

На правах рукописи



СИНИЦЫНА ТАТЬЯНА ИВАНОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОВТОРНОГО
СЕЛЕКТИВНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА
В СКВАЖИНАХ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ОКОНЧАНИЕМ**

Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

Научный руководитель: **Земцов Юрий Васильевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений» ФГБОУ ВО
«Тюменский индустриальный университет».

Официальные оппоненты: **Пономарева Инна Николаевна**,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Нефтегазовые технологии» ФГАОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»;

Кашапов Денис Вагизович,
кандидат технических наук, генеральный
директор ООО «Фрак Градиент».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» г. Самара.

Защита состоится «27» июня 2024 года в 15 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу:
625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском
комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте
www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «24» мая 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пономарева Татьяна Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия в нефтегазовой отрасли наблюдается наращивание объемов строительства скважин с горизонтальным окончанием, что обусловлено необходимостью увеличения степени дренирования вводимых в разработку коллекторов с ухудшенными свойствами. К 2030 году доля горизонтального бурения на месторождениях Западной Сибири прогнозируется до 70 % от общего объема строительства. При этом, учитывая низкую проницаемость большей части вводимых в разработку пластов, с целью повышения рентабельности их эксплуатации применяют селективный многостадийный гидравлический разрыв пласта (МсГРП).

В соответствии с программой стратегического развития ПАО «НК «Роснефть», утвержденной в декабре 2021 года, определено направление целевого ориентира на повышение эффективности геолого-технологических мероприятий (ГТМ). Соответственно, учитывая высокую долю скважин с горизонтальным окончанием, в настоящее время актуален вопрос повторной стимуляции методом селективных МсГРП. Но при планировании таких мероприятий необходимо, в первую очередь, обеспечить обоснованный выбор скважин-кандидатов.

Таким образом, разработка методики выбора и планирования повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием – это важная задача нефтегазовой отрасли, особенно для низкопроницаемых коллекторов.

Степень разработанности темы исследования

В результате оценки степени разработанности темы было установлено, что в настоящее время наблюдается повышение интереса к повторным селективным МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием, что привело к появлению множества публикаций отечественных и зарубежных авторов.

Подходы к планированию кандидатов для ГРП отражены в работах таких авторов, как: Телков А. П., Каневская Р. Д., Насыбуллин А. В., Султанов Ш. Х., Пономарева И. Н., Кашапов Д. В., Булыгин Д. В., Грачев С. И., Лопухов А. Н., Латифуллин Ф. М., Силич В. А., Тютяев А. В., Мулявин С. Ф., Georg Zangl,

Hongyan Guo, Wenjun Wang и другие. Проблемам технологий и эффективности проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием посвящены труды таких авторов, как: Калуджер З., Кулаков К. В., Леонтьев С. А., Смирнов К. В., Тишкевич С. В., Торопов К. В., Цивелев К. В., Зейгман Ю. В., Шарафутдинов Э. М., Янин А. Н., Gregory Kubala и других.

В работе показано, что авторы не рассматривают характеристики проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием, не описывают подходы к этапному планированию кандидатов и определению прогнозных технико-экономических показателей. В основном, эти исследования охватывают технологические принципы проведения повторных МсГРП, не учитывая особенности разработки месторождений и их геологические характеристики.

Цель диссертационной работы – разработка методики пошагового планирования повторных селективных МсГРП, позволяющей обоснованно выбрать потенциальных кандидатов из общего количества скважин с горизонтальным окончанием.

Основные задачи исследования

1. Оценить влияние геолого-технологических параметров на прирост дебита нефти после ГРП в низкопроницаемом коллекторе и установить характеристики выбора скважин с горизонтальным окончанием для проведения повторных селективных МсГРП.

2. Установить значимость характеристик выбора скважин по степени их влияния на прирост дебита нефти при проведении ГТМ.

3. Обосновать комплекс характеристик, позволяющий ранжировать скважины с горизонтальным окончанием для проведения повторных селективных гидроразрывов с использованием методов и средств информационных технологий.

4. Разработать методику пошагового планирования кандидатов МсГРП с фиксированными этапами работ и с помощью методики выделить приоритетные скважины для реализации ГТМ.

Объектом исследования являются скважины с горизонтальным окончанием, введенные в работу с первичными селективными МсГРП на пласт ВК1-3 Каменной площади Красноленинского месторождения.

Предметом исследования являются повторные селективные МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием.

Научная новизна работы

1. Установлен комплекс характеристик выбора скважин с горизонтальным окончанием, являющийся основой ранжирования кандидатов для МсГРП: пластовое давление, продвижение фронта закачиваемой воды, расстояние от подошвы перфорации до водонефтяного контакта, текущие извлекаемые запасы, снижение коэффициента продуктивности, срок эксплуатации, тип заканчивания, количество не стимулированных трещиной ГРП интервалов, удельная масса пропанта при первичном МсГРП и азимутальное направление ствола.

2. Разработан метод обоснования весового вклада характеристик по степени их влияния на прирост дебита нефти при проведении повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием, построенный на системном анализе данных по реализованным ГРП.

3. Обоснован метод определения численного значения потенциала скважины для проведения гидроразрывов, интегрирующего в себе комплекс характеристик и их весовой вклад.

4. Разработана методика пошагового выбора потенциальных скважин-кандидатов для проведения ГТМ с последовательным выполнением статистического прогноза, машинного обучения, геолого-промыслового анализа и трехмерного гидродинамического моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Доказано, что готовность скважины к проведению повторных селективных МсГРП определяется комплексом составляющих характеристик с учетом степени влияния геолого-технологических параметров на прирост дебита нефти после ГРП.

2. Разработанный метод ранжирования скважин дает возможность

мотивированно и оперативно выбирать потенциальных кандидатов для реализации МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием.

3. Методика пошагового планирования, включающая отдельные элементы наиболее значимых существующих подходов к прогнозированию ГТМ, позволяет получить интегральную оценку всех скважин с горизонтальным окончанием нефтяного месторождения для реализации повторного селективного МсГРП.

Методология и методы исследования

Поставленные задачи в диссертационной работе решены с использованием методов и средств информационных технологий, системного анализа, теории нечетких множеств, геолого-промыслового анализа скважинных данных и трехмерного гидродинамического моделирования разработки изучаемого нефтяного объекта.

Положения, выносимые на защиту

1. Обобщённая характеристика скважин для повторного селективного МсГРП определяется численным значением комплекса отдельных геологических и технологических параметров.

2. Параметры, полученные с учетом последовательного выполнения статистического прогноза, машинного обучения и геолого-промыслового анализа, являются основой трехмерного гидродинамического моделирования трещин повторных селективных гидроразрывов.

Личный вклад автора состоит в: оценке зависимостей влияния геолого-технологических параметров на прирост дебита нефти после ГРП с последующим установлением комплекса характеристик; разработке методов обоснования весового вклада характеристик по степени их влияния на прирост дебита нефти и определения комплексного коэффициента по скважинам, учитывающего весовой вклад всех влияющих характеристик; формировании методики пошагового планирования ГТМ; промышленной апробации результатов исследования.

Сбор и проверка данных по добыче и эксплуатации месторождения, подготовка статистической обучающей выборки выполнены с применением программного продукта Microsoft Excel с использованием языка программирования Visual Basic for Applications (VBA). Геолого-промысловый анализ скважинных данных выполнен с помощью программного комплекса РН-КИН. Оценка прогнозных технологических параметров добычи проведена с использованием программного обеспечения для трехмерного гидродинамического моделирования t-Navigator и РН-КИМ.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждена удовлетворительной корреляцией прогнозных приростов дебита нефти, полученных с помощью численной модели, и фактических показателей по скважинам объекта ВК1-3 Каменной площади Красноленинского месторождения, где с использованием разработанной методики реализованы повторные селективные МсГРП.

Результаты работы апробированы на следующих конференциях и семинарах: Всероссийский конкурс на лучшую научно-техническую разработку среди молодежи предприятий и организаций ТЭК «Новая идея», г. Москва, 2016 год; 19-я научно-практическая конференция «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО-Югры», г. Ханты-Мансийск, 2017 год; Форум «Нефть газ ТЭК», г. Тюмень, 2017 год; Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE, г. Москва, 2018 год; Техническая конференция SPE: «ГРП в России: опыт и перспективы», г. Калининград, 2019 год; III Международная научно-практическая конференция «Интегрированное научное сопровождение нефтегазовых активов: опыт, инновации, перспективы», г. Пермь, 2021 год; Техническая конференция Геомодель: «Горизонтальные скважины 2022», г. Сочи, 2022 год; Конференция «Наука в проектировании и разработке нефтяных месторождений-новые возможности», г. Тюмень, 2023 год; V Международная научно-практическая конференция ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Повышение эффективности сопровождения нефтегазовых активов», г. Пермь, 2023 год.

Результаты исследований прошли промышленную апробацию на 12 скважинах пласта ВК1-3 Каменной площади Красноленинского месторождения. В среднем, достигнута дополнительная добыча нефти в размере 14 тыс. тонн на операцию, что отвечает параметрам экономической успешности.

Публикации

Основные положения диссертационной работы отражены в 8 печатных работах, в том числе 5 публикаций в изданиях, входящих в перечень рекомендуемых ВАК РФ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Область исследования соответствует паспорту научной специальности

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, а именно:

– пункту 3 «Научные основы технологии воздействия на межскважинное и околоскважинное пространство и управление притоком пластовых флюидов к скважинам различных конструкций с целью повышения степени извлечения из недр и интенсификации добычи жидких и газообразных углеводородов».

– пункту 9 «Научные основы создания цифровых двойников технологических процессов, используемых в компьютерных технологиях интегрированного проектирования и системного мульти-дисциплинарного мониторинга эволюции природно-техногенных систем, создаваемых для эффективного извлечения из недр или хранения в недрах жидких и газообразных углеводородов и водорода путем управления ими с использованием методов и средств информационных технологий, включая методы оптимизации и геолого-гидродинамического моделирования».

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 19 таблиц, 63 рисунка. Состоит из введения, 4 глав, заключения, приложений А, Б. Список использованных источников включает 126 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность темы и установлена степень её разработанности, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель работы, поставлены задачи и определены методы их решения. Приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, определены основные защищаемые положения. Представлена степень достоверности исследований и апробация работы.

В первой главе работы проведено исследование существующих методов, позволяющих прогнозировать кандидаты и оценивать приросты дебитов нефти после ГТМ: статистический прогноз, машинное обучение, геолого-промысловый анализ, гидродинамическое моделирование. Изучены перечисленные методы, в результате чего выявлены основные преимущества и недостатки каждого из них, а также опыт их использования в отечественных и зарубежных нефтяных компаниях (Таблица 1).

Таблица 1– Подходы прогнозирования и оценки эффективности ГТМ

Подход	Преимущества	Недостатки
Статистический прогноз	Открытость и предсказуемость системы	Однофакторность; Невозможность прогноза без комплексирования результатов
Машинное обучение	Высокая скорость получения результата	Низкая интерпретируемость полученных результатов
Геолого-промысловый анализ	Детальный и представительный анализ по каждой скважине	Высокие трудозатраты на оценку скважин; Субъективность результата
Трехмерное гидродинамическое моделирование	Возможность комплексной оценки в условиях взаимного влияния всех скважин на процесс добычи нефти за период разработки; Учет геологических особенностей пласта	Высокие трудозатраты на оценку скважин; Высокая стоимость работ; Субъективность адаптации модели и способа моделирования

Методика выбора и планирования скважин-кандидатов для проведения повторных селективных МсГРП, предложенная в данной диссертационной работе и схематично представленная в виде блок-схемы (Рисунок 1), основана на комплексировании базовых преимуществ существующих методов, и для

рассматриваемого объекта разработки по результатам опытно-промышленных исследований признана эффективной.

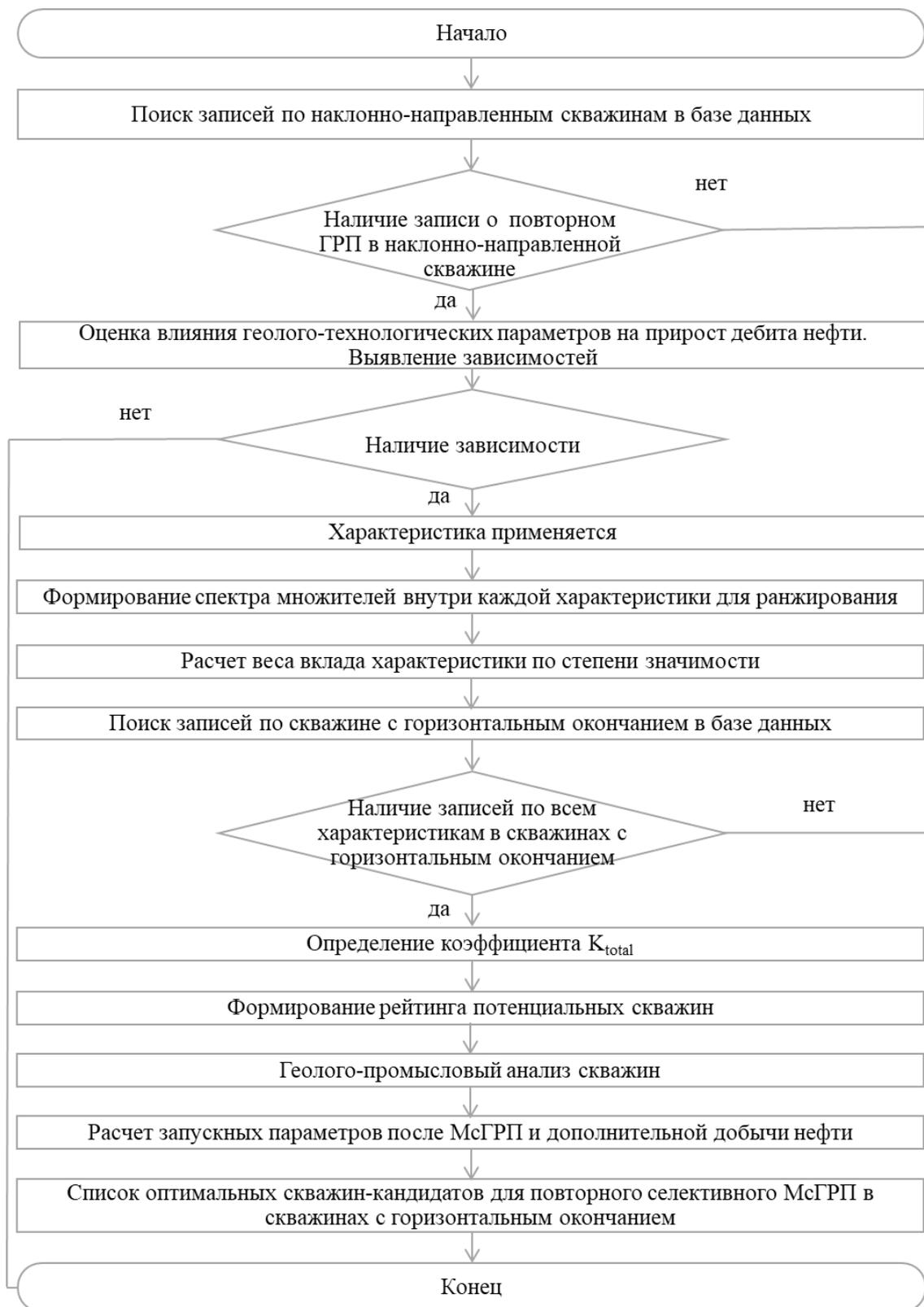


Рисунок 1 – Блок-схема выбора кандидатов для проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием

В диссертации определена последовательность этапов оперативного выбора и обоснования кандидатов для проведения гидроразрывов в скважинах с горизонтальным окончанием, основанных на базовых преимуществах частных подходов (Таблица 2).

Таблица 2 – Этапы планирования МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием

	Статистический прогноз	Машинное обучение	Геолого-промысловый анализ	Гидродинамическое моделирование
	1	2	3	4
Инструмент	Microsoft Excel	Microsoft Excel (VBA)	Программный комплекс РН-КИН	Программное обеспечение t-Navigator, РН-КИМ
Функционал	Обоснование характеристик эффективности проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием на основе статистического анализа повторных ГРП в ННС	Ранжирование кандидатов от лучших к худшим по потенциалу проведения повторного селективного МсГРП	Рассмотрение лучших адресных кандидатов и экспертная оценка состоятельности скважин для проведения повторного селективного МсГРП	Обоснование прогнозных показателей добычи по адресным скважинам, выбранным для повторного селективного МсГРП
Результат	Характеристики для проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием	Ранг скважин с горизонтальным окончанием для проведения МсГРП	Адресные скважины с сформированными планами работ МсГРП	Адресные скважины с обоснованными объемами дополнительной добычи от повторного МсГРП

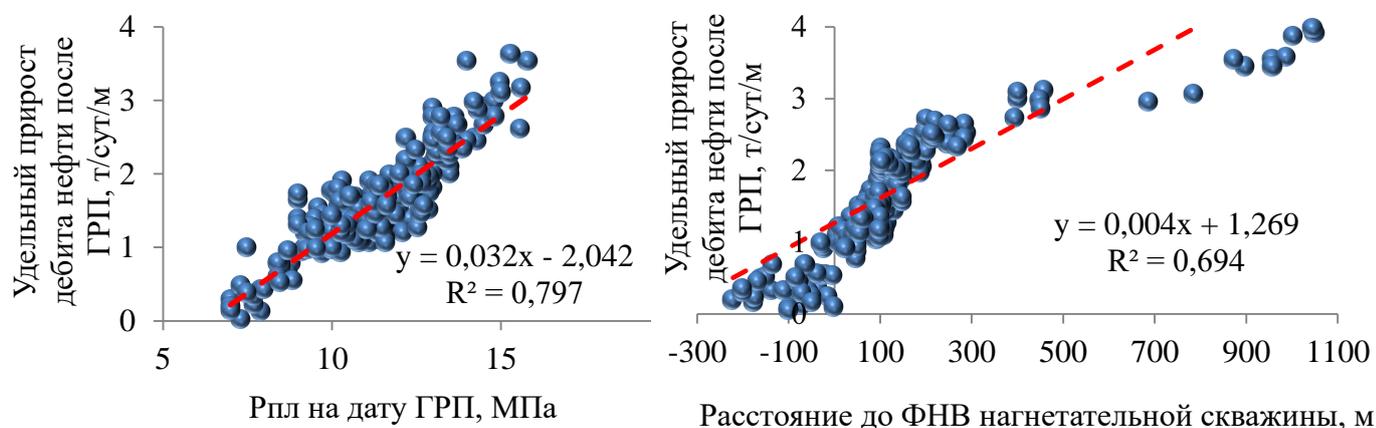
В главе выполнен статистический анализ повторных ГРП в наклонно-направленных скважинах, по результатам которого установлен комплекс из десяти значимых характеристик для проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием. Результаты ГРП в наклонно-направленных скважинах приняты за основу, так как по данным работ существует накопленная статистика – всего в анализе участвовало более 300 операций повторных ГРП.

Выборка ГРП, принятая для анализа, идентична для всех характеристик, кроме двух: расстояние до фронта воды нагнетательной скважины (не по всем зонам разработки организована система поддержания пластового давления) и расстояние от подошвы перфорации до водонефтяного контакта (зоны с подстилающей водой ограничены). С помощью методов, выделенных в первой главе диссертации, выполнен статистический анализ всей обобщенной информации, находящейся в созданной базе данных.

На основе статистических данных установлены геолого-промысловые характеристики скважин с горизонтальным окончанием для проведения повторных селективных МсГРП и принятых для дальнейшего ранжирования:

1. Пластовое давление на дату проведения ГРП (Рпл).
2. Продвижение фронта нагнетания воды ближайшей нагнетательной скважины на дату ГРП (ФНВ).
3. Расстояние от подошвы перфорации до ВНК (Расстояние до ВНК).
4. Текущие извлекаемые запасы по скважине на дату ГРП (ТИЗ).
5. Доля снижения коэффициента продуктивности (Кпрод) скважины относительно максимального.

В результате проведенных исследований получен комплекс характеристик удельного прироста дебита скважин, зависящий от вышеперечисленных параметров разработки. Установленный комплекс зависимостей позволяет определить численное значение потенциала скважин (Рисунок 2).



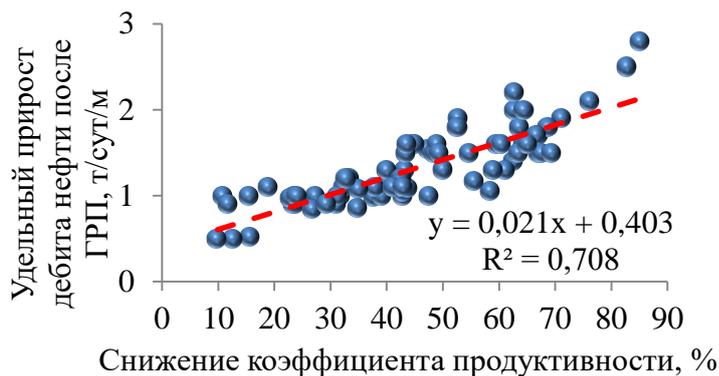
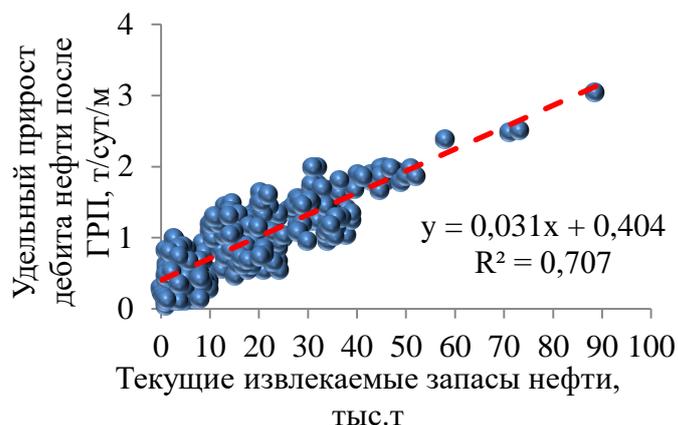
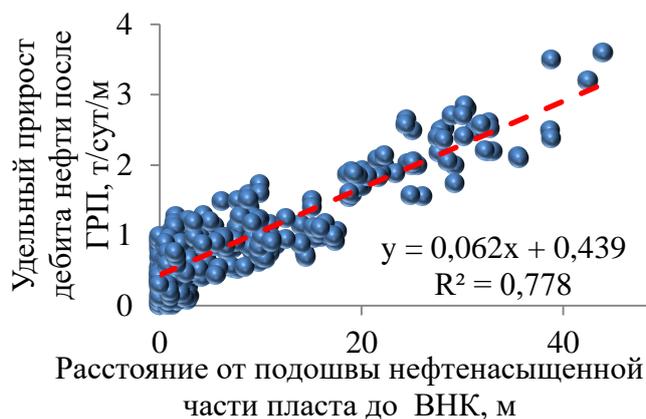


Рисунок 2 – Зависимость удельного прироста дебита нефти после ГРП от значений геолого-промысловых характеристик

Помимо приведённых выше геолого-промысловых характеристик в работе установлены также и технологические, необходимые для мотивированного выбора скважин-кандидатов для селективного повторного МсГРП:

6. Срок эксплуатации.

Исключаются скважины, введенные в добычу и работающие год и менее, так как в течение данного периода снижение $K_{\text{прод}}$ не наблюдается.

7. Тип заканчивания.

Исключаются скважины, селективный МсГРП в которых невыполним ввиду технологических ограничений (перфорированная обсадная колонна).

8. Количество не стимулированных трещиной ГРП интервалов по стволу.

Выделяются скважины с наличием не стимулированных при первичном МсГРП участков в приоритет, так как данные интервалы пласта характеризуются наименьшей выработкой запасов нефти.

9. Удельная масса проппанта, закачанного в каждую стадию.

Исключаются скважины с максимальным объемом проппанта на стадию при первичном МсГРП ввиду наличия выраженной зависимости роста запускной

обводненности продукции от объема проппанта.

10. Азимутальное направление горизонтального ствола.

Выделяются в приоритет скважины, азимутально-ориентированные перпендикулярно направлению максимального напряжения горных пород, так как трещины МсГРП в таких скважинах не интерферируют.

Таким образом, установлен комплекс из десяти характеристик выбора скважин с горизонтальным окончанием для проведения повторных селективных МсГРП. При этом зависимости формируются с учетом экспертных знаний инженера, принимающего решение, и поэтому являются открытыми и обоснованными. Важно добавить, что количество и состав критериев может меняться в зависимости от геолого-технического комплекса исследуемого объекта. Актуализация исходных данных и зависимостей, а соответственно и функций, производится с той периодичностью, с которой обновляется геолого-промысловая информация по месторождению.

С учетом выделенных характеристик создан инструмент ранжирования скважин, использование которого позволяет обосновать перспективные кандидаты для повторного селективного МсГРП. На данном этапе решена задача многокритериальности выбора при наличии ряда характеристик, влияющих на выбор оптимальной для МсГРП скважины, при этом с разной степенью влияния. Для этого сформирован спектр множителей, с помощью которого формируется интерполированная шкала, соответствующая абсолютным значениям характеристик по скважинам на дату создания рейтинга.

В процедуре алгоритма обоснован комплексный коэффициент (K_{total}), который учитывает вклад всех влияющих характеристик и является численным показателем потенциальной эффективности планируемых МсГРП адресно по всем скважинам (Формулы 1-2).

$$S_i = k_1 * w_1 + k_2 * w_2 + \dots + k_3 * w_3, \quad (1)$$

$$K_{total\ i} = (S_i - S_{min}) / (S_{max} - S_{min}), \quad (2)$$

где S_i – сумма произведений множителей и весов; k_i – множитель; i – порядковый номер скважины в базе ГТМ; w_i – вес характеристики (задается равным 1 при оценке фактически выполненных ГРП).

Определение K_{total} и его составляющих производится в автоматическом режиме с учетом динамики обновления геолого-промысловых данных по скважинам. Спектр множителей формируется в соответствии с уравнениями зависимости, полученными выше (Таблица 3).

Таблица 3 – Распределение множителей и весовых вкладов по характеристикам

Характеристика	min	Интерполяция согласно функциям зависимости									max	Вес
		8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Рпл, МПа	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1,2	
Множитель, д.ед.	0,06	0,17	0,27	0,38	0,48	0,58	0,69	0,79	0,90	1,00		
Уд. прирост қн, т/сут/м	0,20	0,52	0,84	1,16	1,48	1,80	2,12	2,44	2,76	3,08		
Расстояние до ФНВ, м	-350	-200	-50	100	250	400	550	700	850	1000	1,5	
Множитель, д.ед.	0,01	0,12	0,23	0,34	0,45	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00		
Уд. прирост қн, т/сут/м	0,04	0,57	1,09	1,62	2,14	2,67	3,19	3,72	4,24	4,77		
Расстояние до ВНК, м	0,1	0,5	1	3	6	9	10	20	30	40	0,9	
Множитель, д.ед.	0,15	0,16	0,17	0,21	0,28	0,34	0,36	0,58	0,79	1,00		
Уд. прирост қн, т/сут/м	0,45	0,47	0,50	0,63	0,81	1,00	1,06	1,68	2,30	2,92		
ТИЗ, тыс.т	0,1	1	10	20	30	40	50	60	70	80	1,8	
Множитель, д.ед.	0,14	0,15	0,25	0,36	0,46	0,57	0,68	0,79	0,89	1,00		
Уд. прирост қн, т/сут/м	0,41	0,44	0,71	1,02	1,33	1,64	1,95	2,26	2,57	2,88		
Снижение Кпрод, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	0,8	
Множитель, д.ед.	0,25	0,33	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00		
Уд. прирост қн, т/сут/м	0,61	0,81	1,01	1,22	1,42	1,62	1,82	2,03	2,23	2,43		
Срок эксплуатации, лет	1	2	3	4	5	10	15				1,0	
Множитель, д.ед.	0,00	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,00					
Уд. масса проппанта,	0,3	0,5	0,7	1	1,2	1,4	1,5				1,0	
Множитель, д.ед.	1,00	0,90	0,70	0,50	0,30	0,10	0,00					
Заканчивание, тип	Перф. обсадная колонна		Система, активируем ая шарами		Система с разрывным и муфтами		Неперф. обсадная колонна				1,0	
Множитель, д.ед.	0,00		0,50		0,90		1,00					
Кол-во пропущенных интервалов, ед	0	1	2	3						1,0		
Множитель, д.ед.	0,70	0,80	0,90	1,00								
Ориентация ствола относительного максимального регионального стресса	Параллельно			Перпендикулярно						1,0		
Множитель, д.ед.	0,70			1,00								

В работе выполнено обоснование весовых вкладов характеристик по степени влияния на прирост дебита нефти. Значимость характеристик определяется с учетом статистического анализа реализованных ГРП в ННС с предварительной оценкой K_{total} . Подбор весовых вкладов осуществляется на тестовой выборке заданной функцией автоматически, до тех пор, пока не

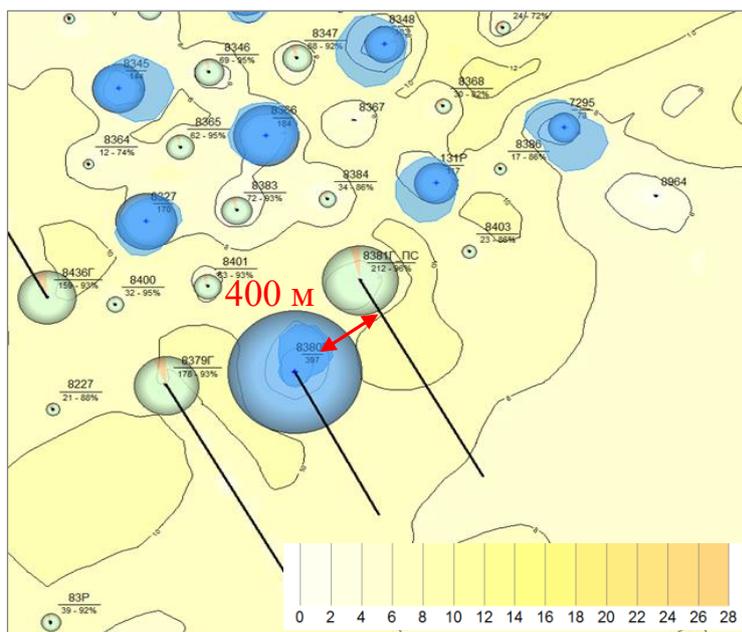
получится растущий график зависимости удельного прироста дебита нефти от K_{total} , а распределение скважин по количеству в группе будет нормальным.

Корректное определение степени значимости характеристик дает возможность формировать рейтинг кандидатов для МсГРП. Высшие в рейтинге скважины рассматриваются в следующем этапе исследования.

Таким образом, в первой главе диссертации научно обоснованы характеристики, а также их значимость по степени влияния в комплексном коэффициенте, на основе расчета которого проводится последующее ранжирование скважин от лучших к худшим с точки зрения планирования ГТМ и прироста дебита нефти после интенсификации. Преимуществом использования данного подхода является получение мотивированного и оперативного результата, в данном случае, рейтинга кандидатов. Целесообразно отметить, что шаг множителей и вес каждой характеристики может меняться в зависимости от геолого-технического комплекса исследуемого объекта.

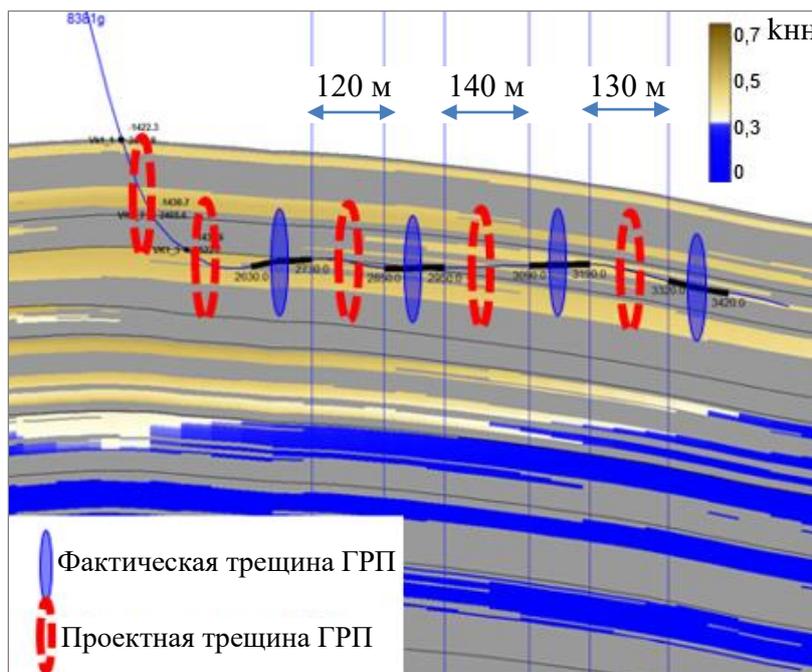
Во второй главе обоснован выбор интервалов горизонтального ствола для проведения МсГРП методом геолого-промыслового анализа участка разработки по адресным кандидатам. С помощью программного комплекса РН-КИН проведены систематизация и изучение результатов геолого-промыслового контроля за разработкой в районах работ.

Сформирован и учтен комплекс условий для анализа: удовлетворительное техническое состояние горизонтального участка ствола скважины и заколонного пространства (в случае зацементированного ствола); наличие актуальных гидродинамических и промыслово-геофизических исследований; взаимовлияние добывающих и нагнетательных скважин в районе прогнозируемых работ; оценка интерференции запасов нефти; тип системы заканчивания и технологическая возможность выполнения ГРП. Пример геолого-промыслового анализа приведен по скважине №1 (Рисунки 3-4). Кандидаты без ограничений для проведения МсГРП подлежат оценке потенциального объема дополнительной добычи нефти по результатам трехмерного гидродинамического моделирования.



$R_{пл} = 14 \text{ МПа}$
 ТИЗ=30 тыс. тонн
 Кпрод снизился на 80% за 10 лет эксплуатации
 Удельная масса пропанта при первичном
 $M_{сГРП} = 0,3 \text{ т/стад/м}$
 (пропущенных интервалов нет)
 Заканчивание — не перфорированная обсадная колонна, зацементированная
 Скважина ориентирована вдоль регионального стресса

Рисунок 3 – Карта совмещенная: остаточных нефтенасыщенных толщин; фронтов нагнетания; текущих отборов



Реализовано при первичном $M_{сГРП}$ 4 стадии. Запланировано 5 стадий повторного селективного $M_{сГРП}$ в интервалах между существующими трещинами.
 Расстояние до ВНК 20 м.
 В наличии актуальные результаты ГДИС и ПГИ.
 Скважина технологически готова к проведению $M_{сГРП}$.

Рисунок 4 – Геологический разрез по профилю скважины

Предпочтительность использования геолого-промыслового анализа заключается в его детальности по адресным скважинам и их оценка специалистом, то есть своего рода проверка отбора, проведенного машиной. Важно добавить, что состав и количество условий геолого-технической оценки может меняться в зависимости от геолого-технического комплекса исследуемого объекта.

На завершающем этапе выбора скважин-кандидатов с использованием программного обеспечения t-Navigator и РН-КИМ обоснованы прогнозные дебиты нефти и жидкости адресных скважин, выбранных для проведения МсГРП, а также спрогнозированы значения дополнительной добычи нефти и жидкости с использованием адаптированной на дату ГТМ трехмерной гидродинамической модели.

Выбор интервалов новых трещин МсГРП проводится с учетом основной задачи, состоящей в увеличении площади дренирования и притока нефти из пласта. Приоритет отдается ранее не стимулированным интервалам перфорации горизонтального участка скважины. При отсутствии пропущенных интервалов первичного гидроразрыва выбираются зоны с наименьшей выработкой запасов и объемом закачанного проппанта.

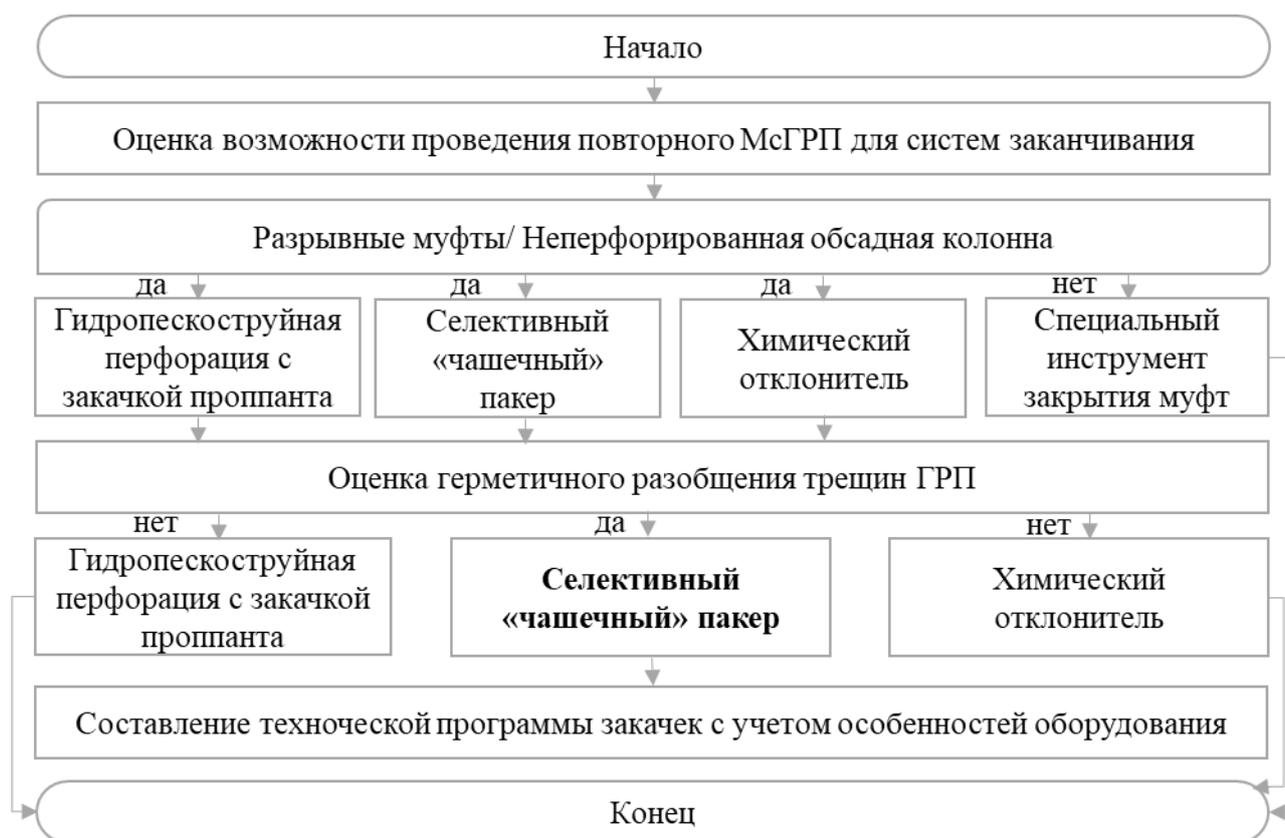
При выборе интервалов также учитываются особенности геологического строения пласта в зоне перфорации: неоднородность пласта, проницаемость прослоев, начальная нефтенасыщенность, расстояние до ВНК и технологические характеристики: расположение пакеров компоновки в скважинах с горизонтальным окончанием, угол набора кривизны ствола, что подробно освещено в диссертации.

Преимущество использования трехмерного гидродинамического моделирования на этапе оценки прогнозных параметров состоит в определении комплексного потенциала скважин на основе геологических особенностей пласта в районе трещин ГРП, а также в оценке объемов прогнозной дополнительной добычи с учетом влияния всех факторов разработки района работ.

Таким образом, во второй главе представлены основные этапы разработанной методики выбора участков горизонтального ствола скважины для селективного МсГРП, выполняемые последовательно с целью обеспечения наибольшей эффективности гидроразрывов. Кроме того, приведены результаты исследований по обоснованию прогнозных добычных параметров, выполненных с учетом влияния всех факторов в районе проведения работ.

В третьей главе исследована техническая возможность проведения повторных селективных МсГРП на скважинах с горизонтальным окончанием с учётом конструктивно-технологических особенностей систем заканчивания. Установлен комплекс параметров, с использованием которых проводится оценка применимости оборудования для реализации МсГРП: равнопроходное сечение эксплуатационной колонны; селективность интервалов перфорации; глубина спуска хвостовика; наличие заколонного разобщения; расстояние между интервалами инициации трещины ГРП; степень очистки забоя.

Так для проведения повторных селективных МсГРП на скважинах пласта ВК1-3 Каменной площади, оборудованных системами заканчивания с разрывными муфтами и неперфорированной обсадной колонной, обоснована технология с применением селективного пакера (Рисунок 5).



*где «да» - технологически применимо, «нет» - технологически не применимо

Рисунок 5 – Блок-схема выбора технологического оборудования для проведения повторного селективного МсГРП в обоснованных скважинах-кандидатах

Обоснованы релевантные технологии повторного МсГРП с применением: гидropескоструйной перфорации; селективного пакера; отклонителя; внутрискважинного оборудования для повторного открытия элементов обсадной колонны. Выявлены особенности использования способов стимуляции и последовательность технологических операций при МсГРП.

Таким образом, в данной главе обоснован подход к планированию селективных МсГРП, обусловленный типом компоновки заканчивания скважин с горизонтальным окончанием и конструктивно-технологическими особенностями оборудования для МсГРП. Доказана эффективность применения метода герметичного разобщения зон и проведения инициации трещин в запланированных интервалах.

В четвертой главе представлены результаты опытно-промышленных исследований разработанной методики пошагового планирования повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием объекта ВК1-3 Каменной площади Красноленинского месторождения.

Оценка эффективности и корректности исследований проводилась на выборке из 139 скважин. На первом этапе оценен K_{total} и скважины ранжированы по данному коэффициенту, выделены 37 кандидатов с $K_{total} \geq 0,7$ д. ед. (выборка сокращена на 73%). Далее по результатам геолого-промыслового анализа определены потенциально эффективные скважины – 20 из 37 (выборка сокращена на 46%). По потенциальным кандидатам с помощью гидродинамического моделирования запланированного количества трещин выполнена оценка прогнозных параметров дебита и дополнительной добычи нефти, выделены скважины с максимальными значениями целевой добычи нефти – 12 из 20 (выборка сокращена на 40%).

По результату апробации исследований в промышленных условиях общее сокращение выборки по месторождению составило 80%, что позволило из общего числа фонда скважин выбрать обоснованно лучшие с гарантированным приростом дополнительной добычи. Кроме мотивированного выбора, следует отметить, что к преимуществам методики относятся оперативность проводимой

оценки фонда скважин, объективность полученных результатов и предсказуемость используемого инструмента.

Во всех обоснованных по методике скважинах с применением выбранного оборудования реализованы повторные селективные МсГРП. Все стадии ГРП выполнены без технологических отклонений, получены приросты дебита и добычи нефти с приемлемой сходимостью прогнозных и фактических значений (Таблица 4), что позволяет сделать вывод о применимости и адекватности разработанной методики.

Таблица 4 – Результаты повторного селективного МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием пласта ВК1-3 Каменной площади Красноленинского месторождения

Скв №	Ktotal д.ед	Тип заканчивания	Прогнозные запускные приросты дебитов			Фактические запускные приросты дебитов			Фактическая доп. добыча Qн, тыс.т
			qn, т/сут	qж, т/сут	Обв, %	qn, т/сут	qж, т/сут	Обв, %	
1	0.79	Неперф. ОК	12,0	207,0	93,0	11,3	193,0	93,0	12,4
2	0.79	Неперф. ОК	8,2	123,0	92,0	11,7	175,0	92,0	16,6
3	0.78	Неперф. ОК	10,0	84,0	85,0	11,7	87,0	84,0	3,4
4	0.78	Неперф. ОК	17,1	72,0	68,0	15,0	93,0	74,0	4,5
5	0.77	Муфты	18,5	114,0	73,0	16,0	156,0	80,0	38,9
6	0.74	Муфты	12,0	168,0	86,0	13,9	343,0	91,0	1,6
7	0.74	Муфты	11,8	70,0	79,0	11,5	120,0	85,0	8,9
8	0.72	Муфты	7,7	79,0	84,0	7,9	81,0	84,0	24,2
9	0.71	Муфты	13,0	150,0	89,0	8,8	177,0	92,0	19,6
10	0.71	Муфты	10,0	64,0	80,0	8,8	90,0	84,0	11,3
11	0.70	Муфты	8,8	79,0	87,0	3,5	76,0	90,0	29,2
12	0.70	Муфты	8,8	147,0	91,0	15,6	206,0	90,0	9,2
Итого									167,6

Таким образом, результаты опытно-промышленных исследований свидетельствуют о том, что применение методики пошагового планирования позволяет оперативно и мотивировано выделять в общем фонде потенциально эффективные кандидаты для проведения МсГРП на основе совокупного учета комплекса характеристик и их весов, последующего геолого-промыслового анализа и оценки добычного потенциала с помощью трехмерной гидродинамической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены характеристики выбора скважин с горизонтальным окончанием, комплекс которых является основой ранжирования и выделения приоритетных кандидатов для проведения повторных селективных МсГРП.

2. Разработан метод обоснования весового вклада характеристик по степени их влияния на прирост дебита нефти при проведении гидроразрывов в скважинах с горизонтальным окончанием.

3. Создан метод обоснования комплексного коэффициента, являющегося числовым выражением потенциала скважины для проведения МсГРП и объединяющего в себе комплекс характеристик и их весов с последующим нормированием.

4. Разработана методика пошагового планирования скважин-кандидатов для проведения повторных селективных МсГРП в скважинах с горизонтальным окончанием, включающая следующие фиксированные этапы прогнозирования: статистический прогноз, машинное обучение, геолого-промысловый анализ и трехмерное гидродинамическое моделирование.

5. Разработанная методика планирования апробирована в опытно-промышленных исследованиях при повторных селективных МсГРП объекта ВК1-3 Каменной площади Красноленинского месторождения с экономическим эффектом. Результаты исследований использованы при планировании и мониторинге повторных селективных МсГРП в низкопроницаемых коллекторах месторождений: имени Малыка, Самотлорском, Соровском, Харампурском.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Опыт проведения избирательных повторных ГРП в горизонтальных скважинах на пласты викуловской свиты Каменного ЛУ Красноленинского НГКМ / Р. Д. Гафаров, Т. И. Сеницына, А. Н. Горбунов [и др.]. – Текст: непосредственный // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2019. – №4(71). – С. 67–70.

2. Опыт проведения избирательных повторных ГРП в горизонтальных скважинах на пласты викуловской свиты Каменного ЛУ Красноленинского НГКМ / Р. Д. Гафаров, Т. И. Сеницына, А. Н. Горбунов [и др.]. – Текст: непосредственный // Нефть. Газ. Новации. – 2020. – № 10(239). – С. 34-40.

3. Сеницына Т. И. Автоматизация процессов ранжирования скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий на Красноленинском НГКМ / Т. И. Сеницына, А. Н. Горбунов. – Текст: непосредственный // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – №4. – С. 116-122.

4. Сеницына Т. И. Методика автоматизированного выбора скважин-кандидатов для гидравлического разрыва пласта на месторождениях ООО «Харампурнефтегаз» / Т. И. Сеницына, А. А. Галеев. – Текст: непосредственный // Нефтяная провинция. – 2022. – №4(32). – С. 239-251.

5. Сеницына Т. И. Методика автоматизированного выбора горизонтальных скважин для проведения повторного избирательного многостадийного гидроразрыва / Т. И. Сеницына, Ю. В. Земцов. – Текст: непосредственный // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2023. – №4(97). – С. 22-27.

Публикации в других изданиях (РИНЦ), материалах конференций:

6. Комплексный подход к выбору скважин-кандидатов для ГТМ (на примере Талинского лицензионного участка Красноленинского нефтегазоконденсатного месторождения) / Т. И. Сеницына (Машканцева), А. В. Князев, А.Г. Олюнина [и др.]. – Текст: непосредственный // Научно-технический

вестник ОАО «НК» Роснефть». – 2016. – №1(42). – С. 34-37.

7. Комплексный подход к выбору скважин-кандидатов для геолого-технических мероприятий на примере Талинского лицензионного участка Красноленинского нефтегазоконденсатного месторождения / Т. И. Сеницына (Машканцева), А. В. Князев, А.Г. Олюнина [и др.]. – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов ООО «Тюменский нефтяной научный центр». – 2016. – №2. – С. 152-157.

8. Сеницына Т. И. Проведение повторных избирательных МГРП в горизонтальных скважинах на активах ПАО «НК» Роснефть» / Т. И. Сеницына. – Текст: непосредственный // В книге: Горизонтальные скважины 2022. Сборник материалов 5-й научно-практической конференции. – Москва, 2022. – С. 81-84.

Подписано в печать 25.04.2024. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 1,44.

Тираж 100 экз. Заказ № 2835.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.