

На правах рукописи



НОВИКОВ ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОВЕДЕНИЯ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК
В КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ НЕФТЯНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕРМСКОГО КРАЯ**

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Мартюшев Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Давлетшина Люция Фаритовна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва

Фоломеев Алексей Евгеньевич, кандидат технических наук, заместитель руководителя службы нефтепромысловой химии и контроля качества углеводородного сырья ООО «Иркутская нефтяная компания», г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 19 сентября 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.15 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан 29 июня 2023 г.

Ученый секретарь,
кандидат технических наук, доцент

Мелехин А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В российской и зарубежной практике разработки месторождений, несмотря на непрерывное развитие производственных и цифровых технологий, наблюдается снижение уровней добычи нефти из переходящих скважин при ухудшении структуры остаточных запасов. На территории Пермского края запасы нефти терригенных коллекторов в значительной мере выработаны, около 60 % остаточных извлекаемых запасов приурочено к карбонатным отложениям. К основным причинам осложнений при извлечении нефти из карбонатных коллекторов можно отнести неравномерность распределения нефтенасыщенных толщин, неоднородность и низкую проницаемость пластов, особенности строения пустотного пространства горных пород. Для интенсификации добычи нефти в таких условиях чаще всего применяются различные химические и физические технологии, наиболее известной из которых является кислотная обработка.

Кислотная обработка – достаточно простой в исполнении и малозатратный способ увеличения темпов добычи углеводородов из карбонатных коллекторов. Несмотря на продолжительный период практического применения технологии, нефтедобывающие предприятия сталкиваются с ее недостаточной успешностью: ежегодно до 45 % операций по различным причинам не достигает плановых результатов. Успешность мероприятий с применением кислотных композиций зависит от формирования высокопроводящих каналов фильтрации (червоточин) в призабойной зоне, позволяющих существенно увеличить область дренирования скважин и тем самым вовлечь в разработку дополнительные участки пласта. На процесс образования червоточин оказывает влияние множество факторов, которые можно разделить на две группы – геологические и технологические. Принимая во внимание сложность регулирования геологических характеристик продуктивных пластов-коллекторов, актуальной задачей является обоснование технологических параметров проведения кислотных обработок в определенных геолого-физических условиях, решение которой позволит повысить эффективность мероприятий.

На территории Пермского края научный и практический интерес представляет повышение эффективности кислотного воздействия в башкирско-серпуховских карбонатных отложениях месторождений

Соликамской депрессии, характеризующихся значительными остаточными запасами нефти, широким диапазоном изменения фильтрационно-емкостных свойств и накопленным опытом реализации более 300 мероприятий при средней успешности на уровне 67 %.

Степень разработанности темы. Проблематика повышения эффективности кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений с различных позиций рассмотрена в многочисленных научных работах, в том числе в трудах Л. К. Алтуниной, Г. Т. Булгаковой, В. Н. Глушенко, И. А. Гуськовой, Л. Ф. Давлетшиной, Ю. В. Зеймана, Р. Р. Ибатуллина, Л. Н. Иконниковой, Р. Д. Каневской, Ю. А. Котенева, Л. Е. Ленченковой, Б. Г. Логинова, Л. А. Магадовой, Д. А. Мартюшева, М. Х. Мусабинова, В. В. Мухаметшина, В. Ш. Мухаметшина, М. К. Рогачева, М. А. Силина, Р. Н. Фахретдинова, А. Е. Фоломеева, Г. П. Хижняка, M. Buijse, G. Daccord, M. J. Economides, H. S. Fogler, C. N. Fredd, K. Furui, A. D. Hill, M. L. Hoefner, H. A. Nasr-El-Din, R. S. Schechter, H. Yoo и др. Однако вопросы проектирования кислотных обработок освещены в недостаточной степени, особенно в части обоснования технологических параметров проведения данных мероприятий. Значительная часть существующих исследований посвящена определению критических темпов нагнетания кислотных композиций на керновых образцах для образования червоточин определенной геометрии преимущественно без демонстрации влияния на успешность воздействия других технологических параметров (объем закачиваемого агента, продолжительность его взаимодействия с горной породой и др.), контроль которых ведется на нефтепромыслах. Другим в неполной мере освещенным вопросом является прогнозирование результата кислотных обработок: существующие модели зачастую имеют ограниченную область применения и сопровождаются сложными математическими расчетами ввиду присутствия в них параметров, определение которых на практике не всегда представляется возможным.

Целью работы является повышение эффективности планирования и реализации мероприятий с кислотным воздействием в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений за счет формирования новых подходов для обоснования технологических параметров проведения обработки и прогнозирования ее результата.

В соответствии с целью работы сформулированы следующие **основные задачи исследования:**

1. Обобщение опыта применения кислотных обработок на добывающих скважинах, эксплуатирующих карбонатные отложения нефтяных месторождений Пермского края.

2. Анализ влияния геолого-технологических параметров на эффективность кислотных обработок в карбонатных коллекторах.

3. Проведение экспериментальных исследований композиций на основе соляной кислоты для обоснования технологических параметров реализации операций в карбонатных пластах с различным вещественным составом горной породы.

4. Разработка способа обоснования технологических параметров проведения кислотных обработок на основе фактических геолого-промысловых данных.

5. Прогнозирование эффективности кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений с учетом накопленного опыта проведения мероприятий.

Объект исследования – карбонатные отложения нефтяных месторождений Пермского края.

Предмет исследования – технология проведения кислотных обработок.

Научная новизна и теоретическая значимость выполненной работы представлена следующими положениями:

1. Экспериментально обосновано, что содержание доломита более 1,3 % в карбонатных продуктивных пластах способствует снижению эффективности проведения обработок композициями на основе соляной кислоты.

2. Впервые разработан и апробирован способ обоснования технологических параметров проведения первичных и повторных кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений на основе фактических геолого-промысловых данных с применением ранговой матрицы, учитывающей изменения эксплуатационных характеристик скважин и свойств пласта.

3. Применение методов математической статистики позволило разработать адресные модели для прогнозирования прироста дебита скважины по нефти, дополнительной добычи и продолжительности эффекта после различных вариаций кислотных обработок, выделить

индивидуальное и комплексное влияние геолого-технологических параметров на результат мероприятий.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Обоснованы технологические параметры для проведения кислотных обработок с учетом вещественного состава горной породы, позволяющие повысить эффективность мероприятий в карбонатных отложениях месторождений Пермского края.

2. Разработан и апробирован способ определения необходимого объема кислотного состава и продолжительности его выдержки в продуктивном пласте на реакцию, основанный на совместном учете эксплуатационных характеристик скважин и материалов интерпретации их гидродинамических исследований.

3. Построенные модели позволяют оперативно прогнозировать прирост дебита скважины по нефти, дополнительную добычу и продолжительность эффекта после кислотных обработок, осуществлять выбор и ранжирование перспективных скважин-кандидатов, а также составлять программы развития активов на краткосрочный и долгосрочный периоды.

Предложенные решения позволяют повысить эффективность проведения кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений Пермского края, что подтверждено актом внедрения результатов исследования в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Методология и методы исследования. Методологическую и теоретическую основу работы составляют труды отечественных и зарубежных ученых в области разработки нефтяных месторождений, планирования и повышения эффективности методов нефтеотдачи и интенсификации добычи. В ходе исследования используются научный эксперимент и математические методы, корректность применения которых подтверждается полученными статистическими оценками.

Положения, выносимые на защиту:

1. Содержание доломита более 1,3 % в карбонатных продуктивных пластах способствует снижению эффективности проведения обработок композициями на основе соляной кислоты.

2. Исследование геолого-промысловых данных с построением ранговой матрицы позволяет выполнить обоснование технологических параметров проведения первичных и повторных кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений.

3. Многомерные модели позволяют с высокой степенью достоверности прогнозировать показатели эффективности различных вариаций кислотных обработок, изучать геолого-технологические условия, обусловившие результат мероприятий.

Степень достоверности результатов работы обусловлена корректным применением аналитических и статистических методов обработки значительного объема геолого-промысловых данных, согласованностью фактических наблюдений и прогнозных расчетов.

Апробация результатов исследований. Основное содержание работы представлялось на международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 2020 г.), всероссийском конкурсе на лучшую научно-техническую разработку среди молодежи предприятий и организаций топливно-энергетического комплекса «Новая идея» (г. Москва, 2020 г.), всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2021 г.), международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), ежегодных конкурсах ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» на лучшую научно-техническую разработку молодых ученых и специалистов (г. Пермь – г. Москва, 2020–2022 гг.).

Публикации. Результаты исследований отражены в 9 научных работах, из них 8 статей в научных изданиях, рекомендованных для публикации основных результатов диссертационных исследований ВАК РФ и/или включенных в международные базы цитирования (Scopus и Web of Science), получен один патент.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 148 наименований, двух приложений. Работа изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка и 62 таблицы.

Автор выражает благодарность за поддержку и ценные советы в период проведения диссертационного исследования научному руководителю – кандидату технических наук, доценту Д. А. Мартошеву.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена актуальность проблематики диссертационного исследования, его цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору исследований, направленных на изучение факторов, оказывающих влияние на эффективность кислотных обработок в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений, существующих моделей распространения червоточин и подходов к оценке производительности скважин после стимуляции.

Во второй главе диссертации выполнен анализ опыта проведения кислотных обработок ($N=349$) в башкирско-серпуховских отложениях месторождений Соликамской депрессии (Гагаринского, Сибирского, Уньвинского, Юрчукского и др.). Отмечено снижение приростов дебитов скважин по нефти при увеличении количества мероприятий, недостаточной успешности и низкой прогностической способности применяемых методов оценки их потенциальной эффективности.

На основе анализа данных с привлечением критериев t -Стьюдента и U -Манна-Уитни, в полном объеме представленного в тексте диссертационной работы, выявлено статистически значимое влияние группы технологических параметров в части кратности стимуляции, дизайна обработки (удельный объем кислотной композиции, продолжительность ее выдержки на реакцию) и текущего режима эксплуатации скважин (удельный дебит скважины по нефти, депрессия на пласт, текущее забойное давление) на результат мероприятия как с точки зрения получения начальных приростов дебита скважин по нефти, так и величины дополнительной добычи и продолжительности эффекта.

Изучение эффективности различных вариаций обработок (в сочетании с методами вторичного вскрытия пласта и без) и типа используемой композиции по механизму действия (с отклонителем и без) позволило установить необходимость учета этих категориальных параметров при проектировании ввиду дифференциации их результатов.

Третья глава посвящена обоснованию технологических параметров проведения кислотных обработок на основе анализа результатов лабораторных экспериментов в свободном объеме, фильтрационных и рентгеномографических исследований. Используются наиболее

распространенные в практике региона кислотные составы на основе соляной кислоты трех производителей – НПС-К, ФЛАКСОКОР-210 и ДН-9010, геолого-промысловый материал семи месторождений – Уньвинского, Сибирского, им. Сухарева, Гагаринского, Маговского, Озерного и Юрчукского. Применяемые алгоритмы, процедуры и результаты экспериментов детально освещены в тексте диссертации.

На первом этапе исследований изучен вещественный состав горных пород с помощью карбонатомера КМ-04М (рис. 1). Значительная дифференциация компонентного состава горной породы целевых объектов (кальцит – 10,8–93,7 %; доломит – 0,4–77,1 %; нерастворимый остаток, представленный кварцем и аргиллитом – 4,2–13,2 %) позволила установить необходимость в проведении анализа для оценки влияния содержания компонентов на эффективность кислотной обработки.

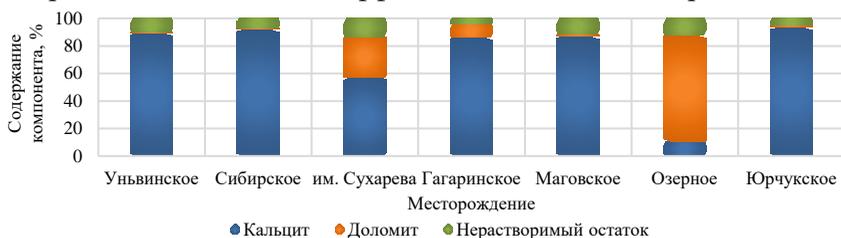


Рис. 1. Результаты определения вещественного состава горных пород

По результатам оценки коррозионной активности кислотных композиций при взаимодействии с металлическими пластинами превышений критических значений ($0,2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) не отмечено.

Исследования скоростей растворения выполнены с применением образцов мрамора (кубики) и горной породы («таблетки»), по их результатам установлено, что ПАВ-замедлители реакции всех рецептов эффективны относительно стандартного 12 % раствора HCl (рис. 2).

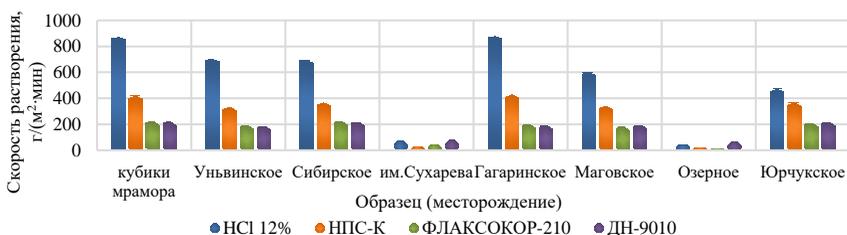


Рис. 2. Скорость растворения образцов кислотными составами

Время нейтрализации кислотных композиций при взаимодействии с горной породой изменяется от 4 до 8 ч, однако по истечении 6 ч растворяющая способность агентов существенно снижается, что подтверждено замерами pH. Отмечено, что повышение содержания кальцита способствует уменьшению времени нейтрализации кислотных растворов, доломита и нерастворимых минералов – его увеличению.

При проведении экспериментов по совместимости композиций с пластовой водой и нефтью целевых объектов критических отклонений не выявлено, за исключением результатов с применением кислотного состава ДН-9010, для которого характерно образование высоковязких эмульсий при взаимодействии с нефтью в любых объемных соотношениях как в активном, так и нейтрализованном состояниях, что обусловило его исключение из программы дальнейших исследований.

Фильтрационные эксперименты выполнены на установках высокого давления AFS-300 и УИК-5ВГ с использованием 52 стандартных образцов зерна башкирско-серпуховских отложений 13 месторождений Пермского края, прошедших подготовительные работы (экстракция, оценка фильтрационно-емкостных свойств и др.). Далее моделировались мероприятия с прокачкой различных объемов кислотных составов V (1, 2, 4 поровых объемов) и продолжительностью выдержки кислоты на реакцию T_B (0, 2, 4, 6 ч). Темп нагнетания кислоты Q варьировался от 1 до 20 см³/мин, давление закачки $P_{зак}$ – от 0,02 до 18 МПа. В качестве показателя эффективности воздействия использован коэффициент изменения проницаемости β – отношение фазовой проницаемости по нефти после обработки (k_2) к ее начальному значению (k_1). Обобщенные результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные результаты фильтрационных экспериментов

Количество образцов зерна, ед.	Количество образцов с червоточинами, ед.	Композиция	V , пор. об.	$PV_{нп}$, д. ед.	T_B , ч	Q , см ³ /мин
52	29	НПС-К, ФЛАКСОКОР-210	1–4	0,35–1,72	0–6	1–20
			$P_{зак}$, МПа	$K_{п}$, д. ед.	k_1 , 10 ⁻³ мкм ²	k_2 , 10 ⁻³ мкм ²
			0,02–18,03	0,02–0,29	0–1587	0–129633

Примечание: $PV_{нп}$ – поровый объем кислотного состава до прорыва, д. ед.; $K_{п}$ – коэффициент пористости, д. ед.

Изучение результатов кислотного воздействия, смоделированного на образцах зерна, выполнено с привлечением рентгеновской компьютерной томографии, в ходе которой проведены исследования

образцов до и после мероприятия. На рис. 3а представлена червоточина, обеспечивавшая наибольшее увеличение проницаемости образца керна среди всех выполненных экспериментов ($\beta=56161$ д. ед.). Трехмерная модель образца керна, изображенная на рис. 3б, свидетельствует о ступенчатом изменении структуры его пустотного пространства. В ходе планирования опыта предполагалось, что канал фильтрации кислоты образуется в зоне более крупных пустот, что опровергнуто экспериментом. Данное явление, наряду с отмеченными в тексте диссертации фактами сохранения проницаемости трещинно-порового образца керна после стимуляции и снижения проницаемости горной породы при развитии червоточины, носит единичный характер, но представляет несомненный интерес и требует дальнейших исследований.

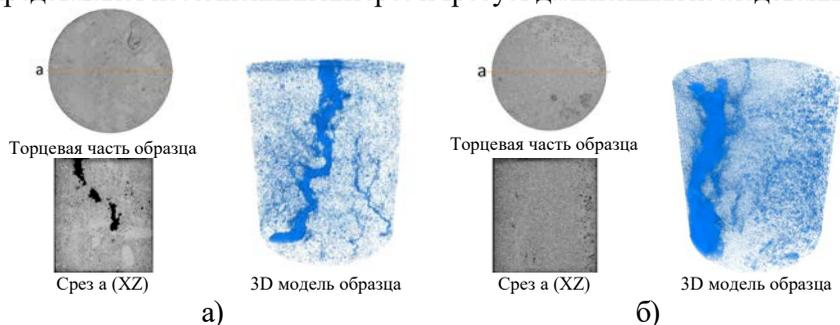


Рис. 3. Изображения образцов керна, полученные с помощью рентгеновской томографии, с развитием: а) червоточины с наибольшим коэффициентом β ; б) червоточины в области ухудшенных фильтрационно-емкостных свойств

Представляется целесообразной унификация результатов исследований, сводимая к обособованию технологических параметров для кислотного воздействия на целевых объектах. В связи с этим, выборка результатов экспериментов предварительно распределена по подгруппам в соответствии с вещественным составом образцов керна месторождений региона, в пределах которых усреднены значения β и выполнено их ранжирование от минимальных до максимальных ($N=13$). Далее построена зависимость между тремя минимальными значениями β и содержанием в горной породе кальцита, доломита и нерастворимых минералов соответственно с определением коэффициента корреляции r .

Аналогично построены последующие зависимости по нарастающей выборке до максимального $N=13$, что позволило на основании динамики изменения r выделить критические содержания компонентов горной породы, при которых происходит изменение тренда корреляции (рис. 4). Кроме того, рассмотрена дифференциация результатов экспериментов в зависимости от используемой композиции.

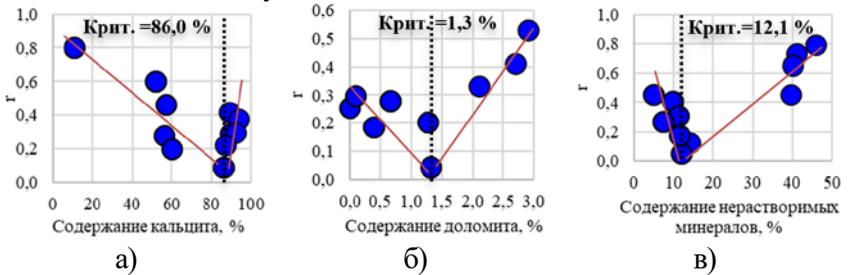


Рис. 4. Изменение коэффициента корреляции r между коэффициентом изменения проницаемости β и содержанием в горной породе: а) кальцита; б) доломита; в) нерастворимых минералов

С учетом критического содержания компонентов в горной породе и используемых композиций выполнен анализ результатов с применением t -критерия Стьюдента и U -критерия Манна-Уитни (табл. 2), в ходе которого установлено статистически значимое влияние ($p < 0,05$) на эффективность обработки содержания доломита.

Таблица 2 – Дифференциация выборки фильтрационных экспериментов

Вещественный состав горной породы						
Параметр	N_1	N_2	Средняя эффективность при показателе < критического	Средняя эффективность при показателе \geq критического	$\frac{t}{p}$	$\frac{U}{p}$
Содержание кальцита (критическое значение – 86,0 %)						
β , д. ед.	33	19	2261,1 \pm 9465,2	5974,8 \pm 13907,5	$\frac{1,144}{0,258}$	$\frac{286,0}{0,608}$
Содержание доломита (критическое значение – 1,3 %)						
β , д. ед.	16	36	10643,7 \pm 18876,4	495,5 \pm 912,4	$\frac{-3,258^*}{0,002}$	$\frac{165,0^*}{0,015}$
Содержание нерастворимых минералов (критическое значение – 12,1 %)						
β , д. ед.	17	35	4980,2 \pm 13475,6	2956,4 \pm 10235,9	$\frac{-0,602}{0,550}$	$\frac{271,0}{0,612}$
Используемый кислотный состав						
Параметр	N_1	N_2	Средняя эффективность (НПС-К)	Средняя эффективность (ФЛАКСОКОР-210)	$\frac{t}{p}$	$\frac{U}{p}$
β , д. ед.	29	23	5655,7 \pm 14834,6	1048,8 \pm 1914,1	$\frac{1,477}{0,146}$	$\frac{325,0}{0,883}$

Примечание: *статистически значимое различие подвыборок ($p < 0,05$).

Результаты экспериментов с применением композиций НПС-К и ФЛАКСОКОР-210 не являются статистически различными, в связи с чем обоснование технологических параметров для них выполнено совместно с учетом содержания доломита и представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Технологические параметры для проведения кислотных обработок на целевых объектах

Кислотный состав	Параметр				
	Удельный объем кислоты, м ³ /м	Продолжительность выдержки на реакцию, ч	Скорость закачки*, м ³ /ч	Давление закачки, МПа	
НПС-К, ФЛАКСОКОР-210	Содержание доломита в горной породе <1,3 %				
	4	без выдержки	4,5	$P_{зак}=7,100 \cdot k_1^{-0,654}$	
	1–4	6			
	Содержание доломита в горной породе ≥1,3 %				
	2–4	4–6	3,2		

Примечание: *расход кислоты на стенке скважины в расчете на 1 м² поверхности обрабатываемой породы.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке и последующей апробации способа обоснования технологических параметров для проведения первичных и повторных кислотных обработок на основе фактических геолого-промысловых данных с применением ранговой матрицы.

Предлагаемый способ состоит из трех основных этапов, в диссертации его применение рассмотрено на примере 36 кислотных обработок (первичных – 13 операций, повторных – 23 операции), выполненных на Гагаринском, Озерном, Сибирском, Уньвинском и Юрчукском месторождениях.

На первом этапе анализируется эффективность кислотных обработок с учетом их кратности по изменению эксплуатационных показателей скважин при закачке различных объемов композиции ($v_{КС}$, м³/м) и продолжительности ее выдержки на реакцию (T_B , ч). В качестве показателей эффективности используются: удельный прирост дебита скважины по нефти после стимуляции (Δq_n , т/(сут·м)); дополнительная добыча нефти ($\sum \Delta Q_n$, т); продолжительность эффекта ($T_{ЭФ}$, сут). Геолого-промысловая информация по проведенным мероприятиям разделяется на интервалы (группы) в зависимости от изменения величин параметров $v_{КС}$ и T_B (не менее трех групп). Показатели эффективности в пределах групп усредняются, на основе их анализа выявляются наиболее эффективные значения $v_{КС}$ и T_B для проведения первичных и повторных кислотных обработок.

На втором этапе по аналогии проводится анализ мероприятий на основе изменения продуктивных и фильтрационных свойств пласта, для чего предварительно выполняется интерпретация материалов гидродинамических исследований скважин. В качестве показателей эффективности кислотной обработки используются коэффициенты изменения продуктивности скважины, проницаемости призабойной и удаленной зоны после стимуляции ($\beta_{\text{прод}}$, $\beta_{\text{ГЗП}}$, $\beta_{\text{УЗП}}$ соответственно, д. ед.).

На третьем этапе для комплексной оценки эффективности кислотных обработок используется оригинальная ранговая система. Для этого каждому из показателей эффективности этапов 1 и 2 присваивается определенный численный ранг. Количество чисел, используемых при ранжировании, зависит от количества выделенных интервалов изменения параметров обработки: например, если выделено 4 интервала, то используются числа 0, 1, 2, 3, где 0 соответствует минимальной эффективности, 3 – максимальной. Выполняется суммирование рангов в пределах групп для определения наиболее эффективных значений $v_{\text{КС}}$ и $T_{\text{В}}$, результаты сводятся в единую ранговую матрицу. Соблюдается закономерность: чем больше суммарный ранг для $v_{\text{КС}}$ или $T_{\text{В}}$, тем выше и ожидаемая эффективность при данном технологическом параметре.

Критерии применимости способа следующие:

1) наличие репрезентативной выборки данных по проведенным кислотным обработкам (не менее 10–20 операций);

2) технологический эффект после кислотной стимуляции должен быть закончен, в противном случае требуется экстраполяция кривой падения добычи нефти для определения ожидаемой дополнительной добычи и продолжительности эффекта;

3) в течение 180 суток до обработки и после нее (в период действия эффекта) должны быть проведены гидродинамические исследования.

На основе данных рассматриваемой выборки ($N=36$) по выполненным кислотным обработкам выделено четыре интервала изменения $v_{\text{КС}}$ и $T_{\text{В}}$ для определения наиболее эффективных: менее $1 \text{ м}^3/\text{м}$, от 1 до $2 \text{ м}^3/\text{м}$, от 2 до $4 \text{ м}^3/\text{м}$, более $4 \text{ м}^3/\text{м}$ и менее 1 ч, от 1 до 2 ч, от 2 до 4 ч, более 4 ч соответственно. Процесс перехода от анализа изменения эксплуатационных характеристик скважин, продуктивных и фильтрационных свойств пласта при различных технологических параметрах кислотной обработки к построению матрицы освещен в диссертации, итоговый результат представлен на рис. 5.

$v_{КС}, \text{м}^3/\text{м}$	Кратность=1		Кратность>1		$T_B, \text{ч}$	
	$v_{КС}$	T_B	$v_{КС}$	T_B		
< 1	5	-	2	2	< 1	Нет данных
1–2	8	10	4	11	1–2	Приоритет 4
2–4	13	11	16	9	2–4	Приоритет 3
> 4	10	15	14	14	> 4	Приоритет 2
						Приоритет 1

Рис. 5. Ранговая матрица эффективности кислотных обработок при различных технологических параметрах: приоритет 1 – наибольшая эффективность; приоритет 4 – наименьшая

Наиболее эффективными технологическими параметрами по результатам оценки являются $v_{КС}$ –2–4 $\text{м}^3/\text{м}$, T_B – более 4 ч (приоритет 1), что подтверждает полученные в ходе лабораторных исследований результаты. Принимая во внимание тот факт, что кислотная стимуляция является кратным мероприятием, для сохранения вариативности его планирования в условиях ограниченного количества скважин-кандидатов рекомендуется сократить объем композиции при первичном воздействии до 2 $\text{м}^3/\text{м}$, а при повторной обработке использовать до 4 $\text{м}^3/\text{м}$.

Апробация разработанной ранговой матрицы выполнена на основе семи первичных и семи повторных кислотных обработок, проведенных на Уньвинском и Юрчукском месторождениях. Отмечено, что средняя эффективность повторных мероприятий ниже первичных: для Δq_n – в 2,2 раз, для $\sum \Delta Q_n$ – в 1,3 раз, для $T_{ЭФ}$ – в 1,1 раз. Проведение повторной кислотной обработки с наиболее приоритетными в соответствии с ранговой матрицей технологическими параметрами позволяет приблизить ее эффективность к первичной. Так, в пределах удельного объема композиции 2–4 $\text{м}^3/\text{м}$ и продолжительности ее выдержки в пласте на реакцию более 4 ч отклонение эффективности повторных обработок от первичных для Δq_n снижается до 1,9–2,2 раз, для $\sum \Delta Q_n$ – до 1,2–1,3 раз, для $T_{ЭФ}$ – до 0,9–1,0 раз. Мероприятия, выполненные с технологическими параметрами в полном соответствии с ранговой матрицей (приоритет 1), обеспечили большую дополнительную добычу нефти и продолжительность эффекта (в среднем на 1,3–2,2 тыс. т и 23–99 суток), чем обработки с отличающимся дизайном, тем самым подтвердив эффективность использования разработанного способа при

планировании первичного и повторного кислотного воздействия на пласт. На разработанный способ получен патент РФ.

Пятая глава диссертации посвящена прогнозированию эффективности кислотных обработок в рассматриваемых условиях на основе математической обработки промысловых данных, заключающейся в установлении зависимостей между дифференциальными (Δq_n , т/(сут·м)) и интегральными ($\sum \Delta Q_n$, т; $T_{эф}$, сут) показателями эффективности стимуляции с геолого-технологическими параметрами (кратность воздействия (n , ед.), удельный объем композиции ($v_{КС}$, м³/м), продолжительность выдержки на реакцию (T_B , ч), коэффициент пористости ($K_{П}$, д. ед.), обводненность (W_1 , %), забойное давление, отнесенное к начальному пластовому давлению ($P_{заб}/P_{пл0}$, д. ед.), проницаемость удаленной зоны пласта до стимуляции ($k_{узП}$, мкм²) и др. (всего 20 различных параметров)).

При обработке геолого-промысловых данных предусмотрен поэтапный подход с последовательной дифференциацией исходной выборки, в ходе которой анализируются:

- 1) все мероприятия с кислотным воздействием на пласт;
- 2) мероприятия, выполненные стандартными кислотными составами (СКС) и композициями с отклоняющими системами (КОС);
- 3) мероприятия, выполненные СКС и КОС с учетом технологической вариации воздействия (ПП – с повторной перфорацией продуктивного интервала, КО – без нее).

Целесообразность дифференциации исходной выборки подтверждена данными статистического анализа: выделенные подгруппы являются статистически различными (табл. 4).

Поэтапный принцип корреляционного анализа, в полном объеме представленный в тексте диссертационной работы, позволил обосновать необходимость учета при проектировании категориальных параметров (тип композиции, технологическая вариация мероприятия) и оценить индивидуальное влияние каждого из геолого-технологических параметров на эффективность обработки. Отмечено отсутствие какого-либо единственного фактора, оказывающего превалирующее влияние на эффективность кислотного воздействия. Установлено, что результат мероприятия определяется комплексно, то есть единовременным разнонаправленным влиянием группы геолого-технологических параметров. Например, на величину Δq_n статистически

значимое влияние оказывают удельный объем кислотной композиции (r варьируется от 0,63 до 0,77), расчлененность обрабатываемого интервала пласта (r от -0,27 до -0,73), кратность воздействия (r от -0,15 до -0,20) и обводненность продукции (r от -0,22 до -0,37).

Таблица 4 – Сравнение средних значений показателей эффективности при дифференциации выборки

Параметр	Этап	N_1	N_2	Среднее значение (СКС)	Среднее значение (КОС)	$\frac{t}{p}$	$\frac{U}{p}$
$\Delta q_n, \tau/(\text{сут}\cdot\text{м})$	2	193	52	0,64±0,54	0,44±0,27	$\frac{2,402 *}{0,017}$	$\frac{3350,0 *}{0,022}$
$\sum \Delta Q_n, \tau$				5472±11981	1607±1172	$\frac{2,060 *}{0,040}$	$\frac{3001,0 *}{0,030}$
$T_{эф}, \text{сут}$				1001±921	627±379	$\frac{2,670 *}{0,007}$	$\frac{3521,5 *}{0,049}$
Параметр	Этап	N_1	N_2	Среднее значение (КО КОС)	Среднее значение (ПП КОС)	$\frac{t}{p}$	$\frac{U}{p}$
$\Delta q_n, \tau/(\text{сут}\cdot\text{м})$	3	120	73	0,57±0,50	0,74±0,59	$\frac{2,125 *}{0,035}$	$\frac{3236,0 *}{0,033}$
$\sum \Delta Q_n, \tau$				4004±10680	7764±13530	$\frac{2,113 *}{0,035}$	$\frac{3357,5 *}{0,026}$
$T_{эф}, \text{сут}$				938±876	1227±1093	$\frac{2,001 *}{0,047}$	$\frac{3361,5 *}{0,041}$
Параметр	Этап	N_1	N_2	Среднее значение (КО КОС)	Среднее значение (ПП КОС)	$\frac{t}{p}$	$\frac{U}{p}$
$\Delta q_n, \tau/(\text{сут}\cdot\text{м})$	3	37	15	0,38±0,23	0,56±0,32	$\frac{-2,171 *}{0,035}$	$\frac{159,0 *}{0,048}$
$\sum \Delta Q_n, \tau$				1330±971	2087±1360	$\frac{-2,073 *}{0,044}$	$\frac{126,0 *}{0,047}$
$T_{эф}, \text{сут}$				687±391	377±175	$\frac{2,307 *}{0,026}$	$\frac{120,5 *}{0,018}$

Примечание: *статистически значимое различие подвыборок ($p < 0,05$).

Для исследования множественных (комплексных) связей выполнен пошаговый регрессионный анализ, в ходе которого построена 21 статистическая модель. Полученные многомерные зависимости позволяют качественно прогнозировать показатели эффективности воздействия. Анализ уравнений с описанием процесса их формирования, областей и границ применимости, расчетом статистических оценок подробно представлен в тексте диссертационной работы. Разработанные модели характеризуются высокими оценками: они статистически значимы, наблюдается высокая степень корреляции между рассчитанными и фактическими показателями эффективности ($r \geq 0,7$ при $p < 0,05$). Однако категориальные параметры (тип композиции, вариация мероприятия) в полной мере учитывает только группа моделей,

полученных на третьем этапе моделирования, что делает их предпочтительными для применения. В частности, модель для определения удельного прироста дебита скважины по нефти при проведении КО СКС при $R=0,761$, $p<10^{-10}$ имеет вид:

$$\Delta q_{\text{н}}^{\text{МЗ КО СКС}} = -0,181 + 0,246 \cdot v_{\text{КС}} - 0,141 \cdot n - 0,008 \cdot W_1 + 0,969 \cdot P_{\text{заб1}}/P_{\text{пл0}} + 3,663 \cdot k_{\text{УЗП1}}.$$

Формирование коэффициента множественной корреляции R происходило в соответствии с уравнением регрессии: 0,673; 0,711; 0,735; 0,757; 0,761. Представленная модель применима в диапазоне изменения геолого-технологических параметров: $v_{\text{КС}}$ – от 0,3 до 12,0 м³/м, n – от 1 до 5 ед., W_1 – от 0,0 до 80,1 %, $P_{\text{заб}}/P_{\text{пл0}}$ – от 0,07 до 0,84 д. ед., $k_{\text{УЗП}}$ – от 0,000 до 0,122 мкм².

Корреляционные поля прогнозных и фактических значений удельного прироста дебита скважины по нефти для уравнений, полученных на третьем этапе моделирования, представлены на рис. 6, других показателей – в тексте диссертационной работы. При использовании моделей для ПП КОС (например, рис. 6г), характеризующихся высокой корреляцией фактических и прогнозных значений ($r=0,996$), следует учитывать небольшое количество наблюдений, участвующих в их построении ($N=12$), по мере дальнейшего накопления опыта проведения мероприятия рекомендуется уточнить зависимости.

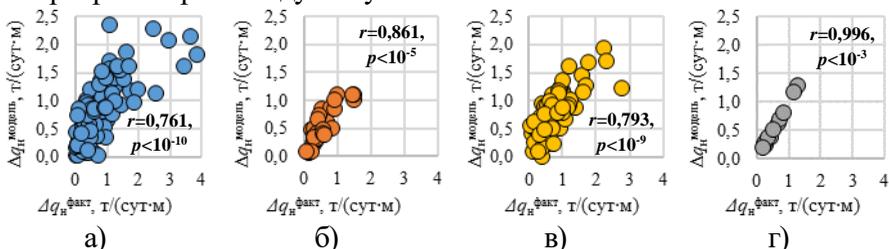


Рис. 6. Корреляционные поля модельных и фактических значений удельного прироста дебита скважины по нефти $\Delta q_{\text{н}}$ после:
 а) КО СКС; б) КО КОС; в) ПП СКС; г) ПП КОС

Частотный анализ многомерных статистических моделей с учетом индивидуальных корреляций позволил выделить параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность стимуляции: для $\Delta q_{\text{н}}$ – объем кислоты, объем отклонителя и расчлененность интервала

обработки; для $\sum \Delta Q_n$ и $T_{Эф}$ – кратность воздействия, величина забойного давления относительно начального, текущего пластового давления и давления насыщения нефти газом.

При верификации разработанных моделей для различных вариаций кислотных обработок с привлечением экзаменационной выборки данных (рис. 7) наблюдаются невысокие средние отклонения рассчитанных показателей эффективности от фактических значений (4,0–17,2 %), что подтверждает их достоверность и практическую применимость.

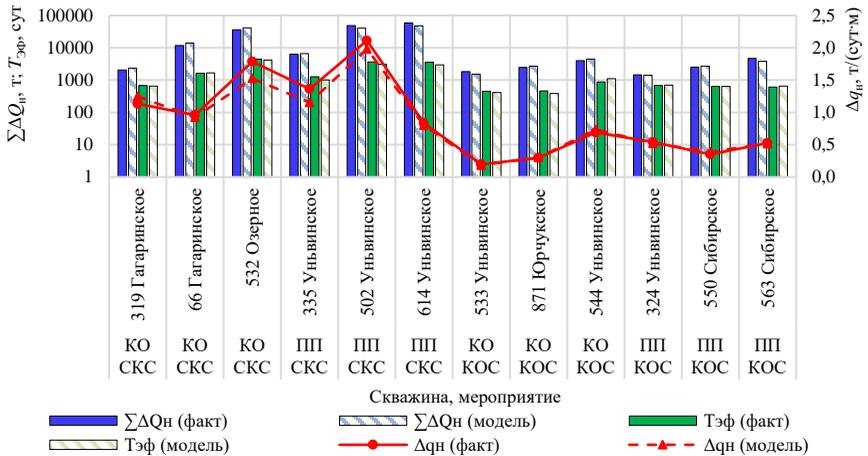


Рис. 7. Результаты прогнозирования показателей эффективности мероприятий с кислотным воздействием на скважинах

Заключение

В ходе диссертационного исследования в соответствии с поставленными задачами получены следующие выводы:

1. Проведение кислотных обработок является основной технологией интенсификации притока нефти в башкирско-серпуховских отложениях месторождений Соликамской депрессии Пермского края при средней успешности реализации около 67 %, что подчеркивает актуальность проблематики диссертационного исследования.

2. Анализ опыта проведения мероприятий с кислотным воздействием с применением статистических методов позволил выделить основные параметры, оказывающие влияние на эффективность обработки карбонатных коллекторов. Доказано, что начальный прирост дебита

скважины по нефти преимущественно определяется технологией проведения мероприятия, дополнительная добыча и продолжительность эффекта – его кратностью и относительными значениями забойных давлений, косвенно характеризующих энергетическое и горно-геологическое состояние прискважинной зоны.

3. По результатам лабораторных экспериментов установлено, что содержание доломита более 1,3 % в карбонатных продуктивных пластах способствует снижению эффективности проведения обработок композициями на основе соляной кислоты. Технологические параметры для проведения обработок обоснованы дифференцировано для пластов как с наличием доломита, так и с его практически полным отсутствием.

4. Разработан способ обоснования технологических параметров для проведения первичных и повторных кислотных обработок на основе фактических геолого-промысловых данных с применением ранговой матрицы, учитывающей изменения эксплуатационных характеристик скважин и свойств пласта. Определены условия применения способа, выполнена апробация, подтвердившая его работоспособность.

5. Построенные адресные многомерные модели позволяют с высокой степенью достоверности прогнозировать показатели эффективности кислотной стимуляции в карбонатных коллекторах нефтяных месторождений, что подтверждено результатами их верификации с привлечением экзаменационной выборки данных (фактически проведенными мероприятиями на скважинах) и полученными статистическими оценками.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science

1. Acid treatment of carbonate reservoir with a new dual action microemulsion: selection of optimal application conditions / R. A. Derendyaev, **V. A. Novikov**, D. A. Martyushev, Z. Liu, Y. Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 216. – P. 110809. (Web of Science, Scopus).

2. A new approach for the demonstration of acidizing parameters of carbonates: experimental and field studies / **V. A. Novikov**, D. A. Martyushev,

Y. Li, Y. Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 213. – P. 110363. (Web of Science, Scopus).

3. Мартюшев Д. А., **Новиков В. А.** Совершенствование кислотных обработок в коллекторах, характеризующихся различной карбонатностью (на примере нефтяных месторождений Пермского края) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 7–17. (Web of Science, Scopus, Перечень ВАК).

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

4. **Новиков В. А.** Методика прогнозирования эффективности матричных кислотных обработок карбонатов // Недропользование. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 137–143. (Перечень ВАК).

5. **Новиков В. А.** Прогнозирование эффективности кислотного воздействия на основе построения математических моделей, учитывающих технологию и используемую композицию // Технологии нефти и газа. – 2021. – № 1 (132). – С. 30–35. (Перечень ВАК).

6. **Новиков В. А.**, Мартюшев Д. А. Обоснование оптимальной скорости закачки кислотных составов с учетом карбонатности коллектора // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 3 (615). – С. 26–30. (Перечень ВАК).

7. **Новиков В. А.**, Мартюшев Д. А. К вопросу повышения эффективности кислотных обработок терригенных коллекторов // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 1 (613). – С. 36–40. (Перечень ВАК).

8. **Новиков В. А.**, Мартюшев Д. А. Опыт применения кислотных составов в карбонатных отложениях нефтяных месторождений Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 72–87. (Перечень ВАК).

Авторские свидетельства и патенты

9. Пат. Рос. Федерации «Способ оценки эффективности кислотной обработки карбонатных пластов»: пат. 2790639 RU / **В. А. Новиков**, Д. А. Мартюшев; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО ПНИПУ. – № 2022104592; заявл. 22.02.2022, опублик. 28.02.2023.