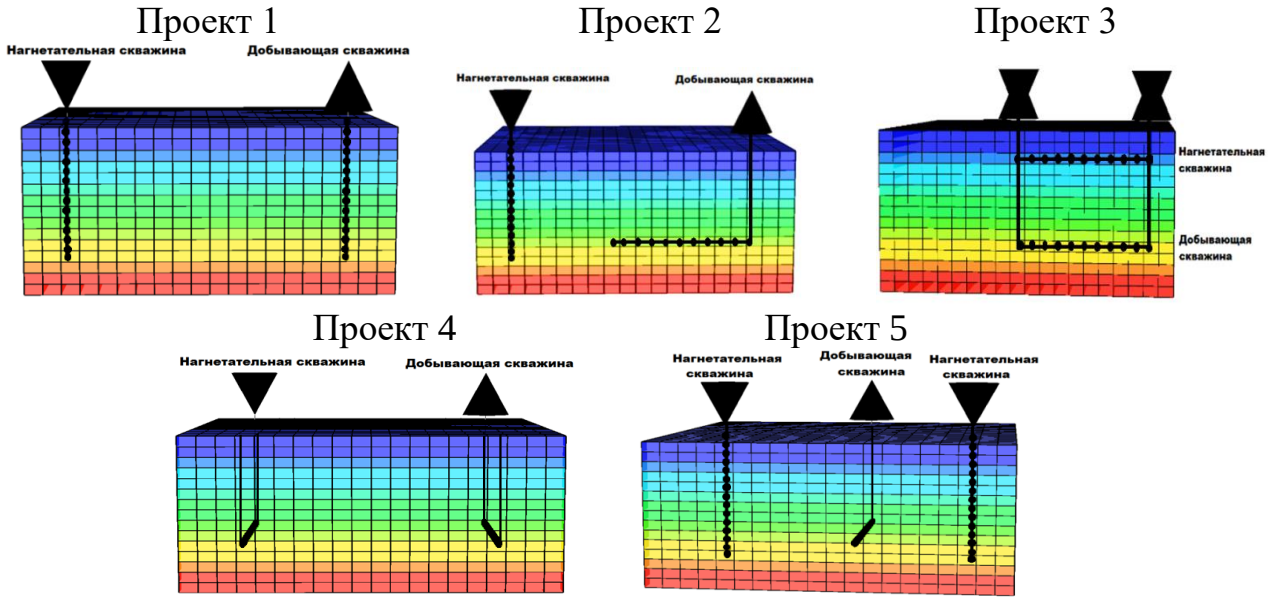



Рисунок 7 – Расстановка скважин для проектов 1–5. Черными точками обозначены скважинные ячейки, в которых проведена перфорация. Объем нагнетаемого агента при всех сценариях составляет 4000 м$^3$/сут

По результатам термодинамических расчетов наиболее эффективным является проект 2 (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели расчетных вариантов разработки 1–5

| Проект | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Расположение скважин в продуктивном пласте | Две вертикальные | THAI | Парные горизонтальные друг над другом | Парные горизонтальные на одном горизонтальном положении | Две вертикальные, одна горизонтальная между ними |
| Накопленная добыча нефти, $м^3$ | 12150,84 | 30468,1 | 27587,53 | 28794,87 | 26402,64 |

При нагнетании на начальной стадии разработки происходит прорыв агента в добывающую скважину при разработке 4-го проекта. Наихудший показатель накопленной добычи отмечен при разработке 1-го проекта.

Применение горизонтальных технологий при моделировании внутрипластового горения показало их высокую эффективность на залежах СВН терригенных отложений (рисунок 8).

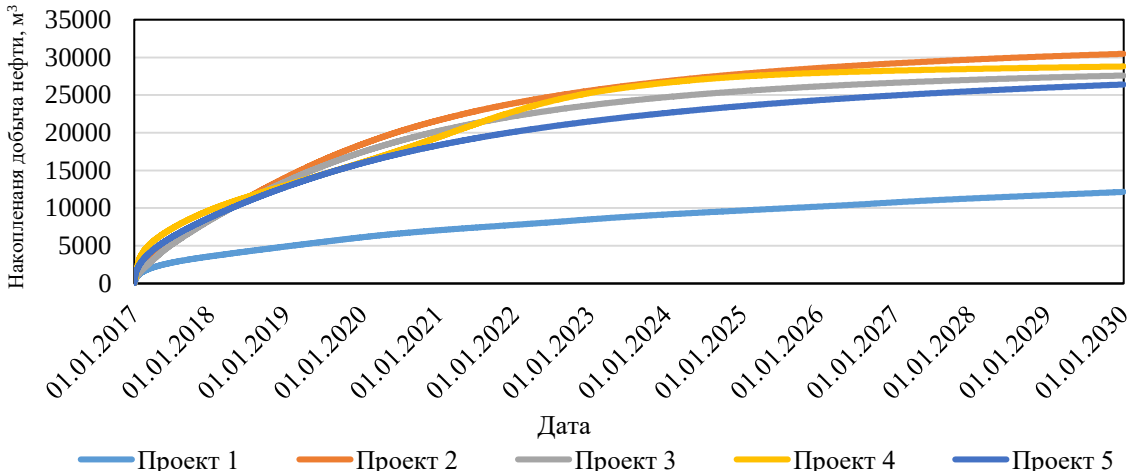



Рисунок 8 – Накопленная добыча нефти проектов разработки 1–5

При использовании вертикальных скважин отмечаются низкие показатели накопленной добычи нефти.

Для оценки технологической эффективности применения многозабойных скважин при реализации метода внутрипластового горения для разработки месторождений СВН были созданы термогидродинамические модели с учетом химических реакций.

Рассмотрено четыре варианта расстановки скважин при внутрипластовом горении:

1) вертикальная нагнетательная и горизонтальная двухзабойная добывающая скважины (рисунок 9, а);

2) горизонтальная нагнетательная и горизонтальная двухзабойная добывающая скважины (рисунок 9, б);

3) горизонтальная нагнетательная и горизонтальная двухзабойная добывающая скважины (рисунок 9, в);

4) горизонтальная нагнетательная и горизонтальная трехзабойная добывающая скважины (рисунок 9, г).

Параметры эксплуатации горизонтальных скважин и показатели разработки по рассмотренным вариантам расчета представлены в таблице 2 и на рисунке 10.

Таблица 2 – Показатели расчетных вариантов разработки 1–4 для случая многозабойных скважин

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Конфигурация добывающей скважины | Двухзабойная | Двухзабойная | Двухзабойная | Трехзабойная |
| Закачка агента, $м^3$/сут | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Срок разработки, годы | 13 | 13 | 13 | 10 |
| Накопленная добыча нефти, $м^3$ | 30087,08 | 29713,0 | 29599,5 | 28004,3 |

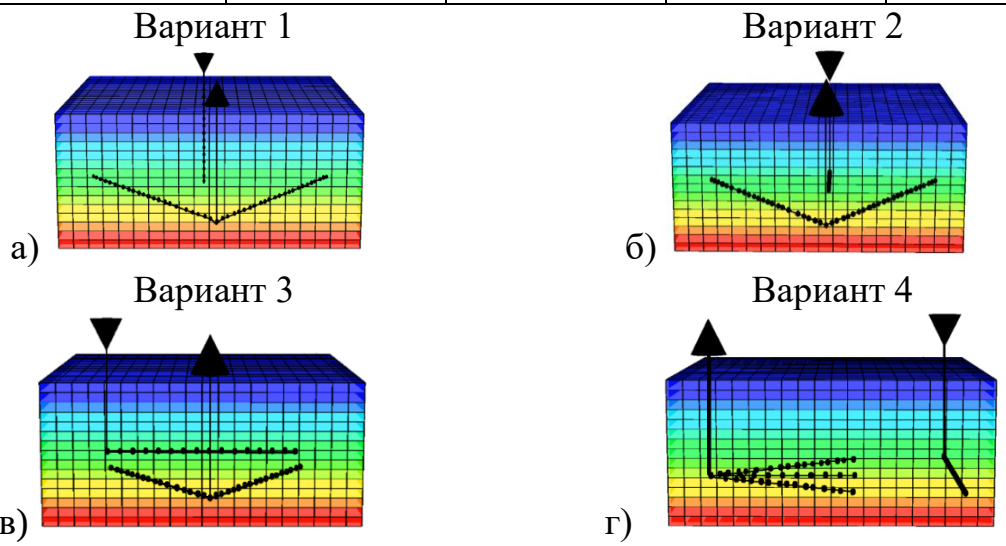



Рисунок 10 – Расстановка скважин на расчетной сетке для варианта 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г). Черными точками обозначены скважинные ячейки, в которых проведена перфорация

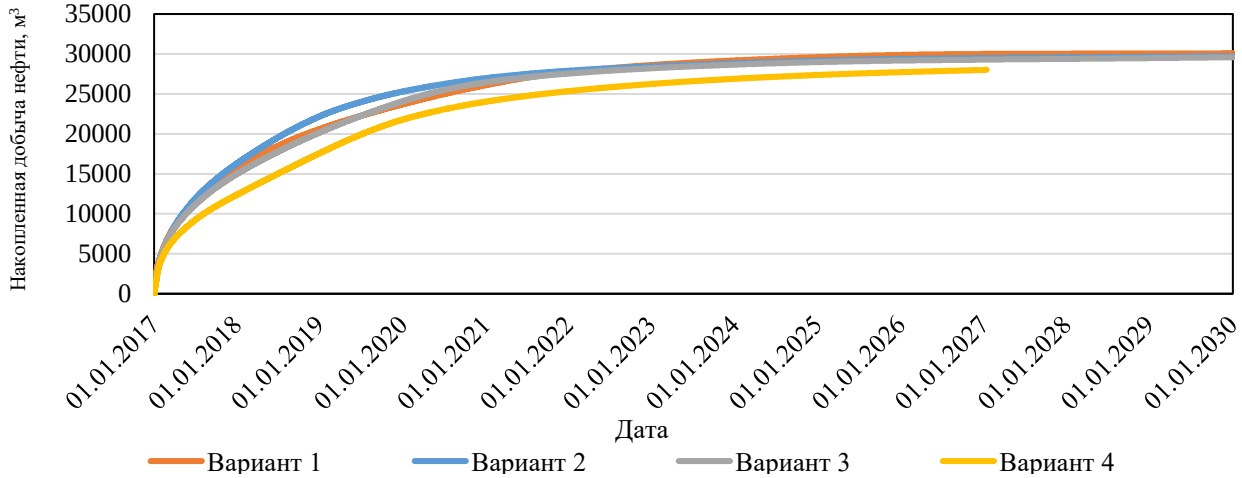



Рисунок 10 – Изменение накопленной добычи нефти во времени по вариантам разработки с использованием многозабойных скважин

Увеличение количества горизонтальных стволов в добывающей скважине (рисунок 9, г) не приводит к увеличению накопленной добычи нефти за счет прорыва агента к забою добывающей скважины в процессе эксплуатации горизонтальных скважин.

Применение горизонтальных скважин позволяет эффективно разрабатывать залежи СВН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного анализа технологической эффективности применения тепловых методов на залежах СВН Республики Татарстан, выявлено, что наличие газонасыщенного интервала приводит к ухудшению распространения паровой камеры и снижению дебита нефти.

2. На залежах СВН с газонасыщенными интервалами с использованием горизонтальных скважин установлены:

а) зависимость КИН от расстояния горизонтальных скважин относительно газонасыщенного интервала. Рекомендуется располагать пару горизонтальных скважин на максимальном расстоянии от газонасыщенного интервала. Горизонтальная добывающая скважина располагается на уровне ВНК залежи СВН. Данное расположение скважин позволяет достичь максимального КИН (0,23 доли ед.) с применением метода парогравитационного дренирования;

б) зависимость КИН от расстояния горизонтальных стволов добывающей и нагнетательной скважин в пласте относительно друг друга. С увеличением расстояния между стволами горизонтальных скважин от 3 до 8 м на залежах с наличием газонасыщенных интервалов происходит наиболее эффективное создание и расширение паровой камеры в пласте. Данное расположение скважин позволяет достичь максимального КИН (0,18 доли ед.) при применении метода парогравитационного дренирования;

в) зависимость КИН от толщины газонасыщенного интервала. В рассмотренном интервале толщин 2, 5, 10 и 15 м с увеличением толщины газонасыщенного интервала происходит снижение КИН. При увеличении толщины в процессе эксплуатации методом парогравитационного дренирования происходит образование конуса из газонасыщенного интервала, который снижает расширение паровой камеры в процессе эксплуатации скважин и приводит к снижению дебита нефти. Рекомендуется разрабатывать залежи СВН с минимальными значениями газонасыщения интервала до 0,5 д.ед.

3. Для залежей СВН с газонасыщенными интервалами разработаны критерии предварительной оценки эффективности применения парогравитационного метода. Для предварительной оценки применения парогравитационного метода и расчета паронефтяного отношения скважин необходимо определить начальные геологические запасы СВН, объем и коэффициент газонасыщения.

4. Оценена технологическая эффективность применения различных систем расстановки скважин при реализации метода внутрипластового горения. Применение горизонтальных скважин в условиях разработки месторождений СВН с помощью метода внутрипластового горения позволяет увеличить накопленную добычу СВН более чем в два раза и снизить объем попутно отбираемого газа на 24 % по сравнению с использованием вертикальных скважин.

5. В ходе выполнения работы предложен ряд новых технических и технологических решений (патенты на изобретения РФ № 2578141, № 2597041, № 2578140, № 2597040, № 2581071, № 2615554, № 2605993, № 2626500, № 2626497, № 2603795, № 2604073, № 2627795, № 2630330), которые могут использоваться для повышения нефтеизвлечения месторождений СВН в терригенных коллекторах.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

**а) статьи из перечня рецензируемых научных изданий**

1. Хафизов, Р.И. Развитие тепловых методов разработки на месторождениях высоковязкой нефти Татарстана [Текст] / Р.И. Хафизов, Р.Х. Низаев, Р.Н. Бурханов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 3. – С. 60-64.

2. Хафизов, Р.И. Геологические и гидрогеологические особенности залегания разрабатываемой залежи высоковязкой нефти Ашальчинского месторождения [Текст] / Р.И. Хафизов, Р.Х. Низаев, Р.Н. Бурханов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 4. – С. 58-63.

3. Хафизов, Р.И. Особенности освоения месторождений высоковязких углеводородных энергоносителей на примере Урмышлинского месторождения нефти [Текст] / Р.И. Хафизов, Р.Х. Низаев, Р.Н. Бурханов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 5-6. – С. 40-45.

4. Анализ эффективности технологий добычи сверхвязкой нефти для условий месторождений ПАО «Татнефть» [Текст] / А.Т. Зарипов, Д.К. Шайхутдинов, Р.И. Хафизов, Я.В. Захаров // Территория «Нефтегаз». – 2016. – № 7-8. – С. 42-50.

5. Разработка Подверьюского месторождения методом направленной закачки воздуха в нефтяные пласты на основе численного моделирования [Текст] / Р.Х. Низаев, Е.Ф. Захарова, Г.В. Александров, Д.К. Шайхутдинов, Р.И. Хафизов, А.А. Сюрин, Ю.Л. Егорова // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 9. – С. 9-12.

6. Зарипов, А.Т. Исследование влияния расположения горизонтальных стволов скважин относительно аномального газонасыщенного интервала на технологические характеристики эксплуатации горизонтальных скважин при разработке залежей высоковязких нефтей [Текст] / А.Т. Зарипов, Д.К. Шайхутдинов, Р.И. Хафизов // Технологии нефти и газа. – 2016. – № 5. – С. 37-42.

**б) патенты на изобретения**

7. Пат. 2578141 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/243. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р., Хафизов Р.И. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2014154362/03 ; заявл. 30.12.14 ; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.

8. Пат. 2597041 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/243. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р., Хафизов Р.И., Низаев Р.Х. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015135337/03 ; заявл. 20.08.15 ; опубл. 10.09.16, Бюл. № 25.

9. Пат. 2578140 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/24, 43/243. Способ разработки залежи природных высоковязких углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р., Хафизов Р.И. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015102281/03 ; заявл. 26.01.15 ; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.

10. Пат. 2597040 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/243, 7/04. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р. Хафизов Р.И., Низаев Р.Х. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015131371/03 ; заявл. 28.07.15; опубл. 10.09.16, Бюл. № 25.

11. Пат. 2581071 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/243. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р., Хафизов Р.И. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015102864/03 ; заявл. 28.01.15 ; опубл. 10.04.16, Бюл. № 10.

12. Пат.2615554 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/243, Е21В 7/04. Способ разработки залежи углеводородных флюидов при тепловом воздействии [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р. Хафизов Р.И., Низаев Р.Х. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2016114244 ; заявл. 12.04.16 ; опубл. 05.04.17, Бюл. № 10.

13. Пат. 2605993 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/243. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р. Хафизов Р.И., Низаев Р.Х. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015144428 ; заявл. 15.10.15 ; опубл. 10.01.17, Бюл. № 10.

14. Пат. 2626500 МПК Е 21 В 43/243, Е21В 7/04. Способ разработки залежи битуминозной нефти из горизонтальной скважины [Текст] / Зарипов А.Т., Хафизов Р.И., Шайхутдинов Д.К.; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – № 2016121628 ; заявл. 31.05.16 ; опубл. 28.07.17, Бюл. № 22.

15. Пат. 2626497 МПК Е 21 В 43/243, Е21В 7/04. Способ разработки залежи битуминозной нефти из горизонтальной скважины [Текст] / Зарипов А.Т., Хафизов Р.И., Шайхутдинов Д.К., Захаров Я.В. ; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – № 2016121626 ; заявл. 31.05.16 ; опубл. 28.07.17, Бюл. № 22.

16. Пат. 2603795 МПК Е 21 В 43/243. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р., Хафизов Р.И., Низаев Р.Х. ; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015131370/03 ; заявл. 28.07.15 ; опубл. 27.11.16, Бюл. № 33.

17. Пат. 2604073 МПК Е 21 В 43/24, 7/04. Способ разработки залежи углеводородных флюидов [Текст] / Нургалиев Д.К., Шапошников Д.А., Исаков Д.Р., Хафизов Р.И., Низаев Р.Х. ; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет». – № 2015149087/03 ; заявл. 16.11.15 ; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34.

18. Пат. 2627795 МПК Е 21 В 43/24, 7/04. Способ разработки залежи битуминозной нефти [Текст] / Зарипов А.Т., Хафизов Р.И., Шайхутдинов Д.К. ; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – № 2016125029 ; заявл. 22.06.16 ; опубл. 11.08.17, Бюл. № 23.

19. Пат. 2630330 МПК Е 21 В 43/24, 7/04. Способ разработки залежи битуминозной нефти [Текст] / Зарипов А.Т., Хафизов Р.И., Шайхутдинов Д.К. ; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – № 2016130909 ; заявл. 26.07.16 ; опубл. 07.09.17, Бюл. № 25.

**в) статьи в научно-технических журналах, сборниках научных трудов и конференций**

20. Хафизов, Р.И. Совершенствование технологии добычи высоковязкой нефти Республики Татарстан [Текст] / Р.И. Хафизов // Нефтегазовый комплекс:

образование, наука и производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 30 марта-3 апр. 2015 г. / М-во образования и науки РТ ; Совет Альметьевского муницип. р-на ; ОАО «Татнефть» ; АГНИ. – Альметьевск, 2015. – Ч. 1. – С. 60-63.

21. Зарипов, А.Т. Технологии добычи СВН и оценка эффективности их применения для условий месторождений СВН ПАО «Татнефть» [Текст] / А.Т. Зарипов, Р.И. Хафизов, Д.К. Шайхутдинов // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта - 1 апр. 2016 г. / М-во образования и науки РТ ; Совет Альметьевского муницип. р-на ; АГНИ. – Альметьевск, 2016. – Ч. 1. – С. 35-37.

22. Хафизов, Р.И. Исследование влияния аномальных газонасыщенных интервалов на эффективность разработки залежей сверхвязкой нефти парогравитационным методом [Текст] / Р.И. Хафизов, А.Т. Зарипов, Д.К. Шайхутдинов // Инновации в разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.Д. Шашина, 7-8 сент. 2016 г., г. Казань : в 2 т. – Казань : Ихлас, 2016. – Т. 2. – С. 235-237.

23. Хафизов, Р.И. Обоснование эффективной технологии разработки залежей сверхвязкой нефти Республики Татарстана с газовой шапкой [Электронный ресурс] / Р.И. Хафизов, Д.К. Шайхутдинов // Молодежная научно-практическая конференция института «ТатНИПИнефть» : Секция № 1 «Геология, разработка нефтяных и нефтегазовых месторождений». – Бугульма, 2016. – 5 с. – Режим доступа: http://10.2.1.52/upload/sms/2016/geol/024.pdf. – Загл. с экрана.

24. Зарипов, А.Т. Исследование влияния расположения горизонтальных стволов скважин относительно аномального газонасыщенного интервала на технологические характеристики эксплуатации горизонтальных скважин при разработке залежи сверхвязкой нефти [Текст] / А.Т. Зарипов, Д.К. Шайхутдинов, Р.И. Хафизов // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ПАО «Татнефть». – Набережные Челны : Экспозиция Нефть Газ, 2017. – Вып. 85. – С. 181-189.

25. Повышение эффективности использования горизонтальных скважин при разработке месторождений сверхвязкой нефти на основе моделирования [Текст] / А.Т. Зарипов, Д.К. Шайхутдинов, Р.И. Хафизов, А.А. Сюрин, А.А. Бисенова // Горизонтальные скважины и ГРП в повышении эффективности разработки нефтяных месторождений : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. основателю горизонт. бурения – А.М. Григоряну, Казань, 6-7 сент. 2017 г. – Казань : Слово, 2017. – С. 66-70.

26. Хафизов, Р.И. Влияние газонасыщенных интервалов на технологические показатели горизонтальных скважин при разработке месторождений СВН [Текст] / Р.И. Хафизов, Д.К. Шайхутдинов, А.Т. Зарипов // Горизонтальные скважины и ГРП в повышении эффективности разработки нефтяных месторождений: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ.

основателю горизонт. бурения – А.М. Григоряну, Казань, 6-7 сент. 2017 г. – Казань : Слово, 2017. – С. 270-271.

27. Хафизов, Р.И. Совершенствование технологии разработки залежей сверхвязкой нефти шешминских отложений Республики Татарстан с наличием аномально газонасыщенных интервалов [Электронный ресурс] / Р.И. Хафизов, Д.К. Шайхутдинов // Проблемы поисков и разведки нетрадиционных запасов из нетрадиционных коллекторов : сб. тез. докл. молодеж. науч.-практ. конф. / ПАО «Татнефть» ; ТГРУ. – Казань : Изд-во АН РТ, 2017. – С. 80-82. – Режим доступа: http://www.antat.ru/ru/izdatelstvo-fen/izdaniya/books/Sbornik2017.pdf. – Загл. с экрана.