

На правах рукописи



**ХУСНУТДИНОВА РЕГИНА РАФАЭЛЕВНА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ В СКВАЖИНАХ  
С ВЫСОКОЙ ПРИЕМИСТОСТЬЮ**

Специальность 2.8.4 – Разработка и эксплуатация  
нефтяных и газовых месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2024

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

**Научный руководитель:**

**Фаттахов Ирик Галиханович,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Давлетшина Люция Фаритовна,**  
доктор технических наук, доцент  
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет  
нефти и газа (национальный исследовательский  
университет) имени И.М. Губкина», профессор кафедры  
технологии химических веществ для нефтяной и газовой  
промышленности, ведущий научный сотрудник  
отделения НЦМУ «Рациональное освоение запасов  
жидких углеводородов планеты»

**Леонтьев Дмитрий Сергеевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,  
кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин»

**Ведущая организация:**

**Общество с ограниченной ответственностью**  
**«РН-БашНИПИнефть», (г. Уфа)**

Защита диссертации состоится 26 декабря 2024 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 72.1.021.01 в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, 32

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

Автореферат разослан «\_\_\_» 2024 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н.

Кабирова Алексия Хатиповна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

В последние годы разработка многих нефтяных месторождений требует создания методов, ориентированных на ограничение притока воды в нефтяные скважины из-за их высокой обводнённости. Одним из основных способов снижения обводнённости являются ремонтно-изоляционные работы. Данный вид работы направлен на оптимизацию условий работы продуктивных пластов с высокой долей обводнения. Для прогноза эффективности проводимых работ разрабатывают дизайн ремонтно-изоляционных работ, в основе которого лежат расчеты основных параметров используемого изоляционного материала. На сегодняшний день проведено много исследований, посвященных вопросам ремонтно-изоляционных работ. Однако, существующие задачи необходимости повышения технологической эффективности работ обосновывают потребность в разработке новых методов планирования и способов проведения ремонтно-изоляционных работ (РИР). С учетом этого, вопросы в исследуемой работе являются актуальными и своевременными.

### **Степень разработанности темы исследования**

Большой вклад в изучении этого направления внесли такие ученые, как Аветисов А.Г., Агзамов Ф.А., Андреев В.Е., Блажевич В.А., Волочкив Н.С., Григорьев А.В., Зозуля Г.П., Ибрагимов Г.З., Ивакин Р.А., Ибатуллин Р.Р., Кадыров Р.Р., Клещенко И.И., Кошелев А.Т., Котенев Ю.А., Крылов В.И., Мерзляков В.Ф., Никишов В.И., Овчинников В.П., Рогачев М.К., Стрижнев К.В., Стрижнев В.А., Телков А.П., Уметбаев В.Г., Умрихина Е.Н., Федоров К.М., Artun E., Lane R.H., Rowland D.A., Richardson E.A., Smith F.W., Stone H.L., Seright R.S., Wang Y., White S.R., Woodard H.D. и многие другие ученые, которые занимались вопросами ограничения водопритока в скважину. Но, тем не менее, появляются все более новые возможности, усовершенствованные технологии, материалы, благодаря чему эта тема не теряет своей актуальности и значимости.

### **Цель работы**

Повышение эффективности изоляционных работ в нефтепромысловых скважинах с обеспечением технологической эффективности тампонажных работ в условиях высокой приёмистости.

### **Основные задачи исследования**

1. Исследование вопросов разработки дизайна изоляции заколонного перетока с учетом профиля давления в водоносном пласте.
2. Исследование влияния коэффициента изоляции тампонажного материала на прогнозную обводненность и дебит нефти при изоляции заколонного перетока.

3. Исследование на гипотетической гидродинамической модели влияния отключения интервалов пластов на ожидаемое изменение дебита жидкости и нефти.

4. Исследование влияния факторов, характеризующих геолого-технические условия и эксплуатационные характеристики скважин Бобриковского, Радаевского, Протвинского, Башкирского, Турнейского ярусов и горизонтов, на прогноз эффективности изоляционных работ.

5. Разработка композиций на основе ангидрита и способов изоляции для снижения приёмистости поглощающих пластов.

### **Научная новизна**

1. Установлена полиномиальная зависимость второй степени необходимого объема реагента от радиуса обработки изоляции заколонного перетока.

2. Выявлено, что при превышении объема закачки водоизоляционной композиции в пределах  $12\text{-}15 \text{ м}^3/\text{м}$  происходит выполнение кривых зависимости скин-фактора от объёма закачки при любом коэффициенте изоляции и эффективность от дальнейшего приращения объема закачки уменьшается.

3. Установлена зависимость растекаемости тампонажного раствора на основе полуводного гипса и дизельного топлива (ДТ), показывающая монотонное увеличение растекаемости раствора с ростом отношения ДТ/гипс до диапазона этого отношения 1-1,1 в котором имеет место скачкообразное увеличение растекаемости, причем при дальнейшем увеличении концентрации ДТ в растворе, зависимость растекаемости тампонажного раствора от отношения ДТ/гипс выполняется.

4. Разработана методика расчета требуемого объёма водоизоляционного состава при разработке дизайна ремонтно-изоляционных работ с учетом подбора условий выбора тампонажного материала, применительно к рассматриваемым объектам, в зависимости от геолого-технических условий с применением программного продукта.

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

1. Разработана методика проектирования дизайна работ по изоляции заколонного перетока с построением гидродинамической модели терригенных пластов пашийского, кыновского горизонтов.

2. Установлены оптимальные параметры для планирования изоляционных работ путем проведения многофакторного анализа параметров, влияющих на успешность работ по технологиям для ограничения водопритока.

3. Установлены коэффициент изоляции и давление прорыва воды изоляционных материалов проведением исследований на фильтрационной установке.

4. Разработан и испытан новый способ применения тампонажной композиции на основе ангидрита для снижения поглощений.

### **Методы решения поставленных задач**

1. Аналитические исследования и обработка промысловых данных методами статистического анализа с использованием программного продукта.

2. Экспериментальные лабораторные исследования свойств изоляционных композиций на основе ангидрита.

3. Промысловые испытания способа снижения приёмистости поглощающих пластов композицией на основе ангидрита для оценки эффективности.

### **Основные защищаемые положения**

1. Установленное влияние коэффициента изоляции тампонажного материала на прогнозную обводненность и дебит нефти при изоляции заколонного перетока, позволяющее оптимизировать выбор изоляционного материала при планировании работ.

2. Разработка композиции на основе ангидрита обеспечивает технологичность и простоту реализации процесса проведения изоляционных работ.

3. Разработка способа изоляции для снижения приёмистости поглощающих пластов обеспечивает интенсификацию снижения приёмистости изолируемого пласта композицией на основе ангидрита.

4. Разработанная методика расчета объема водоизоляционного состава обеспечивает минимизацию затрат при выполнении водоизоляционных работ в скважине.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается лабораторными и опытно-промышленными работами, проведенными в соответствии с утвержденными нормами и стандартами.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения диссертационной работы представлены на международном научном форуме «Наука и инновации – современные концепции», г. Москва, 25 марта 2022 г., Форуме молодёжной науки, 2022 г.; Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (31 марта 2022 г.), VII Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли», Альметьевский государственный нефтяной институт (АГНИ), 2022 г., Международной научно-практической конференции для студентов, молодых ученых, преподавателей, аспирантов и специалистов нефтегазовой отрасли, посвященной памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде, г. Уфа, 2023 г.

**Личный вклад автора** состоит в подборе и анализе литературных источников, постановке цели и основных задач исследования, в выборе и разработке методов решения поставленных задач, в проведении лабораторных исследований и планировании промысловых испытаний. Автором организованы подбор и тестирование усовершенствованного водоизоляционного состава. В соавторстве с коллегами подготовлены научные публикации.

### **Публикации**

Основные положения диссертации изложены в 16 опубликованных научных трудах, в том числе – 1 монографии, 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

### **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и содержит 134 страницы машинописного текста, 55 рисунков, 26 таблиц.

**Автор выражает благодарность** своему научному руководителю – доктору технических наук, доценту Фаттахову Ирику Галихановичу, заведующему лабораторией отдела эксплуатации и ремонта скважина института «ТатНИПИнефть» Жиркееву Александру Сергеевичу и всем, кто оказал помощь и поддержку при выполнении работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изучается степень разработанности темы, ставятся цели и задачи исследований, приводятся методы решения поставленных задач, научная новизна, практическая и теоретическая значимость и апробация работы.

**В первой главе** проведен обзор опубликованных материалов по различным подходам при планировании (разработке дизайна) изоляционных работ в скважинах, использовании и исследованиях различных изоляционных материалов для работ в условиях высокой приёмистости. Опубликованные материалы показывают, что большую ценность представляет анализ успешных и неуспешных обработок на конкретном объекте, который может указать на оптимальный тип и объём водоизоляционной композиции. Известны различные блокирующие составы для снижения поглощающей способности в процессе строительства и ремонта скважин. Основным направлением применения составов для изоляции является повышение технологической эффективности и снижение стоимости работ. Показано, что тампонажные составы и способы ведения работ в условиях высокой поглотительной способности работают в области наиболее сложных задач – разработка новых и совершенствование имеющихся решений являются актуальными востребованными задачами.

**Во второй главе** рассмотрена разработанная усовершенствованная методика построения дизайна ремонтно-изоляционных работ. Планирование и проведение ремонтно-изоляционных работ в скважине начинается со сбора геолого-технических данных, информации о конструкции скважины и других сведений. Далее определяют потенциально возможный эффект от проведения работ по изоляции заколонного перетока. Затем, в зависимости от исходных данных, в частности, на основе имеющихся данных о приемистости изолируемого интервала, проводится предварительный выбор изоляционного материала. Следующим шагом является расчет необходимого изоляционного материала и стоимости основного или альтернативных вариантов технологии. Завершающим этапом алгоритма расчетов является обоснование выбранной технологии и проведение РИР.

При выборе тампонажного материала необходимо руководствоваться определенными критериями применения. При использовании других технологий могут создаваться дополнительные условия. Такими условиями являются тип РИР (герметизация колонны, отключение пласта, заколонные перетоки, внутрипластовый переток), область применения водоизоляционного материала с учетом значения приемистости, стоп-факторы (соответствие значений приемистости по области применения). Учет допустимых отклонений и критически важных «стоп-факторов» обеспечивает наиболее точный выбор технологии для каждой скважины. Для расчета потребного количества изоляционного материала при РИР по изоляции заколонного перетока использовали гидродинамическое моделирование. При моделировании заколонного перетока предполагается, что модель будет являться двухслойной: первый слой – продуктивный пласт, второй слой – водоносный пласт (рисунок 1).

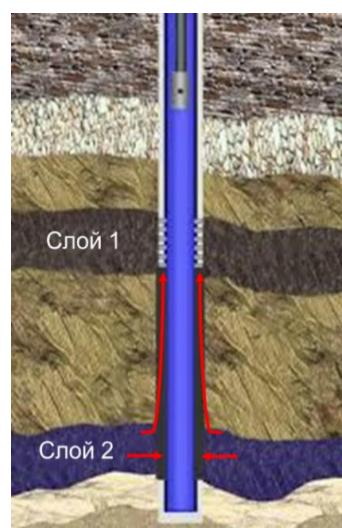


Рисунок 1 – Схема пластов для модели

Модель предполагает, что в вертикальной скважине после нарушения целостности цементного кольца происходит поступление воды по заколонному пространству из нижнего водоносного пласта.

Пусть скважина работает с дебитом жидкости  $q_{ж}$  при забойном давлении  $P_3$ . Обводненность продукции составляет  $f(w)$  и контролируется поступлением воды по заколонному перетоку.

В таком случае на первом этапе определяется объем воды, поступающей из водоносного пласта по формуле (1)

$$q_{в} = k * q_{ж} * (обв), \quad (1)$$

где  $q_{в}$  – дебит воды по водоносному прослою,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$q_{ж}$  – дебит скважины по жидкости,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$обв$  – объемная обводненность скважины, д.ед.:

$k$  – коэффициент, учитывающий естественную обводненность целевого пласта (при условии принятия нефтенасыщенного целевого пласта равным 1 доли ед., т.е. вся вода поступает из водоносного слоя).

На основании вычисленного дебита воды и зная забойное давление, можно рассчитать профиль давления в водоносном слое, используя формулу (2). Необходимость расчета профиля давления обусловлена ограничениями прочностных характеристик водоизоляционных составов:

$$P(r) = P_{заб} + \frac{q_{в} * B_{в} * \mu_{в}}{k * h} * \ln \frac{r}{r_c}. \quad (2)$$

Для решения требуется величина следующих фильтрационно-емкостных параметров водоносного пласта:

$q_{в}$  – дебит воды по водоносному прослою,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$k$  – проницаемость водоносного слоя,  $\text{м}^2$ ;

$h$  – толщина водоносного слоя, м;

$r_c$  – радиус скважины, м;

$B_{в}$  – объемный коэффициент, д.ед.;

$\mu_{в}$  – вязкость воды,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Результаты расчета представляют собой профиль давления на удалении от скважины.

Вычисленные по указанным формулам градиент  $dP/dr$  и суммарное изменение давления позволяют определить на каком расстоянии от интервала обработки необходимо закачать композицию для обеспечения условия прочностных характеристик реагентов, по представленной формуле (3)

$$dP/dr(r) < dP/dr_{прорыва}. \quad (3)$$

Следующим этапом после выбора радиуса обработки является расчет потребного объема реагента для проведения обработки по формуле (4)

$$V_{pear} = \pi * r^2 * h * m, \quad (4)$$

где  $r$  – принятый радиус обработки, м;  
 $h$  – толщина водоносного слоя, м;  
 $m$  – пористость пласта, д.ед.

Ожидаемый эффект от проведения работ рассчитывается, исходя из дополнительного фактора сопротивления, который обеспечивается закачкой водоизолирующего состава. Тогда снижение дебита воды определяется через добавление дополнительных фильтрационных сопротивлений за счет скин-эффекта. Расчет осуществляется по формуле Хокинса (5)

$$s = \left( \frac{K}{K_s} - 1 \right) * \ln \frac{R_s}{r_{скв}}, \quad (5)$$

где  $r_{скв}$  – радиус скважины; м  
 $R_s$  – радиус зоны обработки; м

$k$  – проницаемость водоносного слоя,  $\text{м}^2$ ;

$K_s$  – проницаемость скин-зоны, определяется исходя из коэффициента изоляции водонасыщенной модели по формуле (6)

$$K_s = k - k * \left( \frac{K_{изоляции}}{100} \right). \quad (6)$$

Расчет скин-фактора позволяет рассчитать объем воды, поступающей из водоносного пласта после проведения обработки, по формуле Дюпюи. Сделав эти вычисления, возможно оценить дебит скважины и сокращение добычи воды после обработки.

Для обеспечения возможности проведения расчётов, необходимо знать изоляционные характеристики используемых водоизоляционных композиций. Определение в лабораторных условиях необходимых для расчета численных величин характеристик проводится на насыпной модели пласта с использованием фильтрационной установки. Моделировался девонский пласт с терригенными коллекторами, основной характеристикой которого является проницаемость равная 1061 мД. Исследования проводились в лаборатории обработки призабойной зоны пласта и водоизоляционных работ института «ТатНИПИнефть». Порядок проведения экспериментов на фильтрационной установке состоял из трех этапов:

- подготовки модели пласта и фильтрационной установки;
- фильтрации насыщающей пористую среду жидкости и исследуемого тампонажного состава по схеме «скважина-пласт» и «пласт-скважина» через модель пласта для установления параметров фильтрации и водоизолирующих свойств;
- обработки результатов исследований.

Определяющим вычислением является определение коэффициента изоляции, который говорит об оценке изолирующей способности материала и успешности проводимого мероприятия. Коэффициент изоляции представляет собой отношение проницаемости до и после закачки тампонажного состава и определяется по формуле (7)

$$K_{из} = \frac{K_0 - K_1}{K_0} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где  $K_{из}$  – коэффициент изоляции, %;

$K_0$  – проницаемость модели пласта до тампонирования,  $\text{мкм}^2$ ;

$K_1$  – проницаемость модели пласта после тампонирования,  $\text{мкм}^2$ .

Проницаемости  $K_0$  и  $K_1$  определяют на основе данных, полученных в процессе ранее проведенных исследований в лабораторных условиях.  $K_{из}$  равный 100% показывает, что произошло полное закупоривание пор модели пласта.

В таблице 1 приведены результаты исследования на модели пласта некоторых изоляционных материалов.

Таблица 1 – Характеристики изоляционных материалов

Изоляционный материал	Коэффициент изоляции модели, %	Давление прорыва, МПа/м
Тампонажный раствор на основе микроцемента	97	2,8
Тампонажный раствор на основе эпоксидной смолы	99	3,9
Композиция на основе силиката натрия	89	0,9

С целью определения эффективности мероприятий, направленных на изоляцию заколонного перетока, была создана двухфазная гидродинамическая модель, позволяющая оценить восстановление дебита нефти после изоляционных работ. По результатам численных расчетов прослеживается тенденция изменения скин-фактора в зависимости от увеличения коэффициента изоляции, что, в свою очередь, дает возможность спрогнозировать увеличение дебита нефти и снижение водопритока на стадии проектирования. Применяемая модель за счет расчета ожидаемого дебита нефти позволяет определить экономическую эффективность от мероприятий в процессе проектирования работ.

Гипотетическая гидродинамическая модель представляет собой объект из двух пластов, разделенных перемычкой, где верхний слой полностью нефтенасыщенный, нижний слой – водоносный (рисунок 2).

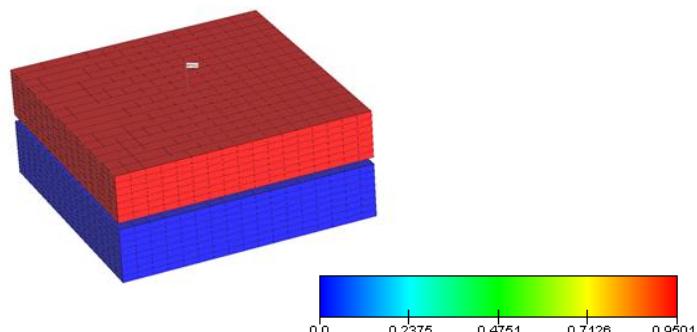


Рисунок 2 – Модель для проведения расчетов (насыщенность)

Оба пласта эксплуатируются скважиной, находящейся в центре залежи, с постоянными граничными условиями (давление, насыщение). Значение вязкости нефти составляет 0,0016 Пас. Значения проницаемости и толщин пластов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Фильтрационные показатели пластов в модели

Пропласток	Толщина, м	Проницаемость, мД
1 пласт	3,5	305,7
2 пласт	4,0	1061,0

Прогнозные расчеты проводились в течении 20 лет. На восьмой год имитация возникновения заколонной циркуляции моделировалась путем открытия перфорации на верхнюю ячейку водоносного слоя. Дебит жидкости на расчете задавался постоянным. Воздействие состава будет происходить через перфорированный водоносный пласт. Проведение водоизоляции моделировалось путем добавления расчётных скин-факторов для удельного объема закачки изоляционной композиции от 1 до 15 м<sup>3</sup>/м для коэффициентов изоляции 85%, 90%, 95%, 98%, 99% (таблица 3) по формуле (8)

$$s(K_{изоляции}, V_{pear}) = \left( \frac{K_{изоляции}}{100 - K_{изоляции}} \right) * \ln \frac{\sqrt{\frac{V_{pear}}{\pi * h * m}}}{r_{скв}} . \quad (8)$$

Для нефтяной и водоносной частей пласта скин-фактор, принятый за обработку, будет разным.

Таблица 3 – Рассчитанный скин-фактор для различных коэффициентов изоляции (К<sub>из</sub>)

Удельный объем на 1 м толщины пласта	K <sub>из</sub> =85 %	K <sub>из</sub> =90 %	K <sub>из</sub> =95 %	K <sub>из</sub> =98 %	K <sub>из</sub> =99 %
1	15	23	49	126	255
2	19	29	62	160	323
10	28	44	93	239	483
15	30	48	100	259	523

Результаты проведенных расчетов представлены на рисунках 3, 4.

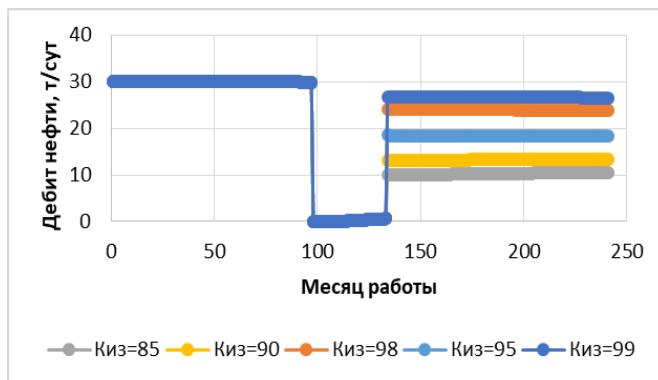


Рисунок 3 – Динамика изменения дебита нефти для различных коэффициентов изоляции

Отношение дебита нефти после обработки к дебиту до возникновения заколонной циркуляции приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Восстановление дебита нефти после обработки

Коэффициент изоляции, %	85	90	95	98	99
Восстановление базового дебита нефти, %	33	44	62	81	90

На рисунке 3 и в таблице 5 видно, что ни в одном из расчетных вариантов не удалось достичь дебита нефти после обработки больше дебита нефти, чем до возникновения заколонной циркуляции.

С учетом изложенного возможно сделать выводы, что технологический эффект от проведения мероприятия по изоляции притока из водоносного пласта направлен на восстановление базовой добычи, а при заданном диапазоне коэффициента изоляции от 85% до 99% восстановление базовой добычи нефти составляет от 33% до 90%. Разработанная методика планирования проведения РИР была испытана для расчетов в скважине с характеристиками, представленными в таблице 5.

Таблица 5 – Данные по скважине для расчета

Показатель	Значение	Единица измерения
Дебит жидкости	100	м <sup>3</sup> /сут
Дебит воды	90	м <sup>3</sup> /сут
Обводненность	90	%
Забойное давление	5	МПа
Проницаемость водоносного слоя	120	мД
Пористость водоносного слоя	0,2	д.ед.
Толщина водоносного слоя	7,6	м
Радиус скважины	0,073	м
Объемный коэффициент	1,0	д.ед.
Вязкость воды	0,0016	Пас

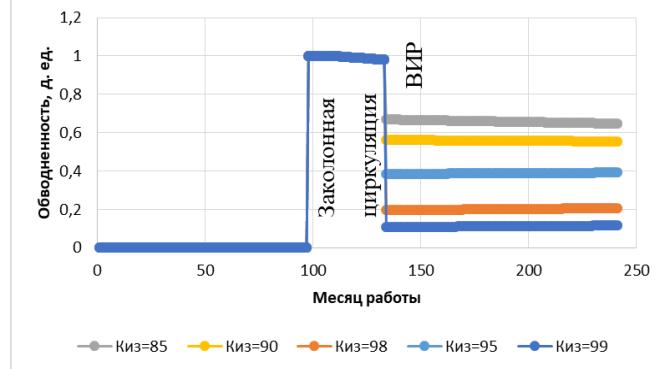


Рисунок 4 – Динамика изменения обводненности для различных коэффициентов изоляции

При расчётах с использованием формул (1) и (2) рассчитан профиль давления на различном удалении от скважины, представлен на рисунке 5. Результаты расчета необходимого объема реагента от радиуса обработки представлены на рисунке 6.

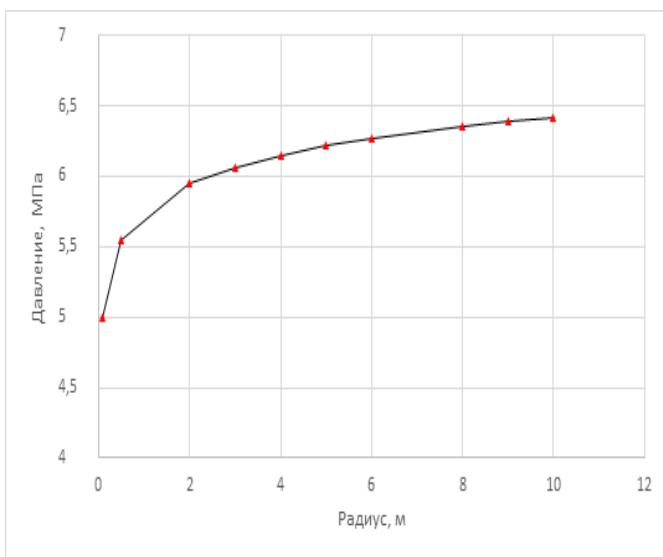


Рисунок 5 – Результаты расчета профиля давления на различном удалении от скважины

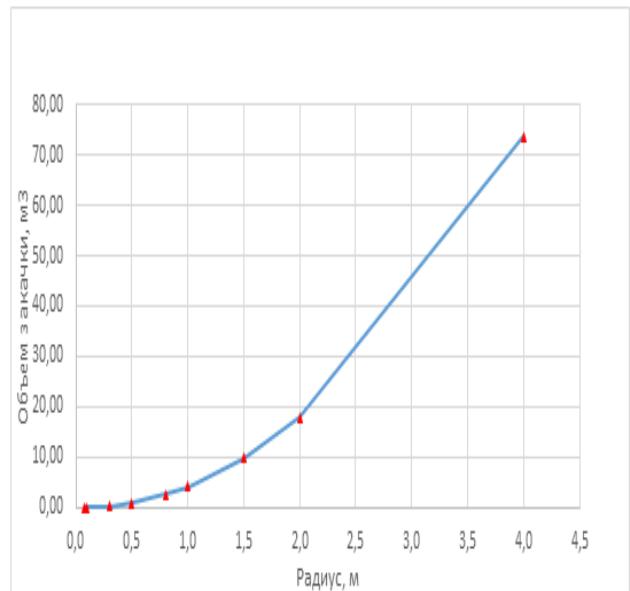


Рисунок 6 – Результаты расчета потребного объема реагента от радиуса обработки

Потребный объём водоизоляционной композиции в зависимости от радиуса обработки рассчитали по формуле (4). В данном случае необходимый объем реагента от радиуса обработки определяется полиномиальной зависимостью второй степени  $y = 4,7864x^2 - 0,7247x + 0,0264$ .

Для анализа влияния коэффициента изоляции и удельного объема обработки на метр изолируемой толщины проведены аналитические расчеты по предлагаемой методике. Для расчетов принят диапазон величины коэффициента изоляции от 80% до 99%. Расчет проводился согласно формулам (4), (5), (6), где скин-фактор является функцией коэффициента изоляции и объема реагента, формула (8). При этом объем поступающей из неперфорированного интервала воды контролируется именно достигаемым дополнительным фильтрационным сопротивлением. Расчет притока воды осуществляется по формуле Дюпюи. Результаты расчетов представлены на рисунке 7. Расчетные значения скин-фактора для различных коэффициентов изоляции представлены штрихпунктирными линиями, расчётная зависимость дебита от скин - фактора представлена красной линией.

По результатам теоретических расчетов установлено, что на потребный объем закачки водоизоляционной композиции оказывают основное влияния два фактора – прочностная характеристика состава и потребное дополнительное сопротивление в призабойной зоне

водоносного горизонта. При этом очевидно, что с повышением объема закачки увеличивается радиус зоны обработки и эффект от водоизоляционных мероприятий увеличивается.

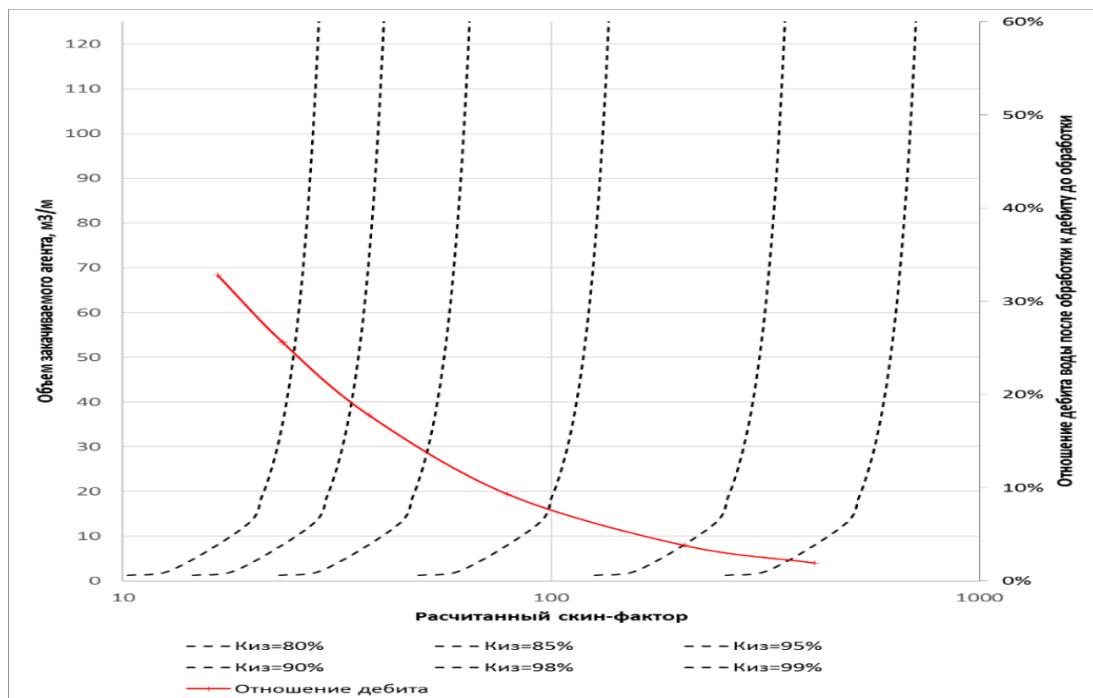


Рисунок 7 – Зависимость отношения дебита воды от объема состава

Из результатов расчетов, представленных на рисунке 7, видно, что с увеличением коэффициента изоляции, на результат работ преобладающее влияние начинает оказывать коэффициент изоляции, а не объем закачки. При закачке более 12-15 м<sup>3</sup>/м изоляционного материала динамика изменения скрин-фактора замедляется независимо от коэффициента изоляции тампонажного материала.

**В третьей главе** с использованием гидродинамической модели проведена оценка влияния отключения интервалов пластов на ожидаемое изменение дебита жидкости и нефти. В качестве объекта исследования рассматривались терригенные отложения пашийского и кыновского горизонтов. В качестве примера рассмотрена скважина, эксплуатирующая однородный пласт толщиной 6,5 м с текущей обводненностью более 98%. По результатам проведенных исследований нижняя часть пласта промыта закачиваемой водой, в кровле пласта остались извлекаемые запасы. На рисунке 8 представлен профиль притока скважины с гидродинамической модели. Согласно представленной диаграммы, в интервале 1459-1462 м поступление нефти из пласта не наблюдается. С помощью РИР на данной скважине отсечен обводнившийся интервал.

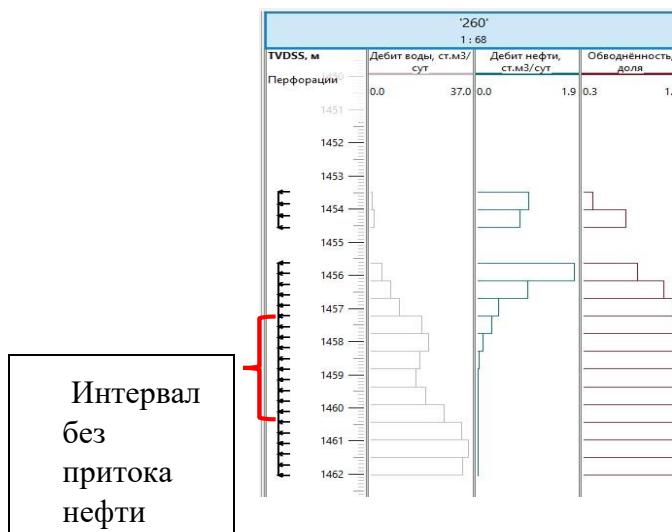


Рисунок 8 – Профиль притока скважины до РИР

На рисунке 9 представлен график показателей разработки по скважине с проведением РИР и без.

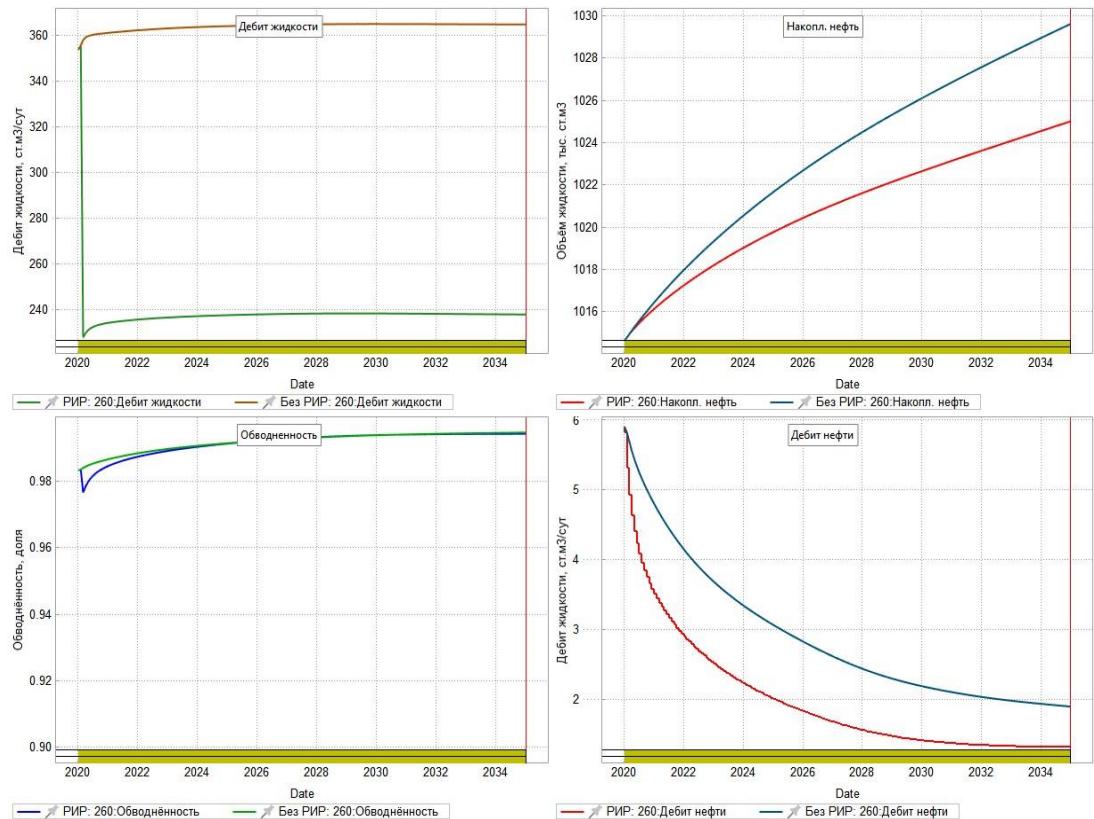


Рисунок 9 – Динамика показателей разработки

Как видно из графика, на скважине значительно снизился дебит жидкости, что объясняется сокращением интервала перфорации, при этом долгосрочного снижения обводненности не наблюдается. Накопленная добыча нефти при этом снизилась. Для анализа

причин незначительного снижения обводненности после отключения обводнившегося интервала рассмотрены профили притока при базовом расчете (без РИР) и расчете с РИР (рисунок 10).

После отключения обводнившего участка перфорации, в интервале 1456-1459 м выросла обводненность, что связано с подтягиванием воды с нижней части однородного пласта. При этом из-за сокращения мощности вскрытого интервала снизилась продуктивность скважины. Возможно предположить, что в однородных пластах, подошвенная часть которых промыта закачиваемой водой отключение нижних обводнившихся интервалов не дает значимого эффекта в связи с быстрым подтягиванием конуса воды к верхней части интервала перфорации. При движении водяной фазы в части пласта, не вскрытой перфорацией, происходит изменение потоков и направление их вверх. Чем больше расстояние от нижних дыр перфорации до воды, тем выше происходит поднятие конуса. Данный эффект может снизить конечную нефтеотдачу. При моделировании объектов с подошвенной водой оценивали влияние размера ячеек на время подтягивание конуса воды к верхней части интервала перфорации. Серия расчётов с измельчением сетки в районе скважины в 5-25 раз показали, что размер ячеек не оказывает существенного влияния время подтягивание конуса воды к верхней части интервала перфорации.

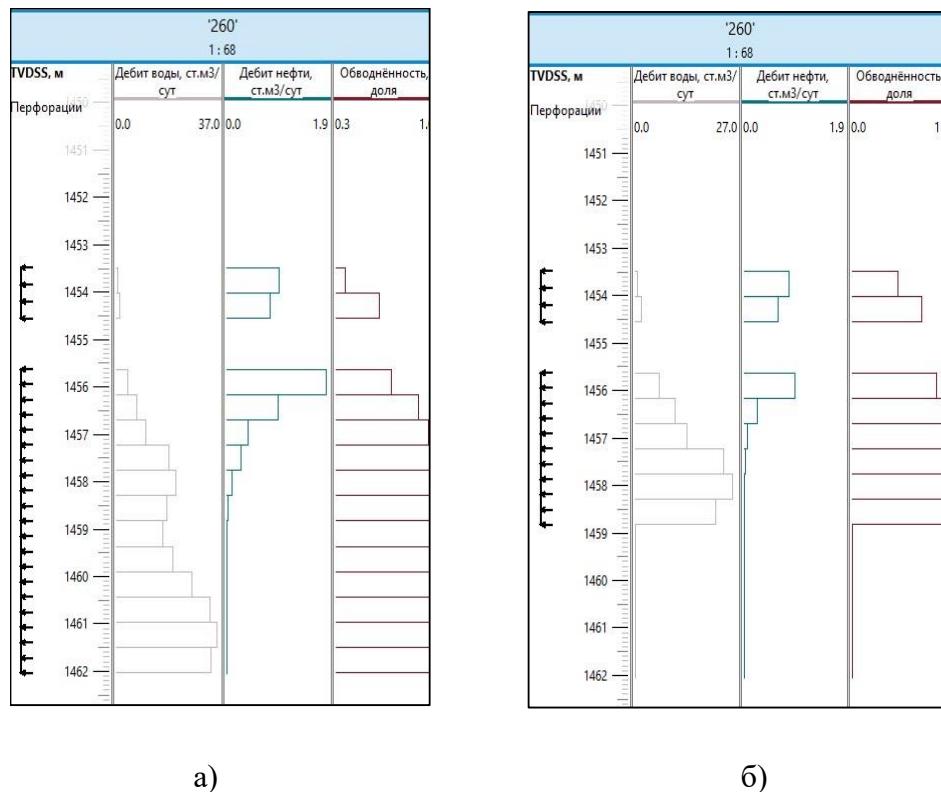


Рисунок 10 – Профиль притока скважин с проведением РИР (б) и без (а)

Таким образом, эффективность отключения нижней части однородного, промытого закачиваемой водой пласта, может быть низкой в связи со снижением продуктивности и подтягиванием конуса обводнения. Однако, даже в подобных случаях, проведение водоизоляционных работ способствует увеличению срока рентабельной добычи за счет снижения объема добываемой воды. Для более полной выработки подобных участков возможно рассмотреть бурение горизонтальных скважин в кровлю пласта, либо зарезку бокового горизонтального ствола.

**В четвертой главе** с использованием программы «Изыскание» (программный продукт для ЭВМ) проведено выявление факторов повышения эффективности изоляционных работ. Данное программное обеспечение позволило провести анализ результатов работ на 261 скважинах с карбонатными коллекторами.

В работе рассматриваются результаты ВИР с применением трех технологий, которые далее по тексту будем указывать как Тип «А», Тип «Б» и Тип «В». Методика заключается в выделении двух объектов группы А и группы В, которые связаны между собой какой-либо общей характеристикой, параметром (эксплуатационной, геолого-технологической). Если при разделении (дифференциации) двух объектов рассматриваемый признак отличается, то можно считать его информативным, и наоборот, при дифференциации двух объектов по одному признаку полученные данные имеют схожие граничные значения – неинформативными. Анализ производился по таким критериям, как прирост нефти до мероприятий, проницаемость, толщина продуктивных пластов и другие. С каждым показателем формировался отдельный график, что в последующем помогало произвести анализ и аналитику подбора индивидуальной программы перед началом водоизоляционных работ для каждой конкретной скважины, на которых планируется проведение водоизоляционных работ с учетом всех положительных и отрицательных моментов. По результатам проведенных ВИР по трем разным технологиям и анализа 64 полученных графиков сопоставили группу параметров с входящими в нее переменными, которых получилось 24. На рисунке 11 изображен пример работы программного продукта. Задана переменная характеристика проницаемости. Изображен график зависимостей с объектами группы А и группы В, где по оси X даны интервалы рассматриваемой характеристики, по оси Y – сглаженная часть группы А и группы В в заданных интервалах.

Проанализировав данные по проведенным работам более, чем на 261 скважинах-кандидатах через продукт «Изыскание», установлено, что увеличение текущих значений коэффициента извлечения нефти может достигать 0,6 % и выше от достигнутых величин. Также темпы отбора аналогично повышаются от 0,3 % и более от полученных значений.

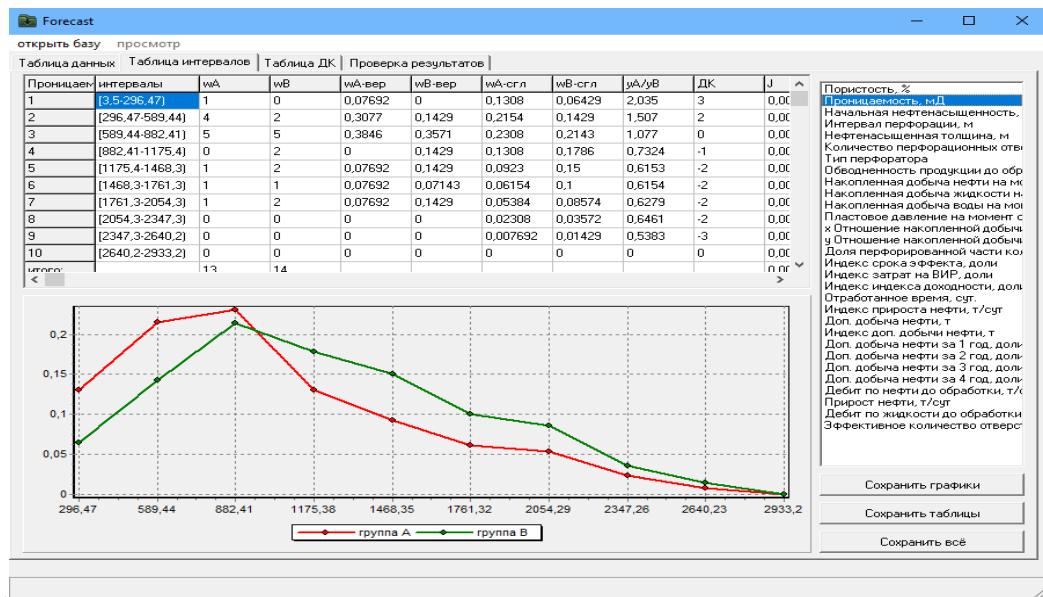


Рисунок 11 – Образец работы программного продукта на примере проницаемости

Расчеты показали, что наиболее результативный интервал от проведения мероприятия достигается при дебите скважины от 1,3 т до 7,1 т по нефти и от 77,2 м<sup>3</sup>/сут до 150 м<sup>3</sup>/сут по жидкости в зависимости от выбранной технологии. По результатам проведенных работ получена возможность прогнозирования запланированных мероприятий с возможностью анализа применения не одной технологии, а нескольких типов, еще на стадии проектирования, что в разы уменьшает риски отрицательного результата, повышает эффективность мероприятий.

Выбор правильных критериев по области применения позволяет повысить общую успешность водоизоляционных работ за счет того, что ремонты не проводятся в скважинах, в которых, согласно анализа, ожидается отрицательный результат. Таким образом, по экспертной оценке, на каждые 100 скважин будет сэкономлено 3,1 млн. рублей.

**В пятой главе** рассмотрены результаты проведенных мероприятий по повышению эффективности изоляционных работ в скважинах для условий высокой приёмистости с использованием композиций ангидрита.

Рассмотрена базовая технология, которая реализуется последовательным закачиванием силиката натрия и раствора хлористого кальция. Показано, что технология имеет недостатки:

- тампонажная масса образуется не во всем объёме;
- тампонажная масса хрупкая и имеет низкую механическую прочность.

В связи с имеющимися указанными недостатками проведена дополнительная проработка и разработан состав на основе ангидрита, тампонажная масса из которого образуется во всем объёме и имеет повышенную механическую прочность. Проведена лабораторная проверка

замедления сроков отверждения полуводного гипса с использованием нитрилотриметилфосфоновой кислоты (ХЕЛЛАН KW 1100) и лимонной кислоты. Результаты исследований составов на основе полуводного гипса с замедлителями отверждения представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты исследований тампонажных растворов на основе полуводного гипса и пресной воды с замедлителями отверждения

№	Тип замедлителя	Содержание	Водогипсовое	Сроки отверждения,	
				начало	конец
1	Лимонная кислота	0,25	1,0	130	190
2	Лимонная кислота	1,0	1,0	140	240
3	ХЕЛЛАН KW 1100	0,05	1,0	10	20
4	ХЕЛЛАН KW 1100	0,25	1,0	20	50
5	ХЕЛЛАН KW 1100	0,5	1,0	более 150	-

Как видно из результатов исследований, приведённых в таблице 6, сроки отверждения тампонажных растворов на основе полуводного гипса могут значительно продлеваться за счет использования различных типов замедлителей.

С целью исключения необходимости многократных проверок рецептур тампонажного раствора на основе полуводного гипса перед каждым применением в скважине был проработан вопрос затворения полуводного гипса на безводных жидкостях. Раствор полуводного гипса, затворённый на безводной жидкости, будет отверждаться только при контакте с водой в изолируемом интервале, поэтому необходимость контрольных проверок рецептур исключается. Результаты исследований тампонажных растворов на основе полуводного гипса и дизельного топлива (ДТ) с использованием конуса растекаемости, представлены в таблице 7 и на рисунке 12.

Таблица 7 – Результаты исследований составов на основе полуводного гипса и дизельного топлива

№ состава	Отношение ДТ/гипс	ПАВ Неоминол, мл	ПАВ Солвгель, мл	Растекаемость раствора, мм
1	2	3	4	5
1	0,41			100
2	0,78			140
3	1,0			170
4	1,1	1,05	0,3	240
5	1,3			260
6	1,5			более чем 260

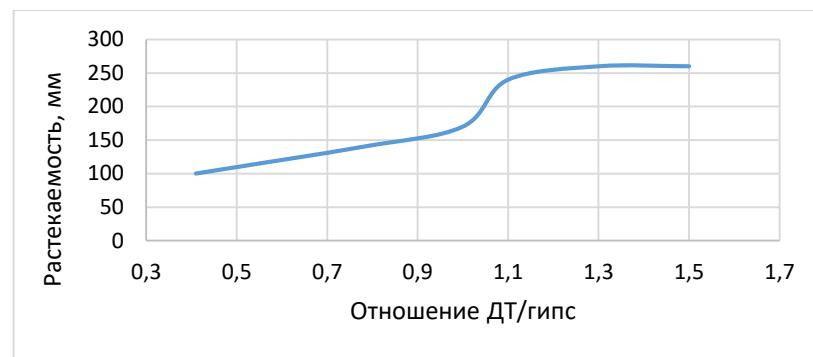


Рисунок 12 – Зависимость растекаемости от отношения ДТ/гипс

Исследования отношения ДТ/гипс проводили с целью выявления состава с растекаемостью более 180 мм, так как обычно считается, что составы с растекаемостью менее 180 мм затруднительно прокачивать насосными агрегатами, используемыми при ремонте скважин. График зависимости при отношении ДТ/гипс 1,1 и более выполняется, поэтому возможно считать, что отношение 1,1 обеспечивает получение раствора с оптимальными свойствами по прокачиваемости насосами. С учётом изложенного, для исключения необходимости многократных проверок рецептур тампонажного раствора на основе полуводного гипса, перед каждым применением, а также для повышения безопасности проведения работ, была изучена возможность использования для изоляционных работ тампонажного состава, на основе медленно твердеющего ангидритного гипсового вяжущего и воды. Ангидрит является медленно твердеющим вяжущим, которое после затворения водой постепенно переходит в двуводную форму гипса, приобретая высокую конечную прочность. В качестве медленно твердеющего гипсового вяжущего использовали молотый гипсовый ангидрит или ангидритовый цемент. При проведении исследований использовали тонкомолотый ангидрит. Результаты исследований тампонажных растворов на основе ангидритных вяжущих представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты исследований тампонажных растворов на основе ангидритовых вяжущих

№	Цемент ангидритовый, г	Ангидрит молотый, г	Вода, мл	Время загустевания, отверждения, ч-мин
1	20	-	20	Отвердел за время >7 ч и < 23 ч
2	-	20	20	Отвердел за время >24 ч и < 30 ч
3	20	-	20	Отвердел за время >7 ч и < 15 ч
4	-	20	20	Отвердел за время >26 ч и < 38 ч
5	20	-	18	Через 7 ч не текучий раствор
6	20	-	16	Через 2 ч начало отверждения, через 3 ч не текучий раствор
7	20	-	14	Через 2,5 ч начало отверждения, через 5 ч не текучий раствор
8	100	-	90	Через 7 ч не текучий раствор
9	100	-	75	Через 2 ч 40 мин не текучий раствор
10	100	-	80	Через 2 ч 40 мин не текучий раствор

Результаты исследований, приведенные в таблице 8, свидетельствуют о том, что возможно применение для тампонажных работ составов на основе ангидритовых вяжущих без дополнительного использования замедлителя отверждения.

При проведении тампонажных работ в условиях высокой приёмистости тампонажный состав должен обладать минимальным разрывом во времени начала и конца отверждения. Тампонажные растворы на основе ангидритного вяжущего могут мгновенно отверждаться в полном объёме при контакте с жидким стеклом. При отверждении образуется тампонажный камень. С точки зрения безопасности и простоты проведения работ, наиболее перспективно использование последовательной закачки оторочек силиката натрия (жидкого стекла) и суспензии ангидрита, разделенный промежуточной жидкостью. При контактировании в изолируемой зоне раствора закачиваемых реагентов произойдёт отверждение смеси ангидритного вяжущего и жидкого стекла. Пока состав будет закачиваться (в движении) отверждение происходит не будет, после попадания в изолируемый интервал и смешения компонентов произойдёт скоротечное отверждение смеси вызывающее блокирование изолируемой зоны. Данный вариант технологии был апробирован в лаборатории и промысловых условиях на скважине Х12 месторождения L.

На рисунке 13 приведена компоновка оборудования в скважине на момент проведения работ.

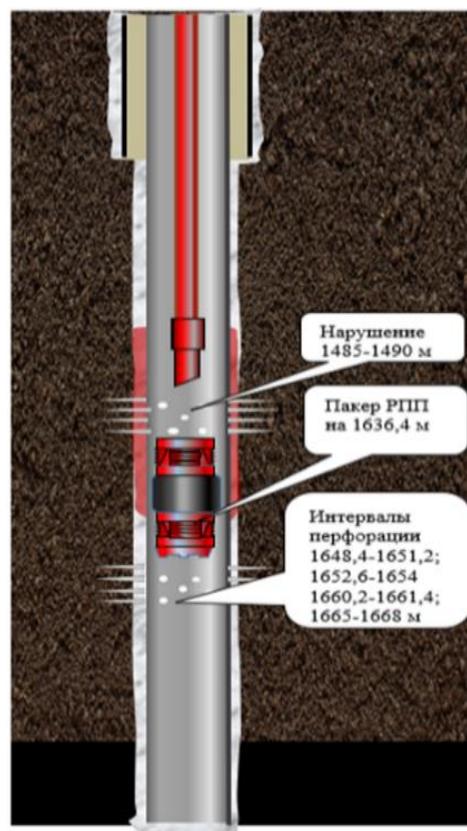


Рисунок 13 – Компоновка оборудования в скважине для проведения работ

Герметизация нарушения в скважине была проведена последовательной циклической закачкой суспензии ангидрита и жидкого стекла с закреплением цементом. По результатам испытаний после РИР эксплуатационная колонна был признана герметичной.

Далее использованный способ был усовершенствован, разработан новый способ применения тампонажной композиции на основе ангидрита для снижения поглощений. В новом способе проведена интенсификации снижения приёмистости за счет уменьшения разбавления состава буферной жидкостью и обеспечения улучшения смешения компонентов состава. С использованием данного способа проведены практические работы по герметизации нарушения последовательной циклической закачкой суспензии ангидрита и жидкого стекла без закрепления цементом. По результатам испытаний после РИР приёмистость существенно снизилась. Помимо интенсификации снижения приёмистости новый способ РИР позволяет уменьшить риск создания аварийной ситуации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили получить следующие выводы:

1. Исследования с использованием разработанной методики и гидродинамического моделирования позволили установить зависимости восстановления базового дебита нефти скважины после РИР с учетом коэффициента изоляции тампонажного материала и уменьшения влияния на снижение дебита воды объема изоляционного материала после превышения объема закачки более  $12\text{-}15 \text{ м}^3/\text{м}$ .
2. Разработана методика для расчета требуемого объема водоизоляционного состава при разработке дизайна ремонтно-изоляционных работ.
3. Создание гидродинамической модели для определения эффективности ВИР позволяет оперативно выявлять скважины с высокообводненными пластами, пропластками, моделировать различные сценарии ограничения водопритока.
4. Проведением многофакторного анализа параметров, влияющих на успешность работ по технологиям для ограничения водопритока, установлены оптимальные геолого-технические условия для планирования работ.
5. Разработан и испытан новый способ применения тампонажной композиции на основе ангидрита для снижения высокой приемистости изолируемых интервалов.

**Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах, в том числе:**

**В ведущих рецензируемых научных изданиях в соответствии с требованиями ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:**

1. Фаттахов И. Г. Разработка и подбор оптимальных рецептур тампонажного состава для проведения ремонтно-изоляционных работ / И. Г. Фаттахов, З. А. Гарифуллина, А. С. Жиркеев, А. К. Сахапова, Р. Р. Хуснудинова // Нефтяная провинция. – 2021. – № 4-2 (28). – С. 492-507.
2. Фаттахов И. Г. Эффективность разработанной методологии расчетов для дизайна ремонтно-изоляционных работ / И. Г. Фаттахов, А. С. Жиркеев, А. К. Сахапова, З. А. Гарифуллина, Р. Р. Хуснудинова, А. Р. Вафин, Р. Ф. Хуснудинов // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 3 (639). – С. 46-53.
3. Фаттахов И. Г. Анализ технологии водоизоляционных работ на основе реагентов отечественного крупнотоннажного химического производства / И. Г. Фаттахов, А. С. Жиркеев, Р. А. Ахметзянов, Р. Р. Хуснудинова // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 2 (650). – С. 35-43.
4. Хуснудинова Р. Р. Оптимизация водоизоляционных работ за счет автоматизации подбора объектов / Р. Р. Хуснудинова, А. А. Пименов, И. Г. Фаттахов // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 12 (660). – С. 50-58.
5. Хуснудинова Р. Р. Ограничение водопритока на скважинах с использованием гидродинамической модели / Р. Р. Хуснудинова, А. И. Семанова, А. С. Семанов, И. Г. Фаттахов, И. Ф. Галиуллина, Р. Ф. Хуснудинов // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 11 (659). – С. 58-64.
6. Хуснудинова Р. Р. Оценка технологической эффективности ремонта скважин / Р. Р. Хуснудинова, И. Г. Фаттахов, Р. Р. Степанова, А. С. Жиркеев, А. К. Сахапова, И. Н. Рахманов, А. А. Пименов // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 1 (661). – С. 54-57.
7. Фаттахов И. Г. Разработка мероприятий по повышению эффективности применяющихся технологий и качества тампонажных работ при ремонте скважин / И. Г. Фаттахов, А. С. Жиркеев, А. К. Сахапова, З. А. Гарифуллина, Р. Р. Хуснудинова, А. А. Пименов // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 2 (662). – С. 45-50.
8. Nurgaliev R. Z. A method for assessing the effectiveness of water isolation works based on the development of a hydrodynamic model / R. Z. Nurgaliev, I. G. Fattakhov, R. R. Khusnudinova , A. R. Vafin, A. S. Zhirkeev, A. K. Sakhapova // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 1. – Pp. 94-99.

**В монографии:**

9. Фаттахов И. Г. Комплекс мероприятий принятия решений и проведения работ по водоизоляции: монография / И. Г. Фаттахов, А. С. Жиркеев, Р. Р. Хуснутдинова. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023. – 113 с.

**В других научно-технических изданиях:**

10. Хуснутдинова Р. Р. Обзор опубликованных принципов вычислений, используемых для разработки дизайна ремонтно-изоляционных работ / Р. Р. Хуснутдинова, И. Г. Фаттахов, А. С. Жиркеев, А. К. Сахапова // Природные энергоносители и углеродные материалы & Natural energy sources and carbon materials. – 2021. – №3. – С.3-31.

11. Khusnutdinova R. Effectiveness of using a plugging composition during water shutoff works / R. Khusnutdinova, I. Fattakhov, A. Zhirkeev, A. Sakhapova // Journal of science. – 2022. – № 28. – Pp. 25-29.

12. Хуснутдинова Р. Р. Выбор оптимальной рецептуры тампонажного раствора для успешного проведения ремонтно-изоляционных работ / Р. Р. Хуснутдинова // наука и инновации – современные концепции: сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума (Москва, 25 марта 2022 г.). / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. – Москва: Инфинити, 2022. – С. 142-150.

13. Хуснутдинова Р. Р. Оценка эффективности водоизоляционных работ на примере создания гидродинамической модели / Р. Р. Хуснутдинова, И. Г. Фаттахов, А. Р. Вафин, Т. И. Муслимов // Форум молодёжной науки. – 2022. – Т. 3. – №3. – С. 10-20.

14. Фаттахов И. Г. Методология расчета для построения дизайна ремонтно-изоляционных работ / И. Г. Фаттахов, Р. Р. Хуснутдинова // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 1. – С. 319-323.

15. Хуснутдинова Р. Р. Технологические результаты водоизоляционных работ на основе реагентов отечественного производства / Р. Р. Хуснутдинова, И. Г. Фаттахов, А. С. Жиркеев, Р. А. Ахметзянов, Ван Жуйхао // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции / коллектив авторов. – Альметьевск: Изд-во АГНИ, 2022 – С. 135-140.

16. Хуснутдинова Р. Р. Применение программного продукта для оптимизации водоизоляционных работ / Р. Р. Хуснутдинова, Т. И. Муслимов, И. Г. Фаттахов // Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче: сборник тезисов Международной научно-практической конференции для студентов, молодых ученых, преподавателей, аспирантов и специалистов нефтегазовой отрасли, посвященный памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде / ред. кол. Р. Н. Бахтизин [и др.]. – Уфа: УНПЦ «Изд-во УГНТУ». – 2023. – С. 148-150.