

на правах рукописи



**Грищенко Вадим Александрович**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ  
ЗАПАСОВ НЕФТИ В УСЛОВИЯХ «ЗРЕЛЫХ» МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 2.8.4. – Разработка и эксплуатация нефтяных и  
газовых месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

**Научный руководитель** доктор технических наук, доцент  
**Мухаметшин Вячеслав Вячеславович**

**Официальные оппоненты:** **Гиляев Гани Гайсинович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет»,  
кафедра нефтегазового дела имени профессора  
Г.Т.Вартумяна, профессор

**Миннуллин Андрей Геннадиевич**  
кандидат геолого-минералогических наук  
Закрытое акционерное общество «Алойл»,  
главный технолог

**Ведущая организация** Татарский научно-исследовательский  
и проектный институт нефти ПАО «Татнефть»  
имени В.Д. Шашина (г. Бугульма)

Защита диссертации состоится «08» декабря 2022 года, в 16-00 ч., на заседании диссертационного совета Д 24.2.428.03, созданного при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Наиболее крупные месторождения нефтяных компаний, ведущих разработку на территории Волго-Урала, были открыты в прошлом столетии. Тогда же происходило формирование существующих сегодня систем разработки, которые, зачастую, показывали свою высокую эффективность. Об этом свидетельствуют исторические данные о высоких уровнях добычи, а также текущих коэффициентах извлечения нефти (КИН). Не смотря на это, в недрах всё ещё остаётся более половины геологических запасов нефти. На локализацию этих запасов и поиск методов их извлечения и направлены основные научные изыскания в области разработки «зрелых» нефтяных месторождений. Сегодня в целом регион характеризуется постепенным снижением уровня добычи, что связано с высокой выработкой наиболее высокопродуктивных пластов. Данный процесс обуславливает плавное смещение акцентов в сторону участков с низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС), залежей в водо-нефтяных зонах (ВНЗ), сложнопостроенных карбонатных коллекторов. Для эффективного ввода «трудных» запасов в разработку необходимо совместить существующие аналитические инструменты и современные технологические решения. Каждая новая скважина, дополнительная глубинная проба нефти, качественное гидродинамическое исследование и др. являются ценнейшими источниками информации. На их основе могут уточняться геолого-гидродинамические и статистические модели нефтяных пластов, составляться детализированные аналитические проекты, что позволяет увеличить прогнозную способность инструментов и повысить степень выработки запасов. В связи с этим, модели и выводы, которые выполнялись в более раннее время, сегодня требуют уточнения, поскольку каждый день прибавляется новый объём знаний: появляются новые скважины, исследования, меняются режимы эксплуатации, фильтрационные потоки и энергетическое состояния пластов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.8.4. – «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», а именно п.2: Геолого-физические, геомеханические, физико-химические, тепломассообменные и биохимические процессы, протекающие в естественных и искусственных пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр и подземном хранении жидких и газообразных углеводородов и водорода известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для развития научных основ создания эффективных систем разработки, обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода, захоронения кислых газов, включая диоксид углерода, п.3: Научные основы технологии воздействия на межскважинное и околоскважинное пространство и управление притоком пластовых флюидов к скважинам различных конструкций с целью повышения степени извлечения из недр и интенсификации добычи жидких и газообразных углеводородов и п.9: Научные основы создания цифровых двойников технологических процессов, используемых в компьютерных технологиях интегрированного проектирования и системного мультидисциплинарного мониторинга эволюции природно-техногенных систем, создаваемых для эффективного извлечения из недр или хранения в недрах жидких и газообразных углеводородов и водорода путем управления ими с использованием методов и средств информационных технологий, включая методы оптимизации и геолого-гидродинамическое моделирования.

### **Степень разработанности темы**

Оптимизация процесса извлечения углеводородов из недр включает в себя решение большого количества задач различного уровня. Для повышения эффективности выработки запасов вниманием должны быть охвачены все затрагиваемые области – от геологического строения и правильности выбора

системы разработки, до совершенствования расчётных моделей, позволяющих с высокой точностью прогнозировать эффективность мероприятий. Большой вклад в развитие положений об управлении разработкой внесли научно-исследовательские работы Абызбаева И.И., Алтуниной Л.К., Андреева В.Е., Ахметова Р.Т., Бакирова И.М., Батурина Ю.Е., Владимирова И.В., Гильмановой Р.Х., Грачева С.И., Дмитриевского А.Н., Еремина Н.А., Ермилова О.М., Жданова С.А., Закирова С.Н., Зарипова А.Т., Зейгмана Ю.В., Золотухина А.Б., Ибатуллина Р.Р., Ивановой М.М., Иктисанова В.А., Кадырова Р.Р., Каневской Р.Д., Керимова В.Ю., Колганова В.И., Котенева Ю.А., Крылова А.П., Кудинова В.И., Ленченковой Л.Е., Лобусева А.В., Лозина Е.В., Лысенко В.Д., Максимова В.М., Мирзаджанзаде А.Х., Михайлова Н.Н., Мищенко И.Т., Муслимова Р.Х., Мухаметшина В.В., Мухаметшина Р.З., Насыбуллина А.В., Пономарева А.И., Розенберга М.Д., Рогачева М.К., Сагитова Д.К., Степанова С.В., Свалова А.М., Султанова Ш.Х., Сургучева М.Л., Токарева М.А., Федорова К.М., Хакимзянова И.Н., Хасанова М.М., Хисамова Р.С., Хисамутдинова Н.И., Чарного И.А., Шустера А.А., Щелкачева В.Н., Ямалетдиновой К.Ш., Alvarado V., Economides M.J., Giger F.M., Joshi S.D., Mclachlan G.J., Thambynaigam R.K. и др.

Рассмотрение вопросов, связанных с месторождениями на поздних стадиях разработки носит особо сложный характер. Необходимо постоянно уточнять и дополнять ранее сделанные выводы и полученные зависимости, поскольку они могут нести существенные погрешности даже при небольшом изменении степени выработки запасов. Дополнительно существует ряд процессов, связанных с управлением разработкой объектов сложного геологического строения, таких как многопластовые или сложенные карбонатными породами, которые требуют доизучения и совершенствования.

### **Цели и задачи работы**

Целью данной работы является создание методического обеспечения повышения эффективности решения задач ресурсосбережения и увеличения

степени выработки остаточных трудноизвлекаемых запасов на «зрелых» нефтяных месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать методику структурирования ресурсной базы для выявления участков, требующих повышения эффективности выработки запасов, в т.ч. с обоснованием новых критериев отнесения запасов к категории трудноизвлекаемых;

2. Создать алгоритм по определению путей совершенствования систем разработки и поиска наиболее перспективных участков на объектах со сложным геологическим строением;

3. Определение оптимальных технологических параметров и условий эффективного проведения ГРП на многопластовых терригенных и карбонатных объектах;

4. Разработка методических аспектов повышения достоверности информации о процессе разработки залежей в условиях неопределённости.

### **Научная новизна**

1. Предложен алгоритм определения вовлечённости запасов нефти в разработку, эффективности их извлечения и прогнозирования мероприятий на залежах-аналогах. Представлено обоснование необходимости изменения критериев «льготирования» запасов нефти. Для условий карбонатных коллекторов предложен переход от проницаемости к показателю подвижности, как отношению проницаемости к вязкости нефти;

2. Для условий бобриковского горизонта месторождений Волго-Уральской НГП установлена статистическая зависимость между величиной КИН, плотностью сетки скважин и рядом геологических параметров: проницаемостью, прерывистостью и песчанистостью коллектора. Разработан алгоритм картирования карбонатных объектов по перспективности с точки зрения потенциального уровня добычи нефти, включающий анализ влияния различных параметров на эффективность и последующего построения карт

«желательности» на основе набора карт различных характеристик. На примере турнейских отложений предложен методический подход, включающий комплекс процедур по анализу данных. Установлено, что ключевым фактором, влияющим на эффективность системы заводнения, является наличие проницаемой перемычки между пластами;

3. Для условий отдельных залежей пашийского горизонта в терригенных коллекторах определены оптимальные значения геологических (ФЕС целевых пластов, расстояние от целевых пластов до выработанных водонасыщенных интервалов) и технологических (удельная загрузка проппанта) параметров, влияющих на эффективность проведения селективного ГРП. Для карбонатных коллекторов определена область применения высокотехнологичного метода воздействия – кислотного ГРП с проппантом. Установлены необходимые условия её высокой эффективности.

4. Разработана методика определения пластового давления на основе результатов изменения забойного давления (режима работы) при эксплуатации скважин на забойном давлении ниже давления насыщения нефти газом. Предложен алгоритм прогноза обводнённости при снижении забойного давления на основе использования различных характеристик вытеснения. Предложен алгоритм по оценке эффективности системы заводнения, позволяющий оценить степень прокачки в направлении каждой добывающей скважины и определить её эффективность с учётом результатов лабораторных исследований по влиянию степени промывки на коэффициент вытеснения нефти.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании разработанных алгоритмов и предложенных методических подходов для решения задач повышения эффективности выработки запасов на месторождениях, находящихся на заключительных стадиях разработки.

Практическая значимость включает в себя следующие положения:

1. Предложенная методика мониторинга ресурсной базы позволяет эффективно управлять остаточными запасами и формировать программы доизучения, освоения и повышения эффективности выработки наиболее проблемных участков. Включение представленных предложений по корректировке обоснования «льготируемых» объектов позволит значительно повысить рентабельность наиболее проблемных карбонатных объектов, что приведёт к интенсификации процесса освоения этих запасов и опробования высокотехнологичных методов заканчивания и интенсификации.

2. Установленные принципы в области влияния различных параметров на КИН позволили решить важные практические задачи в области регулирования разработки, а также определить рациональную систему разработки для различных участков. Полученные результаты возможно тиражировать на другие месторождения региона со схожими характеристиками. Методика анализа разработка карбонатных объектов позволяет выявить осложняющие факторы, которые негативно сказываются на показателях с целью разработки оптимизационных мероприятий на добывающем и нагнетательном фонде.

3. На основе разработанного алгоритма подбора оптимальных геолого-технологических параметров проведения ГРП на многопластовых объектах с неравномерной выработкой, а также сложнопостроенных карбонатных объектах усовершенствован подход к подбору скважин-кандидатов для гидроразрыва и выбору оптимальной технологии, что позволяет повысить эффективность выработки запасов пластов с ухудшенными ФЕС.

4. Разработанный метод оценки пластового давления позволил значительно повысить охват данными о текущем пластовом давлении в условиях сокращения гидродинамических исследований. Это, в свою очередь, увеличило точность прогнозирования показателей ГТМ и выявить потенциальные участки для оптимизации или формирования системы заводнения. Предложен метод, позволяющий получить аналитическую



модель, в которой обводнённость после ИДН зависит от степени оптимизации, т.е. планируемых отборов жидкости. На её основе удалось значительно повысить точность прогнозирования за счёт снижения экспертной оценки, а также подбирать оптимальный режим эксплуатации;

5. Разработанная схема анализа эффективности системы ППД на завершающей стадии разработки позволяет выявить все направления низкоэффективной закачки с целью дальнейшего внедрения МУН либо остановки для сокращения неэффективных затрат.

6. Материалы диссертационной работы включены в учебный процесс при подготовке студентов по направлению разработки нефтяных месторождений в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

### **Методология и методы исследования**

Поставленные задачи решались путём обобщения информации по анализу и опыту разработки нефтяных месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, в число которых входят геологические и технологические параметры эксплуатационных объектов и отдельно взятых скважин. В процессе вычислений применялись современные вычислительные алгоритмы, а также результаты лабораторных исследований.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика организации процесса мониторинга состояния ресурсной базы позволяющая отслеживать степень вовлечённости запасов в разработку, а также эффективность сформированных систем разработки на выделенных участках. Изменение критериев отнесения объектов к категории «льготизируемых», позволяющее создать обоюдовыгодные условия.

2. Алгоритм анализа объекта сложного геологического строения с анизотропией фильтрационно-емкостных свойств для дифференциации подходов к разработке и повышения эффективности выработки запасов для

всего объекта. Статистические модели, полученные по результатам множественного регрессионного анализа влияния различных геолого-технологических параметров на величину КИН.

3. Способ повышения эффективности проведения гидроразрыва пласта в условиях многопластового объекта, характеризующегося неравномерной выработкой по разрезу. Обоснование области применения перспективной технологии кислотного ГРП с закреплением проппантом

4. Алгоритм определения пластового давления по изменению режима работы скважин, эксплуатируемых при забойном давлении ниже давления насыщения нефти газом. Методика прогнозирования обводнённости после проведения интенсификации добычи нефти путём изменения забойного давления на основе характеристик вытеснения. Комплекс подходов для оптимизации системы заводнения на завершающей стадии разработки.

### **Степень достоверности и апробации результатов**

Достоверность результатов обосновывается множеством наблюдений за фактическими показателями работы скважин и разработки объектов, обобщенных с использованием современного математического аппарата. Алгоритмы, методики и рекомендации, полученные в рамках представленной работы, прошли промышленную апробацию и получили положительный технологический и экономический эффект.

Основные результаты докладывались на международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития в нефтегазовом деле» (г. Октябрьский, 2021 г.), XIV Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2021 г.), научно-технических советах ООО «РН-БашНИПИнефть» (г. Уфа, 2013-2021 г.), а также реализованы при проектировании разработки месторождений, в рамках которого, прошли государственную экспертизу ФБУ «ГКЗ».

## **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных трудах, в том числе: 1 монографии, 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ; 10 статьях, индексируемых в международной базе Scopus и Web of Science.

## **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, основных выводов и рекомендаций, библиографического списка использованной литературы, включающего 140 наименований. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок и 25 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель и сформулированы основные задачи исследования, а также методы их решения, показаны научная новизна и практическая значимость.

В **первой** главе представлена методика структурирования остаточных извлекаемых запасов нефти, позволяющая вести эффективный мониторинг и управление ресурсной базой. Обоснован принцип деления запасов по степени вовлечённости в разработку с введением соответствующего коэффициента. На следующем этапе для участков, вовлечённых в разработку, выполняется прогноз извлекаемых запасов, вырабатываемых при существующих системах разработки. Отношение величины прогнозных запасов к вовлечённым является коэффициентом эффективности использования запасов. Чем выше данный коэффициент, находящийся в пределах от 0 до 1, тем более эффективна система. При низких значениях запасы отбираются недостаточно эффективно, и необходимо выполнить детальный анализ причин с целью подбора мероприятий по оптимизации.

Рассмотрен вопрос повышения эффективности и интенсивности выработки запасов объектов сложнопостроенных карбонатных объектов. Задача решалась путём поиска возможности увеличения рентабельности разработки указанных объектов. На основе множественного сопоставления значений свойств коллекторов и насыщающих флюидов установлено, что эксплуатационные объекты Западной Сибири, подпадающие под критерии «трудноизвлекаемые» по проницаемости коллектора, и карбонатные пласты нефтяных месторождений Урало-Поволжья, насыщенных нефтью более высокой вязкости, имеют близкие значения подвижности, представляющей отношение проницаемости к вязкости нефти.

В результате предложен новый алгоритм определения залежей нефти, относящихся к категории трудноизвлекаемых, учитывающий деление по типу коллектора и показатель подвижности. На примере одного из объектов доказано, что предлагаемые изменения позволяют сменить стратегию разработки на более интенсивную, в результате чего увеличивается и чистый дисконтированный доход недропользователя, и дисконтированный доход государства, а также появляется возможность применения более затратных и эффективных технологий разработки трудноизвлекаемых запасов.

Во **второй** главе рассмотрены вопросы оптимизации системы разработки на объектах, характеризующихся неоднородностью геологического строения.

Представлен методический подход к анализу эффективности выработки запасов с учётом фациальной модели осадконакопления. Объектами исследования и внедрения являются терригенные однопластовые объекты нефтяных месторождений, формировавшиеся в прибрежно-морских условиях и имеющие значительное расхождение фильтрационно-емкостных свойств по площади. Алгоритм включает в себя построение 3D модели осадконакопления, разделение объекта изучения на области с учётом геологических особенностей и системы разработки, прогнозирование показателей на основе гидродинамического моделирования, построение

корреляционных зависимостей геологических и технологических параметров и дальнейшее определение оптимальной стратегии разработки с учётом анализа эффективности технологий воздействия и заканчивания скважин.

Для условий бобриковско-радаевского горизонта одного из месторождений на основе данных ГИС выделены две группы фаций – каналы и дельты. Первая группа обладает более высокими ФЕС в сравнении со второй. Установлено, что на участках с преобладанием фаций дельт требуется формирование более плотной сетки скважин и более жёсткой системы заводнения для достижения КИН, сопоставимых с участками, где преобладают фации каналов.

На основе анализа выполненных геолого-технических мероприятий определено, что для фаций каналов эффективным мероприятием является бурение горизонтальных скважин, а для фаций дельт – проведение ГРП. Методом множественного регрессионного анализа получены две спастические зависимости, позволяющие оценить величину КИН на основе значений ФЕС, содержания запасов в группе фаций каналов и планируемой плотности сетки скважин. Полученные уравнения приведены в формулах:

$$\text{КИН} = 0,041 - 0,006 \cdot \text{ПСС} - 0,105 \cdot S_{\text{н\kappa}} + 0,750 \cdot K_{\text{пр}} + 0,091 \cdot K_{\text{песч}}, \quad (1)$$

где КИН – прогнозная величина КИН, д.ед.;

ПСС – планируемая плотность сетки скважин, га;

$S_{\text{н\kappa}}$  – доля неколлектора, представляющая из себя соотношение суммарной площади неколлекторов к общей площади участка, д.ед.;

$K_{\text{пр}}$  – величина абсолютной проницаемости, мкм<sup>2</sup>;

$K_{\text{песч}}$  – коэффициент песчаности, д.ед.

$$\text{КИН} = 0,490 - 0,012 \cdot \text{ПСС} + 0,003 \cdot D_1, \quad (2)$$

где  $D_1$  – доля запасов, содержащихся в группе фаций 1, д.ед.

Таким образом, для условий терригенных пластов с высокой площадной изменчивостью свойств получены новые корреляционные зависимости, позволяющие определить оптимальную стратегию выработки запасов, и которые учитывают как геологические особенности формирования коллектора, так и степень охвата пласта разработкой.

Представлен алгоритм обоснования технологических решений, направленных на оптимизацию разработки карбонатных коллекторов. Последовательность действий включает в себя следующие основные этапы: анализ лабораторных и промысловых исследований с целью выявления влияния вторичной пустотности на работу скважин, на основе которого в дальнейшем проводится определение процессов и параметров, на которые данные геологические особенности оказывают прямое либо косвенное воздействие, определение наиболее перспективных для разработки участков на основе построения комплексных карт влияющих параметров.

Для условий многопластовых карбонатных отложений турнейского яруса на основе анализа данных работы скважин, результатов промыслово-геофизических и гидродинамических исследований доказано, что между продуктивными пластами существует гидродинамическая связь. Установлено влияние мощности перемычки между пластами на стартовую обводнённость продукции добывающих скважин, а также влияние абсолютной отметки кровли коллектора на величину накопленного водо-нефтяного фактора. С учётом указанных фактов и распределения ФЕС по площади построена комплексная карта, позволяющая определить относительную прогнозную эффективность разработки рассматриваемого участка.

С использованием данных гидродинамического моделирования для условий никзопроницаемых отложений кизеловского горизонта получена уточнённая корреляционная зависимость между плотностью сетки скважин и величиной достигаемого КИН. Полученное уравнение позволяет определить оптимальную систему разработки для участков со схожим геологическим

строением с большей точностью относительно ранее опубликованных результатов. Зависимость представлена на Рисунке 1.

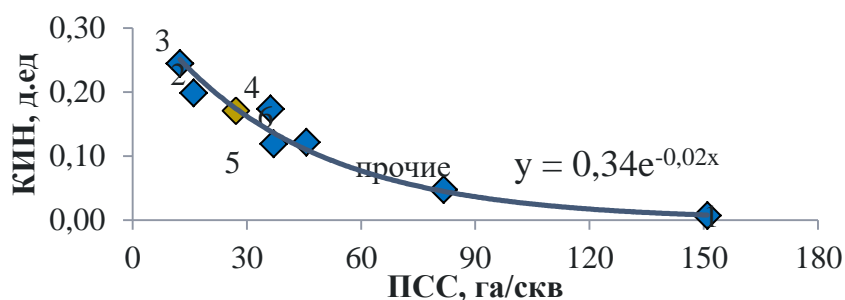


Рисунок 1 – Влияние плотности сетки скважин на величину КИН

На основе обобщения промысловых данных определено критическое забойное давление в нагнетательных скважинах в 17,5 МПа, выше которого появляется эффект автоГРП и значительно сокращается эффективность заводнения. С учётом данного положения, составлена стратегия оптимизации системы ППД на объекте, предусматривающая снижение давления закачки с достижением соотношения добывающих и нагнетательных скважин 3/1 при текущем – 5/1. Это позволит снизить нецелевую закачку и обеспечит повышение охвата заводнением по площади, что позволит увеличить эффективность вытеснения нефти к добывающим скважинам.

В **третьей** главе диссертации определены пути повышения эффективности проведения мероприятий по воздействию на ПЗП.

Изучен вопрос повышения эффективности проведения гидроразрыва пласта на многопластовом терригенном объекте, находящемся на завершающей стадии разработки и характеризующимся неравномерной степенью выработки запасов по разрезу. Алгоритм определения состоит из следующих шагов: детальная локализация остаточных запасов нефти на основе анализа истории разработки, промысловых исследований, результатов геолого-технических мероприятий и гидродинамического моделирования, определение влияния геологических условий и технологических параметров ГРП на эффективность проведенных мероприятий, построение схемы

принятия решений исходя их условий, определённых на предыдущих этапах, а также построение комплексных карт потенциальной эффективности технологии ГРП для условий рассматриваемого нефтяного объекта.

Для залежей многопластового пашийского горизонта, находящегося на завершающей стадии разработки, доказано, что основные остаточные запасы локализованы в верхних пластах, характеризующихся худшими ФЕС в сравнении с нижними. Данный вывод основан на анализе данных работы скважин, выполненных ГТМ, результатах ПГИ и гидродинамического моделирования. С целью интенсификации выработки запасов выполнен поиск оптимальных геолого-технологических параметров для селективного ГРП. В качестве ключевого влияющего параметра определено минимальное расстояние между нефте- и водонасыщенными пластами. На Рисунке 2 представлена зависимость, отражающая влияние мощности перемиčky и загрузки проппанта на обводнённость после ГРП.

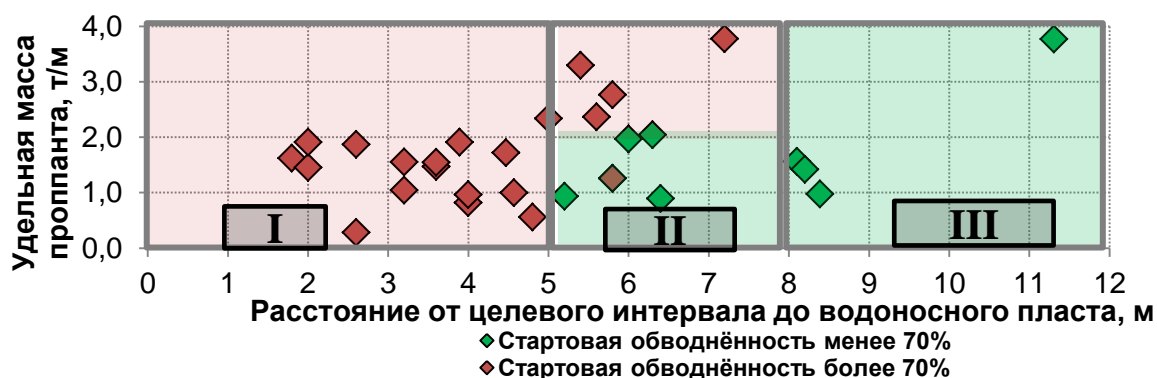


Рисунок 2 - Влияние параметров на стартовую обводнённость

В результате впервые для рассмотренных условий пашийского горизонта определено, что для минимизации риска прорыва трещины ГРП в водонасыщенные пласты в интервале мощности перемиčky от 5 до 8 м предельная загрузка проппанта составляет 2,0 т/м, при мощности более 8 м возможна повышение закачки проппанта. В условиях мощности перемиčky до 5 м прорыв происходит даже при небольшой массе проппанта, при этом успешность в виде дебита нефти будет определяться ФЕС верхних пластов,



влияние которых описывается следующей зависимостью, также впервые полученной для данного объекта:

$$\Delta q_n = 17,495 \cdot m \cdot H_{эфф} - 0,1862, \quad (3)$$

где  $\Delta q_n$  – прогнозный прирост дебита нефти при условии прорыва трещины ГРП в водонасыщенные пласты, т/сут,

$m$  – средневзвешенная открытая пористость нефтенасыщенных пластов, д.ед.,

$H_{эфф}$  – эффективная мощность нефтенасыщенных пластов, м.

На основе полученных выводов построена комплексная карта, учитывающая разработанные критерии и отражающая целесообразность проведения селективного ГРП на различных участках объекта исследования.

С целью изучения проблемы повышения эффективности воздействия на призабойную зону неоднородных низкопроницаемых карбонатных пластов проанализирован вопрос применения двух современных технологий – кислотного ГРП (КГРП) и кислотного ГРП с закреплением проппантом (ПКГРП). В ходе анализа сформирован следующий алгоритм проведения исследования в равных условиях: разделение скважин по группам, учитывающим компенсацию отборов закачкой для исключения фактора разности пластовых давлений, определение влияющих параметров на основе построения корреляционных зависимостей геологических параметров и технологической эффективности в виде дополнительной добычи нефти.

Для условий карбонатных пластов республики Башкортостан впервые установлено, что ключевыми характеристиками, оказывающими влияния на эффективность технологии ПКГРП являются: проницаемость, песчанность и обеспеченность компенсацией отборов закачкой. Влияние первых двух параметров приведено на Рисунке 3.

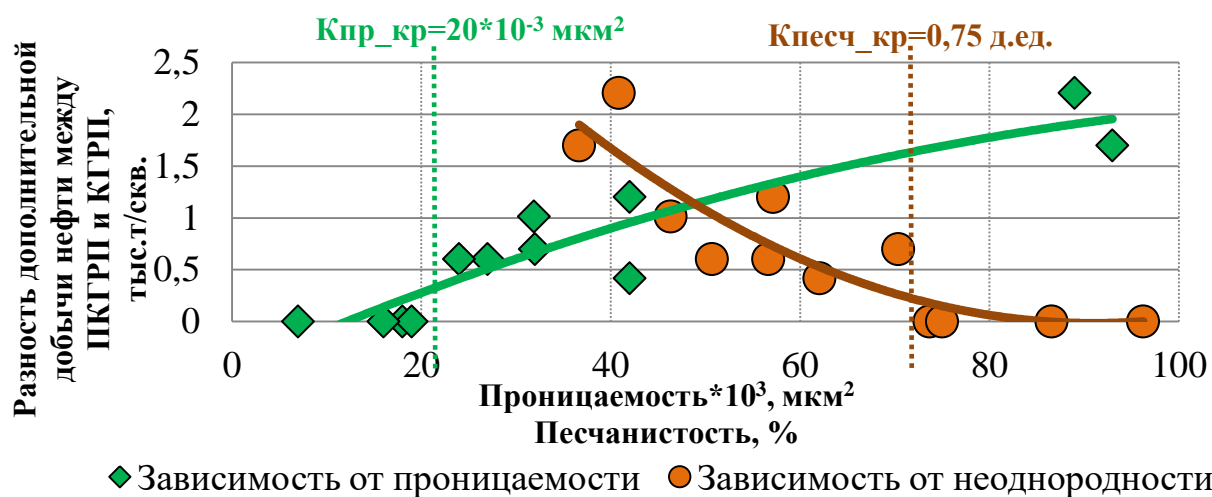


Рисунок 3 – Влияние проницаемости и песчанности на ПКГРП

С высокой достоверностью определены граничные условия эффективности: проницаемость не менее 0,020 мкм<sup>2</sup>, песчанность не более 0,75 д.ед., необходимый уровень компенсации определяется индивидуально для каждого объекта. Для указанных условий рекомендуется проведение КГРП с проппантом, для прочих условий – технология стандартного КГРП.

В **четвёртой** главе рассмотрены вопросы, посвящённые задачам оптимизации процессов разработки, сопровождаемых неопределённостями.

С целью повышения охвата данными об энергетическом состоянии пластов разработан алгоритм косвенной оценки пластового давления на основе изменения режимов работы скважин. Оценка пластового давления напрямую из формулы притока возможна при эксплуатации в режиме забойного давления выше давления насыщения нефти газом. В условиях разработки месторождений Волго-Урала значительное количество скважин эксплуатируются с более низким забойным давлением, что требует разработки специального алгоритма построения кривой притока с учётом выделения газа в призабойной зоне пласта. В данном случае уравнение включает в себя две неизвестных – пластовое давление и продуктивность в режиме ниже давления насыщения. Для решения поставленной задачи в виде регрессионного уравнения предложено использовать специальный математический аппарат – генетический алгоритм. На основе разработанного

алгоритма проведён ретроспективный анализ выполненных операций по изменению забойного давления с наличием замеров пластового давления в данный период. Сопоставление расчётных и фактических пластовых давлений представлено на Рисунке 4.

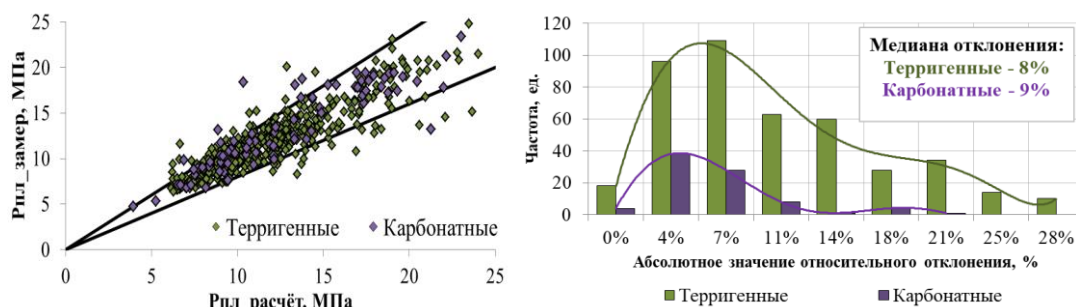


Рисунок 4 – Сопоставление расчётных и фактических пластовых давлений

Результаты показывают высокую сходимость – медиана отклонения 8-9%, что доказывает возможность применения разработанного инструмента для оценки пластового давления. Следует отметить, что описанные алгоритмы не являются полноценной заменой гидродинамических исследований по определению пластовых характеристик, а являются их дополнением, результаты которого должны анализироваться с учётом опыта разработки залежей в конкретных геологических условиях.

С целью повышения точности прогноза эффективности оптимизации насосного оборудования разработан подход к прогнозу обводнённости на основе характеристик вытеснения, учитывающий интенсивность отбора жидкости из пласта. Для данной задачи используемые характеристики должны обладать определённым свойством – в одной из частей уравнения отборы нефти и жидкости должны быть независимы друг от друга. Предложенный механизм был опробован на скважинах с фактическими выполненными мероприятиями по снижению забойного давления, которые разрабатывают месторождения республики Башкортостан. На основе сопоставления расчётных и фактических значений обводнённости установлены оптимальные виды характеристик вытеснения, наилучшим

образом подходящие для рассмотренных геологических групп. Сопоставление фактической обводнённости с первичным прогнозом и на основе выбора оптимальных характеристик представлено на Рисунке 5. Среднее абсолютное отклонение по адаптированному алгоритму составляет 1,9%, что показывает высокую точность прогноза.

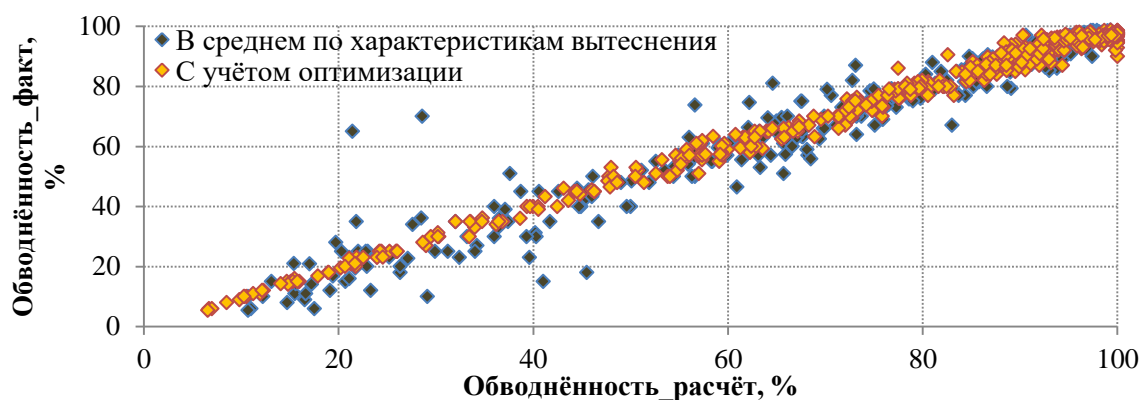


Рисунок 5 – Сопоставление расчётной и фактической обводнённости

С целью принятия научно-обоснованных решений по оптимизации системы заводнения на завершающей стадии разработки представлена методика оценки эффективности закачки. Алгоритм включает в себя распределение накопленной закачки по разрезу на основе результатов исследования скважин и распределения ФЕС, а также распределение по площади, определяемое по следующей формуле:

$$\varphi_i = \varphi_{\text{пр}} * \gamma_1 + \varphi_{\text{стр}} * \gamma_2 + \varphi_{\text{ф}} * \gamma_3 + \varphi_{\text{р}} * \gamma_4, \quad (4)$$

где  $\varphi_i$  - коэффициент распределения закачки;

$\varphi_{\text{пр}}$  - пространственный фактор распределения закачки;

$\varphi_{\text{стр}}$  - структурный фактор распределения закачки;

$\varphi_{\text{ф}}$  - фильтрационный фактор распределения закачки;

$\varphi_{\text{р}}$  - фактор изменения давления;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  - весовые доли факторов.

На основе указанных распределений вычисляется степень прокачки порового объёма пласта в районе каждой добывающей скважины. Затем проводится сопоставление полученного значения с предельной прокачкой, определяемой в лабораторных условиях, выше которой не происходит вытеснения нефти закачиваемым агентом. Решение об эффективности закачки принимается на основе сопоставления фактической прокачки с предельной.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

На основании проведённых исследований созданы новые и уточнены существующие методические подходы, направленные на обоснование управляющих решений задач ресурсосбережения и увеличения выработки остаточных трудноизвлекаемых запасов на зрелых нефтяных месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. При этом:

1. Для условий регионов, имеющих сложную структуру ресурсной базы, предложен алгоритм, позволяющий организовать эффективный мониторинг использования запасов. На его основе возможно выделение участков, перспективных для вовлечения, планирование программы геолого-разведочных работ для уточнения запасов, а также выявление участков с недостаточной эффективностью существующей системы разработки. С целью ввода в разработку законсервированных запасов и интенсификации выработки запасов предложен механизм изменения определения категории трудноизвлекаемых запасов. На основе сопоставления параметров карбонатных объектов Волго-Урала и Западной Сибири предложен переход от обоснования проницаемости к подвижности, представляющей собой отношение проницаемости коллектора к вязкости флюида. Разработанный принцип позволяет повысить экономическую целесообразность разработки наиболее сложных участков для обеспечения возможности применения более затратных и эффективных технологий разработки, а также увеличивает дисконтированный доход государства.

2. Предложен подход определения оптимальных параметров системы разработки на основе данных фациальной модели осадконакопления и распределения фильтрационно-емкостных свойств. Полученные результаты с достаточной достоверностью могут быть также транслированы на участки со схожим строением коллектора. Для условий одного из карбонатных объектов разработан алгоритм поиска перспективных для разработки участков и оптимизации работы системы заводнения.

3. На примере одного из многопластовых терригенных объектов с неравномерной выработкой запасов по разрезу предложена схема составления портрета успешного ГРП и определения ключевых геолого-технологических параметров. Для карбонатных объектов республики Башкортостан определена область применения перспективной технологии кислотного ГРП с закреплением проппантом: проницаемость не менее  $0,020 \text{ мкм}^2$ , песчанистость не более 0,75 д.ед., обеспеченность необходимым уровнем компенсации отборов закачкой.

4. Для повышения охвата данными об энергетическом состоянии пластов разработан алгоритм косвенного определения пластового давления по изменению режима работы скважин в условиях, когда забойное давление ниже давления насыщения нефти газом, что позволяет более точно планировать ГТМ и мониторинг работы базового фонда при недостаточном охвате гидродинамическими исследованиями. С целью повышения точности прогноза обводнённости после ИДН предложено применение характеристик вытеснения. Преимуществом разработанного метода является учёт темпа отбора жидкости из пласта, что отсутствует при экспертной оценке. Предложен алгоритм определения неэффективных направлений закачки на основе комплексного распределения закаченных объёмов в каждом направлении и привлечения фильтрационных исследований на керне. Предложенный подход позволяет определить объёмы неэффективной закачки для дальнейшего внедрения МУН либо остановки скважин с целью повышения рентабельности разработки.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

- в монографии:

1. Грищенко В.А. Научно-методические аспекты повышения эффективности использования активов нефтяных компаний в условиях «зрелых» месторождений [текст]: монография / В.А. Грищенко, Р.Р. Асадуллин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. – 143 с.

- в статьях в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ в соответствии с требованиями ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

2. Грищенко В.А., Баширов И.Р., Мухаметшин М.Р., Бильданов В.Ф. Особенности применения пропантно-кислотного гидроразрыва пласта на нефтяных месторождениях Республики Башкортостан // Нефтяное хозяйство. – 2018. - №12. – С. 120-122.

3. Грищенко В.А., Якупов Р.Ф., Мухаметшин В.Ш., Мухамадиев Б.М., Позднякова Т.В., Трофимов В.Е. Локализация и стратегия выработки остаточных запасов нефти пашийского горизонта Туймазинского месторождения на заключительной стадии разработки // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 103-107.

4. Грищенко В.А., Харисов М.Н., Якупов Р.Ф., Мухаметшин В.Ш., Вафин Т.Р. Анализ результатов косвенного определения пластового давления по изменению режимов работы скважин с использованием генетического алгоритма // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 8 (356). – С. 36-41

5. Грищенко В.А., Гареев Р.Р., Циклис И.М., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В., Якупов Р.Ф., Вафин Т.Р. О повышении интенсивности ввода в активную разработку залежей нефти с трудноизвлекаемыми запасами в карбонатных коллекторах // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 1 (361). – С. 45-52

- В изданиях, индексируемых в международной базе Scopus:

6. Грищенко В.А., Пожиткова С.С., Мухаметшин В.Ш., Якупов Р.Ф. Прогноз обводненности после оптимизации глубинно-насосного оборудования на основе характеристик вытеснения // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. № 2. – С. 143-151

7. Грищенко В.А., Рабаев Р.У. Мухаметшин В.Ш., Якупов Р.Ф. Методический подход к определению оптимальных геолого-технологических характеристик при планировании ГРП на многопластовых объектах // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. № 2. – С. 182-191.

8. Грищенко В.А., Циклис И.М., Мухаметшин В.Ш., Якупов Р.Ф. Методические подходы к повышению эффективности системы заводнения на поздней стадии разработки // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. № 2. – С. 161-171

9. Грищенко В.А., Гареев Р.Р., Циклис И.М., Мухаметшин В.В., Якупов Р.Ф. Расширение круга льготированных объектов, содержащих трудноизвлекаемые запасы нефти // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. № 2. – С. 8-18

10. Грищенко В.А., Позднякова Т.В., Мухамадиев Б.М., Мухаметшин В.В., Бахтизин Р.Н., Кулешова Л.С., Якупов Р.Ф. Повышение эффективности разработки залежей нефти в карбонатных коллекторах на примере турнейского яруса // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. № 2. – С. 238-247

11. Грищенко В.А., Асылгареев И.Н., Бахтизин Р.Н., Мухаметшин В.В., Якупов Р.Ф. Методический подход к мониторингу эффективности использования ресурсной базы при разработке нефтяных месторождений // SOCAR Proceedings. – 2021. – Специальный выпуск. № 2. – С. 229-237

12. Indirect determination of reservoir pressure by changing operating modes of exploration and recovery wells / V.A. Grishchenko, M.N. Kharisov, R.F. Yakupov, V.V. Mukhametshin, L.S. Kuleshova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science

(XIV Russian Conference on Petroleum and Mining Engineering). – 2022. – Vol. 1021. – 012048. – P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012048

13. Grishchenko V.A., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Ways to improve the development efficiency in the complex-structured carbonate deposits of the Tournaisian stage using hydraulic fracturing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (XIV Russian Conference on Petroleum and Mining Engineering). – 2022. – Vol. 1021. – 012017. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012017

*– в других изданиях и материалах различных конференций и семинаров:*

14. Грищенко В.А. Оценка эффективности различных систем разработки на примере турнейского яруса // Инновации и перспективы развития в нефтегазовом деле – 2021: сборник трудов международной научно-практической конференции (Октябрьский, 16-17 апреля 2021 г.) – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – С. 26-30.

15. Грищенко В.А., Вагизов А.М., Харисов М.Н. Результаты и перспективы технологии многостадийного кислотного гидроразрыва пластов на месторождениях ПАО АНК «Башнефть» // Сборник научных трудов ООО «РН-БашНИПИнефть». – Уфа: БашНИПИнефть, 2018 – Вып. 125.– . 115-121.

16. Грищенко В.А., Асылгареев И.Н., Червякова А.Н. Повышение эффективности выработки запасов в зонах совместного залегания объектов разработки на примере Копей-Кубовского нефтяного месторождения // Актуальные научно-технические решения для развития нефтедобывающего потенциала ПАО АНК «Башнефть», Сборник научных трудов. Уфа, изд.БашНИПИнефть, 2016 – Вып. 124. – С. 209-214.

17. Грищенко В.А. Повышение эффективности геолого-технических мероприятий на сложнопостроенных карбонатных отложениях турнейского яруса // Инновации и перспективы развития в нефтегазовом деле – 2021: сборник трудов международной научно-практической конференции (Октябрьский, 16-17 апреля 2021 г.)–Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – С. 177-181.