

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело
 ООП Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений
 Отделение школы Отделение нефтегазового дела

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫМИ КИСЛОТНЫМИ СОСТАВАМИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

УДК 622.276.63(571.1)

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Шарф Ирина Валерьевна	д.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ
21.04.01 Нефтегазовое дело
ООП «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способность осуществлять поиск, критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность решать производственные и (или) исследовательские задачи на основе фундаментальных знаний в нефтегазовой области
ОПК(У)-2	Способен осуществлять проектирование объектов нефтегазового производства
ОПК(У)-3	Способность разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-4	Способность находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способность оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в нефтегазовой отрасли и смежных областях
ОПК(У)-6	Способность участвовать в реализации основных и дополнительных профессиональных образовательных программ, используя специальные научные и профессиональные знания
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен разрабатывать методическое обеспечение для первичной и периодической подготовки и аттестации специалистов в области добычи углеводородного сырья
ПК(У)-2	Способен анализировать и обобщать данные о работе технологического оборудования, осуществлять контроль, техническое сопровождение и управление технологическими процессами добычи углеводородного сырья
ПК(У)-3	Способен оценивать эффективность инновационных технологических решений в процессе выполнения производственных показателей при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений углеводородного сырья
ПК(У)-4	Способен обеспечивать безопасную и эффективную эксплуатацию и работу технологического оборудования нефтегазовой отрасли
ПК(У)-5	Способен участвовать в управлении технологическими комплексами, принимать решения в условиях неопределенности

ПК(У)-6	Способен применять полученные знания для разработки и реализации проектов и научно-исследовательских работ различных процессов производственной деятельности на основе методики проектирования в нефтегазовой отрасли, а также инструктивно-нормативных документов
ПК(У)-7	Способен применять современные программные комплексы для научно-исследовательских работ и проектирования технических устройств, аппаратов и механизмов, технологических процессов в соответствии с выбранной сферой профессиональной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело
 ООП Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений
 Отделение школы Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ И.А. Мельник
 (Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич

Тема работы:

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫМИ КИСЛОТНЫМИ СОСТАВАМИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	№ 12-11/с от 12.01.2024

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	08.02.2024
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Тексты и графические материалы отчетов и исследовательских работ, фондовая и научная литература, технологические регламенты, нормативные документы.</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<p>Геолого-физическая характеристика месторождений карбонатных коллекторов. Осложнения в карбонатных коллекторах при разработке месторождения. Механизм воздействия кислотных составов в пластовых условиях карбонатных коллекторов. Геологические факторы влияющие на эффективность проведения кислотных обработок.</p>

	Выбор участка для проведения кислотной обработки. Методика расчета кислотной обработки карбонатного коллектора. Интерпретация результатов соляно-кислотной обработки карбонатных коллекторов. Возможность использования дополнительных буферов в соляно-кислотной обработке.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Профессор, д.э.н., Шарф Ирина Валерьевна
«Социальная ответственность»	Доцент, к.б.н., Антоневиц Ольга Алексеевна
Английская часть	Доцент, к.ф.н., Надеина Луиза Васильевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Geological features of carbonate reservoirs	
High-Temperature Conditions	
Heterogenous Formations	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.01.2024
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			15.01.2024

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич		15.01.2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело
 ООП Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений
 Отделение школы Отделение нефтегазового дела
 Период выполнения _____ весенний семестр 2022/2023 учебного года

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич

Тема работы:

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫМИ КИСЛОТНЫМИ СОСТАВАМИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	08.02.2024
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.01.2024	<i>Анализ современной добычи нефти из карбонатных коллекторов на нефтяных месторождениях</i>	30
25.01.2024	<i>Выбор и обоснование применения технологий интенсификации притока на карбонатных коллекторах</i>	30
30.01.2023	<i>Эффективность применения соляно-кислотной обработки на месторождении X</i>	20
02.02.2024	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
08.02.2024	<i>Социальная ответственность</i>	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			15.01.2024

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Мельник Игорь Анатольевич	д.г.-м.н		15.01.2024

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич		15.01.2024

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 118 страниц, в том числе 16 рисунков, 21 таблица и 42 литературных источников. Работа содержит 1 приложение.

Ключевые слова: месторождение, нефть, призабойная зона пласта, карбонатный коллектор, кислотная обработка, проницаемость.

Объектом исследования являются нефтяные месторождения с карбонатными коллекторами.

Цель работы – эффективность применения технологии соляно-кислотной обработки карбонатных коллекторов на нефтяных месторождениях.

В данной работе рассматривается метод кислотного воздействия на призабойную зону пласта карбонатных коллекторов: геолого-физические характеристики карбонатных коллекторов, осложнения в карбонатных коллекторах при разработке месторождения, механизм воздействия кислотных составов. А также выполнен анализ критериев выбора скважин-кандидатов и предложена методика расчета кислотной обработки в карбонатных коллекторах.

Наиболее эффективной кислотой для обработки карбонатных коллекторов является: соляная кислота с различными добавками интенсификаторов, ингибиторов коррозии, стабилизаторов.

Область применения: представленные решения целесообразно применять на нефтяных месторождениях с карбонатными коллекторами.

Потенциальная экономическая эффективность выражается в дополнительной добыче нефти за счет обработки призабойной зоны пласта соляной кислотой.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1.АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ ИЗ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ	13
1.1 Геолого-физическая характеристика месторождений карбонатных коллекторов.....	15
1.1.1 Литологические особенности карбонатных коллекторов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.....	15
1.1.2 Механизм фильтрации флюида в карбонатных коллекторах.....	20
1.1.3 Физико-химические свойства пластовых флюидов	24
1.2 Осложнения в карбонатных коллекторах при разработке месторождения	26
1.3 Механизм воздействия кислотных составов в пластовых условиях карбонатных коллекторов	31
1.4 Геологические факторы влияющие на эффективность проведения кислотных обработок.....	38
2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА НА КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ	41
2.1 Выбор участка для проведения кислотной обработки	41
2.2 Методика расчета кислотной обработки карбонатного коллектора.....	43
2.3 Интерпретация результатов соляно-кислотной обработки карбонатных коллекторов.....	50
2.4 Возможность использования дополнительных буферов в соляно-кислотной обработке.....	53
2.4.1 Опыт применение добавок к основному кислотном раствору	58
3 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛЯНО-КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ X.....	61
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	69
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	75

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	75
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства Ошибка! Закладка не определена.	
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны Ошибка! Закладка не определена.	
5.2 Производственная безопасность.....	77
5.2.1 Анализ вредных факторов и обоснование мероприятий по снижению воздействия	78
5.2.2 Анализ опасных факторов и обоснование мероприятий по снижению воздействия	82
5.3 Экологическая безопасность.....	84
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	87
Заключение	90
Список используемых источников.....	92
Приложение А	97

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом темпы добычи углеводородного сырья снижаются, а обводненность увеличивается. В связи с этим актуальность приобретает разработка карбонатных коллекторов с целью поддержания темпов добычи.

Особенностью карбонатных коллекторов является их сложное строение, которое обладает низкой проницаемостью, высокой степенью неоднородности, сложной структурой порового пространства, а также неоднородностью коллекторских фильтрационных характеристик. Так из-за неравномерного распределения проницаемости по толщине и площади приводит к неравномерной выработке запасов, оставляя низко проницаемые участки не затронутыми, а порово-каверново-трещинный тип коллектора приводит к быстрой обводненности флюида и как следствие снижению нефтеотдачи.

Начиная с конца XIX в., инженеры-промысловики, нефтяники стали задумываться о том, как интенсифицировать добычу нефти. Одним из найденных ими решений было применение кислотных составов для обработки продуктивных горизонтов нефтеносных пластов.

В те времена интерес к кислотным обработкам то угасал, то набирал силу, но уже к середине XX в. ситуация изменилась и кислотные обработки получили большое распространение по всему миру. Актуальность проблемы кислотных обработок скважин, бесспорно, прослеживалась с момента начала их промышленного применения, т.к. обработки кислотой решают целый ряд проблем на всех этапах разработки месторождения и спектр их использования достаточно велик: очистка приза бойной зоны пласта (ПЗП) от загрязнения, вызванного использованием широкого спектра химических веществ, закачиваемых в пласт на всех стадиях работы со скважиной, как в новых скважинах после вскрытия пласта, так и после капитального ремонта скважины; повышение продуктивности добывающих (нефтяных) и приемистости нагнетательных скважин; выравнивание профиля приемистости

продуктивных пластов при закачке воды с целью поддержания пластового давления.

В результате кислотной обработки повышается дебит добывающих скважин за счет восстановления первоначальной проницаемости пласта в терригенных коллекторах или за счет создания новых высокопроницаемых каналов в карбонатных коллекторах.

Цель работы – эффективность применения технологии соляно-кислотной обработки карбонатных коллекторов на нефтяных месторождениях.

Задачи:

- 1) Проанализировать современные способы добычи нефти из карбонатных коллекторов на нефтяных месторождениях;
- 2) Определить влияние геологических параметров пласта на эффективность кислотных обработок в карбонатных коллекторах;
- 3) Выбрать и обосновать применение технологии интенсификации притока в карбонатных коллекторах;
- 4) Сформировать комплексный подход к эффективному применению соляно-кислотной обработки на нефтяном месторождении X.

Использование на скважине-кандидате кислотного раствора в объеме 9,6 м³, состоящего из 16% соляной кислоты с добавлением ингибитора коррозии В-2, интенсификатора Марвелан и уксусной кислоты, приводит к увеличению дебита скважины.

На месторождение X скважина-кандидат имела скин-фактор 4,9, дебит 82 м³/сутки, при концентрации известняка и доломита равным 95% и 5% соответственно. После проведения соляно-кислотной обработки скин-фактор изменился на -5,46, приняв значение -0,56, а дебит вырос до 163,8 м³/сутки, при этом дополнительная добыча от обработки составит 27177 м³.

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

НГДУ – Нефтегазодобывающее управление;

ГИС – Геофизические исследования скважины;

ВНИГНИ – Всероссийский научно-исследовательский геологический
нефтяной институт;

НГКМ – Нефтегазоконденсатное месторождение;

ОАО – Открытое акционерное общество;

АО – Акционерное общество;

ООО – Общество с ограниченной ответственностью;

ПЗП – Призабойная зона пласта;

ПАВ – Поверхностно-активные вещества;

АСПО – Асфальто-смоло-парафиновые отложения;

НКТ – Насосно-компрессорные трубы;

ПРС – подземный ремонт скважины;

СКО – Соляно-кислотная обработка;

КВД – кривая восстановления давления;

ОПЗ – обработка призабойной зоны;

ЧДД – чистый дисконтированный доход;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

КРС – капитальный ремонт скважины;

СИЗ – средства индивидуальной защиты;

ПДК – предельно-допустимая концентрация.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ ИЗ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Карбонатный коллектор – это горная порода, в основном образованная из доломитов и известняков, в которой фильтрация флюида происходит за счет трещиноватости (системы трещин). Так же хотелось бы отметить, что карбонатный коллектор обладает сложной структурой вертикальной послойной макро- и микротрещиноватостью.

Интенсификация добычи нефти – это комплекс мероприятий и методов воздействия на призабойную зону пласта, направленные на увеличение добычи нефти.

История разработки карбонатных коллекторов началась еще в начале 1950-х годов в связи с открытием залежей Спраберри в Западном Техасе и гигантских месторождений на Ближнем Востоке.[1]

Исследования и пробная эксплуатация карбонатных коллекторов верхнего девона НГДУ «Бавлынефть» были начаты еще в 1958-1960 гг. В пределах Бавлинского месторождения, залежь заволжского горизонта, была открыта в 1958 г. разведочная скважина, из которой был получен приток безводной нефти дебитом 3 т/сут. В 1960 г. была открыта залежь данково-лебедевского горизонта, при опробовании которой дебит безводной нефти составил 2 т/сут.[2]

Так же разработка карбонатных коллекторов, а именно доманиковых отложений, производилась на Купавном и Матросовском месторождении. На Купавном месторождении разработка данных отложений осуществлялась четырьмя добывающими скважинами. Стимуляция скважин проводилась посредством кислотных обработок. Залежь на Матросовском месторождении разрабатывалась двумя добывающими скважинами. На добывающих скважинах за весь период разработки доманиковых отложений выполнено пять обработок призабойной зоны по трем технологиям: обработка поверхностно-активным кислотным составом, кислотным составом

медленного действия, проведение направленного солянокислотного воздействия. В результате данных мероприятий получилось дополнительно добыть 4 тыс. т. нефти.

Разработка карбонатных коллекторов производилась на Кузайкинском месторождении. В разрезе пробуренных скважин №№ 14036,14037,14039,14042 (2013г.) на Байгашкинском поднятии по ГИС были выделены маломощные карбонатные коллекторы алексинского горизонта, которые имели эффективную толщину от 0,6 до 1,2 м, коэффициент пористости 6,8-13,9% , коэффициент глинистости 0,9-4,5%, и только лишь в одной скважине №14035 по комплексу ГИС дали однозначное заключение об их слабом нефтенасыщении: эффективная толщина 1,1м, коэффициент пористости 13,3%, коэффициент глинистости 0,9%, коэффициент нефтенасыщенности 54,3%. А на скважинах №№ 14038,14040, 14044, 11941 данный пласт вовсе не охарактеризован, видимо из-за маломощности, неясного характера насыщения и неоднозначности коллекторских свойств. После получения всех данных и комплексного анализа, в скважинах №№ 14042, 14044 и 14036 было произведено опробование в эксплуатационной колонне 2х кратная кислотная обработка (последовательно глинистая кислотная композиция и поверхностно-активная кислотная смесь). В результате чего получили среднесуточные притоки нефти в размере 2, 2,5 и 1,0 т/сут, соответственно. [3]

На территории Республике Татарстан, а именно на Бавлинском месторождении с 2012 года начали изучать «доманиковую толщу», которая является карбонатными отложениями среднефранского-верхнефаменского возрастов. В процессе разработки, в 40 скважинах было опробована нижняя часть доманиковой толщи (продуктивные пласты данково-лебедянского горизонта). Дебиты нефти изменяются от 0,1 до 12,24 т/сут. В 33 скважинах опробована верхняя пачка доманиковой толщи (продуктивные пласты заволжского горизонта). Дебиты нефти изменяются от 0,05 до 10,8 т/сут. Так же с целью увеличения продуктивности в скважине 1144 (2013г.) была

произведена перфорация нижней пачки доманиковых отложений и произведен кислотный гидроразрыв пласта, с закачкой 72 м³ соляной кислоты. После чего дебит нефти составил 10,6 т/сут.[4]

В период 2006-2013 гг. на Урманском нефтяном месторождении расположенном на Нюрольской впадине, имеющая карбонатные коллектора палеозойский отложений, было проведено 11 скважинно-операций по обработке призабойной зоны соляной кислотой. Дебиты нефти по скважинам выросли от 1,5 до 120 т/сут. Дополнительная добыча нефти от применения соляно-кислотных обработок на призабойную зону пласта составила 32,4 тыс.т..

Таким образом, можно сказать, что разработка карбонатных коллекторов активно развивается в последнее время. Проводятся геофизические исследования скважин с целью выявления нефтенасыщенных коллекторов. После чего уже с помощью комплексных мероприятий добиваются притока нефти из скважины.

1.1 Геолого-физическая характеристика месторождений карбонатных коллекторов

1.1.1 Литологические особенности карбонатных коллекторов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции

Самым лучшим местом для процессов накопления углеводородов являются пористые породы, что доказывает факт, который говорит о том, что нефть и природный газ образуются лишь в благоприятных для этого породах. Породы, где происходят данные процессы называют коллекторами. Что касается особенностей таких пород, то одной из таких является возможность накапливать углеводороды, совместно с этим производя фильтрацию пластовых флюидов, что наилучшим образом сказывается на накоплении в коллекторах нефти и газа. На сегодняшний день эти породы имеют определенную классификацию. При отнесении коллектора к тому или

иному типу учитывают полезную емкость, проницаемость, глубину залегания, состав флюида.

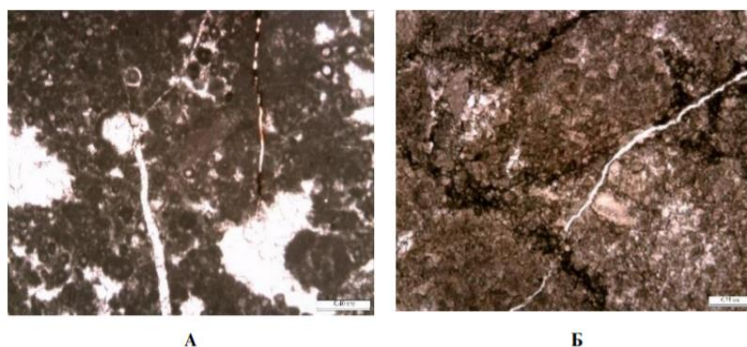
Данные характеристики позволили выделить такие группы коллекторов как поровые, кавернозные, трещинные, биопустотные и смешанные. Также стоит отметить то, что образование нефти может происходить и в битуминозных, вулканогенных, магматических и других коллекторах. Но важно то, что первые 5 видов являются наиболее распространенными и содержат в себе основные массы углеводородных запасов.

Касаясь карбонатных коллекторов, можно выделить такую особенность как многообразие, а также большое количество пластов, представленных данным видом коллектора. Известно, что на сегодняшний день по всему миру карбонатные коллекторы хранят в себе от 30 до 50 % мировых залежь нефти. Состав их включает рифы, хемогенные известняки, доломиты и обломочные известняки, на практике чаще всего встречаются коллекторы, которые в основном сложены известняками и доломитами. Такой состав обуславливает одну из самых главных особенностей этих коллекторов, это необычная фильтрационно-емкостная система. Кроме этого полезные ископаемые, входящие в состав карбонатных коллекторов, имеют особенность, которая выражается в виде необычного взаимодействия с поверхностью породы-коллектора.

Также такие коллекторы имеют еще одну классификацию, которая определяется характером и объемом. В нее входят поровые, трещинные, каверновые и смешанный типы. Строение карбонатных коллекторов также характеризуется сложностью строения системы трещин, которые располагаются в нем вдоль вертикальных слоев. Такой вид расположения позволяет некоторым трещинам распространяться на несколько сотен метров в длину, а расстояние между ними составляет всего от 2 до 10 см.

Наиболее широким распространением в карбонатных породах пользуются коллекторы смешанных типов, например, такой как трещинно-

поровый коллектор. Особенностью осадков в карбонатных коллекторах является литофациальная изменчивость по латерали и в разрезе. Эта особенность обуславливается, тем что эти карбонатные осадки формируются в мелководных шельфах, к которым и приурочено большинство месторождений углеводородов (далее УВ). Касаемо последствий данных условий формирования стоит отметить повышенную изменчивость фильтрационно-емкостных характеристик (далее ФЕС), а также чередование различных пористых участков, характеризующихся разной проницаемостью пород вдоль всего разреза. К таким участкам можно отнести плотные непроницаемые или же плохо проницаемыми по матрице породы. В случаях подобной неоднородности фильтрация жидкости происходит за счет трещин, расположенных в продуктивном пласте, у которых проницаемость в несколько раз превышает проницаемость межзерновых канальцев. По значению открытой пористости в середине разреза определяют принадлежность породы относят к различным видам коллекторов. Так, например, породы с открытой пористостью, превышающей пять процентов, относят к трещинно-поровому типу коллектора, а если открытая пористость меньше данных пяти процентов, то такой коллектор относят к порово-трещинному. Данная классификация отражает роль трещин того или иного коллектора в процессах фильтрации флюида при извлечении жидкости из скважины.



А

Б

Рисунок 1 – Коллектор смешанного типа (А – известняк водорослевый, Б – доломит с теньвыми контурами)

Продолжая рассматривать открытую пористость карбонатных коллекторов, важно отметить, что в наиболее плотных карбонатных или глинисто-карбонатных разностях показатель открытой пористости настолько мала, что данные структуры даже не рассматриваются как коллекторы. Причиной низкой открытой проницаемости является подверженность вторичным преобразованиям, кальцитизации и доломитизации.

Геометрически, открытые трещины в карбонатных коллекторах смешанного типа, выглядят прямолинейно или же имеют слегка извилистый вид. Также они иногда могут прерываться или пересекаться.

Показателем, характеризующим наличие фильтрации УВ через трещины, является залаченность трещин черным битумом. Чаще всего такие трещины характеризуются раскрытием от 10 до 30 микрон.

Образование пустотного пространства в карбонатных коллекторах детально описан К.И. Багринцевой [5]. Факторы, служившие для образования и формирования пор, были определены ей как процессы выщелачивания и растворения, так как это служило причиной появления новых пор, трещин и каверн с карстами в различных карбонатных коллекторах.

Перечисленные факторы ведут к образованию первичной пористости, которая играет важную роль в образовании пустотного пространства. Многие исследования доказали, что конечное влияние на формирование структуры порового пространства оказывают как первичные условия седиментации карбонатных пород, так и их последующие постседиментационные преобразования, которые в свою очередь приводят довольно часто к полному изменению состава, текстурно-структурных особенностей пород и их пустотного пространства [6].

Чаще всего крупные поры диаметром от 50 до 1000 мкм и каверны диаметром более чем 1000 мкм, которые являются составляющей основной емкости карбонатных коллекторов, соединены между собой более тонкими поровыми каналами диаметром от 1 – 2 до 20 – 50 мкм и микротрещинами раскрытостью от 1 – 2 до 20 – 40 мкм, которые образуют собой менее

значительную часть емкости этого коллектора, но почти полностью обуславливающими его фильтрационные свойства.

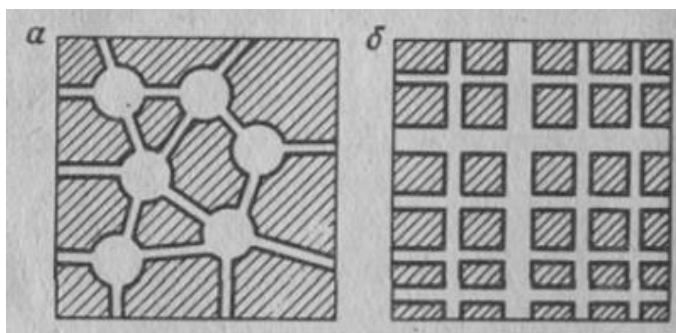


Рисунок 2 – Схематичное строение порового пространства низкопроницаемых карбонатных (а) и терригенных (б) коллекторов

По мимо пористости, трещиноватость имеет также большое значение для увеличения объёма пустотного пространства и повышения емкостных параметров карбонатных пород-коллекторов. Например, трещины литогенетические, которые образуются в процессе уплотнения породы. Они способствуют процессу растворения, так как обуславливают неоднородность проницаемости карбонатных толщ по вертикали и созданию проходимых трещин, по которым осуществляется циркуляция подземных вод. Касаемо трещин тектонического происхождения можно сказать, о их более высокой роли в формировании непосредственно пустотного пространства. Из-за наличия секущих трещин в группе трещин тектонического происхождения обеспечивается достаточно интенсивная циркуляция подземных вод на больших глубинах.

Если подходить к рассмотрению геологических особенностей карбонатных коллекторов, сравнивая их с терригенными, то можно сделать следующие выводы:

1. При низкой и средней проницаемости удельная поверхность карбонатных коллекторов значительно ниже чем терригенных. При высокой проницаемости их удельные поверхности совпадают. Поэтому нефтенасыщенность и коэффициент нефтевытеснения низко- и

среднепроницаемых карбонатных коллекторов существенно выше, чем аналогичных по проницаемости терригенных коллекторов.

2. В низкопроницаемых карбонатных коллекторах не существует корреляционной связи между пористостью и проницаемостью. В среднепроницаемых коллекторах эта связь слабее, чем в терригенных. В высокопроницаемых карбонатных коллекторах корреляционная связь между пористостью и проницаемостью вполне удовлетворительная.

3. Карбонатные пласты более неоднородны по литологическим, емкостно-фильтрационным и упруго-механическим свойствам, чем терригенные.

1.1.2 Механизм фильтрации флюида в карбонатных коллекторах

Формирование пористости карбонатных пород происходит в четыре главных этапа (гипергенез → седиментогенез → диагенез → катагенез) с дальнейшими постседиментационными преобразованиями (уплотнение и цементация, перекристаллизация, доломитизация, кальцитизация и сульфатизация, выщелачивание, трещинообразование). Рассмотрим эти этапы и их следствия [7].

Седиментогенез – это процесс образования осадка. На формирование пустотного пространства и его структуру на этой стадии большое влияние оказывает гидродинамика среды осаждения. Слабая гидродинамика и подвижность осадка приводят к осаждению тонкозернистого карбонатного материала (пелитоморфные, тонкозернистые известняки и илы), у которых размер пор равен размерам карбонатных частиц ($\approx 10^{-3}$ мм).

Диагенез в соответствии с представлениями Н. М. Страхова – это все процессы, происходящие в осадке сразу после его образования до момента полной его литификации и превращения в породу. При диагенезе происходит уплотнение осадка и снижение объема порового пространства как реакция на более плотную упаковку зерен при возрастании горного давления. Уплотнение осадка сопряжено с процессом цементации, который происходит за счет

поступления дополнительного карбонатного вещества с метеорными и морскими водами, что ведет к снижению пористости и литификации пород.

При диагенезе образуется два вида трещиноватости: литогенетическая, приводящая к образованию микротрещин, и тектоническая, сопровождаемая мезо- и макротрещинами. Следующая за диагенезом стадия – это катагенез.

Катагенез – стадия химико-минералогического преобразования осадочных пород до превращения их в метаморфические породы. Катагенез сопровождается перекристаллизацией, кальцитизацией и сульфатизацией пород, выщелачиванием и доломитизацией, а также трещинообразованием. Содержание цемента может достигать 30 % от общего объема породы и составляет половину твердой фазы. Выщелачивание на этой стадии – один из главных процессов, ведущий к образованию каверновой пористости.

Доломитизация, или замещение кальция на магний, происходит в результате воздействия магнийсодержащих вод. Изменение структуры порового пространства происходит по реакции Гайдингера (1) или Мариньяка (2):



Величина катагенетической пористости при доломитизации зависит от состава магнийсодержащих растворов. Если доломитизация идет по реакции Мариньяка, то образующийся хлорид кальция из-за высокой растворимости выносится, пористость возрастает. Если же действует схема Гайдингера, образуются сульфаты кальция, частично заполняющие поры и снижающие пористость.

По данным Н. П. Запывалова наибольшее значение для изменения фильтрационных и емкостных свойств имеет доломитизация. Он считает, что, по существу, это метасоматоз, который происходит путем замещения иона кальция ионом магния.

В метасоматических доломитах часто образуются поры размером 0,2–0,8 мм и каверны размером более 1,0 мм.

Конечной стадией катагенетических преобразований является процесс образования трещин.

Трещиноватость обеспечивает связь между пористыми участками, в ряде случаев вдоль трещин образуются пустоты выщелачивания, стилолитовые швы. Трещинная пустотность обычно невелика.

Трещинная пористость:

$$m_{\text{трещ}} = \frac{V_{\text{трещ}}}{V_{\text{общ}}} \quad (3)$$

где, $V_{\text{трещ}}$ – объем трещин; $V_{\text{общ}}$ – общий объем породы.

Пористость m_m и проницаемость k_m чисто трещиноватых пластов определяется плотностью трещин Γ , геометрией систем трещин в породе и их средним раскрытием δ .

Коэффициент проницаемости изотропного трещиноватого пласта выражается через плотность трещин и их среднее раскрытие соответственно:

$$k_m = \frac{\theta \cdot \Gamma \cdot \delta^3}{12} = \frac{m_m \cdot \delta^2}{12} \quad (4)$$

где, θ – коэффициент, учитывающий геометрию систем трещин и принимающий значения $1 \leq \theta \leq 3$.

Трещины, наблюдаемые в карбонатных породах, могут быть полностью или частично заполнены («залечены») различными минеральными веществами (карбонатом, кварцем, сульфатами и т. п.), глинистым материалом либо черным метаморфизованным органическим веществом. Все они именуется минеральными. Наряду с ними могут различаться трещины, остающиеся полыми — открытые. К последним относятся также трещины, заполненные коричневым или желтым битумом (нефтью). Виды трещин представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Виды трещин

Раскрытость минеральных трещин варьируется в очень широких пределах: от долей миллиметра до 1 см и более. Раскрытость открытых трещин, как правило, не превышает 20—25 мкм, т. е. 0,02—0,025 мм (микротрещины). По раскрытости трещины подразделяются на капиллярные (от 0,005 до 0,01 мм или 5—10 мкм), субкапиллярные (от 0,01 до 0,05 мм или 10—50 мкм), а также волосные (от 0,05 до 0,15 мм или 50—150 мкм) [7].

Уравнение дебита, при установившейся фильтрации жидкости и газа в деформируемом трещиноватом пласте можно представить как [8]:

$$Q = \frac{2\pi k_{m0} h (p_k - p_c) \left[1 - \frac{3\beta}{2} (p_k - p_c) \right]}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} \quad (5)$$

где, Q – дебит скважины; h – толщина пласта; P_k – давление на контуре питания скважины; P_c – давление на забое скважины; R_k – радиус контура питания скважины; r_c – радиус скважины; $\beta = \beta_m l / \delta_0$ – комплексный параметр трещиноватой среды; μ – вязкость; δ_0 – раскрытие трещины при давлении p_0 ; l – среднее расстояние между трещинами; $\beta_m = (1 - 2\sigma) / E$ – упругая константа; E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона.

Комплексный параметр трещиноватой среды, зависит от упругих свойств и геометрии трещин. Среднее расстояние между трещин показывает, насколько много трещин в пласте и как следствие, при большем количестве трещин фильтрация будет проходить интенсивнее и дебит будет больше.

Упругая константа показывает, насколько порода устойчива к деформациям, и чем меньше данный параметр, тем порода меньше влияет на сжимание трещины и снижение фильтрации в пласте. Параметр раскрытости трещины при начальном давлении с точки зрения фильтрации показывает ширину трещины, через которую проходит флюид и чем больше она, тем больше проницаемость пласта, а, следовательно, и дебит будет больше.

1.1.3 Физико-химические свойства пластовых флюидов

Данные свойства играют не малую роль в процессе разработки, за счет них можно определить возможные осложнения и трудности при разработке, что позволяет скорректировать процесс и предпринять меры их устранения.

Физико-химические свойства пластовых углеводородов пласта М₁ Арчинского месторождения изучались по результатам исследования 16 глубинных проб нефти из скважин 40, 41, 42, 44, 45 Арчинских.

Физико-химические свойства дегазированной нефти Арчинского месторождения по результатам четырех представительных проб из скважин 40, 46 и 49 следующие: по плотности – средняя (855 кг/м³ при 20°С), малосернистая (содержание общей серы – 0,36 % масс.), высокопарафинистая – (содержание твердых парафинов 6,48 % масс.), малосмолистая (содержание смол силикагелевых 4,93 % масс.). Содержание асфальтенов равно 1,64 % масс. Температура начала кипения 78°С, выход легких фракций до 300 °С 42 % об. Значение молярной массы нефти равно 230 г/моль. Кинематическая вязкость нефти при 20 °С и 50 °С равна соответственно 18 мм²/с и 6 мм²/с. Классификация нефти по ГОСТ Р 51858-2002 - 1.2.1.1. Динамическая вязкость пластовой нефти при пластовых термобарических условиях (32,7 МПа, 104°С) равна 0,45 МПа·с.

Таблица – 1 Свойства пластовой нефти продуктивных пластов Арчинского месторождения

Наименование параметра	Пласт М ₁	
	Диапазон изменения	Принятые значения
Пластовое давление, МПа	31,7-32,7	32,7
Пластовая температура, °С	90-106	104
Давление насыщения газом при пластовой температуре, МПа	9,6-30,5	32,7
Газосодержание при однократном разгазировании, м ³ /т	142-183	145
Газовый фактор при дифференциальном разгазировании в рабочих условиях, м ³ /т	64-180	121,4
Плотность нефти при пластовых условиях, кг/м ³	619-777	688
Динамическая вязкость нефти при пластовых условиях, мПа·с	0,50-2,73	0,45
Коэффициент объемной упругости, 1/МПа*10 ⁻⁴	9,9-33,0	9,9
Плотность нефтяного газа, кг/м ³ , при 20 °С: - при однократном (стандартном) разгазировании - при дифференциальном (ступенчатом) разгазировании	0,768-1,053	0,898
	0,796-1,053	0,885
Плотность дегазированной нефти, кг/м ³ , при 20 °С - при однократном (стандартном) разгазировании - при дифференциальном (ступенчатом) разгазировании	774-875	868
	766-880	862

Таблица – 2 Основные параметры пластовой нефти пласта М Северо-Останинского и некоторых сопредельных с ним месторождений

Наименование параметра	Северо-Останинское, пласт М		Селимхановское м-е скважина 5, пласт М ₁ (2486-2516)	Чкаловское, пласт М ₁
	северный блок	южный блок		
Тип залежи по составу пластового флюида	нефтяная	нефтегазо-конденсатная	нефтегазо-конденсатная	нефтегазо-конденсатная
Давление пластовое, МПа	28.6	28.6	25.1	29.6
Температура пластовая, °С	115.0	115.0	107.0	119.8
Давление насыщения, МПа	22.2	28.6	25.1	25.4
Плотность нефти в условиях пласта, г/см ³	0.624	0.562	0.553	0.544
Вязкость нефти в условиях пласта, мПа·с	0.29	0.19	0.19	0.14
Газосодержание, м ³ /т	245.7	394.0	406.8	413.7
Объемный коэффициент пластовой нефти (однократное разгазирование)	1.660	1.998	2.040	2.082
Плотность сепарированной нефти при 20 °С, кг/м ³ (однократное разгазирование)	804.0	804.0	785.0	788.7

Плотность выделившегося газа при 20 °С, кг/м ³ (однократное разгазирование)	1.163	1.155	1.077	1.097
Серы, масс. %	0.13	0.05	0.05	0.07
Смол силикагелевых, масс. %	3.29	1.61	0.90	1.22
Асфальтенов, масс. %	0.22	0.09	Менее 0.1	0.30
Парафинов, масс. %	23.78	17.10	25.3	10.02

В таблице 1,2 представлены свойства палеозойской нефти. Сравнив данные по нескольким месторождениям, можно сказать, что плотность нефти изменяется от 0,544 до 0,776 г/см³, вязкость от 0,14 до 2,71 мПа*с. При этом в нефти содержится серы 0,05-1,22 масс. %, смол 0,9-9,13 масс. %, асфальтенов 0,09-3,91 масс. %, парафинов 10,02-37,2 масс. %.

Отсюда можно сделать выводы, что по плотности нефть особо легкая, по массовой доле серы – малосернистая, по вязкости – незначительно вязкие, по содержанию парафинов – высокопарафинистая, по содержанию смол и асфальтенов – малосмолистая.

1.2 Осложнения в карбонатных коллекторах при разработке месторождения

Важными осложнениями при разработке нефтяных месторождений с карбонатным типом коллектора являются: малая пористость, трещиноватость, неоднородность. Так при естественном режиме добычи нефтеотдача достигает 12-15%, а при применении методов интенсификации не превышает 25-29%.

Для карбонатных коллекторов характерно слоистое строение продуктивных толщ, неоднородность по толщине, поэтому в процессе разработки происходит неравномерная послойная выработка запасов.

Снижение проницаемости коллектора, ведет к осложнениям в процессе разработки. Одной из причин является деформация коллектора, а именно смыкание естественных трещин при снижении забойных и пластовых давлений, в процессе разработки.

Другой причиной является загрязнение призабойной зоны. В начальных пластовых условиях вследствие упругости пород продуктивного пласта и насыщающих его жидкостей трещины эти находятся в раскрытом состоянии и не препятствуют движению жидкости. Однако при вскрытии пласта или при добыче создаются высокие депрессии на призабойную зону, и происходит смыкание трещин пласта около ствола скважины. С повышением депрессии на пласт происходит снижение коэффициента продуктивности. После снижения депрессии порода приобретает первоначальное состояние и фильтрационные характеристики восстанавливаются. Слишком высокие депрессии могут приводить и к необратимым изменениям в скелете породы. Такие процессы происходят при пластических деформациях коллекторов, которые возникают, когда эффективное горное давление превышает предел текучести породы. Так при увеличении депрессии усиливается воздействие на породу и активнее происходит вынос отделившихся частиц вследствие небольших разрушений породы, что влечет за собой более интенсивное засорение фильтрационных каналов, а затем снижение проницаемости ПЗП.

В призабойной зоне пласта наблюдаются наибольшие перепады давления. Вследствие влияния минерализации и высоких давлений, происходит процесс интенсивного выпадения и скопления солей в ПЗП.

Одним из признаков, определяющих загрязнения ПЗП является скин-фактор. Кислотные обработки проводятся при значениях скин-фактора от -1 до 5. Предел результата, которого можно достичь от кислотной обработки, может быть $S = -3$. Типовые значения скин-фактора представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Типовые значения скин фактора

Значения	Интерпретация
$S > 10$	Механические проблемы
$S - 5$	Серьезные загрязнения ПЗП
$S - 1-2$	Умеренные загрязнения ПЗП
$S > 0$	Загрязнения ПЗП
$S < 0$	Интенсификация притока
$S - -3$	Предел для кислотной обработки
$S - -4$	Хороший ГРП
$S - -5,5$	Нижний предел

Фильтрат бурового раствора

Фильтрат бурового раствора просачивается через пласт-коллектор и образует на стенках скважины глинистую корку, а также существенно увеличивает затраты и риски при бурении и освоении, а, чтобы их предупредить или ликвидировать, необходимо использовать различные методы, которые направлены на сохранение бурового раствора в стволе скважины и на предотвращение дальнейшего трещинообразования.

При подъёме бурового раствора вверх происходит его взаимодействие стволом скважины. Зачастую, при бурении используется превышение давления ствола скважины над пластовым, что не допускает притока в скважину пластовой жидкости.

Механизм ухода бурового раствора в зоны поглощения может проходить двумя путями. Первый путь – это поглощение жидкого компонента проницаемой породой и образование фильтрационной корки на стенке ствола скважины (твёрдый компонент и эмульсия) с помощью адгезионной способности породы. В низкопроницаемых породах явление утечки бурового раствора будет проявляться в меньшей степени, но потеря циркуляции всё же может происходить, если порода имеет каверны, большое количество трещин и пустот. Второй путь – если давление ствола скважины выше давления разрыва породы, то образование трещин и каверн является естественным результатом.

В результате двух путей возможно дальнейшее трещинообразование и усиление поглощения раствора, что является достаточно большой проблемой

Кольматация при проведении текущего и капитального ремонта скважины

В ходе работ по очистке забоя происходит механический кольматаж, частицы бурового шлама проникают в пласт забивая поры ПЗП на расстоянии от забоя не более 10 м., а в трещиноватых коллекторах могут просачиваться достаточно глубоко (до нескольких десятков метров), что зависит от конфигурации трещин и от перепада давления.

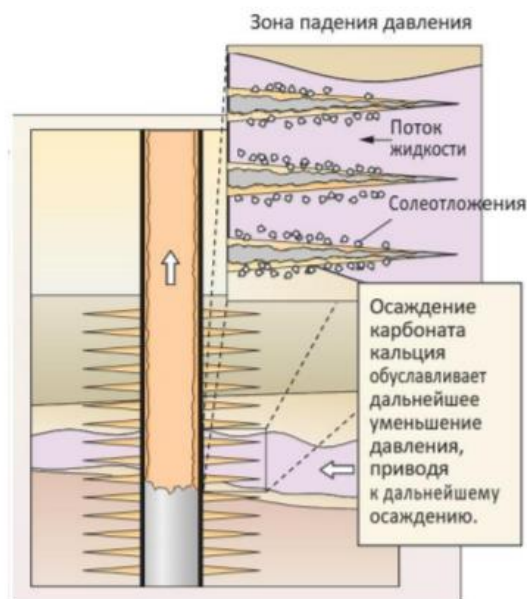


Рисунок 4 – Солеотложения при капитальном ремонте скважин

Применение растворов глушения, которые несовместимы с пластовой водой – является одной из основных причин отложения солей. Данные растворы могут быть на кальциевой основе и включать CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, а также содержание в пластовой воде NaHCO_3 . Кальцит откладывается в ПЗП и погружном оборудовании из-за термодинамического дисбаланса в добываемой пластовых флюидов, при снижении забойного давления ниже давления насыщения, при дальнейшем разгазировании и обязательно в перенасыщенном состоянии ионов солей в воде. Необходимым условием для определения возможности солеобразования, нерастворимого в воде и приводящего к снижению проницаемости ПЗП, является наличие информации об ионном составе раствора глушения и пластовой воды. Чтобы предотвратить образование солей в процессе глушения, необходимо добавлять в раствор глушения ингибиторы солеотложений.

Осаждение асфальтосмолопарафиновых отложений

В состав АСПО входят: асфальтосмолистые соединения, механические примеси, парафины метанового ряда (от $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ до $\text{C}_{64}\text{H}_{130}$), силикагелевые смолы и вода. Они выпадают из нефти из-за резкого изменения термодинамических параметров, в основном это температура и давление.

После выделения АСПО оседают на поверхности породы и оборудования, создавая огромные сопротивления движению потока флюидов.

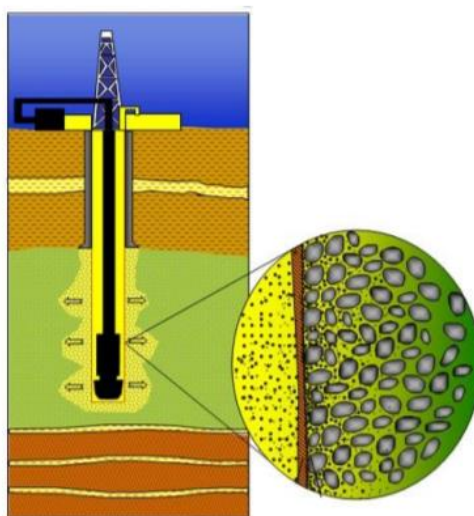


Рисунок 5 – Осаждение асфальтосмолопарафиновых отложений

Изменение скорости движения газожидкостной смеси, снижение температуры и давления, определённое соотношение объёмов, отдельных составляющих потока флюида (нефть, газ, вода) – являются основными факторами, которые влияют на силу и активность выделения АСПО. Огромное влияние оказывает разница между устьевой температурой (ТУ) и температурой насыщения нефти парафином (ТННП). Выпадение АСПО начинается при условии, что $TУ = TННП$. Если $TУ > TННП$ то АСПО в основном выделяются на поверхностном оборудовании и трубопроводе, а при $TУ < TННП$ – выделяются в НКТ и ПЗП.

Высокая депрессия при повышенном газовом факторе

При создании депрессии на пласт при некотором значении забойного давления газовый конус поднимается к перфорационным отверстиям. При этом газовое содержание флюида в скважине увеличивается, и забойное давление еще более уменьшается, что способствует дальнейшему росту газовой шапки и дальнейшему снижению забойного давления. Т. е. возникает положительная обратная связь. Это, в конечном счете, приводит к созданию условий для засорения ПЗП. При высоких депрессиях в пласте происходит

нарушение границ разделов фаз (т.е. газо- и водонефтяных контактов). При резких перепадах давления, и высоких депрессиях возможен прорыв газа и/или воды в скважину, потому что у газа и воды подвижность лучше, чем у нефти, следовательно, дебит нефти снизится, а дебит газа и/или воды стать огромным (из-за оттеснения нефти). Большая депрессия, вызванная повышенным значением газового фактора, увеличивает скорость движения флюидов, усиливается процесс приноса песчаных частиц и других веществ в призабойную зону пласта, забивая поры и трещины.

Загрязнение призабойной зоны ухудшает ФЕС пласта, фильтрацию жидкости в системе «скважина-пласт», тем самым затрудняет добычу нефти и закачку воды.

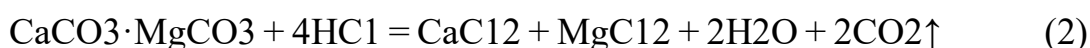
1.3 Механизм воздействия кислотных составов в пластовых условиях карбонатных коллекторов

Карбонатные минералы кальцит CaCO_3 и доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ активно вступают во взаимодействие с большинством неорганических и некоторым количеством органических кислот, что связано с малым значением константы диссоциации угольной кислоты H_2CO_3 образующей минералы. В большинстве случаев для проведения кислотных обработок используют растворы HCl , с концентрацией 12-15 мас. %, и составы на их основе, что связано с растворимостью продуктов реакции в воде, многотоннажным производством и относительно низкой стоимостью соляной кислоты. «Соляная кислота (HCl) – это водный раствор газообразного хлористого водорода с молярной массой $M = 36,46$ г/моль. В исходном состоянии представляет собой бесцветный газ плотностью $\rho = 1,639$ кг/м³ (20 °С), $t_{пл} = -114,2$ °С, $t_{к} = -85,08$ °С, $t_{кр} = 52,4$ °С при $P = 0,826$ МПа. На промыслы поступает абгазная соляная кислота – продукт сжигания хлорорганических веществ с различным содержанием посторонних примесей в виде Fe^{2+} , Fe^{3+} , F^- , SO_4^{2-} и др.».

При сложной инфраструктуре нефтепромысловых объектов, связанной с проблемами доставки жидкой соляной кислоты используют сухие

кислотообразующие реагенты – сульфаминовую кислоту NH_2HSO_3 , смесь параформа $\text{HO}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ и хлорида аммония NH_4Cl , азотнокислую мочевины $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{HNO}_3]$.

Растворение карбонатов CaCO_3 и $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ в растворе HCl протекает с выделением углекислого газа CO_2 и образованием водорастворимых хлоридов кальция CaCl_2 и магния MgCl_2 в соответствии с уравнениями реакций:



Помимо взаимодействия с минералами, слагающими породу, раствор HCl вступает одновременно в реакцию и с минералами-включениями CaSO_4 и FeCO_3 :



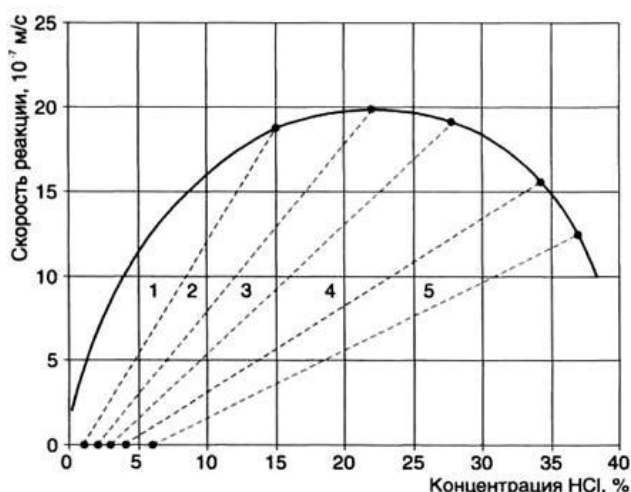
При взаимодействии чистого ангидрита CaSO_4 с раствором HCl в поровом пространстве карбонатной породы возможно образование осадка вторично переотложенного CaSO_4 . Однако отмечается, что при закачке раствора HCl в карбонатный пласт, не создаются условия для образования CaSO_4 .

Для обработки скважин обычно готовится раствор соляной кислоты с содержанием чистой HCl в пределах 10 - 15%, так как при большом ее содержании нейтрализованный раствор получается очень вязким, что затрудняет его выход из пор пласта. Температура замерзания 15 %-ного раствора HCl равна минус 32,8 °С.

От концентрации кислоты зависит не только коэффициент растворимости, но и скорость реакции. В результате экспериментальных исследований было установлено, что скорость реакции растворов соляной кислоты возрастает при увеличении концентрации до 24-28 %. Вне этих пределов скорость реакции уменьшается (зависимость приведена на рисунке б). Скорость реакции резко уменьшается по мере отработки кислоты. Скорость

реакции 15 % соляной кислоты при начальной концентрации почти в два раза выше, чем при эквивалентной концентрации 15 % соляной кислоты, полученной при отработке 28 % соляной кислоты. Чем выше начальная концентрация кислоты, тем ниже скорость реакции кислоты при её частичной отработке. Это уменьшение скорости реакции кислоты объясняется замедляющим влиянием ионов продуктов реакции, насыщающих раствор по мере отработки более концентрированной кислоты. Поэтому при использовании эквивалентного количества кислоты двух различных концентраций время отработки более сильной кислотой будет большим.

Высокие концентрации раствора приводят к образованию насыщенных с повышенной вязкостью растворов CaCl_2 и MgCl_2 , которые трудно извлекаются из пласта при освоении. Кроме того, существенно возрастает коррозия оборудования и труб.



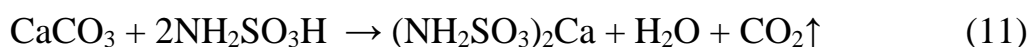
1 - концентрация $C_0 = 15$ %; 2 - $C_0 = 22$ %; 3 - $C_0 = 28$ %; 4 - $C_0 = 34$ %; 5 - $C_0 = 37$ %

Рисунок 6 – Влияние концентрации соляной кислоты на скорость реакции с карбонатными породами

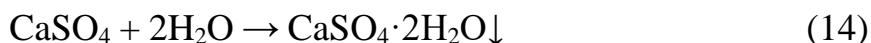
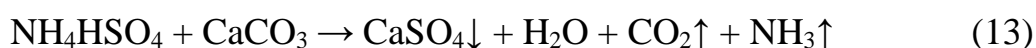
Соляная кислота при взаимодействии с известняком образует хлористый кальций и двуокись углерода, которые влияют на эффективность обработок. При равных объемах более концентрированная кислота образует большее количество этих продуктов, поскольку 28 % кислота растворяет вдвое больше известняка, чем 15 %, следовательно, и концентрация продуктов реакции вдвое больше.

Скорость реакции соляной кислоты с карбонатной породой сильно возрастает при повышении температуры реакции, поэтому обычную соляную кислоту не используют при температурах выше 80 °С. Высокая скорость реакции негативно сказывается на эффективности обработки, поскольку вся кислота расходуется в непосредственной близости от ствола скважины и не увеличивает проницаемость ПЗП в должной мере. Для снижения скорости реакции с породой в рабочие растворы соляной кислоты добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые ингибируют поверхность породы от интенсивного воздействия соляной кислоты, препятствуют ее преждевременной выработке и способствуют более глубокому проникновению в пласт.

Для обработки низкотемпературных коллекторов с невысокой проницаемостью используют сульфаминовую кислоту (реакция 11), чья низкая скорость реакции с породой позволяет составу проникать глубоко в пласт:



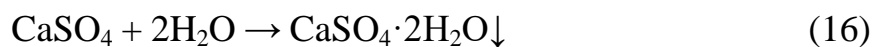
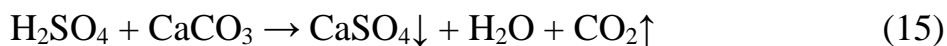
При температуре выше 60 °С происходит гидролиз сульфаминовой кислоты с образованием гидросульфата аммония (реакция 12), который, в ходе дальнейших превращений образует малорастворимый сульфат кальция (реакция 13), переходящий в гипс в результате гидратообразования (реакция 14):



Использование серной кислоты для обработки карбонатных коллекторов связано с рядом моментов, которые следует учитывать при обработке.

С одной стороны, серная кислота достаточно активно реагирует с углеводородами ароматического ряда, в результате чего в пористой среде образуются анионноактивные ПАВ: алкилсульфо-кислоты, алкиларил-

сульфокислоты, которые способствуют улучшению нефтеотмывающих свойств закачиваемой вслед за H_2SO_4 воды.



С другой стороны, применение серной кислоты приводит к выпадению гипса в скважине и промышленном оборудовании (реакции 15, 16), а также повышенному коррозионному разрушению отдельных узлов оборудования и цементного камня. Кроме того, H_2SO_4 в 1,5 раза тяжелее HCl , что затрудняет ее транспортировку. Принципиальное условие применимости закачки H_2SO_4 с точки зрения коррозии – недопустимость поступления разбавленной кислоты к забоям добывающих скважин [9].

Влияние термобарических условий на проведение кислотных обработок

На скорость протекания реакции при соляно-кислотной обработке оказывает влияние давление закачки, температура, состав породы и концентрация кислоты в растворе. В зависимости от вещественного состава карбонатной породы скорость реакции возрастает в 1,6-2,5 раз при повышении температуры от 20 до 60 °С. На рисунке 7 представлена графическая зависимость влияния давления и температуры на время нейтрализации кислотного раствора.

Повышение давления приводит к снижению скорости реакции. Время нейтрализации 75% объёма кислотного раствора увеличивается в 7-10 раз при повышении давления с 0,1 МПа до 0,7 МПа. При увеличении давления от 0,7 МПа до 1 МПа время нейтрализации увеличивается в 30-35 раз, а при увеличении давления с 2 МПа до 6 МПа скорость реакции снижается в 70 раз [10].

Время нейтрализации кислотных растворов резко снижается (в 4 раза и более) по мере увеличения пластовой температуры от 25°С до 90–100°С и выше, ограничивая тем самым глубину проникновения кислотного раствора в

пласт в активном состоянии, что приводит к снижению эффективности обработки глубокозалегающих карбонатных пластов.

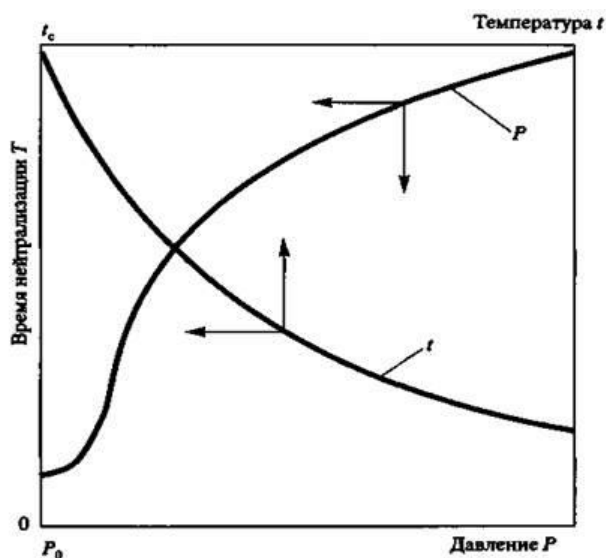
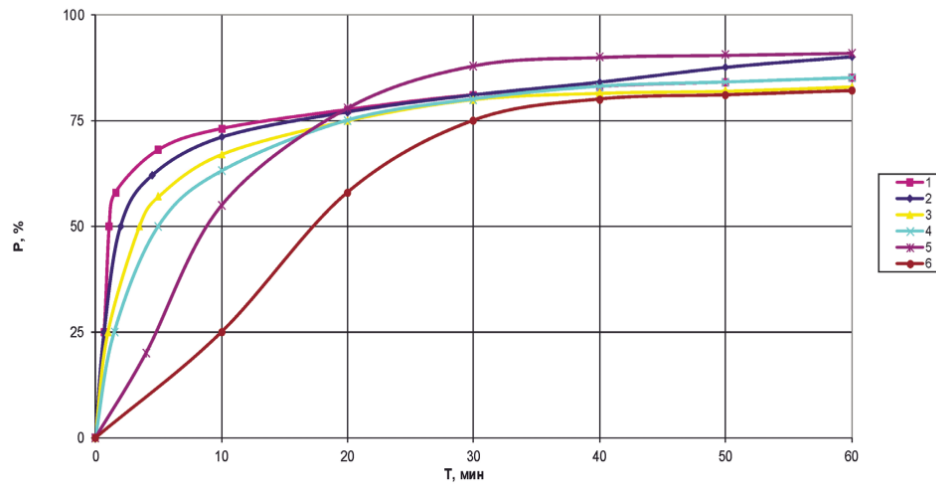


Рисунок 7 – Графическая зависимость влияния давления и температуры на время нейтрализации кислотного раствора $t_c - 20\text{ }^\circ\text{C}$; P_0 – атмосферное давление

Исследование кинетики растворения карбонатов в кислотных растворах показало, что наибольшая скорость растворения породы наблюдается в течение первых 25–30 минут и степень растворимости карбонатов для 14%-й соляной кислоты составляет 79,0%, для 14%-й соляной кислоты + 12%-го хлористого кальция – 77,0% (рисунок 8). Спустя 30 минут степень растворимости карбонатов резко замедляется, а через час процесс практически прекращается, и объем растворенного вещества достигает 80–90 % от исходного [11].



1 - 14% HCl; 2 - 14% HCl+12% CaCl₂; 3 - 14% HCl+2,5% КМЦ; 4 - 14% HCl+2% ОП-4; 5 - 14% HCl + 2% ОП-10; 6 - 14% HCl + 1% сульфонил

Рисунок 8 - Зависимость растворимости карбонатной породы от времени и состава кислоты

Максимальная глубина проникновения кислоты в активном состоянии функционально связана с объемной скоростью ее закачки в пласт, временем нейтрализации кислотного раствора и удельным объемом закачиваемой кислоты:

$$V = Q \cdot T = \pi \cdot (r_p^2 - r_c^2) \cdot h \cdot m \quad (18)$$

При этом глубина проникновения кислоты в пласт определяется из соотношения:

$$L = (r_p - r_c) = \frac{Q \cdot T}{\pi \cdot m \cdot h \cdot (r_p + r_c)} \quad (19)$$

где, m – пористость пласта в долях единицы; h – толщина обрабатываемого интервала пласта; Q – объемная скорость закачки кислоты в пласт; r_p – радиус проникновения кислоты в пласт в активном состоянии; r_c – радиус скважины; T – время нейтрализации кислоты; V – объем закачиваемой кислоты в пласт; $\pi = 3,14$.

Время нейтрализации кислоты показывает время, за которое кислота полностью прореагировала с породой с выделением продуктов реакции. Продолжительность пребывания кислотного раствора в пласте, так же зависит и от температуры:

- при $t = 20\text{--}30^\circ\text{C}$ $T = 1,5\text{--}2,0$ часа;
- при $t = 30\text{--}50^\circ\text{C}$ $T = 1,0$ час;
- при $t = 51\text{--}75^\circ\text{C}$ $T = 0,5\text{--}1,0$ час;
- при $t = 75\text{--}100^\circ\text{C}$ $T = 0,5$ час;
- при $t > 100^\circ\text{C}$ $T < 0,5$ час.

1.4 Геологические факторы влияющие на эффективность проведения кислотных обработок

К основным геологическим факторам (параметрам), оказывающим влияние на эффективность кислотного воздействия, относятся условия протекания процессов фильтрации кислотной композиции: состав и свойства горных пород и пластовых флюидов, пластовое давление и температура.

Содержание в горной породе солей угольной кислоты (чаще всего – кальцита и доломита) является одной из характеристик, которой оперируют исследователи при изучении процесса кислотного воздействия. В литературе отмечается, что протекание реакции водных растворов кислот с кальцитом (известняком) и доломитом существенно отличается, а соотношение этих компонентов определяет итоговый результат мероприятия. Также, повышенное содержание нерастворимых или малорастворимых в соляной кислоте минералов (кварц, алевролит, аргиллит и др.) выделяется как одна из причин снижения эффективности воздействия. Для снижения негативного влияния состава горной породы в таких условиях предпочтительно использовать композиции с включенными в рецептуру спиртами для обеспечения их глубокого проникновения в пласт и максимального извлечения продуктов реакции за счет эффекта снижения межфазного натяжения.

Состояние пласта в зоне дренирования скважины, а именно неоднородность его коллекторских свойств, проницаемость, насыщенность и структура пустотного пространства, может оказывать существенное влияние на результат кислотной обработки. Авторами [12] на основе серии

лабораторных экспериментов получен вывод, что эффективность стимуляции при воздействии на низкопроницаемые образцы горной породы выше, чем в опытах с высокопроницаемыми, при этом подвижность флюида в большей степени увеличилась в водонасыщенных образцах кернх относительно нефтенасыщенных, что объясняется различным характером смачиваемости. Исследователями установлено, что петрофизические характеристики горной породы, такие как пористость и проницаемость, не всегда определяют кинетику реакции в системе «горная порода – кислотный раствор», а при выделении условий для закачки химических композиций целесообразнее принимать во внимание зависимость коэффициента диффузии от распределения пор по размеру.

Отмечено, что критическая скорость закачки в трещиноватой среде практически не отличается от чисто поровых условий при постоянном минералогическом составе горной породы, а распространение червоточин зависит от ориентации трещин: если они параллельны движению потока, то червоточина образуется в их направлении, в противном случае – определяет только количество ответвлений в червоточине. Исследователи [13,14,15] приводят результаты численных и лабораторных экспериментов на кавернозной карбонатной породе, в ходе которых отмечен факт более быстрого образования червоточин при меньшем поровом объеме кислотного раствора относительно однородного порового известняка. На практике следует учитывать, что наличие каверн в структуре коллектора может как способствовать эффективности обработки, создавая направленный канал фильтрации, так и препятствовать, сообщая между собой нефтенасыщенные и водоносные пропластки, тем самым способствуя фильтрации воды. Решением данной проблемы может служить использование химических реагентов-отклонителей или композиций с эффектом самоотклонения.

Состав и свойства пластовых флюидов также относятся к факторам, оказывающим влияние на эффективность кислотной обработки. В работах детально анализируется технологическая эффективность обработки

призабойных зон, осложненных асфальтеносмолопарафиновыми отложениями (АСПО). Пласты, насыщенные высоковязкой, смолистой нефтью, взаимодействуют с кислотным раствором менее эффективно, поскольку пустоты пород блокированы пленками углеводов, что особенно актуально при пластовых температурах, не превышающих 30 °С. Направлением совершенствования кислотных обработок при наличии АСПО на поверхности поровых каналов считается использование композиций с органическими растворителями.

Пластовое давление и температура определяют термодинамические условия среды, в которой протекает реакция кислотных растворов с горной породой. В работе отмечается, что растворяющая способность соляной кислоты возрастает по логарифмическому закону по мере повышения пластовой температуры. В научной литературе отмечено низкое влияние непосредственно температуры пласта на распространение червоточины, в то время как доминирующим параметром является температура закачиваемой кислоты: при более высоких температурах раствора наблюдается более низкая эффективность обработки карбонатных пород. Снижение пластового давления в процессе разработки залежей уменьшает эффективность кислотных обработок, что связано с изменением продуктивных характеристик скважин и негативным воздействием на приток флюида продуктов реакции, извлечение которых из коллектора осложняется недостатком пластовой энергии.

2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА НА КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

2.1 Выбор участка для проведения кислотной обработки

Важными критериями при подборе скважин-кандидатов на проведения кислотной обработки являются снижения дебитов и продуктивности, увеличение скина и обводненности. Основные параметры для выбора скважин-кандидатов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Критерии выбора скважин-кандидатов для проведения кислотной обработки

№	Параметр работы скважин	Желательный диапазон
1	Текущее пластовое давление в долях от гидростатического, %	более 60
2	Текущее пластовое давление в долях от начального, %	более 60
3	Текущий дебит по жидкости, м ³ /сут. (для получения рентабельного прироста)	> 10
4	Текущий дебит по нефти, т/сут. (для получения рентабельного прироста)	> 5
5	Снижение дебита жидкости за последние 9-12 месяцев или от последнего ПРС, %	более 30%
6	Снижение дебита нефти за последние 9-12 месяцев или от последнего ПРС	более 30%
7	Рост обводненности за последние 9-12 месяцев или от последнего ПРС	менее 10%
9	Расстояние до изолированного обводненного интервала ниже объекта обработки, м	более 10
10	Расстояние до изолированного обводненного интервала выше объекта обработки, м	более 10
11	Расстояние до водоносного (газоносного) горизонта, м	более 15
12	Негерметичность эксплуатационной колонны	отсутс.
13	Обводненность, %	менее 80%
14	Наличие изолированного обводненного интервала	отсутс.
15	Снижение коэффициента продуктивности от первоначального	Более 30%
16	Скин-фактор	От -1 до 5

При выборе скважин-кандидатов смотрят на дебит жидкости и нефти, для того чтобы сама кислотная обработка была рентабельная. С очень низкими дебитами, возможный прирост не сможет покрыть затраты компании на саму обработку.

Отсутствие негерметичности эксплуатационной колонны необходимо, для исключения перетоков и воздействия на незапланированные участки пласта. Так же выбор участка с отсутствующим изолированным обводненным интервалом, предотвращает возможное взаимодействие кислоты с изолированным материалом и его разрушение.

Так же акцент делает на обводненности скважины, которая должна быть менее 80%. Это связано с тем, что после кислотной обработки возможно резкое повышение обводненности из-за увеличения проницаемости, что в свою очередь может привести к уменьшению срока рентабельной работы скважины.

Увеличение скин-фактора от -1 до 5, а также снижения дебита жидкости, нефти, коэффициента продуктивности, говорит нам о том, что произошло засорение призабойной зоны пласта. А рост низкий рост обводненности говорит, что причина снижения дебита нефти не из-за прорыва воды.

Ограничения по расстоянию изолированных обводненных интервалов сверху и снизу, а также расстояние до водоносного (газоносного) горизонта снижают риски возникновения снижения эффекта от обработки, связи с прорывом воды или газа к скважине.

Таблица 5 – Исходные данные скважины – кандидата на месторождении X (скв.1193 Арчинского н.м.р, пласт М1).

Параметр	Индекс	Значение	Ед. из.
Плотность нефти в пл. усл.	ρ_n	688	кг/м ³
Плотность воды в пл. усл.	ρ_v	1027	кг/м ³
Внутренний диаметр эксплуатационной колонны	$D_{эк}$	168	мм
Глубина кровли пласта	H	3217	м
Внутренний диаметр НКТ	$d_{нкт}$	62	мм
Пористость	m	0,1	доли ед.
Проницаемость пласта	k	0,0028	мкм ²
Эффективная толщина пласта	h	12	м
Пластовое давление	P_c	29,43	МПа
Забойное давление	P_{wf}	26,19	МПа
Давление насыщения	P_b	18	МПа
Радиус контура	R_c	280	м
Вязкость нефти	μ_n	0,45	мПа*с

Продолжение таблицы 5

Объемный коэффициент нефти	b	1,28	доли ед.
Дебит нефти	Q	82	м ³ /сут
Радиус скважины	rw	0,2	м
Угол экспоненты		0,0004	
Плотность кислотного раствора HCL 100%	$\rho_{\text{кис}}$	1072	кг/м ³
Плотность доломита	$\rho_{\text{изв}}$	2500	кг/м ³
Плотность известняка	$\rho_{\text{каль}}$	2000	кг/м ³
Концентрация HCL		0,16	доли
Товарная концентрация HCL		0,275	доли
Скорость закачки	q	6,85	л/сек
Стехиометрический коэффициент для доломита	$\vartheta_{\text{изв}}$	4	
Стехиометрический коэффициент для известняка	$\vartheta_{\text{каль}}$	2	
Концентрация доломита	x	5	%
Концентрация известняка	y	95	%

2.2 Методика расчета кислотной обработки карбонатного коллектора

В общем случае объёмы кислотного раствора для стандартных кислотных обработок, в расчете на 1 м мощности продуктивного пласта, рекомендуются следующие (в м³).

Для первичных обработок пористых пород [16]:

- малопроницаемых, тонкопористых – 0,4-0,6 м³;
- высокопроницаемых – 0,6-1,0 м³.

Для вторичных обработок пористых пород:

- малопроницаемых, тонкопористых – 0,6-1,0 м³;
- высокопроницаемых – 1,0 – 1,5 м³.

Для первичных обработок трещиноватых пород – 0,6-0,8 м³.

Для вторичных обработок трещиноватых пород – 1,0 – 1,5 м³.

Норма расхода кислотного раствора v_p составляет 1 м³ на 1 метр обрабатываемой толщины пласта. Тогда объем раствора соляной кислоты (V_{HCL}):

$$V_{\text{HCL}} = v_p \cdot h \quad (22)$$

где v_p – норма расхода кислотного раствора, м³/м;

h – обрабатываемый кислотным раствором интервал продуктивного пласта, м.

Объем товарной кислоты (в м³):

$$V_k = \frac{V_{\text{HCL}} \cdot \chi_p \cdot (5,09 \cdot \chi_p + 999)}{\chi_k \cdot (5,09 \cdot \chi_k + 999)} \quad (23)$$

где χ_p χ_k – соответственно объемные доли (концентрации) раствора соляной кислоты и товарной кислоты, %.

В качестве химических реагентов при солянокислотной обработке используют стабилизаторы (замедлители реакции), ингибиторы коррозии и интенсификаторы. Как правило, в соляной кислоте содержится до 0,4 % серной кислоты, которую нейтрализуют добавкой хлористого бария, количество которого $G_{\text{х.б.}}$ рассчитывают по формуле (кг)[17]:

$$G_{\text{х.б.}} = 21,3 \cdot V_{\text{HCL}} \cdot \left(\frac{a \cdot \chi_p}{\chi_k} - 0,02 \right) \quad (24)$$

где, 21,3 – масса хлористого бария (кг), необходимого для нейтрализации 10 кг серной кислоты;

χ_p χ_k – соответственно объемные доли (концентрации) раствора соляной кислоты и товарной кислоты, %;

$\frac{a \cdot \chi_p}{\chi_k}$ – объемная доля серной кислоты в приготовленном растворе;

a – объемная доля серной кислоты в товарной соляной кислоте, % ($a = 0,4\%$)

Обычный раствор HCl истощается достаточно быстро (около 30 минут) и pH возрастает, стремясь к значению 7. Одновременно с нейтрализацией кислотного раствора часть образовавшихся хлоридов остается в растворенном состоянии, а другая часть образует соединения гидроокиси железа [Fe(OH)₃] и алюминия [Al(OH)₃], которые осаждаются, давая вторичные отложения в виде гелей, способных заметно снизить проницаемость обрабатываемой зоны. По этой причине после СКО вместо ожидаемого увеличения дебита иногда происходит полное блокирование ПЗП.

Для предотвращения вторичного выпадения осадков в пласте, в кислотный раствор вводится стабилизатор. В качестве стабилизатора окисных соединений железа используем уксусную кислоту, объем которой определим по формуле:

$$V_{\text{ук}} = \frac{b_{\text{ук}} \cdot V_{\text{HCL}}}{C_{\text{ук}}} \quad (25)$$

где, $b_{\text{ук}}$ - норма добавки 100 %-ной уксусной кислоты (для замедления кислотного раствора $b_{\text{ук}}=3\%$);

$C_{\text{ук}}$ – объемная доля товарной кислоты (80%).

В качестве ингибитора коррозии выбираем реагент В-2, объем которого определим по формуле:

$$V_{\text{и}} = \frac{b_{\text{и}} \cdot V_{\text{HCL}}}{C_{\text{и}}} \quad (26)$$

где, $b_{\text{и}}$ – норма добавки ингибитора (для реагента В-2 $b_{\text{и}}=0,2\%$);

$C_{\text{и}}$ – объемная доля товарного ингибитора (100%).

Для снижения высокого поверхностного и межфазного натяжений при обработке ПЗП рекомендуется применять поверхностно-активные кислотные растворы, добавлением в них смеси неионогенных и анионогенных ПАВ в количестве до 1%. Данное мероприятие дает возможность кислоте более полно проникать в пустоты пористой среды и в тонкие каналы продуктивного пласта, удаляет нефть с поверхности породы и обеспечивает хороший контакт между кислотой и породой. Объем интенсификатора (используется Марвелан) определим по формуле:

$$V_{\text{ин}} = \frac{b_{\text{ин}} \cdot V_{\text{HCL}}}{100} \quad (27)$$

где, $b_{\text{ин}}$ – норма добавки интенсификатора (для Марвелана 0,3%)

При плотности хлористого бария 4000 кг/м^3 его объем определяем по формуле:

$$V_{\text{х.б.}} = \frac{G_{\text{х.б.}}}{\rho_{\text{х.б.}}} \quad (28)$$

Объем воды для приготовления кислотного раствора:

$$V_B = V_{HCL} - V_K - (V_{x.б.} + V_{ук} + V_u + V_{ин}) \quad (29)$$

Транспортировка кислотного раствора осуществляется продавкой нефтью в объеме выкидной линии длиной 25 метров и НКТ:

Объем выкидной линии в (м³):

$$V_{вык} = 0,785 \cdot d_{вн}^2 \cdot l_{вык} \quad (30)$$

где, $d_{вн}$ – внешний диаметр выкидных линий, м;

$l_{вык}$ – длина выкидных линий, м.

Объем НКТ:

$$V_{НКТ} = 0,785 \cdot d_{НКТ}^2 \cdot l_{НКТ} \quad (31)$$

Общий объем продавочной нефти составляет:

$$V_{п} = V_{вык} + V_{НКТ} \quad (32)$$

Продолжительность нагнетания и продавки в пласт раствора:

$$\tau = \frac{(V_{HCL} + V_{п}) \cdot 10^3}{q \cdot 3600} \quad (33)$$

где, q – подача насоса на выбранной скорости, л/с.

Для определения эффективности проведения кислотной обработки необходимо рассчитать скин-фактор до её проведения. Исходя из условия $P_c > P_b$, $P_{wf} \leq P_b$, можно определить скин-фактор скважины-кандидата до проведения соляно-кислотной обработки по формуле:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h \cdot (P_c - P_{wf})}{\mu \cdot b \cdot Q} - \ln\left(\frac{R_c}{r_w}\right) \quad (34)$$

где S – скин-фактор, доли ед.;

k – проницаемость пласта, м²;

h – толщина пласта, м;

μ – вязкость нефти, Па·с;

b – объёмный коэффициент нефти, доли ед.;

Q – дебит скважины, м³/сут;

R_c – радиус контура, м;

r_w – радиус скважины, м.

Для проведения соляно-кислотной обработки призабойной зоны скважин применяется кислотный состав с концентрацией соляной кислоты, $a = 12 \%$, плотность соляной кислоты при стандартной температуре равна $1000,0 \text{ кг/м}^3$. В таблице 6 представлены коэффициенты диффузии для раствора соляной кислоты при разных концентрациях.

Таблица 6 – Коэффициент диффузии для HCl

Массовая концентрация HCl, %	Коэффициент диффузии $D \cdot 10^{-9}$, м ² /с
5	0,169
12	0,190
15	0,212
20	0,235

В связи с тем, что редко коллектор состоит из одного материала, то необходимо рассчитать молярную концентрацию коллектора, состоящего из доломита и известняка по формуле:

$$C_{\text{кол}} = \frac{C_{\text{дол}} \cdot x + C_{\text{изв}} \cdot y}{x + y} \quad (35)$$

где $C_{\text{кол}}$ – молярная концентрация коллектора, моль/л;

x – доля доломита в породе, доли ед.;

y – доля известняка в породе, доли ед.;

$C_{\text{дол}}$ – молярная концентрация доломита, моль/л.;

$C_{\text{изв}}$ – молярная концентрация известняка, моль/л.

Молярную концентрацию доломита в породе, при его содержании $C_{\text{дол}} = 100\%$ по формуле:

$$C_{\text{дол}} = \frac{\rho_{\text{дол}}}{M_{\text{дол}}} \quad (36)$$

где $C_{\text{дол}}$ – концентрация доломита, моль/л.;

$\rho_{\text{дол}}$ – плотность доломита, кг/м³;

$M_{\text{дол}}$ – молярная масса доломита, г/моль.

Молярную концентрацию известняка в породе, при его содержании $C_{\text{изв}} = 100\%$ по формуле:

$$C_{\text{изв}} = \frac{\rho_{\text{изв}}}{M_{\text{изв}}} \quad (37)$$

где $C_{\text{изв}}$ – концентрация известняка, моль/л.;

$\rho_{\text{изв}}$ – плотность известняка, кг/м³;

$M_{\text{изв}}$ – молярная масса известняка, г/моль.

Стехиометрический коэффициент породы, необходимый для расчета кислотного числа, рассчитывается по формуле [18]:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_{\text{дол}} \cdot x + \vartheta_{\text{изв}} \cdot y}{x + y} \quad (38)$$

Где ϑ – стехиометрический коэффициент породы, доли ед.

Молярная концентрацию соляной кислоты рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{HCl}} = \frac{\rho_{\text{HCl}} \cdot \alpha}{M_{\text{HCl}}} \quad (39)$$

где C_{HCl} – концентрация соляной кислоты, моль/л;

ρ_{HCl} – плотность соляной кислоты при нормальных условиях, кг/м³;

α – концентрация соляной кислоты в растворе, доли ед.;

M_{HCl} – молярная масса соляной кислоты, г/моль.

Кислотное число, необходимое для расчета изменения скин-фактора, считается по формуле:

$$A_c = \frac{m \cdot C_{\text{HCl}}}{C_{\text{кол}} \cdot \vartheta} \quad (40)$$

где A_c – кислотное число, доли ед.;

m – пористость, доли ед.

Коэффициент фрактальной размерности d для коллектора рассчитывается по формуле:

$$d = \frac{d_{\text{дол}} \cdot x + d_{\text{изв}} \cdot y}{x + y} \quad (41)$$

где d – коэффициент фрактальной размерности для коллектора, доли ед.;

$d_{\text{дол}}$ – коэффициент фрактальной размерности для доломита, доли ед.;

$d_{\text{изв}}$ – коэффициент фрактальной размерности для известняка, доли ед.

Число Пекле рассчитывается по формуле:

$$N_{Pe} = \frac{q}{D \cdot h} \quad (42)$$

где N_{Pe} – число Пекле, доли ед.;

q – темп закачки кислотного состава, м³/с.;

D – коэффициент диффузии, м²/с.

Для определения эффективности проведения соляно-кислотной обработки рассчитаем изменение скин-фактора после ее проведения, по формуле:

$$\Delta S = \frac{-1}{d} \ln\left(1 + A_c \cdot N_{Pe}^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{b \cdot V_{\text{кисл}}}{\pi \cdot h \cdot m \cdot r_w^d}\right) \quad (43)$$

где ΔS – изменение скин-фактора после проведения СКО, доли ед.;

Произведем расчет дебита после проведения СКО по формуле:

$$Q_{\text{СКО}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h \cdot (P_c - P_{wf})}{\mu \cdot B \cdot \ln\left(\frac{R_c}{r_w} + S + \Delta S\right)} \quad (44)$$

Продолжительность технологического эффекта после обработки рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{Q_{\text{после}}}{Q}\right)}{-\alpha} \quad (45)$$

где t – продолжительность технологического эффекта, сут;

Q – величина дебита по ГДИС, м³/сут.

Дополнительный объём нефти, полученный за счет проведения СКО, рассчитывается по формуле:

$$\Delta V_n = (Q_{\text{СКО}} - Q) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot (1 - e^{-at}) \quad (46)$$

где ΔV_n – дополнительный объём нефти, м³;

$Q_{\text{СКО}}$ – прирост дебита после проведения СКО, м³/сут;

a – постоянная, характеризующая скорость падения дебита.

Полученные результаты расчетов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчетов соляно-кислотной обработки

Показатели	Значения	Единицы измерения
Объем раствора соляной кислоты	9,6	м ³
Объем товарной кислоты	5,58	м ³
Количество хлористого бария	43,5	кг
Объем уксусной кислоты	0,36	м ³
Объем ингибитора коррозии	0,02	м ³
Объем интенсификатора	0,03	м ³
Объем хлористого бария	0,011	м ³
Объем воды	3,6	м ³
Объем выкидной линии	0,05	м ³
Объем НКТ	9,71	м ³
Объем продавочной жидкости	9,76	м ³
Время обработки	1	часы
Скин-фактор до обработки	4,9	
Молярная концентрация коллектора	19,66	Моль/л
Молярная концентрация доломита	13,58	Моль/л
Молярная концентрация известняка	20	Моль/л
Стехиометрический коэффициент породы	2,1	Доли ед.
Молярная концентрацию соляной кислоты	4,7	Моль/л
Кислотное число	0,01	Доли ед.
Коэффициент фрактальной размерности	1,9	Доли ед.
Число Пекле	2635426	Доли ед.
Изменение скин-фактор после обработки	-4,34	
Дебит после обработки	163	м ³ /сут.
Время эффекта обработки	231	сутки
Объем доп. Нефти	27176,6	м ³

2.3 Интерпретация результатов соляно-кислотной обработки карбонатных коллекторов

Оценить результаты проведения СКО можно с помощью гидродинамических исследований скважин и трассерных исследований.

Так в гидродинамических исследования используют график КВД, с помощью которого можно оценить параметры удаленной зоны пласта, а также узнать, насколько изменился скин фактор после СКО, проницаемость, и параметры трещины, образованной в результате кислотной обработки.

Сначала перед проведением КВД скважину останавливают для спуска глубинного манометра, а после запускают на непродолжительный срок работы и снова останавливают скважину уже для замера кривой восстановления

давления [19]. На рисунке 9 представлена технологическая схема исследования скважины с регистрацией КВД.



Рисунок 9 – Технологическая схема исследований скважины с регистрацией КВД

Используя программное обеспечение Карра Saphir, проводится интерпретация КВД с построением диагностических графиков. Основная цель интерпретации заключается в правильном выборе модели скважины, чтобы фактические и модельные кривые максимально совпадали. На рисунке 10 представлен пример диагностического графика КВД по модели с трещиной бесконечной проводимости.

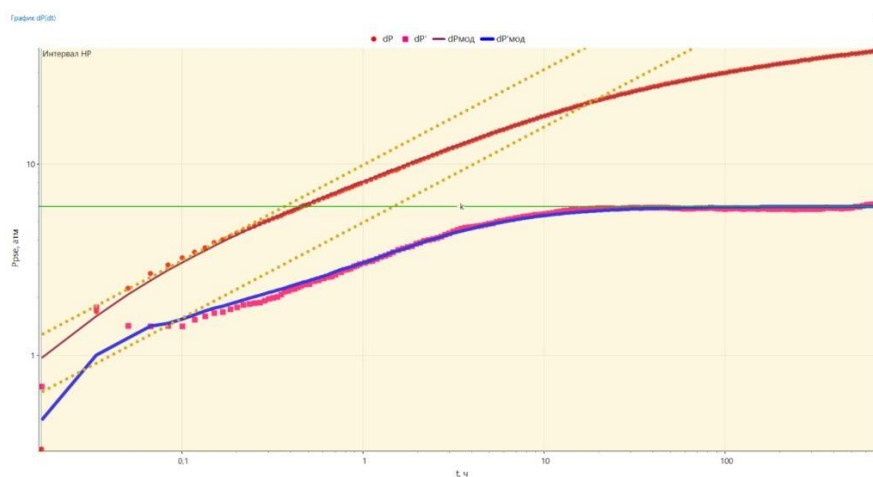


Рисунок 10 – Диагностический график КВД по модели трещины с бесконечной проводимости с дополнительным наложением линий с углами наклона $\frac{1}{2}$ (пунктирные светло коричневые линии) и $\frac{1}{4}$ (штрихпунктирные голубые линии)

По результатам интерпретации выгружается отчет, в котором отображается текущее пластовое давление, проницаемость пласта, параметры образованной трещины, скин фактор, радиус исследования.

Трассерные исследования применяют для определения гидродинамической связи по площади заводненных пластов, выявления высокопроницаемых каналов между нагнетательными и обводненными добывающими скважинами, оценки эффективности потокоотклоняющих технологий регулирования профиля приемистости нагнетательных скважин и охвата пласта вытеснением.

Сущность индикаторных исследований основывается на том, что на поверхности различными стабильными водорастворимыми индикаторами метятся порции воды, которые вводятся через нагнетательные скважины в исследуемый пласт и затем оттесняются к добывающим скважинам закачиваемой водой. Путем регулярного отбора и анализа проб жидкости в лабораторных условиях определяются наличие и количественное содержание индикаторов, а также обводненность продукции добывающих скважин.

Главным источником информации по трассерным исследованиям является график изменения концентрации трассера в наблюдаемой скважине от времени (рисунок 11).

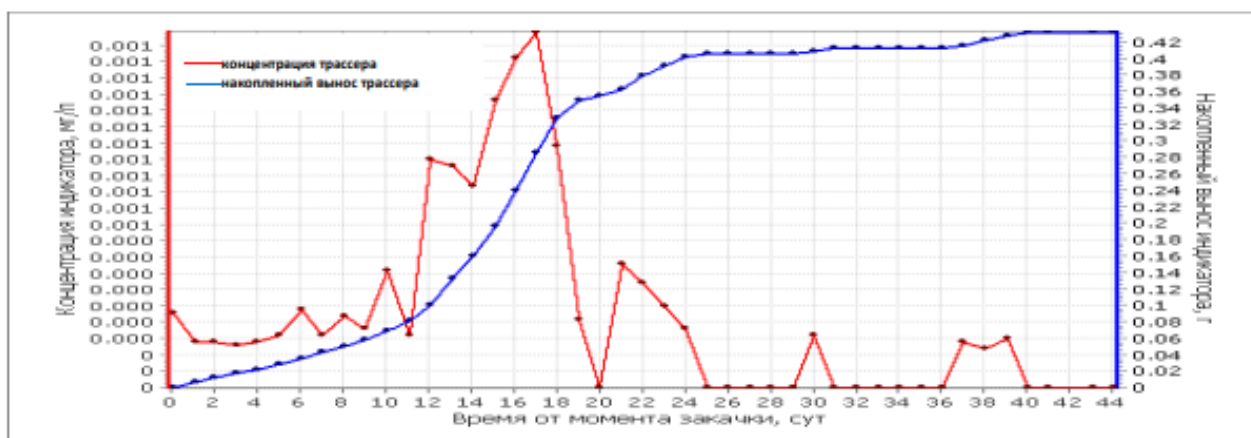


Рисунок 11 – График поступления трассера в контрольную скважину и накопленный вынос трассера

Анализируя результаты трассерных исследований, можно определить, насколько изменилось влияние нагнетательных скважин, неоднородность пласта и охват пласта заводнением, после проведения соляно-кислотной обработки.

2.4 Возможность использования дополнительных буферов в соляно-кислотной обработке

На основе проведенных исследований в Институте химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук создана кислотная нефтевытесняющая композиция пролонгированного действия на основе ПАВ, аддукта борной кислоты и глицерина (композиция ГБК), реализующая концепцию химически эволюционирующих систем. Композиция совместима с минерализованными пластовыми водами, имеет низкую температуру замерзания (минус 20 ÷ минус 60 °С), низкое межфазное натяжение на границе с нефтью (ниже 0.001 мН/м на границе с нефтью Усинского месторождения). Плотность композиции можно регулировать от 1100 до 1300 кг/м³, вязкость – от десятков до сотен мПа·с.

Композиция применима для повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти за счет увеличения проницаемости пород коллектора и продуктивности добывающих скважин в широком интервале температур – от 10 до 200 °С. Наиболее эффективна в карбонатных коллекторах. Композиция обладает замедленной реакцией с карбонатными породами. Высокая нефтевытесняющая способность, совместимость с минерализованными пластовыми водами, снижение набухаемости глин приводит к доотмыву остаточной нефти как из высокопроницаемых, так и из низко проницаемых зон пласта [20].

В результате взаимодействия кислотной композиции с карбонатным коллектором выделяется СО₂, который растворяется в нефти и снижает ее вязкость, что способствует увеличению степени извлечения нефти. Кроме того, при высоких температурах, больше 70 °С, в результате взаимодействия с

карбонатным коллектором и гидролиза карбамида, входящего в состав композиции, рН композиции повышается с 2,8-3,1 до 8,8-10,0, и она химически эволюционирует, превращаясь в щелочную нефтевытесняющую композицию, обеспечивающую эффективное нефтевытеснение и пролонгированное воздействие на пласт. После термостатирования с композицией и карбонатным коллектором при температуре выше 70 °С вязкость нефти снижается в 1,2-2,7 раза.

Композиция ГБК

Кислотная нефтевытесняющая композиция ГБК пролонгированного действия на основе ПАВ, аддукта борной кислоты и глицерина может применяться при обработке призабойных зон (ОПЗ) нагнетательных и добывающих скважин с использованием различных схем закачки: одной оторочкой, несколькими оторочками, чередующейся закачкой оторочек композиции ГБК разной концентрации. При чередующейся закачке оторочек композиции ГБК сначала закачивается оторочка композиции, разбавленная в 3-10 раз (оптимально в 5 раз), затем оторочка композиции ГБК, разбавленная в 2 раза, снова оторочка композиции, разбавленная в 3-10 раз и т.д. После закачки всего объема композиция ГБК продавливается в пласт из насосно-компрессорных труб (НКТ) буферным объемом воды (8-10 м³). Время воздействия композиции ГБК на призабойную зону скважины составляет от 12 часов до 1-3 суток, на этот период скважина должна быть закрыта.

На пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения проведены опытно-промышленные работы с применением кислотной композиции ГБК пролонгированного действия. Была произведена закачка композиции ГБК в 10 низкопродуктивных добывающих скважин. Объем закачки композиции находился в интервале 30-50 м³, объем концентрата композиции – 9-15 м³. После закачки кислотной композиции ГБК пролонгированного действия на основе ПАВ, аддукта неорганической кислоты и полиола наблюдается увеличение дебитов по нефти на 5,5-14,8 тонн/сут., увеличение дебитов по жидкости на 15-25 м³ /сут [20].

Композиция ГАЛКА®

Неорганические гелеобразующие композиции ГАЛКА® в поверхностных условиях являются маловязкими водными растворами, а в пластовых условиях превращаются в гели. Гелеобразование происходит под действием тепловой энергии пласта или закачиваемого теплоносителя, без сшивающих агентов. Для приготовления композиций используется вода любой минерализации. Применимы для неоднородных пластов с проницаемостью от 0.01 до 30 мкм². Время гелеобразования – от нескольких минут до нескольких суток в интервале температур 10-320 °С.

Метод основан на способности системы соль алюминия – карбамид – вода непосредственно в пласте генерировать неорганический гель и СО₂ за счет тепловой энергии пласта или закачиваемого теплоносителя. В методе реализован известный принцип возникающих реагентов (гомогенного осаждения). В пласт закачивается гомогенный водный раствор, содержащий гелеобразующую систему. За счет тепловой энергии пласта или закачиваемого теплоносителя карбамид постепенно гидролизует, образуя СО₂ и аммиак, рН раствора увеличивается, происходит гидролиз ионов алюминия, в результате через определенное время во всем объеме раствора практически мгновенно образуется гель.

В результате образования геля снижается проницаемость пласта для воды. Степень снижения проницаемости тем выше, чем больше исходная водонасыщенность и проницаемость породы пласта. Статическое напряжение сдвига геля находится в пределах 3-40 Па. Принцип внутрипластового гелеобразования использован для создания гелеобразующих систем ГАЛКА и ГАЛКА-ПАВ[21].

Гелеобразующие композиции ГАЛКА, представляющие собой маловязкие растворы с рН = 2,5 – 3, содержащие соль алюминия, карбамид и некоторые добавки, улучшающие их технологические параметры. Они способны растворять карбонатные минералы породы пласта, снижать набухаемость глин. В пласте за счет его тепловой энергии или энергии

закачиваемого теплоносителя карбамид гидролизуеться с образованием аммиака и CO_2 , что ведет к повышению рН раствора. При рН = 3,8 – 4,2 происходит мгновенное образование гидроксида алюминия во всем объеме раствора. Это проявляется в скачкообразном возрастании рН и динамического напряжения сдвига гелеобразующего раствора.

Время гелеобразования зависит от температуры и соотношения компонентов гелеобразующей системы. Растворы солей алюминия без карбамида гелей не образуют. При изменении температуры на каждые 10 °С время гелеобразования изменяется в 3,5 раза. Исследовано влияние геля гидроксида алюминия на фильтрацию пластовых флюидов, выполненных на линейных и насыпных моделях пласта из природных кернов месторождений Западной Сибири. В результате образования геля проницаемость породы для воды снижается в 2-70 раз.

Технологии с применением неорганических гелеобразующих композиций ГАЛКА-термогель эффективны для увеличения охвата пласта при закачке воды или пара в области температур 40-350 °С.

Различают композиции ГАЛКА-термогель:

- ГАЛКА-термогель-С для температур в пласте 70-320 °С,
- ГАЛКА-термогель-У – 40-70 °С,
- ГАЛКА-термогель-НТ – 20-40 °С.

Как показали проведенные исследования, раствор композиции ГАЛКА-термогель-С образует гель при 90 °С через 4 часа, при 80 °С – через 12 часов, при 70 °С и 60 °С – через 2 и 3 суток. Раствор композиции ГАЛКА-термогель-У при 60 °С образует гель уже через 3 часа, при 40 °С – через 18 часов.

Основными отличительными особенностями композиций ГАЛКА-термогель являются:

- возможность регулировать температуру гелеобразования, что позволяет применять их в широком интервале температур (20-320 °С), в том числе и при паротепловом воздействии на пласт;

- гомогенность и низкая вязкость закачиваемых водных растворов, что делает их пригодными для применения в низкопроницаемых коллекторах;
- твердая товарная форма, что дает возможность производить закачку композиций в скважину путем дозирования непосредственно в водовод, без предварительного растворения;
- низкие температуры застывания растворов, что делает технологию применимой в зимних условиях.

Композиция ГАЛКА была применена на 5 месторождениях ООО «РН-Юганскнефтегаз». Всего проведено 50 скважино-обработок, закачено 12 тыс. м³ рабочего раствора. Дополнительная добыча нефти составила 31,3 тыс.т.

Композиция НИНКА-3

Загущенная композиция НИНКА-3 является одновременно потокоотклоняющей и нефтевытесняющей композицией, применяется для увеличения и коэффициента нефтевытеснения, и коэффициента охвата залежей высоковязких нефтей, разрабатываемых паротепловым воздействием (Altunina et al., 2011, 2015; Алтунина и др., 2016). В пласте при тепловом воздействии карбамид гидролизуется, образуя CO₂ и NH₃, который с солью аммония дает щелочную аммиачную буферную систему, оптимальную для целей нефтевытеснения. Повышение pH вызывает гидролиз соли алюминия с образованием золя гидроксида алюминия, при этом вязкость композиции увеличивается на 1-2 порядка, что приводит к увеличению охвата пласта тепловым воздействием, подключению низкопроницаемых пропластков, снижению вязкости нефти и ее доотмыву. В результате происходит увеличение коэффициента охвата пласта, прирост КИН и интенсификация добычи нефти.

В 2014-2015 гг. проведены промысловые испытания технологии увеличения нефтеотдачи с применением загущенной композиции НИНКА-3 на опытном участке паротеплового воздействия пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения. В 2014 г. Произведена закачка 485 тонн композиции НИНКА-3 в 5 паронагнетательных скважин, расположенных на

одном участке. Суммарный эффект по участку, по разным методам оценки, составляет 60-80 тыс. тонн дополнительно добытой нефти.

2.4.1 Опыт применение добавок к основному кислотном раствору

Рецептуру приготовления раствора отработывают либо в промышленных лабораториях, либо в исследовательских институтах. К раствору HCl добавляют следующие реагенты:

1. Ингибиторы – вещества, снижающие коррозионное воздействие кислоты на оборудование, с помощью которого раствор HCl транспортируют, перекачивают и хранят.

Обычно ингибиторы добавляются в количестве до 1 % в зависимости от типа ингибитора и его исходной концентрации. В качестве ингибиторов используют:

- формалин (0,6%), снижающий коррозионную активность в 7 – 8 раз;
- уникол – липкую темно-коричневую жидкость (например, уникол ПБ-5) (0,25 – 0,5%), снижающую коррозионную активность в 30 – 42 раза. Однако поскольку уникод не растворяется в воде, то из нейтрализованной (отреагированной) кислоты он выпадает в осадок, поэтому его концентрацию уменьшают до 0,1 %, что снижает коррозионную активность только до 15 раз.

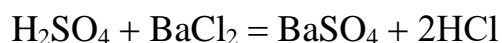
Для высоких температур и давлений разработан ингибитор – реагент И-1-А (0,4%) в смеси с уротропином (0,8%), снижающий коррозионную активность (при $t = 87$ °С и $P = 38$ МПа) до 20 раз.

Ингибитор катапин А считается одним из лучших. При дозировке 0,1 % от объема рабочего кислотного раствора он в 55 – 65 раз снижает коррозионную активность раствора, при 0,025% (0,25 кг на 1 м³ раствора) – в 45 раз. Однако его защитные свойства сильно ухудшаются при высоких температурах. Поэтому при $t = 80 – 100$ °С его дозировка увеличивается до 0,2 % с добавкой 0,2 % уротропина. Кроме того, катапин А является хорошим катионоактивным ПАВ.

2.Интенсификаторы – поверхностно-активные вещества (ПАВ), снижающие в 3 – 5 раз поверхностное натяжение па границе нефти – нейтрализованная кислота, ускоряющие и облегчающие очистку призабойной зоны от продуктов реакции и от отреагировавшей кислоты. Добавка ПАВ увеличивает эффективность кислотных обработок. Некоторые ингибиторы, такие как катапин А, катамин А, мервелан К (0), одновременно выполняют роль интенсификаторов, так как являются и активными ПАВами.

В качестве интенсификаторов используют также такие ПАВы, как ОП-10, ОП-7, 44 – 11, 44 – 22 и ряд других. Учитывая потерю ПАВ на поверхности породы в результате абсорбции в головной части нагнетаемого раствора HCl, концентрацию реагента увеличивают примерно в 2 – 3 раза.

3.Стабилизаторы – вещества, необходимые для удерживания в растворенном состоянии некоторых продуктов реакции примесей раствора HCl с железом, цементом и песчаниками, а также для удаления из раствора соляной кислоты вредной примеси серной кислоты и превращения ее в растворимую соль бария[22]:



В этом случае раствор HCl перед закачкой в скважину обрабатывают раствором хлористого бария (BaCl₂). Образующийся сернокислый барий (BaSO₄) легко удерживается в растворе и удаляется из пор пласта в жидком состоянии вместе с другими продуктами реакции.

Соляная кислота, взаимодействуя с глинами, образует соли алюминия, а с цементом и песчаником – гель кремниевой кислоты, выпадающие в осадок. Для устранения этого и используют стабилизаторы – уксусную (CH₃COOH) и плавиковую (HF) (фтористоводородную) кислоты, а также ряд других (лимонная, винная и др.).

Добавление плавиковой кислоты (HF) в количестве 1 – 2 % предупреждает образование геля кремниевой кислоты, закупоривающего поры коллектора, и способствует лучшему растворению цементной корки.

Уксусная кислота (CH_3COOH) удерживает в растворенном состоянии соли железа и алюминия и сильно замедляет реакцию раствора HCl с породой, что позволяет закачать концентрированный раствор HCl в более глубокие участки пласта.

Рабочий раствор кислоты готовят на центральных промышленных кислотных базах или редко у скважины. Существует строгая последовательность операции приготовления кислоты. Точный рецептурный состав компонентов и их количества определяют по соответствующим руководствам или расчетным таблицам в лабораториях.

Для приготовления рабочего раствора в расчетное количество воды вводят сначала ингибитор и стабилизатор, затем техническую соляную кислоту. После перемешивания добавляют хлористый барий, снова перемешивают до исчезновения хлопьев хлористого бария, что контролируется анализом проб. Затем добавляют интенсификатор, перемешивают снова и далее дают возможность раствору отстояться до полного осветления и осаждения сернокислого бария.

3 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛЯНО-КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ X

По вещественному составу карбонатные породы в основном состоят из известняков и доломитов. Карбонаты палеозойского времени имеют сложное строение, многочисленные интрузий и множества вторичных процессов, благодаря которым карбонатные породы обладают специфическими коллекторами, такими как порово-трещинный, трещинный, порово-кавернозно-трещинный тип с резкой вертикальной и латеральной дифференциации от непроницаемых разностей до коллекторов. Сами же трещины в карбонатных породах могут быть полностью или частично заполнены различными минеральными веществами или же оставаться полыми. Движение флюида в карбонатных коллекторах происходит в основном за счет трещин, в связи с чем коллектора в основном обладают слабой проницаемостью, которая в среднем равна 1,1 мД. Проанализировав месторождения Западной Сибири, можно сделать вывод, что главной особенностью нефти является ее высокопарафинистость, при этом по остальным критериям нефть можно охарактеризовать как, особо легкая, малосернистая, незначительно вязкая, малосмолистая.

Основными проблемами при разработки карбонатных коллекторов можно выделить быструю обводненность продукции, низкую проницаемость и неравномерную выработку запасов. Быстрая обводненность продукции происходит за счет анизотропии трещин, которая способствует к прорыву пластовых и нагнетаемых вод, а также конусообразное подтягивание подошвенной воды к призабойной зоне. Из-за слоистого строения продуктивных толщ карбонатных коллекторов, а также неоднородности по толщине, возникает неравномерная послойная выработка запасов в процессе разработки коллектора.

Однако в процессе разработки возникают ряд других осложняющих процессов. Из-за особенности физико-химического состава нефти, в процессе разработки происходит образования АСПО на стенках НКТ и в призабойной

зоне пласта, что создает сопротивление движению потока флюида. Еще одной проблемой при разработке является снижение проницаемости коллектора. Одной из причин является деформация коллектора, а именно смыкание естественных трещин при снижении забойных и пластовых давлений, в процессе разработки. В начальных пластовых условиях вследствие упругости пород продуктивного пласта и насыщающих его жидкостей трещины эти находятся в раскрытом состоянии и не препятствуют движению жидкости. Однако при вскрытии пласта или при добыче создаются высокие депрессии на призабойную зону, и происходит смыкание трещин пласта около ствола скважины. Другой причиной является загрязнение призабойной зоны. В призабойной зоне пласта наблюдаются наибольшие перепады давления. Вследствие влияния минерализации и высоких давлений, происходит процесс интенсивного выпадения и скопления солей в ПЗП. Когда отложения образуются в пласте, они закупоривают поры, уменьшая таким образом проницаемость. Отложения в пласте образуются в непосредственной близости от скважины, при этом уменьшается проницаемость призабойной зоны скважин.

С целью восстановления проницаемости и повышения нефтеотдачи в карбонатных коллекторах используют кислотную обработку. Наиболее эффективной и рентабельной является соляная кислота. Однако на процесс кислотной обработки влияет температура пласта и давление. Так при повышении температуры происходит рост скорости реакции кислоты с породой, что приводит к быстрой нейтрализации кислоты и затрудняет обработку удаленных зон пласта. Однако при увеличении давления происходит снижения скорости реакции, что помогает проникнуть кислоте глубже в пласт.

Исследуя зависимость выбора оптимальной концентрации соляной кислоты от вещественного состава коллектора, были произведены расчеты изменения скин-фактора, дебита после обработки, время действия эффекта от

обработки и дополнительно добыча нефти. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчетов

Концентрация кислоты	X, %	Y, %	ΔS	Q после СКО, м ³ /сут.	T, сутки	V _н , м ³
5	0	100	-3,85	161,14	225,18	25459,92
	5	95	-3,8	159,53	221,84	24434,56
	40	60	-3,76	159,1	220,94	24164,27
	60	40	-3,74	158,58	219,85	23839,42
	95	5	-3,73	158,24	219,13	23628,2
	100	0	-3,73	158,24	219,13	23628,2
11	0	100	-4,31	162,64	228,27	26434,19
	5	95	-4,29	162,35	227,68	26224,4
	40	60	-4,27	161,91	226,77	25957,76
	60	40	-4,27	161,87	226,69	25931,75
	95	5	-4,28	162,12	227,2	26094,36
	100	0	-4,3	162,58	228,15	26394,86
16	0	100	-4,36	164,02	231,09	27346,67
	5	95	-4,34	163,76	230,57	27176,61
	40	60	-4,32	163,51	230,05	27007,64
	60	40	-4,32	163,59	230,21	27060,68
	95	5	-4,34	163,76	230,56	27173,57
	100	0	-4,37	164,21	231,47	27473,51
20	0	100	-4,53	165,87	234,82	28594,22
	5	95	-4,51	165,21	233,49	28145,95
	40	60	-4,51	164,97	233,01	27983,82
	60	40	-4,52	165,33	233,74	28227,19
	95	5	-4,54	166,12	235,33	28764,94
	100	0	-4,57	166,75	236,59	29197,41

Анализируя зависимость изменения дебита после обработки от содержания известняков и доломитов в породе (Рисунок 12 и 13) можно сделать вывод, что для породы с большим содержанием доломитов низкие концентрации кислоты являются менее эффективными. Однако при использовании концентраций соляной кислоты более 11% в коллекторах с большим содержанием доломитов эффект от обработки немного выше, чем в известняковых.

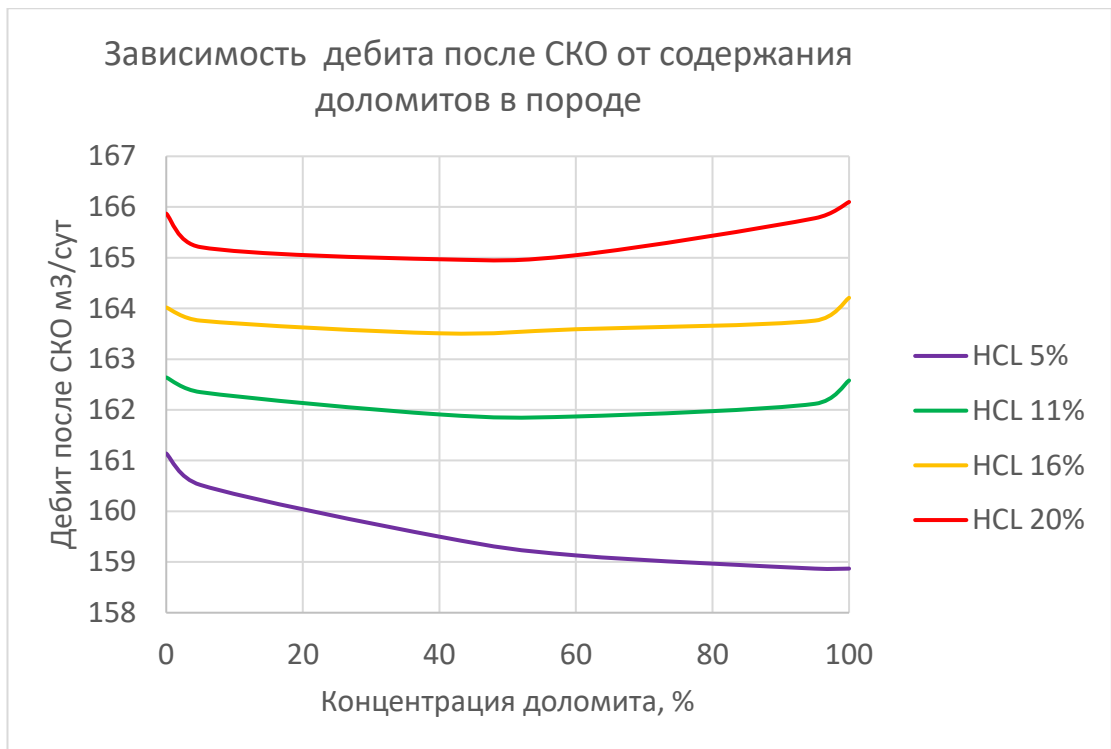


График 12 – Зависимость дебита после обработки от содержания доломитов в породе

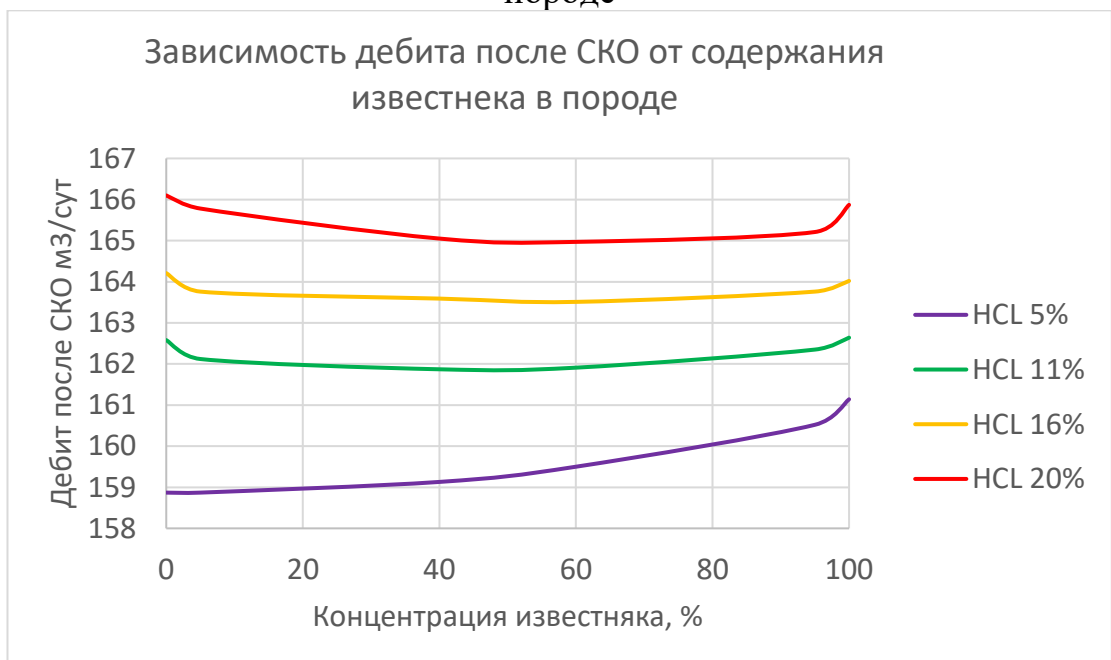


График 13 – Зависимость дебита после обработки от содержания известняков в породе

Анализируя графики (Рисунок 14 и 15) зависимости изменения скин-фактора от содержания в породе известняков и доломитов, можно сказать, что прослеживается также зависимость что и с дебитом. Однако при увеличении концентрации большого скачка в изменении скин-фактора не наблюдается и

оптимальной концентрации кислоты в такие случаи будет является 16% соляная кислота, в связи с меньшими затратами на кислоту, а также меньшей вязкостью раствора, что упростит его закачку в пласт.

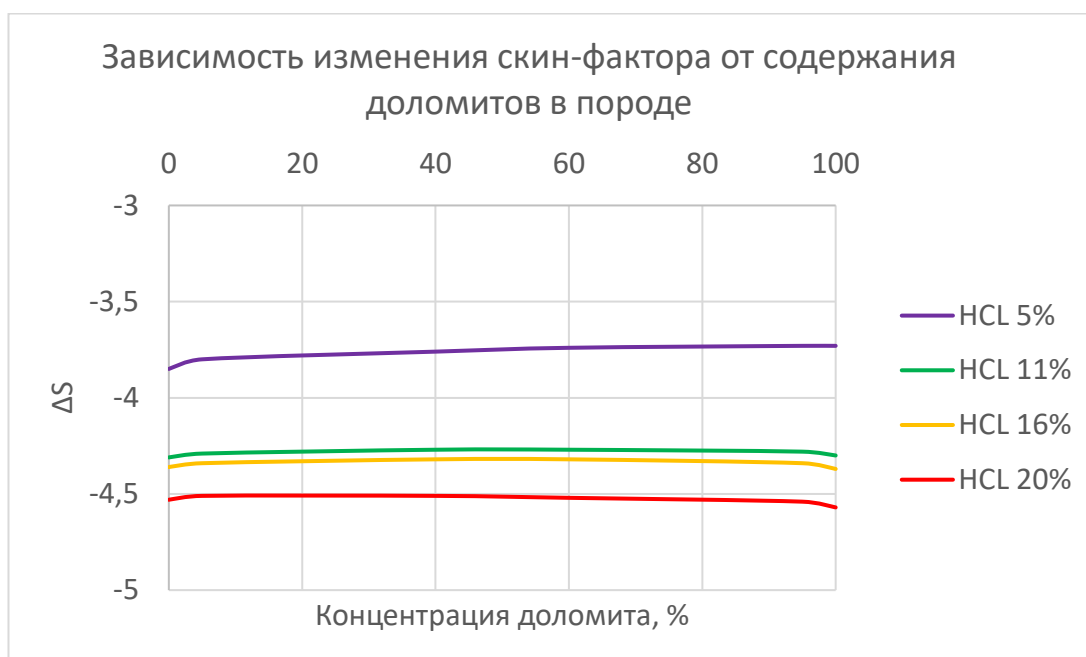


График 14 – Зависимость изменения скин-фактора от содержания доломитов в породе

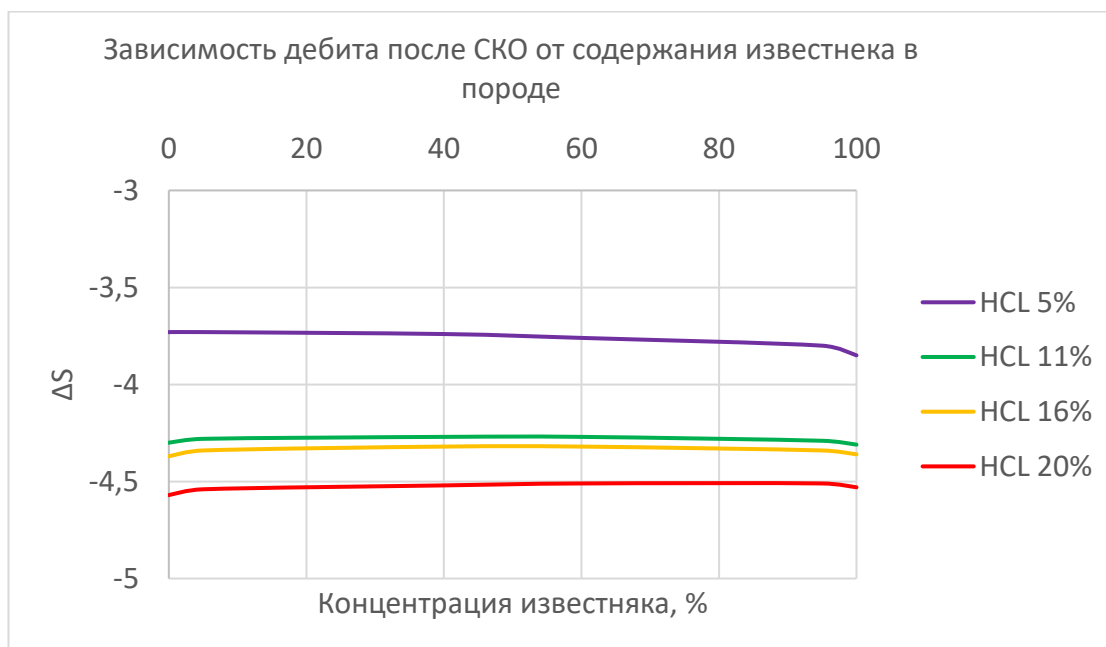


График 15 – Зависимость изменения скин-фактора от содержания известняков в породе

Из расчетов на месторождении X при закачивании 9,6 м³ кислотного раствора будет прирост дебита скважины с 82 м³/сутки до 163,76 м³/сутки, при

этом изменения скин-фактора после обработки равняется -5,46, а объем дополнительной добытой нефти составит 27177 м³. Однако в кислотном растворе помимо кислоты содержится ингибитор коррозии В-2 в размере 0,03 м³, для снижения коррозионного воздействия кислоты на оборудование. Также добавляется интенсификатор Марвелан в размере 0,05 м³ для снижения поверхностного натяжения на границе нефть-нейтрализованная кислота с целью облегчения очистки призабойной зоны от продуктов реакции, а также уксусная кислота, как стабилизатор, в размере 0,6 м³. Помимо обычной соляно-кислотной обработки, можно использовать различные буферы для увеличения нефтеотдачи. Так при высокой неоднородности пласта используют гелеобразующие композиции, с целью изолирования высокопроницаемые участки пласта и перенаправления кислоты в низкопроницаемые. Одним из перспективных является неорганическая гелеобразующая композиция ГАЛКА, которая в поверхностных условиях являются маловязкими водными растворами, а в пластовых условиях превращаются в гели. Гелеобразование происходит под действием тепловой энергии пласта или закачиваемого теплоносителя, без сшивающих агентов. Для приготовления композиций используется вода любой минерализации. Применимы для неоднородных пластов с проницаемостью от 0.01 до 30 мкм². Время гелеобразования – от нескольких минут до нескольких суток в интервале температур 10-320 °С.

После проведения кислотной обработки рекомендуется произвести гидродинамические исследования скважины, а также трассерные исследования с целью точного определения насколько изменился скин-фактор после СКО, а также изменения неоднородности пласта и охват пласта заводнением.

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Обучающемуся:

Группа	ФИО
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич

Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение школы	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Магистратура	Направление ОПОП	Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Тема ВКР:

Анализ технологической эффективности технологии кислотной обработки комплексными кислотными составами на месторождениях Западной Сибири	
Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оценка стоимости материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих ресурсов на проведение кислотных обработок на нефтяном месторождении «Х»
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Приказ Минприроды России №639 от 20.09.2019 «Об утверждении Правил подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья» (ред. 6.10.2020)
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоговый кодекс РФ часть 1 ФЗ №146 от 31.07.1998 (ред от 19.12.2023 № 611-ФЗ) Налоговый кодекс РФ часть 2 ФЗ №117 от 5.08.2000 (ред от 25.12.2023 № 643-ФЗ)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Обоснование перспективности проведения обработок на нефтяном месторождении «Х»
<i>2. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Расчет доходов и затрат на проведение кислотных обработок
<i>3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка экономической эффективности проведения кислотных обработок с учетом применяемого оборудования и прогнозных объемов добычи нефти
Перечень графического материала:	
Таблицы 1. Макроэкономические показатели; 2. Капитальные вложения; 3. Эксплуатационные затраты, тыс. руб; 4. Расчет прибыли; 5. Экономическая эффективность соляно-кислотной обработки. Рисунки 1. График зависимости ЧДД от параметров анализа чувствительности.	

Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком	15.01.2024
---	------------

Задание выдал консультант по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Шарф И. В.	д.э.н., доцент		15.01.2024

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич		15.01.2024

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В данном разделе диссертации проводится оценка технико-экономической эффективности от проведения соляно-кислотной обработки призабойной зоны пласта на примере одной скважины. Расчет произведен в среде MS Excel. Мероприятия позволяют увеличить нефтеотдачу пласта, за счет вовлечения остаточной нефти.

Оценка технико-экономической эффективности основана на расчете затрат на обработку и оценке технологического эффекта от применения технологии, в качестве которого выступают дополнительная добыча нефти. Дополнительная добыча нефти после проведения обработки составит 5961 тонну.

Цена нефти Urals в рассматриваемый период взята согласно данным Министерства экономического развития Российской Федерации [23] и составила 70,1 долл./барр. В 2023 году и 67,5 долл./барр. В 2024 году.

Среднегодовой валютный курс для доллара по данным Центрального банка [24] в России составит 68,3 руб. в 2023 году и 70,9 руб. в 2024 году.

Для перехода от тонн нефти «Urals» к баррелям используем коэффициент $7,28 - 1 \text{ тонна нефти Urals} = 7,28 \text{ баррелей}$.

Отразим основные макроэкономические показатели необходимые для дальнейшего расчета в таблице 9.

Таблица 9 – Макроэкономические показатели

Год	2024	2025
Цена нефти Urals, долл/барр	71,67	70,1
Обменный курс рубля	89,5	91,1
Цена на нефть в долл./тонн	521,16	509,74
Дополнительная добыча нефти, т	4418	1543
Выручка, млн. руб	206,1	71,7

Учитывая стоимость соляно-кислотной обработки и материалы, то капитальные затраты на проведение обработки одной скважины будут

составлять 1,69 млн рублей. Однако нужно учитывать и другие затраты. Основные капитальные вложения представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Капитальные вложения

Показатели	2023
Стоимость оборудования, млн. руб.	1,69
Прочие капитальные вложения, млн. руб.	0,25
Всего капитальных вложений, млн. руб.	1,94

Проведем оценку эксплуатационных затрат на проведение кислотной обработки. Согласно производственным данным, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования 733,94 руб./т.

Произведем расчет налоговых затрат на добычу полезных ископаемых, а также страховых взносов, налогов на имущество организации и прочие. Результаты расчета эксплуатационных затрат при применении соляно-кислотной отображены в таблице 11.

Таблица 11 – Эксплуатационные затраты, тыс. руб.

Показатели		2024	2025
Текущие затраты	Заработная плата	1185,52	1185,52
	Содержание и эксплуатация оборудования	3242,56	1132,48
	Общепроизводственные расходы	572,04	199,79
	Амортизация основных фондов	241,11	241,11
	Прочие	2556,64	892,92
Налоги, включаемые в себестоимость	НДПИ	65966,60	20837,73
	Страховые взносы	367,51	367,51
	Налог на имущество организации	31,82	26,51
	Прочие	2,31	0,81
Итого		74166,12	24884,37

Чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV) – это стоимость, полученная путем дисконтирования отдельно на каждый момент, временной период разности всех оттоков и притоков, доходов и расходов, накапливающихся за весь период функционирования объекта инвестирования при фиксированной, заранее определенной процентной ставке. NPV рассчитывается по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{(\Pi_t + A_t) - K_t}{(1 + r)^{t-tp}} \quad (47)$$

где NPV – дисконтированный поток денежной наличности;

Π_t – прибыль от реализации в t-м году;

A_t – амортизационный отчисления в t-м году;

K_t – капитальные вложения в разработку месторождения в t-м году;

t, tp – соответственно текущий и расчетный год;

r – ставка (норма) дисконта, принимаем равной 20%.

Если $NPV > 0$, то проект является прибыльным; если $NPV < 0$, то проект является убыточным; если $NPV = 0$, то проект является ни прибыльным, ни убыточным.

Результаты расчета прибыли и экономической эффективности представлены в таблице 12 и 13.

Таблица 12 – Расчет прибыли

Показатели	Ед. из.	2024	2025
Прирост добычи нефти	тыс. тонн	4,42	1,54
Выручка	млн руб.	206,1	71,7
Текущие затраты	млн руб.	74,17	24,88
Валовая прибыль	млн руб.	131,93	46,82
Налог на прибыль	млн руб.	26,39	9,36
Чистая прибыль	млн руб.	105,54	37,46

Таблица 13 – Экономическая эффективность соляно-кислотной обработки

Показатели	Ед. из.	Сумма	2024	2025
Денежный поток	млн руб.	139,6	103,84	35,76
Чистый дисконтированный доход	млн руб.	116,33	86,53	29,8
Срок окупаемости	месяцы	1		
Индекс доходности	доли ед.	59,96		

Анализ чувствительности проекта – это оценка влияния изменения исходных параметров рассматриваемого проекта на его конечные характеристики, в качестве которых, как правило, используется NPV (ЧДД).

В качестве исходных параметров (показателей) при проведении анализа были выбраны: дополнительная добыча нефти; цена на нефть марки «Urals»; капитальные затраты.

Результаты проведенного анализа чувствительности представлены на рисунке 16.

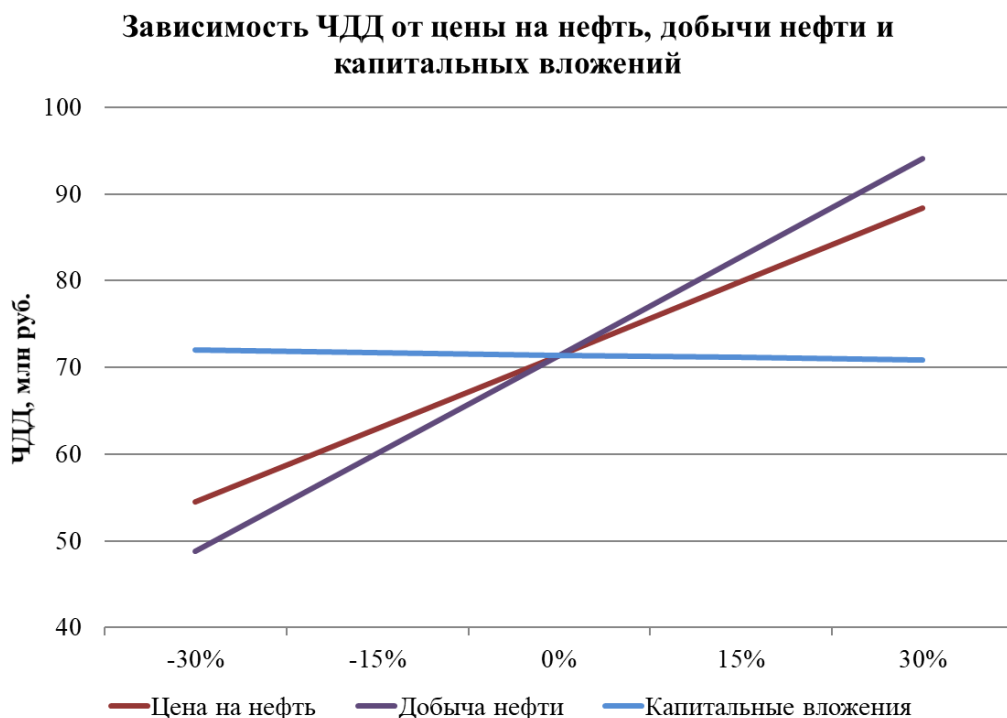


Рисунок 16 – График зависимости ЧДД от параметров анализа чувствительности

Согласно проведенному анализу, наибольшее влияние на ЧДД оказывает дополнительная добыча нефти и цена ее реализации.

Вывод: Расчеты экономической эффективности от проведения кислотной обработки на одной скважине показали рентабельность применения данной технологии: при ЧДД > 0, равным 116,33 млн. рублей, срок окупаемости составляет 1 месяц, а индекс доходности достаточно высокий и составляет 59,96.

Исходя из данных, полученных при анализе чувствительности проекта, можно заключить, что наибольшее влияние оказывает объем дополнительной добытой нефти и цена на нефть.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
О-2БМ11		Ишмурзин Герман Валерьевич	
Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение школы	21.04.01 «Нефтегазовое дело»
Уровень образования	Магистратура	Направление/ОПОП	Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Тема ВКР:

Анализ технологической эффективности технологии кислотной обработки комплексными кислотными составами на месторождениях Западной Сибири	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> Месторождение X <i>Область применения:</i> обработка призабойной зоны пласта <i>Рабочая зона:</i> полевые условия <i>Климатическая зона:</i> местность, приравненная к районам Крайнего Севера <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> Добывающие и нагнетательные скважины, насосное оборудование, станции управления. <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> обслуживание и ремонт наземного и подземного оборудования, соблюдение норм технологического режима.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс – Ст. 297, Ст. 298, Ст. 299 Общие положения о работе вахтовым методом. Продолжительность вахты. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. От 05.04.2021) // Собрание законодательства РФ. – Глава 47, ст. 302. Гарантии и компенсации лицам, работающим вахтовым методом. ИПБОТ 137-2008: «Инструкция по промышленной безопасности и охране труда для оператора по химической обработке скважин». ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования»</p>
<p>2.Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего. 2) Повышенный уровень локальной, общей вибрации. 3) Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристиками шума. 4) Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током.

	<p>5) Опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания.</p> <p>6) Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование средств индивидуальной защиты органов дыхания и органов слуха, перчатки, одежда специальная для защиты рабочих от воздействия нефти и нефтепродуктов, заземление электроустановок, изоляция, ограждения, устройства автоматического контроля и сигнализации.</p> <p>Расчет: заземление.</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: загрязнение почв нефтью, нефтепродуктами, различными химическими веществами и сточными водами.</p> <p>Воздействие на литосферу: загрязнение почв нефтью, нефтепродуктами, различными химическими веществами и сточными водами.</p> <p>Воздействие на гидросферу: разлив и утечки нефти и нефтепродуктов, а также агентов, применяемых при бурении, глушении и освоении скважин; изменение характеристик фильтрационного внутриболотного и поверхностного стока</p> <p>Воздействие на атмосферу: выделение продуктов сгорания попутно добываемого газа, выделение углеводородов от технического оборудования, выделение продуктов сгорания топлива.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p>	<p>Возможные ЧС: паводковые наводнения, лесные и торфяные пожары, ураганы, метели и снежные заносы, прекращение подачи электроэнергии, пожар на объекте, нарушение герметичности аппаратов и трубопроводов, пропуск сальников насосов, арматуры.</p> <p>Наиболее типичная ЧС: взрыв и пожар</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	
	<p>15.01.2024</p>

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		15.01.2024

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич		15.01.2024

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Технологический процесс обработки скважин кислотными композициями осуществляется с использованием агрегатов и оборудования при воздействии высокими давлениями (от 10 до 30 МПа) различными веществами (соляная кислота, плавиковая кислота) и требует строгого соблюдения техники безопасности в соответствии с правилами и нормами КРС и ОПЗ скважин: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» утверждённые приказом от 12.03.2013 №101 Федеральной службы по экологическому, техническому и автономному надзору. При выполнении работ также необходимо руководствоваться: планом работ, технологической картой, технологическим регламентом на проведение кислотной обработки. В плане должны быть указаны порядок подготовительных работ, схема размещения оборудования, технология проведения процесса, меры безопасности, ответственный руководитель работ.

Работы по ОПЗ кислотами ведутся круглогодично. Климат района: резко континентальный; снежный покров устанавливается во второй половине октября и держится до середины апреля, а в лесных массивах до начала июня.

Все химические реагенты, которые используются при проведении геолого-технического мероприятия, входят в «Перечень химических продуктов, разрешённых к применению в технологических процессах нефтедобычи».

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Большинство месторождений Западной Сибири значительно удалены от населенных пунктов, соответственно, у работников преобладает вахтовый метод работы. Данный вид работ регулируется Трудовым Кодексом Российской Федерации – Глава 47, в частности ст. 297 «Общие положения о работе вахтовым методом». Особенности регулирования труда лиц,

работающих вахтовым методом [25]. Вахтовый метод – особая форма осуществления трудового процесса вне места постоянного проживания работников, когда не может быть обеспечено ежедневное их возвращение к месту постоянного проживания.

В статье 298 «Ограничения на работы вахтовым методом» указано, что к работам, выполняемым вахтовым методом, не могут привлекаться работники в возрасте до восемнадцати лет, беременные женщины и женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, а также лица, имеющие противопоказания к выполнению работ вахтовым методом в соответствии с медицинским заключением, выданным в порядке, установленном федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации.

Статья 299 «Продолжительность вахты» главы 47 ТК РФ определяет, что вахтой считается общий период, включающий время выполнения работ на объекте и время междусменного отдыха. Продолжительность вахты не должна превышать одного месяца. В редких случаях продолжительность может быть увеличена до трех месяцев. Рабочее время и время отдыха в пределах учетного периода регламентируются графиком работы на вахте, который утверждается работодателем.

В статье 302 «Гарантии и компенсации лицам, работающим вахтовым методом» вышеупомянутого нормативного документа отмечено, что лицам, выполняющим работы вахтовым методом, за каждый календарный день пребывания в местах производства работ в период вахты, а также за фактические дни нахождения в пути от места нахождения работодателя (пункта сбора) до места выполнения работы и обратно выплачивается взамен суточных надбавка за вахтовый метод работы.

При подготовке и в процессе обработки призабойной зоны пласта в целях безопасности наиболее важно соблюдать ИПОТ 137-2008 «Инструкция по промышленной безопасности и охране труда для оператора по химической обработке скважин».

Немаловажно учитывать нормативный документ ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования», который непосредственно и описывает основные эргономические требования к рабочим местам при физической работе различных степеней тяжести. Конструкция, взаимное расположение элементов рабочего места (органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

5.2 Производственная безопасность

Сущность работ заключается в выполнении следующих технологических операций: обслуживание, монтаж и демонтаж оборудования, используемого при добыче нефти и газа; контроль за работой оборудования; осуществление работ по обработке призабойной зоны скважины; работа с химическими реагентами.

Все неблагоприятные производственные факторы по результирующему воздействию на организм работающего человека в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [26] подразделяют на вредные и опасные.

Факторы, влияющие на работника при проведении перфорации скважины представлены в таблице 14:

Таблица 14 – Возможные опасные и вредные факторы при выполнении работ на кустовых площадках

Факторы	Нормативные документы
1. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего.	ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – 3 с. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

2. Повышенный уровень локальной, общей вибрации.	ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования. Стандартиформ, 1990. – 20 с.
3. Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристиками шума.	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
4. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током.	ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов; ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
5. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания.	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
6. Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования.	ГОСТ 12.2.062-81 ССБТ. Оборудование производственное. Ограждения защитные.

5.2.1 Анализ вредных факторов и обоснование мероприятий по снижению воздействия

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего.

Работы по обработке призабойной зоны скважины проходят на открытом воздухе. Отклонение показателей климата может привести к ухудшению общего самочувствия работающего и даже несчастному случаю.

Томская область относится к 4 и особому климатическому поясу согласно Приложению 14.1 Единых санитарно-эпидемиологических и

гигиенических требований к продукции (товарам) подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) и ГОСТ 12.4.26-2011.

Работающие на открытой территории в холодный период года должны быть обеспечены комплектом СИЗ от холода, имеющим теплоизоляцию в соответствии с:

- постановлением Минтруда России от 31 декабря 1997 г. № 70;
- приказом Минздравсоцразвития России от 22 июня 2009 г. № 357н;
- приказом Минздравсоцразвития России от 1 сентября 2010 г. № 777н;
- приказом Минздравсоцразвития России от 14 декабря 2010 г. № 1104;
- приказом Минтруда России от 9 декабря 2014 г. № 997н;
- приказом Минтруда России от 1 ноября 2013 г. № 652н;
- приказом Минздравсоцразвития России от 25 апреля 2011 г. № 340н.

СИЗ должны предотвращать или уменьшать риск действия производственных факторов. Они выбираются согласно климатическому поясу. В особом климатическом поясе дополнительно к теплой специальной одежде выдаются: полушубок на 4 года, шапка-ушанка на 3 года, меховые рукавицы на 2 года.

Работникам, занятым зимой на наружных работах в II, III, IV и Особом поясах, дополнительно необходимо выдать электрообогревающие комплекты к специальной одежде типа «Пингвин» со стационарным источником питания со сроком носки 2 года.

Материал спецодежды должен обладать защитными свойствами, соответствующими условиям трудовой деятельности, быть стойким к механическим воздействиям, атмосферным осадкам, воздействию света, различного рода загрязнителям, легко очищаться. Он должен быть способным

пропускать влагу из пододежного пространства в окружающую среду и иметь воздухопроницаемость, адекватную скорости ветра. Для защиты головы от теплового облучения применяют алюминиевые и фибровые каски. Для защиты глаз от попадания песка используются очки. Защитой от пониженной температуры служит теплая спецодежда, работа в дождь запрещена технологическими инструкциями. Основные сроки выдачи СИЗ по климатическим поясам утверждены постановлением Минтруда России от 31 декабря 1997 г. № 70 (таблица 15).

Таблица 15 – Виды СИЗ в зависимости от климатического пояса

Наименование теплой специальной одежды и теплой специальной обуви	Климатические пояса				
	I	II	III	IV	Особый
Куртка на утепляющей прокладке	3	2,5	2	1,5	1,5
Брюки на утепляющей прокладке	3	2,5	2	1,5	1,5
Куртка лавсано-вискозная на утепляющей прокладке	3	2,5	-	-	-
Брюки лавсано-вискозные на утепляющей прокладке	3	2,5	-	-	-
Валенки	4	3	2,5	2	2

Нормирование параметров на открытых площадках не производится, но определяются конкретные мероприятия по снижению неблагоприятного воздействия их на организм рабочего.

В соответствии с конкретными величинами температуры воздуха и скорости ветра может быть определен риск обморожения открытых областей тела человека, определяющий степень безопасности работ в охлаждающей среде с учетом времени холодового воздействия в соответствии с МР 2.2.7.2129-06. 2.2.7 [27] (таблица 16).

Таблица 17 – Зависимость риска обморожения от интегрального показателя условий охлаждения (ИПУОО, балл)

ИПУОО, балл	Риск обморожения	Продолжительность безопасного пребывания на холоде, не более мин
≤ 34	игнорируемый (отсутствие обморожения)	длительнее
$34 < \text{ИПУОО} \leq 47$	умеренный	60
$47 < \text{ИПУОО} \leq 57$	критический	1
> 57	катастрофический	0,5

Интегральный показатель условий охлаждения (обморожения) – ИПУОО определим согласно уравнению:

$$\text{ИПУОО} = 34,654 - 0,4664 \cdot t_{\text{в}} + 0,6337 \cdot V \quad (1)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;

V – скорость ветра, м/с.

Таблица 18 – Погодные условия, при которых работы на открытом воздухе приостанавливаются

Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
Безветренная погода	-40
Менее 5,0	-35
5,1 – 10,0	-25
10,1 – 15,0	-15
15,1 – 20,0	-5
Более 20,0	0

Повышенный уровень локальной, общей вибрации.

Если говорить о вибрации, то ГОСТ 24346-80 [28], регламентирует данный показатель не более 92 дБ. Для борьбы с данными вредными факторами применяются комплексные целевые программы, включающие в себя снижение шума в самом источнике и на путях распространения, также ведется планировка производственных объектов и технологических установок, производится обеспечение работников средствами индивидуальной защиты, такими как антифоны (противошумы), наушники. Также необходимо проводить планирование времени работы и отдыха рабочих [29].

Для борьбы с вибрацией необходимо производить профилактический осмотр и ремонт технического оборудования, подтягивание ослабевших соединений, смазывание вращающихся деталей.

Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристиками шума.

Шум агрегатов (насосных и кислотных) негативно воздействует на органы слуха. Внезапные шумы высокой интенсивности, даже кратковременные (взрывы, удары и т.п.), могут вызвать как острые нейросенсорные эффекты (головокружение, звон в ушах, снижение слуха), так и физические повреждения (разрыв барабанной перепонки с кровотечением, поражения среднего уха и улитки). Шум не должен превышать определённых значений исходя из ГОСТ 12.01.003.83 [30] (таблица 19).

Таблица 19 – Предельно допустимые уровни звукового давления

Вид трудовой деятельности, рабочего места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц.									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБ)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Выполнение всех видов работ на постоянных рабочих местах на территории предприятия	107	95	87	82	78	75	73	71	89	80

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током.

При нахождении на кустовой площадке оператор (рабочий) может быть поражён током, при взаимодействии со станцией управления, кабелем, и другими элементами, проводящими ток. При замыкании электрической цепи через организм человека ток оказывает термическое (ожоги),

электролитическое (нарушение химического состава тканей и кожи), биологическое (судорожное сокращение мышц, в том числе сердца) и механическое воздействие (разрыв тканей, вывихи, переломы) [31].

Таблица 20 – Воздействие различных сил тока на организм человека

Сила тока, мА	Воздействие
20-25	Паралич рук, затруднение дыхания
50-80	Паралич дыхания
90-100	Фибриляция сердца
>300	Паралич сердца

Защитное заземление или зануление должно обеспечивать защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции [31].

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания.

На месте при проведении работ закачивают агрессивные химические реагенты (фтористой, соляной кислоты и т.д.), которые являются источниками и других вредных веществ. Оксид углерода СО (угарный газ) является опасным для воздуха на рабочих местах. Угарный газ СО образуется при неполном сгорании топлива и встречается в попутном газе, основа которого метан, который также токсичен. Плавиковая кислота содержит в себе фтор, который, при концентрации выше ПДК, вызывает отёк лёгких, острые отравления. Чем выше концентрация токсичных веществ в воздухе рабочего помещения, тем сильнее их воздействие на организм человека.

В воздухе рабочей зоны содержание вредных веществ не должно превышать установленных предельно-допустимых концентраций (ПДК) (таблица 21).

Таблица 21 – Допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны некоторых веществ [28]

Показатели	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
Углеводороды предельные С ₂ – С ₁₀	900	4
Метан	7000	4
Уксусная кислота	5	3

Плави́ковая кислота, БФФА	0,5	2
Соляная кислота	5	2
Оксид углерода	20	4

Персонал, работающий с кислотами, должен быть обеспечен защитными очками, спецодеждой и рукавицами из суконной или другой кислотоупорной ткани, резиновыми сапогами и фартуками в соответствии с ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ [28].

Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования.

При проведении работ по обработке призабойной зоны пласта на нефтепромыслах используется автомобильный транспорт различного назначения, поэтому важно проводить мероприятия по устранению возможных механических травм, к числу которых относятся: проверка наличия защитных кожухов на движущихся и вращающихся частях машин и механизмов; плановая и внеплановая проверка пусковых и тормозных устройств; проверка состояния оборудования и своевременное устранение дефектов согласно ГОСТ 12.2.003-91 [33].

5.3 Экологическая безопасность

Обработка призабойной зоны скважины сопровождается большим количеством негативных воздействий на окружающую среду. С целью минимизации этого воздействия необходимо применять комплекс мероприятий по охране окружающей среды, направленный на защиту атмосферы, гидросферы и литосферы.

Литосфера

Негативное влияние на состояние литосферы оказывают нефть и химические реагенты, используемые на месторождении. Загрязнение почв может происходить по следующим причинам:

- утечка химических реагентов при транспортировке;
- разлив реагентов на дозаторных установках;

— утечка раствора реагентов или нефти при повреждении или коррозировании оборудования скважины.

Допустимая норма загрязнения почвы нефтепродуктами регулируется в соответствии с ГОСТ 17.4.3.06-2020 [34], где «допустимая» категория загрязнения от 1 до 2 ПДК (300-600 мг/кг).

В случае загрязнения почвы нефтью необходимо произвести сбор пролитой нефти, срезку почвенно-растительного слоя толщиной 0,2-0,4 м и перемещение его во временные отвалы до начала строительных работ, после завершения разработки месторождения проводится рекультивация земель. Также в целях защиты литосферы необходимо осуществлять постоянный контроль за герметичностью оборудования, производить подбор оптимальных химических реагентов.

Для предотвращения возникновения загрязнений необходимо проводить инструктажи для работников по вопросам соблюдения норм и правил экологической безопасности и ознакомление с требованиями санитарно-эпидемиологической службы.

Гидросфера

Разлив нефти, химических реагентов, применяемых при ОПЗ, или утилизация остатков реагентов негативно влияют на состав поверхностных и подземных вод. При разливе нефти на воде образуется пленка, которая препятствует воздушному обмену.

При нагнетании воды в пласт, её качество определяется ОСТ 39-225-88 [35].

Пути загрязнения природных вод:

– при некачественном цементировании скважины или ее негерметичности могут возникнуть перетоки по затрубному пространству нефти или химических реагентов с последующим попаданием в природные воды;

– из-за отсутствия гидроизоляции производственных площадок может произойти загрязнение грунтовых вод.

Мероприятия по защите гидросферы должны быть основаны на данных инженерно-геологических изысканий, фильтрационных расчетах и прогнозах миграции загрязняющих веществ в подземных водах с учетом особенностей загрязняющих веществ.

При возникновении аварийной ситуации в целях защиты подземных вод от загрязнения необходимо оградить место аварии, покрыть адсорбционным материалом рассыпанные или разлитые вещества, прекратить отбор подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения в зоне аварии, собрать, нейтрализовать или уничтожить разлитые, или рассыпанные вещества и ликвидировать последствия аварии и повреждения [36].

Атмосфера

Основным источником загрязнения атмосферы являются выбросы газа и вредных веществ, получаемые при аварийных ситуациях. Причины аварий заключаются в механических повреждениях оборудования, некачественном строительстве или ремонте оборудования, а также несоблюдении техники безопасности. Перечень предельных допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия загрязняющих веществ от существующих источников в атмосферном воздухе определяется Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 №2 [37].

Для защиты атмосферы от загрязнения проводят следующие мероприятия:

- защита от коррозии оборудования;
- разработанный план действий при аварийной ситуации;
- ликвидация аварий аварийными службами.

Чистоту атмосферы можно достичь путем сокращения выбросов газа и обезвреживанием вредных веществ, выбрасываемых с основным газом.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

На месторождении могут возникнуть различные чрезвычайные ситуации, которые можно разделить на ЧС природного характера: паводковые наводнения, лесные и торфяные пожары, ураганы, метели и снежные заносы, и ЧС техногенного характера: прекращение подачи электроэнергии, пожар на объекте, нарушение герметичности аппаратов и трубопроводов, пропуск сальников насосов, арматуры, что приводит к загазованности, утечки нефтепродуктов, возможности отравления продуктами горения, пожару, взрыву.

Наиболее вероятным ЧС природного и техногенного характера на нефтяных промыслах является возникновение пожаров, которые могут возникнуть в результате открытого огня, искры от электрооборудования, сильных перегревов, ударов и трений, а также различного рода разрядов электрического тока.

Чтобы не допустить пожароопасных ситуаций между отдельными промышленными объектами должны выдерживаться определенные дистанции: от устья скважины до насосных станций и резервуаров не менее 40 м, до газокompрессорной станции – 60 м, до общественных зданий – 500 м. Помимо этого, необходимо проводить повышение надежности технологического оборудования, своевременное обновление используемых материалов, агрегатов и установок и устраивать инструктажи по пожарной безопасности на предприятии.

Руководитель предприятия, сотрудники и обслуживающий персонал в случае возникновения пожара или его признаков (дыма, запаха горения или тления различных материалов и т. п.) обязаны немедленно сообщить о пожаре в пожарную охрану. Прибывшие к месту пожара сотрудники обязаны:

- продублировать сообщение о возникновении пожара в пожарную охрану;
- принять немедленные меры по организации эвакуации людей;

— проверить включение в работу (или привести в действие) автоматических систем противопожарной защиты (оповещения людей о пожаре, пожаротушения, противодымной защиты);

— прекратить все работы (если это допустимо по технологическому процессу производства), кроме работ, связанных с мероприятиями по ликвидации пожара;

— осуществить общее руководство по тушению пожара (с учетом специфических особенностей объекта) до прибытия подразделения пожарной охраны;

— обеспечить соблюдение требований безопасности работниками, принимающими участие в тушении пожара;

— организовать встречу подразделений пожарной охраны и оказать помощь в выборе кратчайшего пути для подъезда к очагу пожара.

После ликвидации пожара директор предприятия создает комиссию для определения объема восстановительно-ремонтных работ, возможности использования технологического оборудования, коммуникаций, а также оформления установленной документации и разрешения на пуск производства. В комиссию включается представитель пожарной охраны [38].

Во избежание взрывов и пожаров необходимо выполнение следующих требований:

— топливную емкость для двигателей внутреннего сгорания и смазочные материалы необходимо располагать не ближе 15 м от кустовой площадки;

— электрические машины, оборудование и приборы должны соответствовать требованиям «Правил изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»;

— запрещается пользоваться факелами, спичками, свечами на кустовой площадке;

— курение разрешается только в специально отведенных местах, оборудованных емкостью с водой и надписью: «Место для курения».

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые также были продемонстрированы в данном разделе. Категория помещений на кустовой площадке по электробезопасности согласно ПУЭ соответствует третьему классу – «особые помещения повышенной опасности» [39]. Согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал должен обладать I группой допуска по электробезопасности. Присвоение группы I по электробезопасности производится путем проведения инструктажа, который должен завершаться проверкой знаний в форме устного опроса и (при необходимости) проверкой приобретенных навыков безопасных способов работы или оказания первой помощи при поражении электрическим током [40]. Категория тяжести труда на кустовой площадке объекта добычи нефти и газа по СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" относится к категории 3.1 (работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся физическим напряжением) [41]. Кустовая площадка относится к классу опасности производственных объектов 3. Рассмотренный объект, оказывающий незначительное негативное воздействие на окружающую среду, относится к объектам IV, особой категории [42].

Заключение

Карбонатные коллектора в основном состоят из известняков и доломитов, в связи с чем наиболее эффективным и рентабельным средством для повышения нефтеотдачи является соляно-кислотная обработки призабойной зоны пласта. Карбонатные коллектора имеют достаточно сложное строение, многочисленные интрузий и множества вторичных процессов, благодаря которым карбонатные породы обладают специфическими коллекторами, такими как порово-трещинный, трещинный, порово-кавернозно-трещинный тип с резкой вертикальной и латеральной дифференциации от непроницаемых разностей до коллекторов.

Основными проблемами при разработки карбонатных коллекторов можно выделить быструю обводненность продукции, низкую проницаемость и неравномерную выработку запасов. Быстрая обводненность продукции происходит за счет анизотропии трещин, которая способствует к прорыву пластовых и нагнетаемых вод, а также конусообразное подтягивание подошвенной воды к призабойной зоне. Из-за слоистого строения продуктивных толщ карбонатных коллекторов, а также неоднородности по толщине, возникает неравномерная послойная выработка запасов в процессе разработки коллектора.

При выборе скважины-кандидата для обработки необходимо учитывать ряд критериев, во-первую очередь на дебиты скважины, для того чтобы оценить рентабельность обработки, а также на отсутствие повреждений скважинного оборудования. Значения скин-фактора должно быть в диапазоне от -1 до 5. Выбрав подходящую скважину кандидата и произведя расчет соляно-кислотной обработки по предложенной методике получилось, что при закачивании $9,6 \text{ м}^3$ кислотного раствора происходит прирост дебита скважины с $82 \text{ м}^3/\text{сутки}$ до $163,76 \text{ м}^3/\text{сутки}$, при этом изменения скин-фактора после обработки равняется -0,56, а объем дополнительной добытой нефти составит 27177 м^3 . Однако в кислотном растворе помимо кислоты содержится ингибитор коррозии В-2 в размере $0,03 \text{ м}^3$, для снижения коррозионного

воздействия кислоты на оборудование. Также добавляется интенсификатор Марвелан в размере 0,05 м³ для снижения поверхностного натяжения на границе нефть-нейтрализованная кислота с целью облегчения очистки призабойной зоны от продуктов реакции, а также уксусная кислота, как стабилизатор, в размере 0,6 м³.

Учитывая все затраты на проведение обработки и дополнительную добытую нефть, чистый дисконтированный доход составит 116,33 млн. рублей, и обработка окупится за 1 месяц. При этом экономическая рентабельность обработки в основном будет зависеть от цены на нефть и дополнительной добычи.

Эффективность обработки в основном заключается в правильно подобранной концентрации кислоты под условия пласта. Проведя анализ на примере выбранной скважины-кандидата, была выявлена зависимость, что при большем содержании в породе доломитов относительно известняков, эффективнее использовать более концентрированную соляную кислоту. Однако учитываю тот факт, что при увеличении концентрации кислоты увеличивается и вязкость раствора, и его стоимость, то в качестве оптимальной концентрации была выбрана 16% кислота.

Список используемых источников

1) Мониторинг разработки нефтяных и газовых месторождений: разведка и добыча: материалы 13-й Междунар. науч.-тех. конф. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 104 с.

2) Ввод в активную разработку слабопроницаемых карбонатных коллекторов верхнего девона на примере Купавного и Матросовского месторождений / В. Л. Шаймухаметова, И. А. Гаах, Л. М. Миронова [и др.] // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ТатНИПИнефть. – Набережные Челны: ЭкспозицияНефтьГаз, 2017. – С. 143-152.

3) Изучение нетрадиционных коллекторов в тектонически-ослабленных зонах на примере опыта геологического изучения и разработки Кузайкинского месторождения ОАО «Татойлгаз» / Р. С. Хисамов, Р. В. Давлетшин, И. Р. Канифов, Л. С. Камалов // Георесурсы. – 2013. – № 5(55). – С. 27-33. – EDN RENKOV.

4) Изучение и перспективы выработки запасов углеводородов из нетрадиционных коллекторов Бавлинского месторождения / Н. В. Музалевская, О. В. Разуваева, С. Ю. Ибатуллина, М. А. Лифантьева // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ТатНИПИнефть. – Набережные Челны: ЭкспозицияНефтьГаз, 2017. – С. 190-199.

5) Багринцева К.И. Карбонатные породы-коллекторы нефти и газа. М., Недра, 1977.

6) Ввод в активную разработку слабопроницаемых карбонатных коллекторов верхнего девона на примере Купавного и Матросовского месторождений / В. Л. Шаймухаметова, И. А. Гаах, Л. М. Миронова [и др.] // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ТатНИПИнефть. – Набережные Челны: ЭкспозицияНефтьГаз, 2017. – С. 143-152.

7) Методы исследования пород-коллекторов и флюидов: учеб. пособие / А. К. Битнер, Е. В. Прокатень. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 224 с.

8) Николаев В.Н. Отчет дополнение к технологической схеме разработки Юрубчено-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения/ В.Н. Николаев – Красноярск: РН-КрасноярскНИПИнефть, 2021. – 247 с.

9) Силин М.А., Магадова Л.А., Цыганков В.А., Мухин М.М., Давлетшина Л.Ф. «Кислотные обработки пластов и методики испытания кислотных составов» Учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина, 2011 – 142 с.

10) Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов / И.Т. Мищенко // В.Б. Овчаров. – М.: Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – С. 242-269.

11) В.Ф. Калинин Критерии выбора оптимальной технологии повышения продуктивности скважин физико–химическими методами в карбонатных коллекторах // Недра Поволжья и Прикаспия. 2022. №105.

12) Дорфман, М. Б. Влияние фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта на эффективность кислотной обработки / М. Б. Дорфман, А. А. Сентемов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 124–130.

13) В. Н. Глущенко, М. А. Силин. Нефтепромысловая химия: Изд. в 5-ти томах. - Т.4. Кислотная обработка скважин. - М.: Интерконтакт Наука, 2010. - 703 с.

14) Галкин, В. И. Исследование и анализ методов определения эффективности применения технологии пропантного гидроразрыва пласта / В. И. Галкин, А. Н. Колтырин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 50–58.

15) Зейгман, Ю. В. Применение нефтекислотных эмульсий при разработке месторождений с карбонатными коллекторами / Ю. В. Зейгман, А. А. Карпов // Нефтегазовое дело. – 2007. – Т. 5. – № 1. – С. 76–80.

16) Березовский, Д. А. Определение расчётных показателей процесса солянокислотной обработки в скважине № 23 Южно-Шапкинское месторождения / Д. А. Березовский, Г. В. Кусов // Булатовские чтения. – 2018.

– Т. 2-1. – С. 76-87. – EDN XWILIT.

17) Горщарук, А. П. Анализ проведения солянокислотной обработки скважин Восточно-Сотчемью-Талыйюского месторождения / А. П. Горщарук, О. В. Савенок // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 3. – С. 91-108. – EDN MYXGRT.

18) Кривошеков Сергей Николаевич, Козырев Никита Дмитриевич, Вяткин Кирилл Андреевич, Равелев Кирилл Алексеевич Комплексный подход к оценке эффективности проектируемой соляно-кислотной обработки с использованием результатов лабораторных исследований и гидродинамического моделирования // Известия ТПУ. 2021. №7.

19) Ресурсы и технологии групп: официальный сайт – Москва – URL: <http://res-tech.s7.test-site4all.ru/examples/interpretacziya-gidrodinamicheskikh-issledovaniy-na-neustanovivshih-sya-rezhimah-v-gazovoj-skvazhine-posle-provedeniya-bolsheobyomnoj-sko-v-karbonatnom-plaste/> (дата обращения: 27.05.2023). - Текст: электронный.

20) Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Кувшинов И.В. Увеличение нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей кислотными композициями на основе поверхностно-активных веществ, координирующих растворителей и комплексных соединений // Георесурсы. 2019. №4.

21) Алтунина Любовь Константиновна, Кувшинов Владимир Александрович, Кувшинов Иван Владимирович Увеличение нефтеотдачи месторождений с трудноизвлекаемыми запасами с применением физико-химических и комплексных технологий // Северный регион: наука, образование, культура. 2015. №2 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uvlichenie-nefteotdachi-mestorozhdeniy-s-trudnoizvlekaemymi-zapasami-s-primeneniem-fiziko-himicheskikh-i-kompleksnyh-tehnologiy> (дата обращения: 30.05.2023).

22) И.Д. Амелин, Р.С. Андриасов и др. Эксплуатация и технология разработки нефтяных и газовых месторождений. М. Недра, 1978-356 с.

23) Министерство экономического развития Российской Федерации: официальный сайт – Москва – URL: <https://www.economy.gov.ru/> (дата обращения: 29.01.2023). - Текст: электронный.

24) Центральный банк российской Федерации: официальный сайт – Москва – URL: <https://cbr.ru/> (дата обращения: 29.01.2023). - Текст: электронный.

25) Трудовой Кодекс – ТК РФ – Глава 47. Особенности регулирования труда лиц, работающих вахтовым методом.

26) ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

27) МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях.

28) ГОСТ 24346-80 Межгосударственный стандарт. Вибрация. Термины и определения.

29) ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация

30) ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

31) ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

32) ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

33) ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

34) ГОСТ 17.4.3.06-2020. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ.

35) ОСТ 39-225-88. Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству.

36) ГОСТ 17.1.3.06-82. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод.

37) Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 №2.

38) ППБО-85 Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности.

39) Правила использования электроустановок URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030216>.

40) Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок от 15 декабря 2020г. N 903н URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264184>.

41) СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".

42) Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) URL: <https://docs.cntd.ru/document/902249109>.

Приложение А

(справочное)

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL EFFICIENCY OF ACID TREATMENT TECHNOLOGY WITH COMPLEX ACID COMPOSITIONS ON THE DEPOSITS OF WEST SIBERIA

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
О-2БМ11	Ишмурзин Герман Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Максимова Юлия Анатольевна			

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШОН:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, ОИЯ	Надеина Луиза Васильевна	к.филол.н.		

Introduction

Every year the rate of hydrocarbon production decreases, and water cut increases. In this regard, the development of carbonate reservoirs becomes relevant in order to maintain production rates.

A feature of carbonate reservoirs is their complex structure, which has a low permeability, a high degree of heterogeneity, a complex structure of the pore space, as well as heterogeneity of reservoir filtration characteristics. So, due to the uneven distribution of permeability over the thickness and area, it leads to uneven development of reserves, leaving low-permeability areas unaffected. A porous-cavernous-fractured type of reservoir leads to a rapid fluid cut and, as a consequence, a decrease in oil recovery.

Basically, various types of acid treatment of wells are used as methods of oil stimulation in the development of carbonate reservoirs. These methods include hydrochloric acid, thermal acid, foam acid and other types of acid treatments of wells. Acid treatments lead to an increase in permeability, fracturing, which in turn accelerates the process of watering well production.

One such method is the use of combined two-stage polymer acid treatments. The purpose of which is the selective shutdown of water-saturated intervals at the first stage of treatment, and at the second stage the purpose is to use hydrochloric acid treatment of the oil-saturated pore rock to increase the permeability of the carbonate reservoir.

1 Geological features of carbonate reservoirs

The material composition of the rock

The main minerals that make up the carbonate rock are calcite and aragonite CaCO_3 , dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, and magnesite MgCO_3 . In addition to the main rock-forming minerals, carbonates contain rhodochrosite MnCO_3 , siderite FeCO_3 , smithsonite ZnCO_3 , and ankerite $\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Mn})(\text{CO}_3)_2$.

Calcite is the main (sometimes the only) mineral of carbonate sedimentary rocks, especially biogenic rocks, and, along with aragonite, it is included in the hard parts of corals and many other organisms.

Aragonite is an unstable modification of calcium carbonate. It differs from calcite in the appearance of crystals, lack of cleavage and somewhat increased hardness, and from radiant zeolites in reaction with hydrochloric acid.

Dolomite crystallizes, forming rhombohedral crystals, the faces of which are rhombus-shaped and parallel to the directions of its perfect cleavage. Dolomite powder boils in hydrochloric acid, the pieces dissolve very slowly in it, but they are soluble in hot acid.

The processes of carbonate formation according to the method of accumulation in the marine environment lead to the formation of three groups of carbonate rocks. A classification scheme is common that combines limestone, calcareous-dolomite rocks and dolomites. For all of them, the division into three main genetic groups is equally valid: chemogenic (or biochemogenic), organogenic, and detrital, with the fourth genetically complex group of transitional or mixed carbonate rocks identified [1].

The group of chemogenic (or biochemogenic) carbonate rocks includes rocks, the carbonate part of which is mainly (50% or more) represented by chemically or biochemically precipitated carbonate material. This group of rocks includes carbonate formations such as oolites, pisoliths, clots (<0,1 mm) and lumps (0,1-1,0 mm), carbonate muds.

An extensive group of organogenic carbonate rocks consists of rocks in which 50% or more of the carbonate part belongs to carbonate organogenic remains. Depending on whether the latter are represented by the remains of animal organisms (fauna) or flora (algae), organogenic carbonate rocks can be zoogenic, phytogenic, or mixed, phytozoogenic.

In the subgroup of zoogenic carbonate rocks, limestones composed of whole skeletal fragments are distinguished - biomorphic (solid shell) or their fragments - detrital (with fragments larger than 0.1 mm) and sludge (with fragments less than 0.1 mm), as well as mixed biomorphic detrital, biomorphic-sludge.

Further subdivision of zoogenic, phytogenic and phytozoogenic carbonate rocks is carried out in accordance with the group affiliation of organogenic remains.

The zoogenic carbonates include coprogenous limestones, which do not consist of the skeletal remains of the organisms themselves, but of the products of their vital activity.

Among the phytogenic (and phytozoogenic) carbonate rocks, there are proper algal (lithotamnium, codia and other limestones) and their specific varieties - stromatolitic, oncolitic, microphytolithic limestones, calcareous-water-dolomitic rocks and dolomites.

Clastic carbonate rocks include limestones, dolomites, and calcic-dolomite rocks that are 50% or more composed of carbonate rock fragments. Their cement is the granular carbonate material.

Among clastic carbonate rocks, one can distinguish between sedimentary, i.e., primary clastic carbonate rocks, and catagenetic, secondary clastic.

Secondary clastic carbonate rocks include various pseudoconglomerates and breccias that have arisen due to the destruction or crushing of already formed carbonate rocks during tectonic deformations or as a result of leaching processes.

Among the primary detrital carbonate rocks, one should distinguish between terrigenous proper (allochthonous, extraclasts), formed by carbonate fragments - products of destruction of the adjacent land, and intraformational (autochthonous, intraclasts). The latter arise directly at the place of their formation due to underwater erosion of already compacted carbonate sediments. Formed formations of clastic rocks are represented by conglomerates and breccias (>1,0 mm), gravelstones (1.0-10.0 mm), sandstones (1.0-0.1 mm) and siltstones (0,1-0,01 mm).

Transitional or mixed type rocks are rocks in which granular carbonate material is of secondary importance, acting as cement, and the predominant (> 50%) "cemented" material is genetically different. It may belong to chemogenic (biochemogenic) formed carbonate formations, organogenic remains, and fragments of carbonate rocks. In this case, their presence in significant, approximately equal quantities are mandatory. Accordingly, such rocks will be characterized as organogenic-detrital, lumpy-organogenic, and so on.

Carbonate sedimentary rocks – limestones and dolomites – are subdivided according to their material composition, method of formation, and structure. In the classifications of carbonate rocks according to their material composition, along with more or less pure differences, natural mixed carbonate rocks that exist in nature are displayed. Limestones (and dolomites), often containing impurities or significant proportions of clayey, sulfate, siliceous, less often clastic material, form mixed clayey-sulfate-siliceous and detrital-limestone (or dolomite) rocks and occupy an intermediate position between limestones and dolomites, with one side, and clay, sulfate, siliceous and terrigenous rocks - on the other.

For the division of one-, two- and three-component carbonate rocks according to their chemical composition, schemes have been proposed, which are often depicted in the form of triangular diagrams. In the diagrams, three components are given as the main ones: limestone, dolomite, and a residue insoluble in hydrochloric acid (clay, silt, sand). Most classification triangles give two series of transitional rocks between the three main components: series directed from pure limestone (or dolomite) towards clay, through marls, and series from limestone towards dolomite (or magnesite).

Fluid Filtration Mechanism in Carbonate Reservoirs

The formation of the carbonate rocks porosity occurs in four main stages (hypergenesis → sedimentogenesis → diagenesis → catagenesis) with further post-sedimentary transformations (compaction and cementation, recrystallization, dolomitization, calcitization and sulfatization, leaching, fracturing). Let us consider these stages and their consequences.

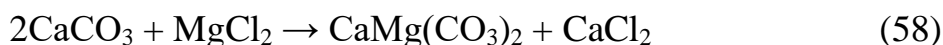
Sedimentogenesis is the process of sediment formation. The formation of the void space and its structure at this stage is greatly influenced by the hydrodynamics of the sedimentation medium. Weak hydrodynamics and sediment mobility lead to the sedimentation of fine-grained carbonate material (pelitomorphic, fine-grained limestones and silts), in which the pore size is equal to the size of carbonate particles ($\approx 10^{-3}$ mm).

According to N. M. Strakhov, diagenesis is all the processes that occur in sediment immediately after its formation until the moment of its complete lithification and transformation into rock. During diagenesis, sediment compaction and a decrease in the volume of the pore space occur as a reaction to a denser packing of grains with an increase in rock pressure. Sediment compaction is associated with the process of cementation, which occurs due to the supply of additional carbonate matter with meteoric and sea waters, which leads to a decrease in porosity and lithification of rocks.

During diagenesis two types of fracturing are formed: lithogenetic, leading to the formation of microcracks, and tectonic, accompanied by meso- and macrocracks. The next stage after diagenesis is catagenesis.

Catagenesis is the stage of chemical and mineralogical transformation of sedimentary rocks before their transformation into metamorphic rocks. Catagenesis is accompanied by recrystallization, calcitization and sulfatization of rocks, leaching and dolomitization, as well as fracturing. The cement content can reach 30% of the total rock volume and is half of the solid phase. Leaching at this stage is one of the main processes leading to the formation of vuggy porosity.

Dolomitization, or the replacement of calcium by magnesium, occurred as a result of exposure to magnesium-containing waters. The change in the structure of the pore space occurs according to the Haidinger (1) or Marignac (2) reaction:



The value of catagenetic porosity during dolomitization depends on the composition of magnesium-containing solutions. If dolomitization proceeds according to the Marignac reaction, then the resulting calcium chloride is carried out due to high solubility, porosity increases. If the Haidinger scheme is in effect, calcium sulfates are formed, partially filling the pores and reducing porosity.

According to N.P. Zapivalov, dolomitization is of the greatest importance for the filtration and capacitive properties change. He believes that, in essence, this is metasomatism, which occurs by replacing a calcium ion with a magnesium ion.

In metasomatic dolomites, pores 0,2–0,8 mm in size and vugs larger than 1,0 mm are often formed.

The final stage of catagenetic transformations is the process of crack formation.

Fracturing provides a connection between porous areas; in some cases, leaching voids and stylolite joints are formed along the cracks. Fractured voids are usually small.

The cracks observed in carbonate rocks can be completely or partially filled (“healed”) with various mineral substances (carbonate, quartz, sulfates, etc.), clay material, or black metamorphosed organic matter. All of them are called mineral. Along with them, cracks can be distinguished that remain hollow - open. The latter also include cracks filled with brown or yellow bitumen (oil).

The opening of mineral cracks varies over a very wide range: from fractions of a millimeter to 1 cm or more. Opening of open cracks, as a rule, does not exceed 20-25 microns, i.e. 0,02-0,025 mm (microcracks). According to the opening, cracks are divided into capillary (from 0,005 to 0,01 mm or 5-10 microns), subcapillary (from 0,01 to 0,05 mm or 10-50 microns), as well as hair (from 0,05 to 0,15 mm or 50 - 150 μm)

The vast majority of hydrocarbon deposits of the Paleozoic complex is confined to the contact zone of Paleozoic and Mesozoic rocks. The most important factors influencing the formation of such traps are the sharply dissected erosion-tectonic relief formed as a result of selective rock erosion and disjunctive tectonics, as well as the unconformity of the overlying rocks. As a rule, hydrothermally or catagenetically altered rocks and weathering crusts of rocks developed on erosion ledges served as reservoirs [2].

In the Late Paleozoic and Early Mesozoic, the territory under consideration was relatively elevated and was subjected to denudation processes with the formation of areal weathering crusts, the thickness of which, according to various researchers, reached from 5–20 m on the domes to 80–100 m on the slopes of the structures. The presence of numerous tectonic faults of different amplitudes and

orientations, as well as their repeated alternating activation, which occurred in the Permian-Triassic, Jurassic, Cretaceous and recent stages of geological development, determined the small-block nature of these ledges, contributed to the introduction of numerous intrusions and the manifestation of gas emanations, and initiated repeated processing of the original rocks by secondary processes. This contributed to the formation of specific reservoirs of porous-fractured, fractured, porous-cavernous-fractured types and their sharp vertical and lateral differentiation from impermeable differences to reservoirs.

The capacity of Riphean reservoirs is associated with leaching cavities (caverns) developed both along the surface of fractures and inside rock blocks. These cavities are linked into a single hydrodynamic system by a developed system of microcracks, which has a predominantly chaotic or horizontal orientation.

The flow rate equation, with steady liquid and gas filtration in the deformable fractured formation, can be represented as:

$$Q = \frac{2\pi k_{m0} h (p_k - p_c) \left[1 - \frac{3\beta}{2} (p_k - p_c) \right]}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} \quad (59)$$

where, Q – well flow rate; h – formation thickness; P_k - pressure on the well supply circuit; P_c - pressure at the bottom of the well; R_k is the radius of the well feed contour; r_c – well radius; $\beta = \beta_m l / \delta_0$ – complex parameter of the fractured medium; μ - viscosity; δ_0 – crack opening at pressure p_0 ; l is the average distance between cracks; $\beta_m = (1 - 2\sigma) / E$ – elastic constant; E - Young's modulus; σ is Poisson's ratio.

The complex parameter of the fractured medium depends on the elastic properties and geometry of the fractures. The average distance between the fractures shows how many fractures there are in the reservoir and, as a result, with a larger number of fractures, the filtration will be more intense and the flow rate will be higher. The elastic constant shows how resistant the rock is resistant to deformations, and the smaller this parameter, the less the rock affects the compression of the fracture and the decrease in filtration in the reservoir. The fracture openness

parameter at the initial pressure from the point of view of filtration shows the width of the fracture through which the fluid passes and the larger it is, the greater the permeability of the reservoir, and therefore the flow rate will be greater.

Complications in carbonate reservoirs during field development

Low porosity, fracturing, heterogeneity are important complications in the development of oil fields with a carbonate type of reservoir. So, in the natural mode of production, oil recovery reaches 12-15%, and when using stimulation methods, it does not exceed 25-29%.

In carbonate reservoirs, the phenomenon of fracture anisotropy is observed, which in turn leads to rapid water cut. When developing objects, one of the reasons for accelerated watering is highly permeable interlayers and fracture systems, through which formation and injected waters break through. The operation of individual wells and the reservoir as a whole can also be complicated by the presence of bottom water, which cone-shaped is pulled up to the bottomhole zone and enters the well, which leads to premature watering and, as a result, to a decrease in oil recovery. Carbonate reservoirs are characterized by a layered structure of productive strata, heterogeneity in thickness, therefore, during the development process, uneven layer-by-layer development of reserves occurs.

The decrease in reservoir permeability leads to complications in the development process. One of the reasons is the deformation of the reservoir, namely the closure of natural fractures with a decrease in bottomhole and reservoir pressures in the development process. Another reason is the contamination of the bottomhole zone. In the initial formation conditions, due to the elasticity of the rocks of the productive formation and the liquids saturating it, these cracks are in an open state and do not prevent the movement of the liquid. However, when the formation is opened or during production, high drawdowns are created in the bottomhole zone, and formation fractures close near the wellbore. With an increase in drawdown, the productivity index decreases. After the depression is reduced, the rock acquires its original state and the filtration characteristics are restored. Too high depressions can

also lead to irreversible changes in the rock skeleton. Such processes occur during plastic deformations of reservoirs, which occur when the effective rock pressure exceeds the yield strength of the rock. Thus, with an increase in drawdown, the impact on the rock increases and the removal of separated particles occurs more actively due to small destruction of the rock, which entails more intense clogging of the filtration channels, and then a decrease in the permeability of the bottomhole zone.

In the bottomhole formation zone, the largest pressure drops are observed. Due to the influence of mineralization, which is the cause of the formation of salts, and high pressures, there is a process of intense precipitation and accumulation of salts in the bottomhole formation zone (BFZ).

In the bottomhole formation zone, the largest pressure drops are observed. Due to the influence of mineralization and high pressures, there is a process of intense precipitation and accumulation of salts in the BFZ. Due to mineralization, the formation of small "embryos" (associates) occurs. With the achievement of the saturation limit for these conditions, on the surface of the equipment or in the volume of the liquid, many small particles almost instantly appear which act as the center of crystallization. The process of diffusion of the dissolved substance from the volume of the solution to the surface of associates is the cause of crystal growth. Their growth is significantly affected by the degree of supersaturation of solutions, the initial value of the "nucleus", the presence of impurities, the roughness of the surface of the equipment, etc.

The formation of CaCO_3 deposits occurs due to:

- a) the pressure drop at which CO_2 is released;
- b) a change in pressure or temperature, which leads to a deterioration in solubility. With increasing temperature, the solubility of calcium carbonate deteriorates and a precipitate forms;
- c) mixing two liquids that are chemically incompatible;
- d) increase in pH (hydrogen index) of formation and waste waters;

e) the use of surfactants, inhibitors and other chemical elements that promote the crystallization of calcite.

When deposits form in the reservoir, they plug the pores, thus reducing the permeability. Deposits in the reservoir are formed in the immediate vicinity of the well, while the permeability of the bottomhole zone of the wells decreases.

2 High-Temperature Conditions

The main problems with the use of hydrochloric acid:

1) Large volume of acid required: due to the high rate of chemical reaction of HCl with formations, acid is consumed rapidly, resulting in large volumes of acid being used in acid treatment. In high temperature formations, the risk increases as a 10°C increase in temperature doubles the rate of the chemical reaction.

2) Inefficient wormhole structure due to rapid reaction of the acid with the formation. The acid does not have time to penetrate deep into the medium and leads to more uniform dissolution. It is also problematic to reduce the injection rate at high temperatures to increase the contact time, since the process of bottomhole dissolution begins.

New acid formulations are needed to solve bottom hole dissolution problems. Figure 1 shows how the injection of HCl at the temperature of 394,26 K and an injection rate of $3,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ led to the formation of a conical channel and the dissolution of the bottom of the core [2]. Moreover, the pore volume to breakthrough (PVBT) of 4,25 was required, which is relatively high. Efficient acidizing requires higher optimum injection rates because the acid is consumed faster at higher temperatures. In high temperature environments, acid slows down the acid reaction, it requires lower pumping rates, which leads to dominant wormholes and reduces the rate of corrosion.

Organic Acids

One of the first proposed alternatives to HCl is the use of organic acids. Since they have a low dissolution rate compared to HCl. Such acids penetrate deep into the reservoir, because they do not linger in the rock. The most common organic acids

are acetic and formic acids. However, they can compete with a more effective acid - methanesulfonic acid (MSA).

Methanesulfonic Acid

Organic acid substitute methanesulfonic acid has a higher acidity than other organic acids, so it is a stronger organic acid. MSA also has the advantage of soluble reaction products, lower corrosiveness and low toxicity. But the cost of this acid is very high. Experimentally, it was possible to obtain a more economical acid system than the use of MSA alone. For this, acid mixtures were created in different ratios: HCl:MSA 2.5:7.5.5:5 and 7.5:2.5 wt.% HCl:MSA at injection rates of $3,3 \times 10^{-8}$ – 8.8×10^{-8} , 1.3×10^{-7} , and 1.7×10^{-7} m³/s at 394.26 K. The optimal acid mixture was 5:5 wt. injection rate $1,3 \times 10^{-7}$ m³/s, PVBT 1,33 required. The acidic mixture formed a single, straight and dominant wormhole (Fig. 1).

Acetic Acid

A study at 394,26 K shows a PVBT of 9,1 at an injection rate of $2,2 \times 10^{-8}$ m³/s using 15% acetic acid (HAc). Moreover, its wormhole structure shows a dominant wormhole but with some offshoots (see Figure 1). The high PVBT value from acetic acid is due to the low solvent power of this weak acid. Organic acids should be used at a careful concentration to avoid precipitation of calcium acetate and calcium formate. A problem with the use of organic acids is their low solvent power, which limits their ability to form wormholes and results in poor acid treatment.

Surfactant-Based Emulsified Acids

In order to slow down the diffusion of hydrochloric acid to the surface of the carbonate and to ensure a deeper penetration of the living acid, delayed action acid systems are added. One example of this is emulsified acids, which are an effective alternative to HCl because they result in better acid distribution due to their higher viscosity and slower reaction rate than HCl. Emulsified acids usually work by adding a surfactant to the acid solution (nonionic and cationic surfactants). Nonionic surfactants consist of a neutral charge at the hydrophilic end, while cationic surfactants have a positive charge instead. Cationic surfactants are most commonly

used, and nonionic surfactants are considered more promising because they do not cause incompatibilities with other additives.

Cationic Surfactant-Based Polymer-Assisted Emulsified Acid

Despite the good knowledge of the use of cationic surfactants, they have led to the formation of corrosion products (Fe^{+2}) due to incompatibility. However, studies by Zakaria & Nasr-El-Din, 2016 showed positive results when using a cationic surfactant in a polymer coated emulsified acid (PA EA) system. This system was achieved by combining gelled and emulsified acids into one by adding 1, 5% polymer in one acid phase. The resulting mixture should reduce the diffusion of acid droplets, thereby slowing down the rate of its reaction by increasing the viscosity of the acid. This acid system resulted in a stable acid with non-Newtonian shear thinning properties. As shown in Figure 1, at low injection rates of $8,3 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$, this acid system had a PVBT of 1,81, and at intermediate injection rates of $3,3 \times 10^{-8}$ and $8,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{With. s}$, it achieved smaller PVBTs of 0,34 and 0,38. Figure 1 also shows a dominant wormhole and some branching. However, the entry and exit of the core observed in Figure 1 show that there was only one dominant wormhole that achieved penetration at both entry and exit. To get rid of most of the polymer residue inside the formation and avoid plugging, a common solvent was used in the post-flush phase.

Non-Ionic Surfactant-Based Emulsified Acids

Nonylphenol has been proposed as a nonionic surfactant in emulsified acid (NP 100 EO). The addition of highly ethoxylated nonylphenol reduces the reaction rate of HCl, with the reaction time increasing from 10 s to 1027. This is due to the increase in viscosity when the nonionic surfactant is added, since the viscosity is highly dependent on the degree of ethoxylation. Figure 1 shows that NP 100 EO has less pore volume to break through at the same HCl injection rate due to its delayed response. In addition, NP 100 EO resulted in a dominant wormhole at low flow rates, while HCl at the same flow rate resulted in end and cone dissolution (see Figure 1). The disadvantage of the study is that it was carried out at a temperature of 298,15 K. Despite the low reaction rate of NP 100 EO and the formation of effective

wormholes at low injection rates, the obtained additional characteristics of the solution can be further studied in high temperature environments. Another non-ionic surfactant, emulsified acid (NIS-EA), also produced a stable emulsion up to 422,04 K. The carbonate core required a low PVBT of 0,19 at a low injection rate of $3,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$. This also resulted in a dominant wormhole (Figure 1).

Especialized Gelled Acid

Another type of slow acting acid is gelled acids. They are obtained by adding a polymer to an acid. According to the scientific literature, modifications of gel-like acids are necessary for effective stimulation. In situ gelled acids are one example that works by adding a crosslinker to the gelled acid. Without additives, thickened acids lead to the formation of a filter cake, which is detrimental to the increase in permeability. The use of thickened acids in situ results in the formation of a thin layer of gel which prevents the formation of a polymeric filter cake.

Biopolymeric Resin-Based Retarded HCl

In order to reduce the mobility of acid particles and, as a result, reduce their reaction rate with respect to the fluid, it was proposed to add a composite based on a biopolymer resin. During the experiment, the optimal injection rate of the composition at a temperature of 394,26 K was determined, which is $4,2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, and the resulting PVBT value was 0,41, as shown in Figure 1. As a result of using a low injection rate, it was possible to form a single dominant wormhole, and a decrease in the calcium concentration of wastewater samples indicates that the acid penetrated deeper into the formation.

Acid System	Acid Type	HCl %	T (K)	I.R. (m ³ /s)	PVBT	Core Inlet	Core Outlet	Wormhole
15% HCl	HCl	15	298.15	8.3×10^{-9}	3			
4% HCl		4	394.26	3.3×10^{-8}	4.25	N/A	N/A	
15% HAc	Organic	0	383.15	2.2×10^{-8}	9.1		N/A	
5% MSA		5	422.04	1.3×10^{-7}	1.33	N/A	N/A	
PA EA	Surfactant-based emulsified	36.8	383.15	3.3×10^{-8}	0.34			
NP 100 EO		N/A	298.15	8.3×10^{-9}	0.5			
NIS EA		15	422.04	3.3×10^{-8}	0.19			
BP Retarded HCl	Specialized gelled	N/A	394.26	4.2×10^{-8}	0.41	N/A	N/A	

Fig. 1 — Experimental characteristics and results from core flooding experiments from different acid systems at high temperatures.

When comparing the results from the high temperatures, NIS-EA is the acid system that had the lowest value of PVBT at a fairly low injection rate. These are good results because the temperature at which the experiment was performed was quite high (422,04 K). This acid system also had a dominant wormhole with almost no branches. The use of the MSA: HCl blend also had good results when compared to the 15% HAc acid system, as it required a lower PVBT. However, it was not the lowest PVBT in this section, and it had the highest optimal injection rate of all the acids discussed. The PA EA also had good results, but when compared to the wormhole of NIS-EA, it had more branches, as is also the case with 15% HAc. The BP Retarded HCl system also had good PVBT at an injection rate of $4,2 \times 10^{-8}$ m³/s

and at a high temperature of 394,26 K. NP 100 EO also had effective results, since at low injection rates it had better performance than that of HCl; however, it should be further tested at different temperatures.

3 Heterogenous Formations

As stimulation treatments have the purpose of raising the overall permeability of the formation, the heterogeneity of multiple layers is a concerning issue for matrix acidizing treatments in carbonate formations [3]. Hence, acid diversion is an indispensable and successful practice to stimulate carbonate reservoirs.

As mentioned above, the most expedient and effective is the use of materials as deflectors that are capable of changing their properties (primarily rheological) directly in the process of acid treatment and providing a certain controllability of acid stimulation on the formation. An example of such materials are specific surfactants, on the basis of which acid treatment technologies have been created using self-diverting acid systems. The viscoelastic self-diverting acid system is a polymer-free deflection system consisting of hydrochloric acid mixed with a viscoelastic surfactant gelling agent. The operation of such systems is based on the ability of surfactants to form a viscoelastic gel when an acid interacts with a carbonate rock. The resulting gel creates an effective local deviation of new portions of the acid composition to previously untreated areas of the formation.

Thus, the use of self-diverting acid compositions ensures uniform intensification of the entire productive interval of the oil reservoir during treatment and a low degree of contamination. Compared to conventional viscous diverter acid stimulation, acidizing with self-diverting acid formulations requires fewer stages and a smaller total injection volume, since the self-diverting acid formulation provides both acid stimulation and diversion. Self-diverting acid composition can be used both as an independent process fluid and in combination with other reagents.

The mechanism of action of the composition can be described as follows: during injection into the well, the process solution first penetrates into zones with high permeability. Acid forms wormholes (fistulas) in carbonate rocks.

During the contact of the acid with the rock, the acid is neutralized, calcium chloride is formed and the pH rises, the composition of the composition begins to turn into a gel and form a new viscous barrier. The gel-like composition temporarily fills (plugs) wormholes, cracks, directing the remainder of the composition into zones and layers with lower permeability.

The resulting viscoelastic gel in its structure, in the first approximation, resembles a polymer one. The main difference is expressed in the type of structure, in the case of a polymer gel - polymer molecules, and in a viscoelastic system - dynamically existing cylindrical micelles consisting of surfactants. When a certain overlap concentration is reached, these supramolecular structures form the so-called entanglement network, which ultimately leads to the formation of a viscoelastic gel.

The formation of worm-like micelles and their further growth is facilitated by a number of factors: the presence of organic and inorganic salts, the pH value, the presence of co-surfactants, etc. These factors contribute to the gradual formation of a viscoelastic gel.

On the basis of the studies carried out at the Institute of Chemical Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, an acid oil-displacing composition of prolonged action based on surfactants, an adduct of boric acid and glycerin (HBA composition) was created, which implements the concept of chemically evolving systems. The composition is compatible with mineralized formation waters, has a low freezing temperature (minus 20 ÷ minus 60 °C), low interfacial tension at the boundary with oil (below 0,001 mN/m at the boundary with oil from the Usinskoye field). The density of the composition can be adjusted from 1100 to 1300 kg/m³, viscosity - from tens to hundreds of mPa·s.

The composition is applicable to enhance oil recovery and intensify oil production by increasing the permeability of reservoir rocks and the productivity of production wells in a wide temperature range - from 10 to 200 °C most effective in carbonate reservoirs. The composition has a delayed reaction with carbonate rocks. High oil-displacing capacity, compatibility with saline formation waters, reduction

of clay swelling leads to additional washing out of residual oil from both high-permeability and low-permeability formation zones.

As a result of the interaction of the acid composition with the carbonate reservoir, CO₂ is released, which dissolves in oil and reduces its viscosity, which contributes to an increase in the degree of oil recovery. In addition, at high temperatures, more than 70 °C, as a result of interaction with the carbonate reservoir and hydrolysis of carbamide, which is part of the composition, the pH of the composition increases from 2,8-3,1 to 8,8-10,0, and it chemically evolves, turning into an alkaline oil-displacing composition that provides effective oil displacement and prolonged impact on the formation. After thermostating with the composition and carbonate reservoir at a temperature above 70 °C, the oil viscosity decreases by 1,2-2,7 times.

Composition of HBA

Acid oil-displacing composition of HBA of prolonged action based on surfactant, adduct of boric acid and glycerin can be used in the treatment of bottom-hole zones (BHZ) of injection and production wells using various injection schemes: one rim, several rims, alternating injection of rims of the HBA composition of different concentrations. With alternating injection of HBM composition rims, first the composition rim diluted 3-10 times (optimally 5 times) is pumped, then the HBM composition rim diluted 2 times, again the composition rim diluted 3-10 times, etc. After injection of the entire volume, the GBK composition is forced into the reservoir from the tubing with a buffer volume of water (8-10 m³). The exposure time of the HBA composition to the bottomhole zone of the well is from 12 hours to 1-3 days, for this period the well must be closed.

Composition GALKA®

Inorganic gel-forming compositions GALKA® under surface conditions are low-viscosity aqueous solutions, and under reservoir conditions they turn into gels. Gelation occurs under the action of the thermal energy of the formation or the injected coolant, without crosslinking agents. For preparation of compositions water of any mineralization is used. Applicable for heterogeneous reservoirs with

permeability from 0,01 to 30 μm^2 . Gelation time - from several minutes to several days in the temperature range of 10-320 °C.

The method is based on the ability of the aluminum salt - carbamide - water system to generate inorganic gel and CO₂ directly in the reservoir due to the thermal energy of the reservoir or the injected coolant. The method implements the well-known principle of emerging reagents (homogeneous precipitation). A homogeneous aqueous solution containing a gel-forming system is injected into the reservoir. Due to the thermal energy of the formation or the injected coolant, carbamide is gradually hydrolyzed, forming CO₂ and ammonia, the pH of the solution increases, hydrolysis of aluminum ions occurs, as a result, after a certain time, a gel forms almost instantly in the entire volume of the solution.

As a result of the formation of the gel, the permeability of the reservoir for water decreases. The degree of permeability reduction is the higher, the greater the initial water saturation and permeability of the reservoir rock. The static shear stress of the gel is in the range of 3-40 Pa. The principle of in-situ gelation was used to create the GALKA and GALKA-surfactant gel-forming systems.

GALKA gel-forming compositions, which are low-viscosity solutions with pH = 2,5 - 3, containing aluminum salt, urea and some additives that improve their technological parameters. They are able to dissolve carbonate minerals of the reservoir rocks, reduce the swelling of clays. In the reservoir, due to its thermal energy or the energy of the injected coolant, carbamide is hydrolyzed with the formation of ammonia and CO₂, which leads to an increase in the pH of the solution. At pH = 3,8 – 4,2 there is an instantaneous formation of aluminum hydroxide in the entire volume of the solution. This is manifested in an abrupt increase in pH and dynamic shear stress of the gel-forming solution [4].

The gelation time depends on the temperature and the ratio of the components of the gelling system. Solutions of aluminum salts without carbamide do not form gels. For every 10°C change in temperature, the gelation time changes by a factor of 3,5. The influence of aluminum hydroxide gel on the filtration of reservoir fluids, performed on linear and bulk models of the reservoir from natural cores of West

Siberia fields, has been studied. As a result of the formation of the gel, the permeability of the rock for water decreases by 2-70 times.

Technologies with the use of inorganic gel-forming compositions GALKA-thermogel are effective for increasing reservoir coverage during water or steam injection in the temperature range of 40-350 °C.

There are compositions of GALKA-thermogel:

- GALKA-thermogel-S for reservoir temperatures of 70-320 °C,
- GALKA-thermogel-U - 40-70 °C,
- GALKA-thermogel-NT - 20-40 °C.

As studies have shown, a solution of the GALKA-thermogel-S composition forms a gel at 90 °C after 4 hours, at 80 °C - after 12 hours, at 70 °C and 60 °C - after 2 and 3 days. A solution of the composition GALKA-thermogel-U at 60 °C forms a gel after 3 hours, at 40 °C - after 18 hours.

The main distinguishing features of the GALKA-thermogel compositions are:

- the ability to regulate the temperature of gelation, which allows them to be used in a wide temperature range (20-320 °C), including the steam-thermal effect on the formation;

- homogeneity and low viscosity of injected aqueous solutions, which makes them suitable for use in low-permeability reservoirs;

- solid commodity form, which makes it possible to inject the compositions into the well by dosing directly into the conduit, without prior dissolution;

- low pour points of solutions, which makes the technology applicable in winter conditions.

Composition NINKA-Z

The thickened NINKA-Z composition is both a flow-diverting and oil-displacing composition, it is used to increase both the oil displacement efficiency and the sweep efficiency of high-viscosity oil deposits developed by thermal steam treatment (Altunina et al., 2011, 2015; Altunina et al., 2016). In the reservoir, under thermal exposure, urea is hydrolyzed, forming CO₂ and NH₃, which, together with

an ammonium salt, gives an alkaline ammonia buffer system that is optimal for oil displacement purposes.

The pH increase causes hydrolysis of the aluminum salt with the formation of an aluminum hydroxide sol, while the viscosity of the composition increases by 1-2 orders of magnitude, which leads to an increase in the coverage of the formation by thermal action, the connection of low-permeability interlayers, a decrease in the viscosity of oil and its aftercare. As a result, there is an increase in the reservoir sweep factor, an increase in oil recovery factor and an intensification of oil production.

REFERENCES

1. Chacon OG, Pournik M. Matrix Acidizing in Carbonate Formations. *Processes*. 2022; 10(1):174.
2. Ortega, A. Acidizing High-Temperature Carbonate Formations Using Methanesulfonic Acid; Texas A&M University: College Station, TX, USA, 2015.
3. Correia, M.G.; Maschio, C.; Schiozer, D.J. Integration of multiscale carbonate reservoir heterogeneities in reservoir simulation. *J. Pet. Sci. Eng.* 2015, 131, 34–50.
4. Finšgar, M.; Jackson, J. Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corros. Sci.* 2014, 86, 17–41.