

*На правах рукописи*

**Григорьев Максим Борисович**



**ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ  
ОКОНЧАНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ**

*Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация  
нефтяных и газовых месторождений*

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

Санкт-Петербург – 2024

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

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Тананыхин Дмитрий Сергеевич*

**Официальные оппоненты:**

*Салимов Олег Вячеславович*

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Тюменский нефтяной научный центр», отдел выполнения и внедрения работ по СНТ/ОПИ, менеджер;

*Щербаков Георгий Юрьевич*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-Технический Центр», Центр инженерных решений по разработке, Блок интегрированных решений, эксперт.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **26 сентября 2024 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ГУ 2024.1 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2, ауд. № 3321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 26 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



РАУПОВ  
Инзир Рамилевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Разработка и эксплуатация залежей/месторождений со слабосцементированными коллекторами зачастую сопряжена с процессом пескопроявления. Первоначальное равновесное напряженное состояние горных пород нарушается уже в процессе бурения, освоения, а также в процессе дальнейшей эксплуатации скважин при создании депрессии на пласт. В результате, когда возникающие в призабойной зоне напряжения превышают предел прочности пород, происходит их разрушение. Как следствие, повышенная концентрация взвешенных частиц горной породы в добываемой продукции становится причиной сбоев в работе погружного и наземного оборудования, а также приводит к снижению коэффициента эксплуатации скважин из-за увеличения частоты и продолжительности ремонтов и, в результате, повышению операционных затрат.

### **Степень разработанности темы исследования**

Значительный вклад в изучение процесса пескопроявления при эксплуатации скважин, вскрывающих залежи со слабосцементированными породами-коллекторами внесли отечественные и зарубежные учёные: Абызбаев И.И., Аксенова Н.А., Белоусов Ю.И., Бондаренко В.А., Бочкарев В.К., Зотов Г.А., Гиляев Г.Г., Давыдов В.В., Орекешев С.С., Румянцева Е.А., Смольников С.В., Строганов В.М., Al-Awad M.N.J., Andrews J.S., Fattahpour V., Khamekhchi E., King G., Mahmoudi M., Matanovic D., Suman G. и многие другие.

Пескопроявление приводит к обширному перечню осложнений при добыче нефти, наиболее важными из которых являются: значительный эрозионный износ подземного и наземного оборудования – насосных труб, насосов, выкидных линий и сепараторов; образование песчаных пробок; утечки нефти на поверхности; смятие эксплуатационных колонн. Предотвращение или борьба с проявлениями этих осложнений требует значительных финансовых и человеческих ресурсов. По этой причине изучение природы пескопроявления и особенностей его течения является актуальной задачей при разработке нефтяных месторождений.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности эксплуатации нефтяных скважин с горизонтальным окончанием, вскрывших залежи со слабосцементированными породами-коллекторами.

**Идея работы.** Поставленная цель достигается путем учета транспортирующей способности потока флюида и геомеханического состояния призабойной зоны пласта.

**Основные задачи исследования:**

1. Выполнить исследование причин и последствий пескопроявления при эксплуатации скважин, вскрывших залежи со слабосцементированными породами-коллекторами, а также способов (технологий) борьбы с пескопроявлением.

2. Исследовать особенности применения современных технологий ограничения пескопроявления на примере месторождений Западной Сибири.

3. Разработать методику проведения физического моделирования на предмет исследования процесса пескопроявления.

4. Разработать комплексный подход к расчету процесса пескопроявления, включающий как аспекты разрушения призабойной зоны пласта-коллектора, так и аспекты транспортировки разрушенных частиц породы по стволу скважины.

5. Провести физическое моделирование процесса пескопроявления с учетом различных технологических режимов работы скважин.

6. Выработать рекомендации по внедрению технико-технологических решений для ограничения процесса пескопроявления.

**Объект исследования** – система «скважина – призабойная зона пласта» на месторождениях со слабосцементированным терригенным типом коллектора с высоковязкой нефтью.

**Предмет исследования** – гидродинамические процессы, протекающие в объекте исследования.

### **Научная новизна работы:**

1. Экспериментально и аналитически установлен избирательный характер зависимости КВЧ от перепада давления при фильтрации и фазового соотношения фильтрующихся флюидов, заключающийся в прямой зависимости количества механических примесей от содержания воды в потоке и в обратной - от содержания газа.

2. Разработан алгоритм и модифицирована математическая модель, учитывающие положение частиц породы на стенках добывающей скважины и возможность их транспортировки потоком флюида на горизонтальном участке ее ствола, позволяющие определить условия ее безаварийной эксплуатации.

Диссертационная работа соответствует п. 2 паспорта научной специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана методика проведения физического моделирования процесса пескопроявления для применения в исследовательских целях. Получен акт внедрения в компании ООО «Сэнд Контрол Лаб».

2. Предложено комплексирование методов математического моделирования для прогнозирования процесса пескопроявления и параметров его течения при освоении и эксплуатации нефтяных скважин в условиях слабосцементированных (неустойчивых) пород-коллекторов.

3. Предложена модифицированная математическая модель для определения способности флюида «выносить» твердые взвешенные частицы непосредственно со стенок ствола скважины, учитывающая положение частицы на его поверхности.

**Методология и методы исследования.** В работе применяются литературный обзор в качестве теоретического метода исследования. В числе методов моделирования – физическое, с проведением фильтрационных испытаний и анализом частиц на предмет количества взвешенных частиц в фильтрате и их

гранулометрического состава, а также математическое моделирование.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Учет установленных, для исследуемого объекта, зависимостей количества взвешенных частиц от перепада давления и фазового соотношения фильтрующихся флюидов, позволит повысить эффективность эксплуатации нефтяных скважин с горизонтальным окончанием, вскрывших слабосцементированные породы-коллекторы.

2. Применение разработанного алгоритма математического моделирования позволяет на этапе освоения скважины определить условия ее эксплуатации без образования песчаных пробок на горизонтальном участке.

**Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций** подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием лабораторного оборудования, достаточной сходимостью расчётных величин с экспериментальными данными.

**Апробация результатов.** Основные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований, выводы и рекомендации работы представлялись на следующих международных и региональных научно-практических конференциях и форумах: Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых (г. Пермь, 2021); Нефть и газ 2022 (г. Москва, 2022); Актуальные проблемы недропользования (г. Санкт-Петербург, 2022); Круглый стол «Перспективы развития нефтегазового комплекса в Волго-Уральском регионе» (г. Самара, 2022); Международная молодежная научно-практическая конференция под эгидой Совета молодых ученых РАН в рамках VI Молодежного научно-практического форума «Нефтяная столица» (г. Нижневартовск, 2023); XXVII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2023).

**Личный вклад автора.** Анализ и обобщение публикаций по теме диссертации, постановка и проведение экспериментов в

лабораториях Горного университета, математическое моделирование с использованием специализированного ПО, обработка и интерпретация результатов экспериментов, подготовка текста работы, формулировка выводов и основных защищаемых положений.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 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 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, содержит 164 страницы машинописного текста, 111 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 124 наименований, 3 приложения на трех страницах.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю – Декану нефтегазового факультета *Тананыхину Дмитрию Сергеевичу*, а также всем сотрудникам кафедры РНГМ за оказанную помощь.

Сотруднику ООО «Газпромнефть НТЦ» - *Сандыге Михаилу Сергеевичу*, за помощь в проведении экспериментов.

Сотрудникам компании ООО «РН-Пурнефтегаз» - *Стецюку Илье Александровичу* и *Фаррахову Линару Анировичу*, за экспертизу работы и ценные советы, полученные в ходе ее обсуждения.

Сотруднику ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» - *Королеву Максиму Игоревичу*, за наставничество, а также полезные советы и рекомендации, полученные в ходе обсуждения работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** изложены базовые понятия, связанные с проблемой пескопроявления. Проведен анализ факторов, оказывающих влияние на инициирование и течение процесса пескопроявления. Приведены типовые решения, применяемые для ограничения и/или предотвращения пескопроявления, проведен анализ преимуществ и недостатков применяемых технологий. Приведен перечень возникающих осложнений, вызываемых выносом механических примесей в нефтяных скважинах.

**Во второй главе** представлены результаты математического моделирования. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния призабойной зоны пласта при эксплуатации нефтяных скважин. Приведена физическая модель отрыва частиц породы со стенок ствола скважины. Представлены расчеты транспортирующей способности потока флюидов на горизонтальном участке труб (насосно-компрессорных / эксплуатационной колонны) в зависимости от действующего перепада давления при фильтрации (забойного давления).

**В третьей главе** приведены результаты лабораторных экспериментов для исследования процесса пескопроявления. Приведена методика проводимых фильтрационных испытаний с использованием насыпных моделей пласта-коллектора. Исследование разбито на 3 этапа: на первом этапе исследуется зависимость процесса пескопроявления от внешних факторов, на втором этапе исследуется влияние объемного распределения фаз в общем потоке фильтрующихся флюидов на процесс пескопроявления, на третьем этапе исследуется влияние профиля проволоки на эффективность удержания механических примесей забойным проволочным фильтром.

**В четвертой главе** приводятся данные по работе фонда скважин одного из месторождений Западной Сибири. Проведен



корреляционный анализ по сопоставлению полученных лабораторных данных с работой реального фонда скважин.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Учет установленных, для исследуемого объекта, зависимостей количества взвешенных частиц от перепада давления и фазового соотношения фильтрующихся флюидов, позволит повысить эффективность эксплуатации нефтяных скважин с горизонтальным окончанием, вскрывших слабосцементированные породы-коллекторы.**

Для изначально слабосцементированных пород-коллекторов проблема выноса породы из пласта в ствол скважины должна быть обоснована по результатам керновых испытаний образцов породы и математического моделирования прочностных свойств породы-коллектора при действующих напряжениях, обусловленных перепадом давления при фильтрации (депрессией).

Расчеты по различным геомеханическим моделям показывают, что баланс сил на примере скважины с горизонтальным окончанием одного из месторождений Западной Сибири может способствовать разрушению горной породы, т.е. пескопроявление инициируется уже с начальной стадии эксплуатации скважин, вскрывающих коллекторы подобного типа.

Забойное давление, в этом случае, оказывает влияние на скоростные потоки непосредственно в призабойной зоне пласта, а также далее по стволу скважины.

Таким образом, по результатам моделирования должна ставиться задача по применению технико-технологических решений для ограничения и/или предотвращения пескопроявления. Подробный перечень решений представлен в основном тексте работы.

С целью оценки влияния перепада давления при фильтрации на количество взвешенных частиц в фильтрате (далее - КВЧ) была проведена серия экспериментальных исследований на насыпных моделях пласта-коллектора. Применение данных моделей обусловлено невозможностью получить образцы реального керна в

силу отсутствия технологий, доступных в настоящее время в России, для его отбора из слабосцементированных пород-коллекторов. Критерием сходимости насыпных моделей с реальным керном пласта-коллектора служат фильтрационно-емкостные свойства моделей и их гранулометрический состав. В рамках проведенных испытаний установлена сходимость моделей по фазовой проницаемости на моделирующем нефть флюиде (смесь полиметилсилоксановых масел) с фазовой проницаемостью по нефти в реальном пласте. Насыпные модели собирались из горной породы, вынесенной с забоев добывающих скважин одного из месторождений Западной Сибири. Песок очищался и затем рассеивался на фракции в вибрационной установке с помощью набора сит. Подготовленный песок смешивался по фракциям в таких пропорциях, которые соответствуют усредненному гранулометрическому составу пласта-коллектора моделируемого месторождения. В качестве модели нефти использовалось полиметилсилоксановое масло с вязкостью 72 мПа·с, в качестве модели газа – азот, в качестве модели воды – пластовая вода, подготовленная в лаборатории по данным химического анализа пластовых вод моделируемого месторождения. Отбор проб для исследования на предмет КВЧ и гранулометрического состава выносимых частиц производился трижды – последовательно 3 раза по 10 миллилитров продукции. Схема установки, использовавшейся в ходе проведения экспериментов, представлена на рисунке 1.

Результаты экспериментов по оценке влияния перепада давления при фильтрации на количество взвешенных частиц в фильтрате отражены на рисунках 2-4. По представленным графикам видно, что повышение перепада давления приводит к увеличению КВЧ. Причем в зависимости от «стадии» пескопроявления (этапа отбора проб), разница в КВЧ между различными перепадами давления растет. Усредненная оценка увеличения КВЧ (без привязки к этапу отбора проб) при четырехкратном росте перепада давления (с 0,33 МПа до 1,3 МПа) составляет 2,6 раза. При этом, к третьему этапу отбора проб была зафиксирована разница до 8 раз. Соответственно,

увеличение перепада давления (снижение забойного давления) наиболее критично на более поздних этапах эксплуатации скважин.

Поскольку ни одно из технических решений не позволяет полностью предотвратить поступление частиц породы в ствол скважины, автором был рассмотрен вопрос о транспортировке частиц на поверхность для предотвращения образования песчаных пробок в стволе горизонтальной скважины. В качестве базового сценария рассматривается заканчивание скважины открытым стволом с применением забойных скважинных фильтров.

Рассмотрим скоростные модели транспортировки частиц породы, выносимых непосредственно на горизонтальный участок ствола скважины. Применение скоростных моделей направлено на определение критической скорости – скорости, при которой смесь флюидов способна транспортировать частицы породы, т.е. поддерживать их во взвешенном состоянии.

Для этой цели в работе были адаптированы модели Салама, Ибарры и Дэниелсона при перепадах давления 1,3 МПа и 0,33 МПа.

Для определения критической скорости движения флюида было принято допущение, что приток флюидов к скважине является абсолютно равномерным в горизонтальной плоскости, т.е «дебит» скважины последовательно возрастает в направлении от «носка» к «пятке». Учтем тот факт, что полость трубы последовательно заполняется флюидом до полного покрытия сечения трубы в направлении от «носка» к «пятке» в зависимости от дебита скважины, фиксируемого на поверхности.

Автором были рассмотрены 2 отдельных случая транспортировки частиц на горизонтальном участке трубы – с возможностью образования водонефтяных эмульсий и без нее. В первую очередь, необходимость этого допущения вызвана изменением средневзвешенной вязкости смеси флюидов при образовании и без образования эмульсий различного типа.

Результаты моделирования по моделям Салама и Ибарры без образования нефтяных эмульсий представлены на рисунках 6-7, с образованием нефтяных эмульсий – на рисунках 8-9.

Из представленных диаграмм для случаев без образования нефтяных эмульсий видно, что при работе скважины с пониженным забойным давлением (0,33 МПа), зоной повышенного риска для образования песчаных пробок является лишь «носок» скважины, тогда как при повышенном забойном давлении (1,33 МПа), зона риска смещается ближе к центральной части горизонтального участка ствола скважины. Пересыпание горизонтального участка может привести к резкому снижению дебита скважины и необходимости проведения промывки под высоким давлением.

При учете возможности образования нефтяных эмульсий, даже при пониженном забойном давлении, в соответствии с моделями Салама и Дэниелсона, песчаная пробка может образоваться на всем участке горизонтальной части ствола скважины.

Таким образом, влияние забойного давления на процесс пескопроявления можно рассмотреть в контексте двух разных процессов – выноса породы и ее транспортировки. С точки зрения выноса породы, уменьшение забойного давления приводит к интенсификации процесса пескопроявления, что может негативно сказаться на работе погружного и наземного оборудования. Однако, с точки зрения стабильной работы скважины, увеличение перепада давления может быть оправдано с целью поддержания ее работы без образования песчаных пробок.

**2. Применение разработанного алгоритма математического моделирования позволяет на этапе освоения скважины определить условия ее эксплуатации без образования песчаных пробок на горизонтальном участке.**

Многими исследователями отмечается, что пескопроявление наиболее активно протекает на этапе освоения скважин, либо в процессе вывода на режим после проведения ремонтных работ. Во втором случае, повышенный КВЧ на начальном этапе может быть связан с усталостными нагрузками, которые «скопились» в призабойной зоне пласта-коллектора. Не менее важным фактором является динамика увеличения перепада давления (т.е. темп снижения забойного давления). В случае первичного освоения скважины, повышенный КВЧ может быть вызван наличием

продуктов бурения, разуплотнением призабойной зоны ввиду контакта с буровым раствором и иными причинами. Кроме того, установлено, что на процесс удержания частиц породы также оказывает влияние «арочный эффект», т.е. образование из частиц породы естественных «мостоподобных» структур вблизи щелей и отверстий фильтра, которые блокируют поступление механических примесей в его внутреннее пространство.

Для подробного изучения этого феномена была предложена методика проведения опытов с троекратным последовательным отбором проб.

На рисунках 10-12 продемонстрировано влияние апертуры проволочного фильтра на процесс стабилизации КВЧ для различных фазовых соотношений фильтрующихся флюидов. Незначительное влияние апертуры фильтра на процесс стабилизации КВЧ также подтверждается данными графика, представленного на рисунке 14, где можно отследить процесс стабилизации КВЧ для различных фазовых соотношений и апертур фильтров – процесс стабилизации в большей степени зависит от фазового соотношения фильтрующихся флюидов, чем от апертуры проволочного фильтра.

На процесс стабилизации КВЧ с течением времени оказывает влияние перепад давления при фильтрации, что показано на рисунке 13. В первую очередь это вызвано режимом течения флюидов и балансом сил вблизи арочных структур. Увеличение перепада давления при фильтрации приводит к увеличению влекущей силы потока флюидов, которая первостепенно зависит от свойств флюида и скорости его движения. Таким образом, повышение скорости движения флюидов в призабойной зоне может привести к увеличению частоты разрушения арочных структур вблизи щелей и отверстий фильтра, что окажет влияние на количество взвешенных частиц в добываемой продукции.

Обобщая результаты опытов, можно заключить, что при фильтрации водонефтяных смесей КВЧ к третьему этапу стабилизируется у отметки в 27% от исходного, при фильтрации нефтегазовых – в 54% от исходного, при фильтрации чистой «нефти» - 26% от исходного. Тем не менее, цифры носят относительный

характер. В абсолютном выражении, наибольший КВЧ соответствует фильтрации чистой «нефти», далее следуют водонефтяные и нефтегазовые смеси в порядке уменьшения КВЧ.

Значительное различие в относительных величинах КВЧ на третьем этапе объясняется различием в поведении газожидкостных потоков – значительная доля газа приводит к локальным турбулентным течениям, что способствует разрушению хрупких арочных структур вблизи щелей и отверстий фильтров. Однако, увеличение доли газа в потоке выше 50% не способствует долговременному увеличению КВЧ – наблюдается обратный процесс – при содержании газа в потоке равном 90%, КВЧ стабилизируется у отметки в 20-30% от начального, что продемонстрировано на рисунке 14.

Уменьшение КВЧ с течением времени ввиду образования арочных структур, блокирования щелей и отверстий фильтра, разрушения поровых и фильтрационных каналов приводит к уменьшению проницаемости системы «пласт-скважина». Для количественной оценки этого явления в процессе проведения фильтрационных экспериментов и определения коэффициента относительного изменения проницаемости (КОИП), также проводился анализ гранулометрического состава частиц пород в фильтрате. Исходная проницаемость насыпных моделей замерялась при достижении заданного перепада давления (депрессии) при фильтрации по закону Дарси. Второй «замер» проницаемости проводился после фильтрации через насыпную модель 50-ти ее поровых объемов (в среднем, 200-250 мл. жидкости). Так как первоначальная проницаемость замерялась по маслу, здесь и далее речь идет о фазовой проницаемости насыпной модели по маслу с вязкостью 72 мПа·с.

Ряд авторов отмечает, что продолжительный вынос породы из призабойной зоны может положительно сказаться на ее проницаемости, однако, взаимосвязи между КВЧ и КОИП для всех типов фильтров не установлено. В случае наибольшего КВЧ в выборке, КОИП соответственным образом не является наибольшим, причем в некоторых случаях при достаточно высоком КВЧ, КОИП

является одним из наименьших. Для исключения возможной ошибки, связанной с тем, что апертура фильтра подобрана некорректным образом, было предложено исследовать гранулометрический состав выносимых через фильтр частиц. Для ряда фильтров была выявлена взаимосвязь между D-параметром и КОИП, как например для фильтра с апертурой 200 мкм – как в группе Н/В (нефть/вода), так и в группе Н/Г (нефть/газ), уменьшение параметра D75 приводит к росту КОИП. Однако, этой зависимости не прослеживается для остальных фильтров. При этом, для фильтра с апертурой 150 мкм, полностью отсутствует какая-либо зависимость КОИП как от D-параметров гранулометрического состава, так и от КВЧ – при приблизительно равных КВЧ и D-параметрах во всей группе экспериментов Н/Г, разница между максимальным и минимальным КОИП составляет более 40%. Данный результат свидетельствует о значительном влиянии на конечную проницаемость процессов, происходящих непосредственно в самой насыпной модели. При построении графиков зависимости КВЧ от D-среднего, прямолинейной зависимости не установлено.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Эксплуатация нефтяных скважин, вскрывающих слабосцементированные породы-коллекторы, зачастую осложнена значительным выносом механических примесей из призабойной зоны пласта (пескопроявлением).

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Выполнено исследование причин и последствий процесса пескопроявления - оно вызвано превышением нагрузок на стенки скважины над их прочностными характеристиками, что приводит к широкому перечню негативных последствий для всей производственной цепочки добычи нефти, самым значительным из которых является пересыпание стволов скважин с горизонтальным окончанием.

2. Особенностью применения технологий ограничения пескопроявления является их бессистемный подбор, т.е. он проводится без соответствующих лабораторных исследований, что

приводит к повышенному выносу механических примесей на всех этапах эксплуатации скважины, а учет размеров выносимых частиц зачастую не ведется, что приводит к вероятности образования песчаных пробок.

3. Разработана методика проведения физического моделирования, позволяющая в динамике прогнозировать процесс пескопроявления при эксплуатации нефтяных скважин с горизонтальным окончанием путем определения количества и размеров взвешенных частиц породы в модели пластового флюида, профильтровавшегося через образцы скважинных фильтров, а также коэффициент относительного изменения проницаемости.

4. Предложен алгоритм математического моделирования, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние призабойной зоны пласта и возможность транспортировки частиц породы со стенок скважины, а также на горизонтальном участке ее ствола в зависимости от депрессии на пласт.

5. В ходе проведения физического моделирования были выявлены следующие закономерности:

- при фильтрации водонефтяных смесей увеличение доли воды в потоке флюида приводит к увеличению количества взвешенных частиц в фильтрате;
- при фильтрации газонефтяных смесей увеличение доли газа в потоке флюида приводит к снижению КВЧ;
- с течением времени КВЧ при фильтрации естественным образом снижается ввиду образования «арочных систем» на поверхности щелей фильтр-элементов.

6. В результате проведенного комплекса математического и физического моделирования рекомендуется при эксплуатации скважин, вскрывающих слабосцементированные породы-коллекторы, проводить их освоение на щадящей депрессии, в дальнейшем планомерно увеличивая ее для достижения оптимального уровня добычи; проводить мероприятия по ограничению водопритока в скважину, начиная с этапа ее освоения, а также при получении притока воды уже в ходе ее эксплуатации.



Интерес для дальнейшего развития темы диссертации представляют случаи трехфазной фильтрации, а также испытание иных видов технологий ограничения пескопроявления в изменяющихся условиях породы-коллектора (гранулометрический состав, влияние форм-фактора частиц, неоднородности и прочих факторов).

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Порошин, М.А. Анализ лабораторных методов исследования процесса пескопроявления при разработке нефтяных месторождений / М.А. Порошин, Д.С. Тананыхин, **М.Б. Григорьев** // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 2(12). – С. 1-22.

2. Королев, М.И. Повышение эффективности эксплуатации нефтяных скважин, осложненных пескопроявлением, за счет учета геомеханического состояния призабойной зоны пласта / М.И. Королев, И.А. Стецюк, Д.С. Тананыхин, **М.Б. Григорьев** // Инженер-Нефтяник. – 2021. – №1. – С. 41-47.

3. Кукарских, Р.Д. Анализ движения и выноса механических примесей из скважины на месторождениях Западной Сибири / Р.Д. Кукарских, М.И. Королев, **М.Б. Григорьев** // Инженер-Нефтяник. – 2023. – №2. – С.17-23.

*Публикации в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

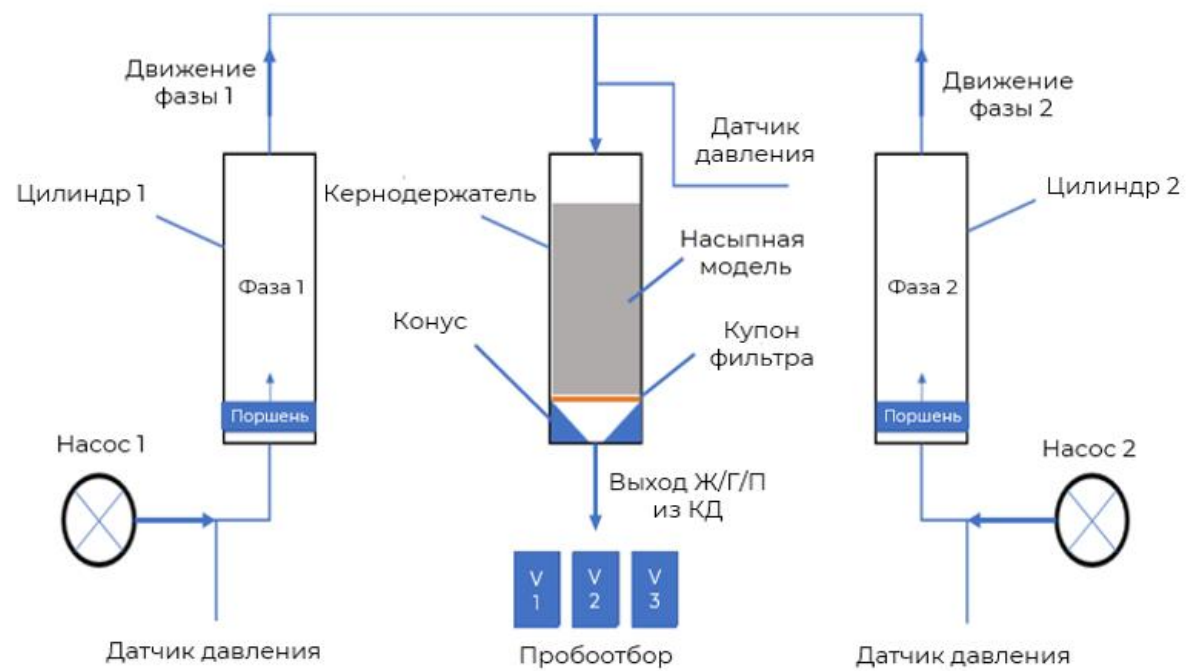
4. Tananykhin, D. Experimental Evaluation of the Multiphase Flow Effect on Sand Production Process: Prepack Sand Retention Testing Results / D. Tananykhin, **M. Grigorev**, M. Korolev, T. Solovyev, N. Mikhailov, M. Nesterov // Energies. – 2022. – Vol. 15. – №13. – P.1-17. DOI: 10.3390/en15134657.

5. Tananykhin, D. Effect of Wire Design (Profile) on Sand Retention Parameters of Wire-Wrapped Screens for Conventional Production: Prepack Sand Retention Testing Results / D. Tananykhin, **M. Grigorev**, E. Simonova, M. Korolev, I. Stecyuk, L. Farrakhov // Energies. – 2023. – Vol.16. - №5. – P.1-13. DOI: 10.3390/en16052438.

6. Tananykhin, D. An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical, Field and Laboratory Data Analysis / D. Tananykhin, M. Korolev, I. Stecyuk, **M. Grigorev** // Resources. – 2021. – Vol.10. - №12. – P.1-15. DOI: 10.3390/resources10120125

*Патент:*

7. Патент №220168 Российская Федерация, МПК E21B 49/00 (2006.01), G01N 15/08 (2006.01). Кернодержатель: № 2023114363: заявл. 01.06.2023: опубл. 30.08.2023 / Тананыхин Д.С., **Григорьев М.Б.**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 7 с.: ил.



\* Кернодержатель. Патент РФ №220 168

Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторной установки для проведения физического моделирования

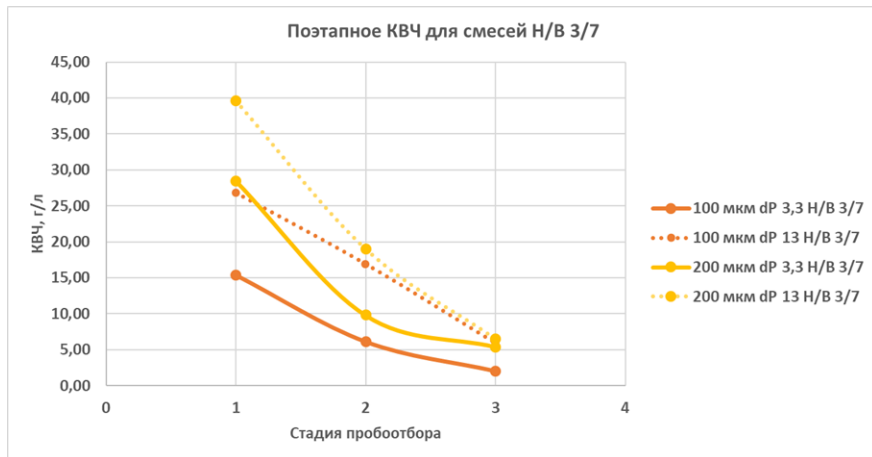


Рисунок 2 – Зависимость КВЧ от стадии пробоотбора для проволочных фильтров с апертурой 100 и 200 микрометров при перепадах давления 0,33 МПа и 1,3 МПа

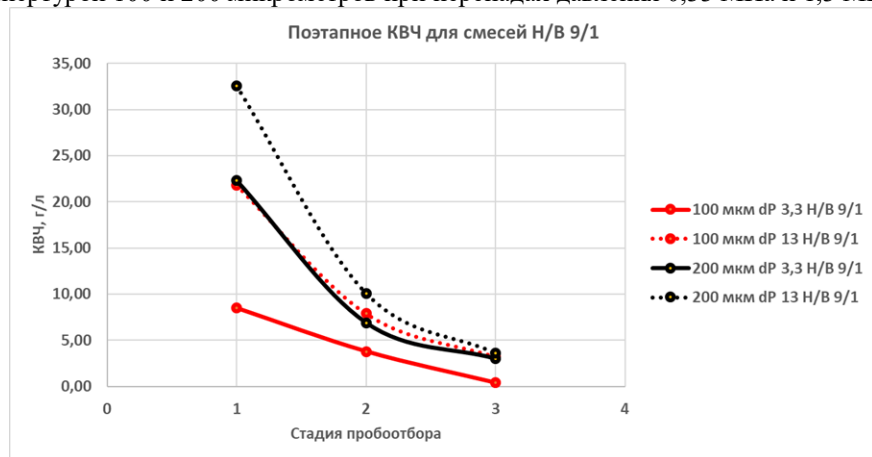


Рисунок 3 - Зависимость КВЧ от стадии пробоотбора для проволочных фильтров с апертурой 100 и 200 микрометров при перепадах давления 0,33 МПа и 1,3 МПа

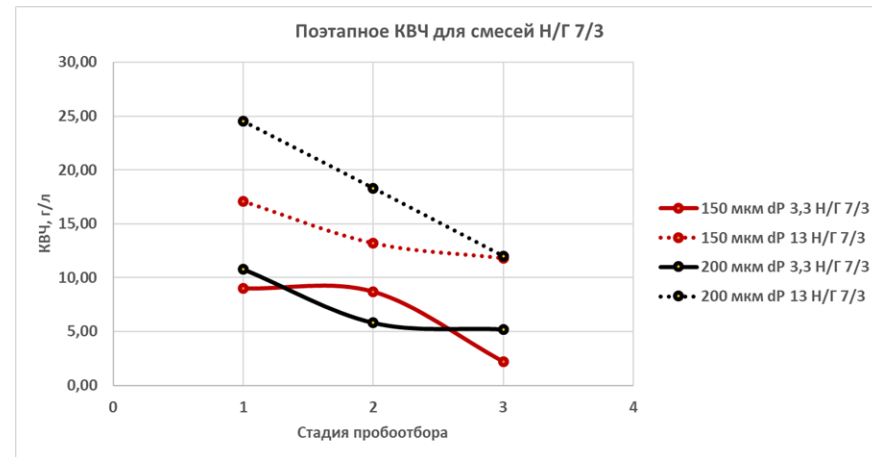


Рисунок 4 – Зависимость КВЧ от стадии пробоотбора для проволочных фильтров с апертурой 150 и 200 микрометров при перепадах давления 0,33 МПа и 1,3 МПа

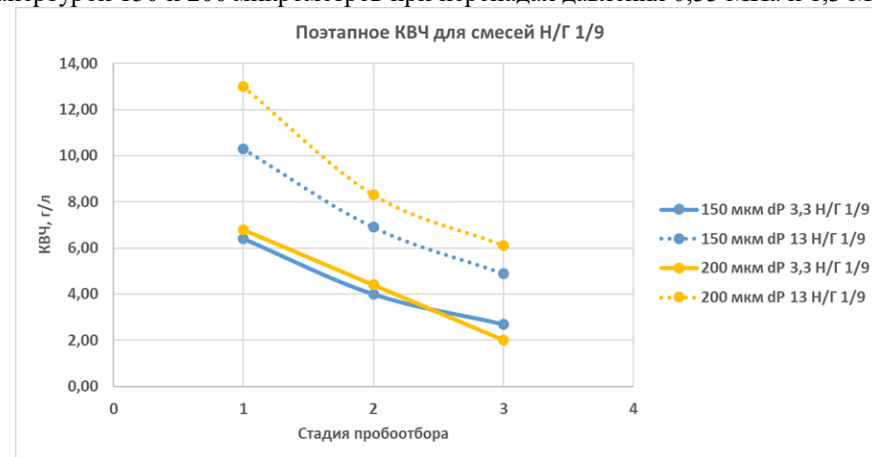


Рисунок 5 – Зависимость КВЧ от стадии пробоотбора для проволочных фильтров с апертурой 150 и 200 микрометров при перепадах давления 0,33 МПа и 1,3 МПа

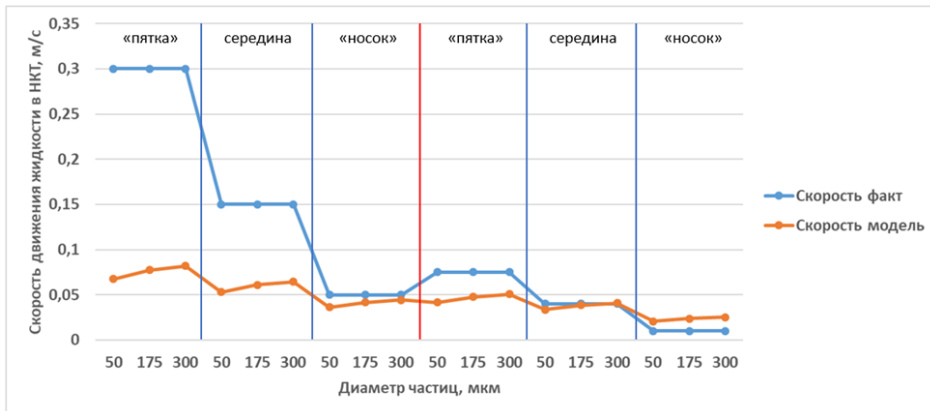


Рисунок 6 – Результаты расчета по модели Салама (Salama). Левая часть (до красной черты) – работа скважины при депрессии 1,3 МПа, правая часть – работа скважины при депрессии 0,33 МПа (случай без образования эмульсий)

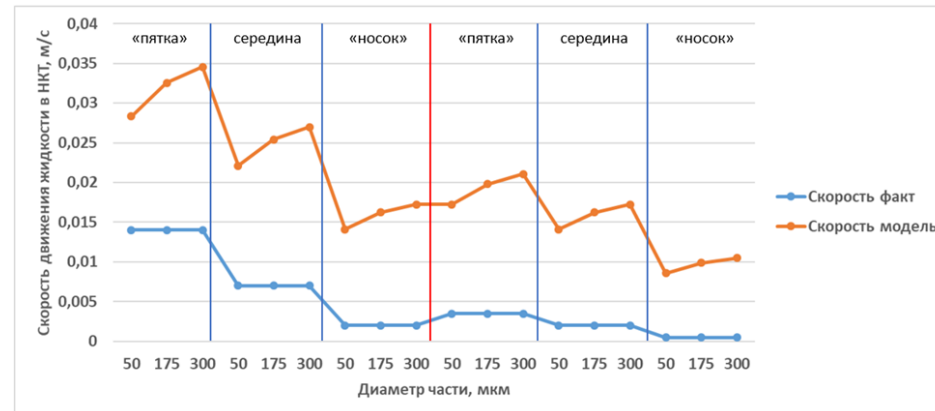


Рисунок 8 – Результаты расчета по модели Салама (Salama). Левая часть (до красной черты) – работа скважины при депрессии 1,3 МПа, правая часть – работа скважины при депрессии 0,33 МПа (случай с образованием эмульсий)

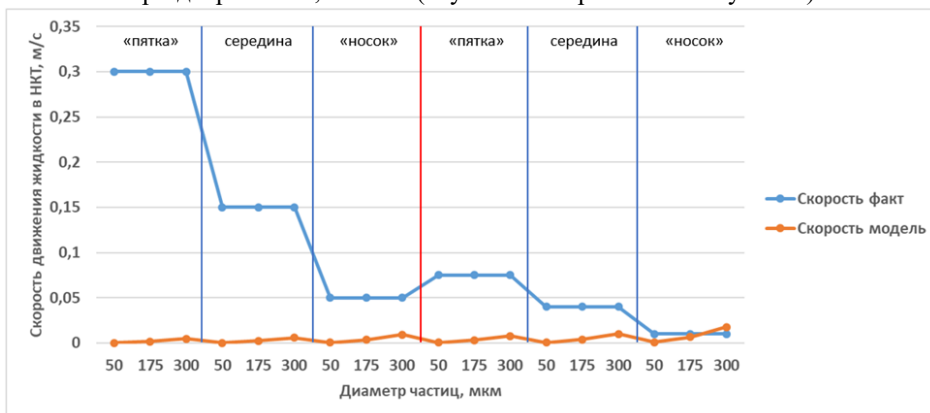


Рисунок 7 - Результаты расчета по модели Ибарра (Ibarra). Левая часть (до красной черты) – работа скважины при депрессии 1,3 МПа, правая часть – работа скважины при депрессии 0,33 МПа (случай без образования эмульсий)



Рисунок 9 – Результаты расчета по модели Ибарра (Ibarra). Левая часть (до красной черты) – работа скважины при депрессии 1,3 МПа, правая часть – работа скважины при депрессии 0,33 МПа (случай с образованием эмульсий)

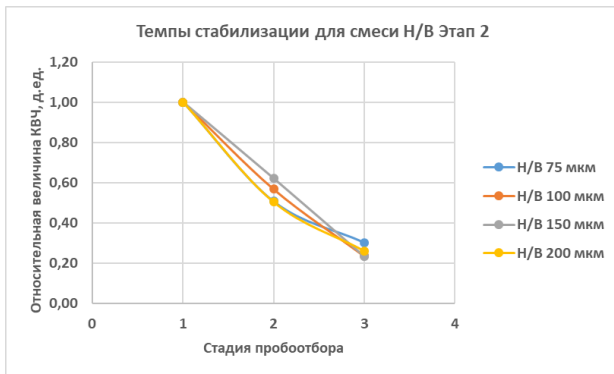


Рисунок 10 – Влияние апертюры фильтра на стабилизацию КВЧ при фильтрации водонефтяных смесей

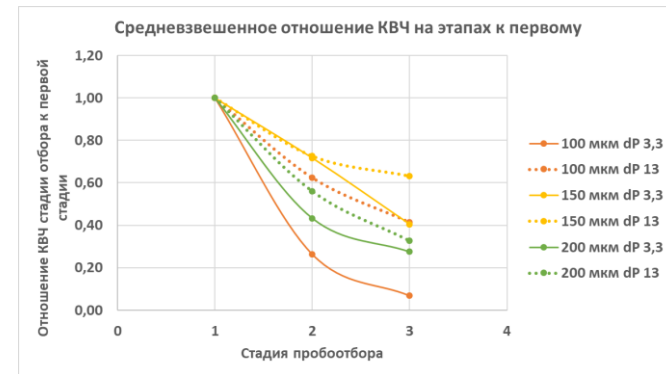


Рисунок 13 – Средневзвешенное (для всех фазовых соотношений) влияние перепада давления и апертюры фильтра на стабилизацию КВЧ

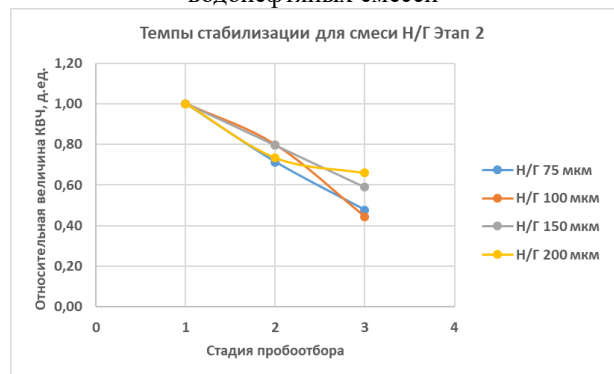


Рисунок 11 - Влияние апертюры фильтра на стабилизацию КВЧ при фильтрации нефтегазовых смесей

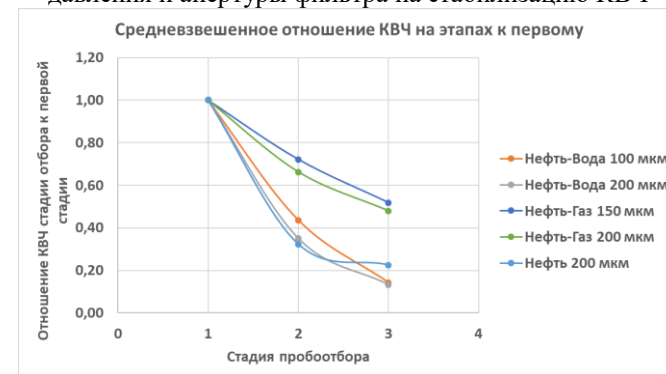


Рисунок 14 – Влияние фазового соотношения фильтрующихся флюидов на процесс стабилизации КВЧ (для крупных групп смесей)

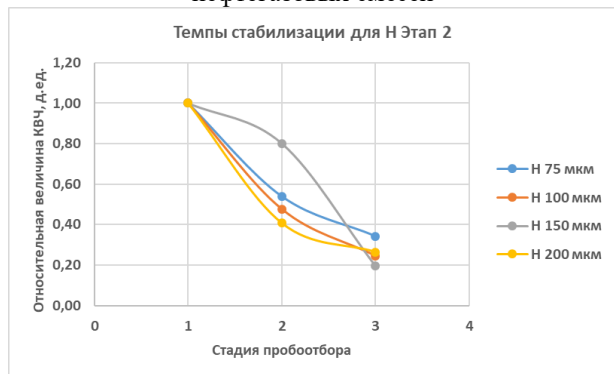


Рисунок 12 - Влияние апертюры фильтра на стабилизацию КВЧ при фильтрации модели нефти

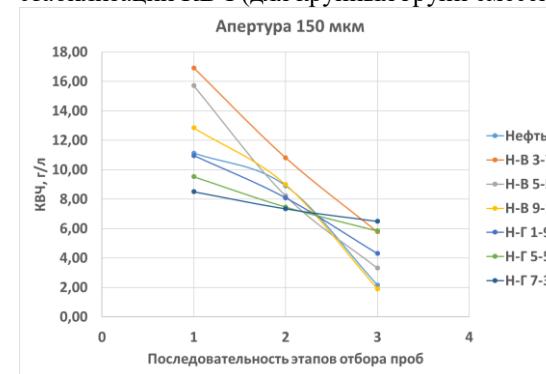


Рисунок 15 – Влияние фазового соотношения фильтрующихся флюидов на динамику снижения КВЧ