

На правах рукописи



КОЧЕТКОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА
С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Альметьевск – 2024

Работа выполнена в публичном акционерном обществе «Татнефть»
им. В. Д. Шашина

Научный руководитель: - доктор технических наук, доцент
Фаттахов Ирик Галиханович

Официальные оппоненты: - **Савенок Ольга Вадимовна**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и
газовых месторождений ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II»
- **Зиновьев Алексей Михайлович**
кандидат технических наук, доцент кафедры
разработки и эксплуатации нефтяных и газовых
месторождений ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет»

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

Защита состоится 26 декабря 2024 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 72.1.021.01 в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма, ул. Джалиля, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Татарского научно-исследовательского и проектного института www.tatnipi.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.



Кабилова Алесия Хатиповна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Успешность процессов гидравлического разрыва пласта (ГРП) напрямую зависит от характеристик создаваемых трещин. Как геометрические, так и фильтрационные свойства трещины зависят не только от геологических условий залегания целевого пласта, но и от параметров обработки, определяемых на стадии проектирования. Точный прогноз характеристик трещин позволяет подобрать оптимальную технологию и соответствующие параметры обработки. Некорректный подбор параметров повышает технологические и эксплуатационные риски, что приводит к снижению или отсутствию потенциала эффективности обработок. Актуальность точного подбора параметров возрастает при выборе технологий для скважин в осложненных геолого-технических условиях.

Данные исследования направлены на повышение точности прогноза характеристик трещины ГРП с использованием предлагаемых автором подходов, в том числе математических моделей и инструментов анализа. В настоящей работе объектом исследования является техногенная трещина в терригенном коллекторе, закрепленная пропантом. Автором предлагаются способы повышения точности прогнозирования характеристик техногенных трещин, создаваемых в результате проведения процессов ГРП за счет внедрения усовершенствованных математических моделей и инструментов статистического анализа.

Степень разработанности темы

Проблемами прогнозирования параметров ГРП занималось большое количество ученых. Наибольший вклад в их решение внесли: М. Economides, R. Olini, P. Walko, K. G. Nolte, R. Alfred, J. Jennings, B. Atkinson, H. H. Abass, H. Saeed, D. L. Meadows, A. S. Abou-Sayed, R. L. Dougherty, J. A. Ayoub, J. E. Brown, R. D. Barree, J. J. Elphick, H. Mukherjee, E. Fjaer, Р. Д. Каневская, Р. Х. Гильманова, Д. В. Кашапов, С. Г. Черный. Необходимо отметить значительный вклад А. В. Насыбуллина, В. Г. Салимова, О. В. Салимова, Н. Г. Ибрагимова, Р. Р. Ибатуллина в изучение и решение прикладных задач в области ГРП, в том числе в части моделирования с целью определения прогнозных параметров техногенных трещин для условий месторождений Республики Татарстан.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование способов повышения эффективности процессов ГРП терригенных коллекторов путем уточнения прогнозирования его технологических параметров.

Для достижения указанной цели в ходе исследования решались следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели, описывающей процесс изменения концентрации пропанта в смеси жидкости разрыва при проведении ГРП.
2. Оценка влияния горно-геологических напряжений на возможность прогнозирования технологических параметров ГРП и геометрических характеристик создаваемых техногенных трещин.
3. Оценка влияния зенитного угла ствола скважины в интервале перфорации и расстояния от перфорации до забоя скважины на риск возникновения технологического осложнения при проведении ГРП, проявляющийся в превышении допустимого устьевого давления, не позволяющего разместить пропант в пласте в полном объеме (преждевременная остановка закачки).

Научная новизна

1. Создана математическая модель, описывающая изменение концентрации пропанта при проведении основного процесса ГРП для случаев линейного и нелинейного увеличения концентрации, особенность которой состоит в том, что она включает аналитическое решение определения переходной концентрации пропанта в условиях применения двух и более видов пропанта.
2. Предложена классификация факторов информативности МиниГРП, включающая методику численной оценки обобщенного влияния геологических, технических и методологических неопределенностей на интерпретацию данных МиниГРП, выраженную в доверительном интервале значений прогнозной скорости фильтрации жидкости разрыва и значения мгновенного давления остановки закачки (МДОЗ).
3. Показано, что конфигурационные параметры скважины вблизи интервала перфорации, выражающиеся зенитным углом от $12,5^\circ$ до 50° и малым расстоянием от перфорации до забоя скважины, вплоть до 0 м, позволяют проводить пропантные ГРП с общей массой пропанта более 15000 кг и концентрацией пропанта в смеси до 900 кг/м^3 при сохранении уровня риска технологического осложнения в виде преждевременной остановки закачки.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. На основе оценки влияния параметров предложена корректировка перечня осложняющих факторов для различных значений зенитного угла и расстояния от перфорации до забоя скважины.

2. Внедрение представленных методик позволило увеличить сходимость моделей при прогнозировании технологических параметров ГРП, что выражается в средних значениях, и за период 2017-2022 гг. для высоты трещины отклонение снизилось с 25 % до 14 %, для ширины – с 33,8 % до 22,7 %, для длины – с 33 % до 17 % и для проводимости – с 34 % до 23 %.

3. Разработаны учебно-методические пособия для студентов магистратуры государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Альметьевский государственный технологический университет "Высшая школа нефти" (АГТУ «ВШН»), ранее именовавшегося Альметьевский государственный нефтяной институт, касающиеся проектирования дизайна ГРП. Проведены лекционные и практические занятия для студентов магистратуры.

4. Разработано программное обеспечение для решения прикладных задач подготовки корректных входных данных, используемых в симуляторах ГРП. Семь разработанных программ для ЭВМ зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, получены свидетельства о государственной регистрации.

5. В рамках проведения опытно-промышленных работ было проведено научно-техническое сопровождение процессов ГРП, что обеспечило прирост дебита в 1,44 раза выше среднего прироста до внедрения обозначенного подхода.

6. Практическое внедрение предложенных методик закреплено в руководящих документах (РД) и стандартах ПАО «Татнефть» (СТО). РД 153-39.0-588-15 – «Инструкция по проведению гидравлического разрыва пласта в ПАО «Татнефть» и его обновленная редакция – СТО ТН 646-2021 с аналогичным наименованием, а также СТО ТН 631-2020 – «Инструкция по обеспечению и контролю качества при проведении гидроразрыва пласта и кислотного гидроразрыва пласта». СТО ТН 646-2021 и СТО ТН 631-2020 являются действующими стандартами ПАО «Татнефть» и применяются на всех НГДУ при подготовке и проведении ГРП.

Методология и методы исследований

Решение поставленных задач базируется на теоретических, экспериментальных исследованиях и промысловых данных, с предварительным анализом отечественного и зарубежного опыта по опубликованным источникам. Технологические параметры ГРП определялись при помощи программного комплекса «РН-ГРИД». Статистический анализ проводился с применением ПО «JASP», критерия Крамера-Мизеса-Смирнова, методов корреляции Спирмена, Вилкоксона-Манна-Уитни.

Основные защищаемые положения

1. Научно-техническое сопровождение ГРП позволило повысить эффективность процессов на осложняющемся фонде скважин-кандидатов в 1,44 раза при помощи внедрения подходов для уточнения прогнозных параметров.

2. Применение усовершенствованных методов статистического анализа позволило повысить точность прогнозирования условий формирования техногенных трещин ГРП в части геометрических параметров. Для высоты трещины отклонение снизилось с 25 % до 14 %, для ширины – с 33,8 % до 22,7 %, для длины – с 33 % до 17 % и для проводимости – с 34 % до 23 %.

3. Предложенная классификация факторов, осложняющих интерпретацию информационных ГРП, позволила корректно учитывать степень их влияния и, следовательно, внести вклад в повышение точности анализа.

Степень достоверности результатов

Научные положения, выводы и рекомендации подкреплены результатами анализа промысловых данных. Выявленные корреляции подтверждаются на выборках с более 2500 процессов ГРП. Расчеты проводились в лицензионном программном обеспечении, широко применяемом в производственной практике, учитывались рекомендации разработчиков соответствующего ПО.

Апробация работы

Основное содержание и результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах различного уровня:

- Международной научно-практической конференции «Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче» (г. Уфа, 2023 г., заочно);
- Всероссийском саммите по гидроразрыву пласта: вызовы и перспективы (г. Тюмень, 2023 г.);
- Научно-технической конференции «Разработка нефтяных и газовых месторождений – новые научные подходы, инновационные технологии, перспективы» (г. Бугульма, 2023 г.);
- LI Международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology» (г. Москва, 2023 г., заочно);
- Конференции Norwegian Journal of development of the International Science (г. Осло, 2023 г., заочно);
- Конференции Journal of science. Lyon (г. Лион, 2023 г., заочно);

- Конференции «Изучение опыта нефтяных и сервисных мировых компаний в области ГРП с использованием пропанта» (провинция Кханьхоа, Вьетнам, 2022 г.);
- Российской нефтегазовой технической конференции SPE (г. Москва, 2018 г.);
- Семинаре ЦСМС ПАО «Татнефть» по секции «Текущий, капитальный ремонт скважин и ПНП» (г. Альметьевск, 2016 г.).

Публикации

Основные положения диссертации отражены в 19 опубликованных работах, из них 15 – в рецензируемых научных изданиях, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад

Автор участвовал в постановке, планировании и решении задач диссертационной работы, непосредственно выполнял расчеты при проведении работ на скважинах. При непосредственном участии автора проведены промысловые испытания. Лично и в соавторстве с коллегами осуществлял подготовку к публикации статей, стандартов организации, выступал с докладами на корпоративных, всероссийских и зарубежных конференциях. Автор проводил лекционные и практические занятия для студентов магистратуры АГТУ «ВШН» (ранее АГНИ), участвовал в разработке методических пособий. Подходы, разработанные при непосредственном участии автора, применяются в производственной практике ГРП в ПАО «Татнефть».

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 119 наименований, и содержит 131 страницу машинописного текста, 40 рисунков, 18 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору технических наук, директору по повышению нефтеотдачи пластов, волновым и биотехнологиям института «ТатНИПИнефть» И. Г. Фаттахову, за особое внимание, наставления и рекомендации; доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений АГТУ «ВШН» А. В. Насыбуллину за отзывы и рекомендации по проработке публикуемых материалов; заместителю начальника департамента разработки месторождений СП «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» А. А. Лутфуллину за поддержку и определение приоритетов при внедрении новых технологий и стандартов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ изученности объекта и ранее примененных технологий, обзор новых технологий ГРП, методов моделирования ГРП и геомеханики.

Во второй главе представлены разработка усовершенствованной методики научно-технического сопровождения ГРП и построение математических моделей.

Необходимость разработки новой методики становилась всё более актуальной по мере осложнения потенциального фонда скважин для ГРП. В период с 2015 по 2016 г. с участием автора проведены опытно-промышленные работы (ОПР) по научно-техническому сопровождению процессов ГРП. В рамках данных ОПР сформирована концепция научно-технического сопровождения работ, что обеспечило прирост дебита в 1,44 раза выше среднего прироста до внедрения. научно-техническое сопровождение работ ГРП получило развитие и с 2017 г. внедрено в 100 % процессов.

В дальнейшем проведен поиск лучших решений при подборе, проектировании и проведении различных видов ГРП (кислотных, пропантных, гибридных) в карбонатных коллекторах. Дана качественная и всесторонняя оценка применяемым техническим решениям и инструментам мониторинга проведения ГРП. Опытные работы включали кислотные, пропантные и комбинированные кислотно-пропантные ГРП в ряде вариантов исполнения. Полученные зависимости приняты к использованию в симуляторах и применяются при планировании кислотных обработок с учетом влияния температуры, скорости реакции, глубины проникновения.

При планировании пропантных ГРП отмечается потребность в точности выполняемых расчетов. Одна из решаемых задач - исключение возникновения искажений в программе закачки пропантного ГРП. При сохранении корректной массы по стадиям будет нарушен линейный характер набора концентрации, рисунок 1 (а). В обратном случае будет получено некорректное распределение массы пропанта по стадиям, рисунок 1 (б).

Математически точный линейный набор концентрации возможен только в том случае, если переходная концентрация рассчитана для заданных условий. Построена математическая модель изменения концентрации пропанта при ГРП. Условие формирования линейного набора концентрации:

$$\frac{v_s}{c_2 - c_1} = const = K \quad (1)$$

где C_1, C_2 – начальная и конечная концентрация рассматриваемого отрезка плана обработки, кг/м^3 , V_s – объем смеси жидкости разрыва с пропантом, м^3 , K – коэффициент наклона линии набора концентрации.

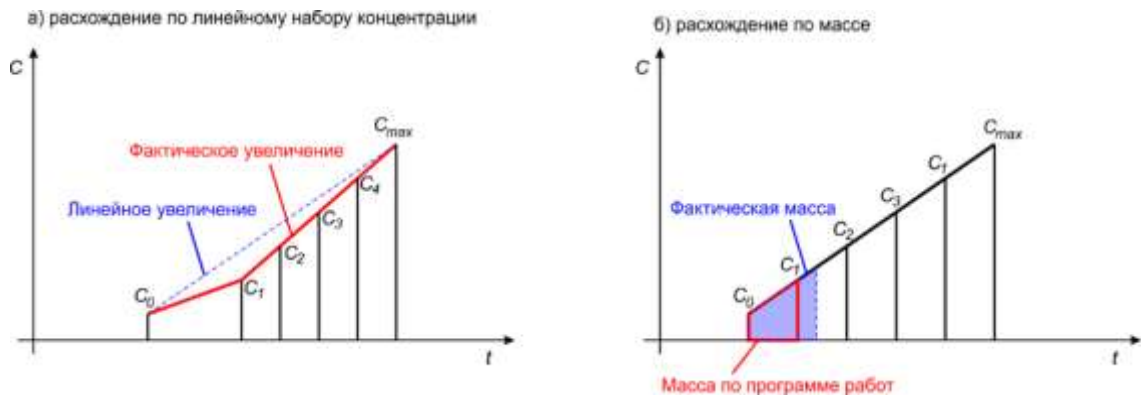


Рисунок 1 - Искажения, возникающие при сохранении шага наращения концентрации при переходе между фракциями

Для сохранения линейного набора при переходе между фракциями пропанта необходимо, для заданной массы пропанта с максимальной концентрацией C_{max} рассчитать концентрацию перехода C_a . Если представить концентрацию пропанта C как функцию от объема жидкости разрыва V , то условие линейного набора концентрации будет сохраняться при равном значении угла наклона ϕ для прямых C_0C_a и C_aC_{max} , как и на стандартных графиках с осью времени t при постоянном расходе закачки r . При этом, масса пропанта может быть представлена как площадь трапеции, ограниченной линией концентрации, проекцией на ось V и перпендикулярами начальной и конечной концентрации к проекции.

$$m = S_{\text{трапеции}} = \frac{C_1 + C_2}{2} V \quad (2)$$

где C_1, C_2 – начальная и конечная концентрация на рассматриваемом участке, кг/м^3 , V – объем чистой жидкости, м^3 .

Зная массу пропанта по фракциям, планируемую минимальную и максимальную концентрацию рассчитаем объём:

$$V = \frac{2M}{C_0 + C_{max}} \quad (3)$$

где M – общая масса пропанта всех фракций, кг , C_0, C_{max} – начальная и максимальная концентрация, кг/м^3 .

Объем смеси жидкости с пропантом:

$$V_s = \frac{2M}{C_0 + C_{max}} + \frac{M}{\rho} \quad (4)$$

где ρ – абсолютная концентрация пропанта, кг/м³.

Принимая во внимание постоянство коэффициента K в формуле (1) и применение формулы (4) для пропанта фракции №1, получена система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{V_s}{C_{max}-C_0} = \frac{V_{sa}}{C_a-C_0} \\ V_{sa} = \frac{2m_a}{C_0+C_a} + \frac{m_a}{\rho} \end{cases} \quad (5)$$

В уравнении два неизвестных: C_a и V_{sa} . В первую очередь в практических целях интересует переходная концентрация C_a . Аналитическое решение:

$$C_a = \frac{\sqrt{(C_0 m_a - C_{max} m_a)^2 - 4 \rho V_s (C_0^2 m_a - C_0^2 \rho V_s - C_0 C_{max} m_a + 2 C_0 m_a \rho - 2 C_{max} m_a \rho) - C_0 m_a + C_{max} m_a}}{2 \rho V_s} \quad (6)$$

Минимальное необходимое количество стадий, требуемых для описания закачки двух типов пропанта сводится к двум, с переходной стадией C_a . Модель позволяет рассчитать точное значение концентрации перехода. Для нелинейного набора вводится поправочный коэффициент ω , влияющий на K :

$$K'_1 = 1; K'_n = K'_{n-1} + \frac{\omega-1}{N-1} \quad (7)$$

Соответственно, объемы стадий могут быть определены по прогрессии.

$$V_{sn} = (C_n^{max} - C_n^{min}) \cdot K_n \quad (8)$$

На рисунке 2 показано нелинейное увеличение концентрации.

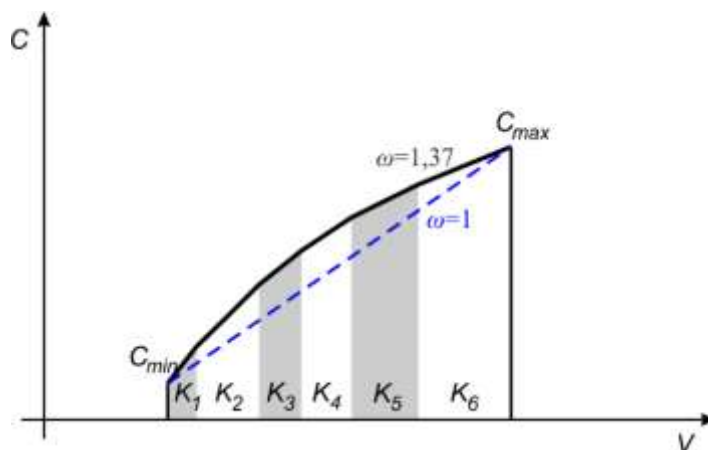


Рисунок 2 - Нелинейное увеличение концентрации пропанта

Формула расчета переходной концентрации (6) внедрена в используемые инженерами ГРП формы электронных таблиц, что позволяет применять представленный подход во всех процессах пропантных ГРП.

В третьей главе рассматривается применение методов статистического анализа при оценке условий проведения ГРП. Предлагаемый подход, включающий применение статистического анализа, позволяет повысить качество анализа, как в части подтверждения корректности факторов, так и в части численной оценки их влияния.

Статистический анализ позволяет подтвердить или опровергнуть корректность применяемых решений. В теории ГРП, описанной Экономидесом, упоминается наличие рисков, связанных с величиной зенитного угла в интервале перфорации, в котором проводится ГРП. Отмечается, что при величине, близкой к 45° , возникающие риски максимальны. На рисунке 3 схематично изображено основное предположение об источнике риска.

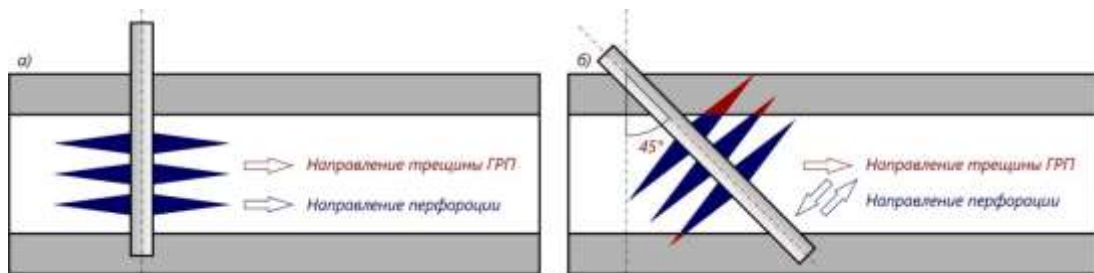


Рисунок 3 – Предполагаемый источник рисков

Для проверки гипотезы были отобраны данные о проведенных ГРП на 2527 скважинах. Исходные переменные для анализа включали зенитный угол в градусах в качестве целевой переменной, бинарную переменную *Stop*, характеризующую наличие технологических осложнений, переменные с общими потерями давления на трение, а также измеренную глубину до интервала перфорации. В таблице 1 показаны рассмотренные переменные. Для численного подтверждения характера распределения выборки проведен расчет критерия Крамера-Мизеса-Смирнова для переменной *Angle* с применением формулы:

$$(n + 1)\omega^2 = \sum_{i=1}^n \left[P(x) - \frac{i}{n+1} \right]^2 + \frac{n}{12(n+1)^2} \quad (9)$$

Где n – количество элементов выборки, i – номер элемента, $P(x)$ – проверяемая функция распределения, ω – критерий Крамера-Мизеса-Смирнова.

Для стандартно принимаемого уровня значимости $\alpha = 0,05$ граничным значением ω^2 является 0,126, в то время как для переменной *Angle* получено значение больше 40, что явным образом свидетельствует о ненормальном распределении значений переменной.

В соответствии с характером распределения переменных *Angle*, *Gr1* и *Gr2* для определения наличия или отсутствия связи возможно применение коэффициента ранговой

корреляции Спирмена. Если $d_i = x_i - y_i$ – разность рангов i -ого объекта, то коэффициент корреляции Спирмена равен:

$$r_s = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (10)$$

Таблица 1. Переменные, примененные для проведения анализа

Переменная	Единица измерения	Примечание
<i>Angle</i>	°	Целевая переменная, угол входа в пласт
<i>Stop</i>	-	Бинарная переменная, факт получения осложнения
<i>FrInj</i>	атм.	$P_k - ISIP$, общие потери давления на трения на МиниГРП
<i>FrMin</i>	атм.	$P_k - ISIP$, то же, на Замещении
<i>MD</i>	м	Длина от устья до интервала перфорации
<i>Gr1</i>	Па/м	$101325 \frac{FrInj}{MD}$, метрика по формуле
<i>Gr2</i>	Па/м	$101325 \frac{FrMin}{MD}$, метрика по формуле

Критическое значение r_{Kpum} , при превышении которого подтверждается связь переменных с учетом $\alpha=0,05$. Для пар переменных *Angle-Gr1* и *Angle-Gr2* произведен расчет r_s и r_{Kpum} . Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Корреляция Спирмена трений и зенитного угла в интервале перфорации

Стадия ГРП	r_s	α	r_{Kpum}	Интерпретация
Замещение	0,833	0,05	0,0216	Связь значима
МиниГРП	0,835	0,05	0,0215	Связь значима

Проведен также категориальный анализ, по которому определено влияние зависимости. Максимальное отличие градиента потерь давления на трения между скважинами с зенитным углом 0° - $12,5^\circ$ и $37,5^\circ$ - $52,5^\circ$ составило 1114 Па/м для замещения и 334 Па/м для информационного ГРП с пропантной пачкой. Такие значения свидетельствуют о том, что зенитный угол в интервале перфорации не оказывает влияния, достаточного для увеличения риска технологического осложнения.

Усовершенствованные методы статистического анализа применены для ряда других задач. Проведена оценка влияния факторов на точность определения параметров МиниГРП. Составлена обобщённая схема передачи данных при оценке условий проведения ГРП. Предложены метрики оценки:

$$Ef_A = \frac{\max(Ef_m; Ef_{hf}) - |Ef_m - Ef_{hf}|}{\max(Ef_m; Ef_{hf})} \quad (11)$$

$$Ef_B = \frac{Ef_{hf}}{Ef_m} \quad (12)$$

$$ISIP_A = \frac{ISIP_{hf} - |ISIP_r - ISIP_{hf}|}{ISIP_{hf}} \quad (13)$$

$$ISIP_B = \frac{ISIP_{hf}}{ISIP_r} \quad (14)$$

Где Ef_A – метрика «А» по эффективности жидкости, Ef_m – эффективность жидкости, определённая по анализу тестовой закачки, Ef_{hf} – эффективность жидкости в откалиброванной модели основного ГРП, Ef_B – метрика «В» по эффективности жидкости, $ISIP_A$ – метрика «А» по МДОЗ, $ISIP_r$ – планируемый МДОЗ основного ГРП на стадии редизайна по результатам анализа тестовой закачки, $ISIP_{hf}$ – фактический МДОЗ основного ГРП, $ISIP_B$ – метрика «В» по МДОЗ.

По результатам анализа определены зависимости, позволяющие более точно анализировать МиниГРП. Выявлены группы риска получения сниженной информативности, такие как маломощные пласты менее 7 м, малообъёмные ГРП, крайне низкие и крайне высокие напряжения. Классификация факторов, влияющих на информативность МиниГРП, представлена в таблице 3.

Таблица 3 - Классификация факторов, влияющих на информативность МиниГРП

Группа	Фактор	Возможность численного измерения влияния	Возможность исключения фактора	Мероприятия по снижению влияния
1	Планирование	–	+	Наполнение БД работ ГРП и исследований пласта.
	Проведение	–	+	Контроль качества ГРП.
2	Показания аналоговых датчиков	+	+	Контроль качества ГРП.
	Время записи данных	+	+	Согласование остановки записи с аналитической службой ГРП.
	Дополнительные каналы	+	+	Применение дополнительного оборудования.
3	Настройка системы сбора данных	–	+	Контроль качества ГРП.
	Верификация и пересчет данных	–	+	Контроль применяемых методов получения расчетных данных.
4	Неопределенности	+	–	Статистический анализ. Разработка методов. Многовариантное моделирование и сверка с фактическими данными.
	Предварительные замеры	+	+	Контроль качества лаборатории.

Усовершенствованный подход был применен для анализа близкого расположение текущего забоя к интервалу перфорации как осложняющего фактора проведения ГРП. Для оценки влияния переменной подобраны две метрики. Первая метрика – ($Propp_{needls}$), представляет массу пропанта, оставленную в стволе скважины свыше плановой недопродавки. Вторая метрика ($ISIP_{growth}$) – прирост фактического МДОЗ ГРП относительно планируемого значения. Проведение статистического анализа по аналогии с представленным позволяет исключить гипотезы, потенциально не оказывающие влияния на технологически значимые параметры ГРП. Полученный результат показывает отсутствие значимого влияния зумпфа на риски при ГРП.

В четвертой главе рассматривается построение геомеханической модели. Предложен вариант построения ограниченно-трехмерной геомеханической модели (рисунок 4).

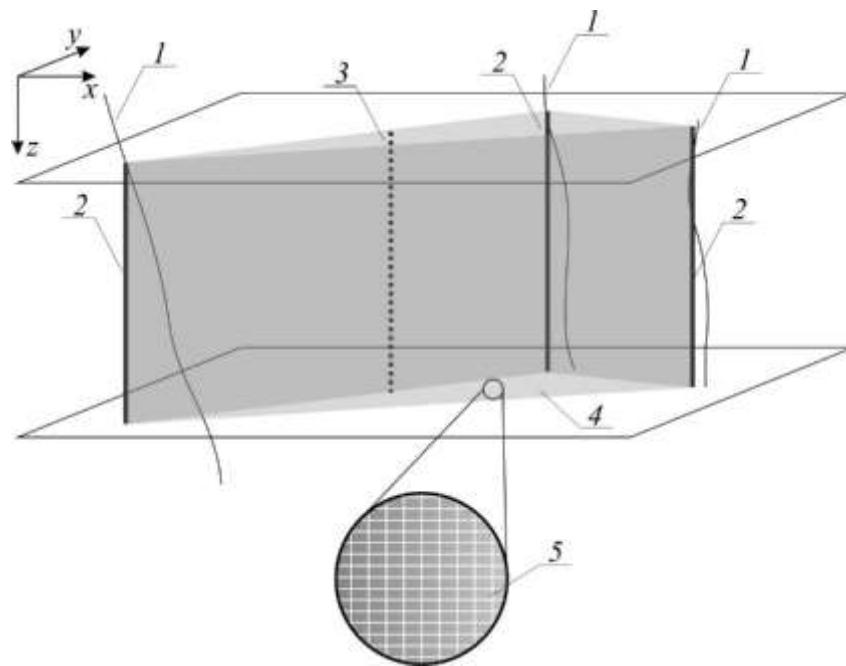


Рисунок 4. Обобщённое представление ограниченно-трехмерной модели

Ячейки в модели для двух опорных вертикальных проекций и заполняются известными данными (рисунок 5). Для заполнения ячеек границы и остальных ячеек, заполняющих плоскость, применяется алгоритм.

Основное применение ограниченно-трехмерной фильтрационно-механической (ОТФМ) модели – получение геомеханических и фильтрационных данных по новой скважине или порту горизонтального ствола. Алгоритм позволяет сформировать геомеханические и фильтрационные данные для произвольно заданной вертикальной проекции в пределах, ограниченных плоскостями ОТФМ модели, а также за пределами

плоскостей, если расстояние до ближайшей плоскости не превышает 10 % средней длины плоскости в модели.

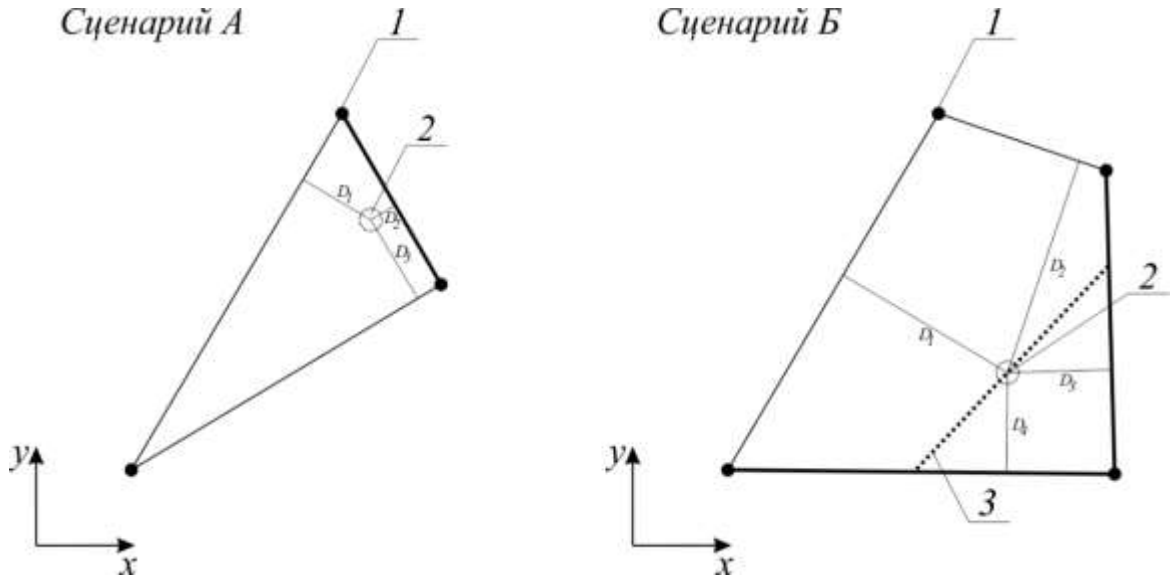


Рисунок 5. Демонстрация алгоритма для двух сценариев

В практике моделирования ГРП применяется несколько методов первичного построения и калибровки кривой минимального горизонтального напряжения. Из теории ГРП, описанной М. Экономидесом, известно:

$$\sigma_{h.min} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_V + \beta \frac{1-2\nu}{1-\nu} p_{res} + \epsilon_{tect} E \quad (15)$$

где $\sigma_{h.min}$ – минимальное горизонтальное напряжение, σ_V – вертикальное напряжение, p_{res} – поровое давление, ν – коэффициент Пуассона, β – постоянная Био, ϵ_{tect} – коэффициент влияния тектоники, E – Модуль Юнга.

Неопределенность вызывает компонента уравнения, содержащая множитель p_{res} – поровое давление. Для преобразования значений пластового давления в кривую предлагается следующая система уравнений:

$$p_{res}^h = \begin{cases} \frac{h}{h_1^f} P_{нач}, & \text{при } h < h_1^f \\ P_{нач} - \frac{h-h_1^f}{h_1^p-h_1^f} (P_{нач} - P_{тек}), & \text{при } (h > h_1^f; h < h_1^p) \\ P_{тек}, & \text{при } (h > h_1^p; h < h_2^p) \\ P_{тек} + \frac{h-h_2^f}{h_2^f-h_2^p} (P_{нач} - P_{тек}), & \text{при } (h > h_2^p; h < h_2^f) \\ \frac{h}{h_2^f} P_{нач}, & \text{при } h > h_2^f \end{cases} \quad (16)$$

где p_{res}^h - поровое давление на глубине h , $P_{нач}$ – начальное пластовое давление, $P_{тек}$ – текущее пластовое давление.

В пятой главе рассмотрено внедрение усовершенствованных подходов, которое происходило поэтапно, по мере разработки и опробования методик. В таблице 4 представлена хронология внедрения методик.

Таблица 4 – Хронология внедрения усовершенствованных методик

Год внедрения	Методика	Основной результат
2017	Научно-техническое сопровождение ГРП	Охват 100% процессов ГРП сопровождением с применением симулятора, проведением анализа. Формирование базы данных (БД), содержащей технологические параметры процесса – основа для анализа.
2018	Методика ГРП карбонатных пластов	Разработка, опробование и внедрение оптимизированного дизайна КГРП.
2018	Усовершенствованные системы деструкции геля	Внедрение жидкой формы деструктора в 100 % процессов пропантных ГРП.
2019	Геомеханическая модель высокого разрешения	Повышение точности моделирования при помощи цифровой интерпретации каротажных данных
2019	Расширенная БД	Совершенствование регистрации цифровых данных в БД, расширенная основа для анализа
2020	Усовершенствованные корреляции геомеханики	Повышение точности моделирования с учетом особенностей, выявленных при проведении комплекса работ по верификации и уточнению корреляций геомеханических свойств и данных стандартных ГИС
2021	Методика расчета КГРП при обработке расчлененных пластов	Корректное моделирование КГРП в симуляторе. Формирование отдельной расширенной базы для анализа КГРП.
2021	Переинтерпретация профиля минимального горизонтального напряжения	Повышение точности моделирования в условиях отсутствия статистических данных по объекту, для объектов ГРП, обособленных внешних проектов.
2022	Усовершенствованный статистический анализ	Повышение эффективности использования накопленных данных. Учет фактической степени влияния факторов при планировании процессов ГРП.
2023	Методика работы с факторами снижения информативности МиниГРП	Учет фактической степени влияния факторов при проведении процессов и анализе МиниГРП

Корректировки позволили уточнить прогнозирование высоты трещины, что наиболее актуально в условиях ограниченных перемычек и близкого расположения водонасыщенных зон коллектора. На рисунке 5.5 показана эволюция построения моделей в симуляторе ГРП.

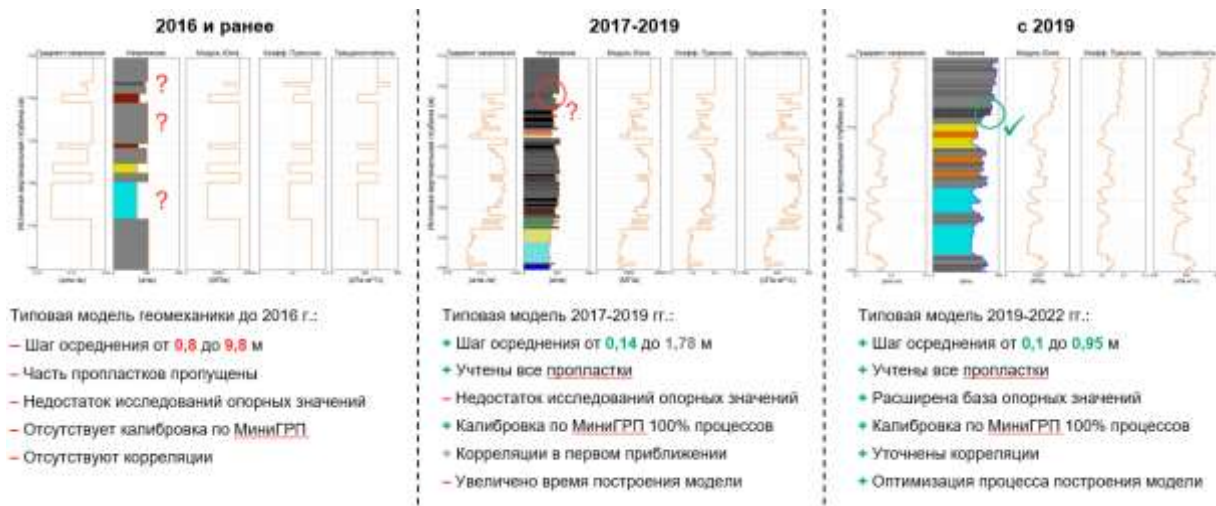


Рисунок 6 – Эволюционный подход к уточнению моделирования

Динамика отклонений по фиксируемым показателям демонстрирует эффективность внедряемых решений – применение более точных подходов к моделированию позволяет прогнозировать параметры с меньшей погрешностью. На рисунке 7 показано изменение отклонений по показателям с момента начала формирования БД.

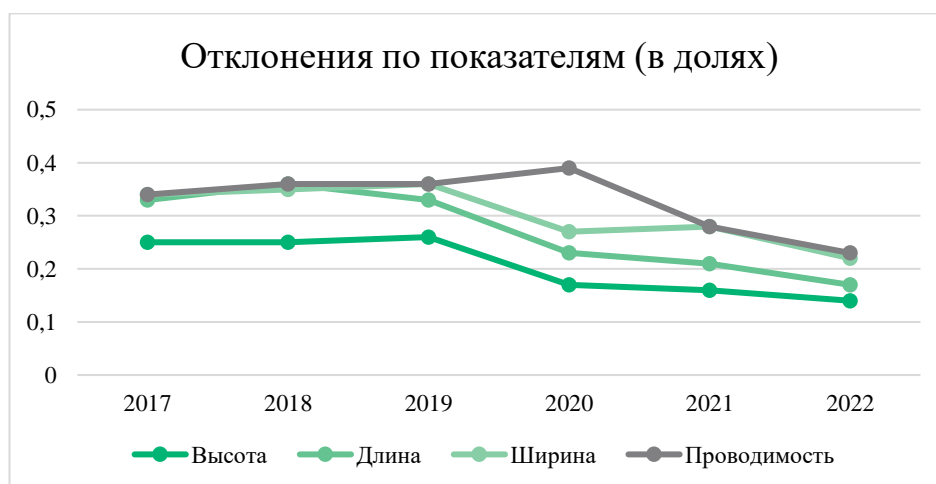


Рисунок 7 – Динамика отклонений по показателям

Анализ показывает эффективность примененных методик и включает сопоставление планируемых и фактических технологических показателей при проведении ГРП. Отмечается, что по мере внедрения методик снижаются отклонения показателей оценки качества планирования и моделирования ГРП.

Также рассмотрены низкопроницаемые объекты разработки, которые часто не могут эффективно разрабатываться без применения технологий интенсификации. На территории РТ такими объектами являются доманикоиды, относящиеся также к I группе доманиковых отложений – данковский, лебедянский, елецкий горизонты, и доманикиты, относящиеся ко II группе – мендымский, бургесский, семилукский (рисунок 8).

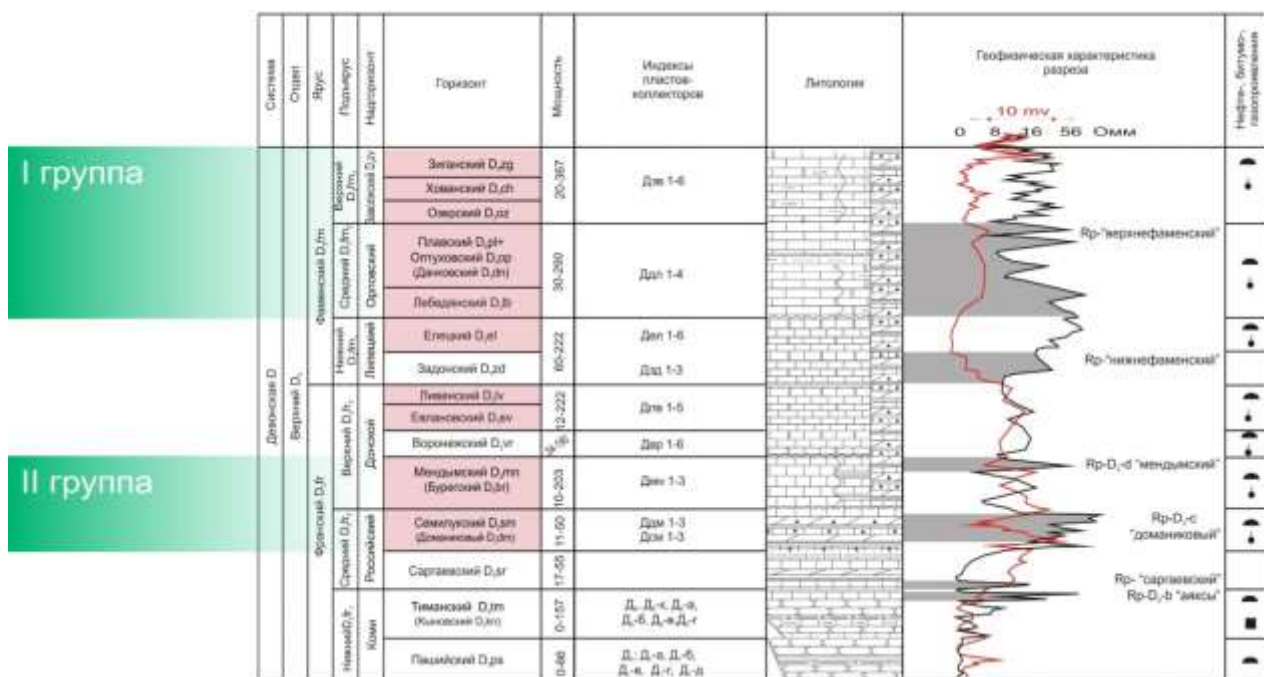


Рисунок 8 – Стратиграфия доманиковых объектов

Для различных объектов доманиковой группы применялись соответствующие технологии ГРП. В качестве примера внедрения методик выбрано проведение ГРП на Бавлинской группе активов.

Технология применялась на Заволжском и Данково-Лебедянском горизонтах и характеризуется следующими особенностями:

- Стадия Замещения включает закачку кислоты HCl 15%;
- В качестве основного компонента жидкости разрыва применяется ксантан с концентрацией 5-7 кг/м³;
- Концентрация пропанта ограничена до 600 кг/м³;
- В качестве основной фракции пропанта применяется 20/40;
- После проведения основного ГРП и смыкания трещины проводится стадия с закачкой кислоты HCl 24 %.

Применение технологии рассмотрено на примере скважины 3102 Бавлинского месторождения. Был запланирован ГРП с закачкой 7 т пропанта 20/40 с последующей кислотной стадией HCl 24 % 10 м³. Для определения плановой геометрии трещины была

построена модель ГРП. При проведении работ на скважине предварительная закачка кислоты прошла без повышения устьевого давления. После закачки кислоты провели МиниГРП. Установилось устьевое давление, позволившие определить МДОЗ и провести анализ спада давления МиниГРП. Сопоставление ожидаемых и полученных параметров анализа МиниГРП представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Сопоставление параметров МиниГРП

	Дизайн	МиниГРП
Дельта времени закрытия, мин	-	5,8
ISIP поверхность, МПа	10,4	8,1
Поверхностное давление закрытия, МПа	-	2,8
Чистое давление, МПа	1,8	5,3
Градиент напряжения, МПа/м	0,0144	0,0120
Эффективность, %	30	31
Предполагаемое давление пласта, МПа	8,5	9,3
Общие трения, МПа	-	1,6

По давлениям МиниГРП модель была откалибрована. По результатам анализа МиниГРП принято решение увеличить объем буферной стадии до 8 м³ (план 6 м³), провести закачку 6000 кг пропанта фракции 20/40. В результате, ГРП проведен технически успешно.

Заключение

По результатам работы сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработана математическая модель, описывающая изменение концентрации пропанта, в которой переходная концентрация при применении пропанта двух и более фракций определена аналитическим решением. Применение данной модели позволило повысить точность входных данных, применяемых в симуляторах ГРП.

2. Показано, что горно-геологические напряжения оказывают сложное влияние на точность прогноза технологических параметров – для терригенных девонских отложений Ромашкинского месторождения в диапазонах МДОЗ информационного ГРП ниже 9 МПа, 9-18 МПа, 18-26 МПа и более 26 МПа отмечаются разнонаправленные значимые тренды для метрик сходимости расчетных и фактических параметров.

3. Показано, что оценить влияние зенитного угла ствола скважины и расстояния от перфорации до забоя скважины на риск возникновения технологического осложнения при проведении ГРП, при котором происходит преждевременная остановка закачки, возможно при сопоставлении средних значений градента потерь давления на трения, возникающих при прохождении пропантно-жидкостной смеси по трубопроводам и внутреннему объёму

формируемой техногенной трещины. При сопоставлении данных по зенитному углу численные значения составили 1114 Па/м для замещения и 334 Па/м для информационного ГРП с пропантной пачкой, при этом средние значения для случаев с различным расстоянием от перфорации до забоя скважины не отличаются. Полученные данные позволили сделать вывод о целесообразности исключения определенных значений зенитного угла и расстояния до забоя из перечня факторов, повышающих ожидаемые технологические риски при ГРП.

4. Достигнутые результаты внедрения методик отражаются на показателях мониторинга процессов ГРП: точность планирования, сходимость прогнозируемой геометрии трещин, доля процессов с технологическими осложнениями. Сходимость выражается в средних значениях, и за период 2017 – 2022 г. для высоты трещины отклонение снизилось с 25 % до 14 %, для ширины с 33,8 % до 22,7 %, для длины с 33 % до 17 % и для проводимости с 34 % до 23 %.

5. В условиях неоднородности пластовых свойств необходимо постоянное развитие подходов моделирования и сопровождения ГРП, в том числе пополнение базы данных опорных значений и параметров, включающих геометрические характеристики создаваемых трещин. Актуальная база данных является основой для статистического анализа, позволяющего оценивать влияние технических и геологических факторов на эффективность проведенных процессов ГРП, что учитывается при принятии производственных решений.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Махмутов, И. Х. Результаты научно-технического сопровождения работ в области гидроразрыва пласта/ И. Х. Махмутов, О.В. Салимов, И.И. Гирфанов, Р.З. Зиятдинов, А.У. Мансуров, А.В. Кочетков//Георесурсы, 2017. - том 19, № 4 -с. 302-392

2. Хусаинов, Р. Ф. Развитие технологий ГРП в карбонатных коллекторах в ПАО «Татнефть». Опыт работы в проектировании, мониторинге и управлении геометрическими параметрами трещин ГРП/ Р. Ф. Хусаинов, А.В. Кочетков, Р.М. Гарифуллин, В.А. Сираздинов, Б.Г. Ганиев, А.А. Лутфуллин// SPE, 2018. - SPE-191716-18RPTC-MS

3. Алиев, М.М. Учебно-методическое пособие по проектированию и инженерному сопровождению ГРП по дисциплине «Проектирование ГРП» для магистров направления подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело» программы «Гидроразрыв пласта» очной и

заочной форм обучения/ М.М. Алиев, Р.М. Гарифуллин, А.А. Лутфуллин, Р.Ф. Хусаинов, А.В. Кочетков, З.Ф. Исмагилова// Альметьевск: АГНИ, 2020. – 69 с.

4. Fattakhov, I. G. The use of a liquid destructor with flow into the stream during the injection of the fracturing mixture/ I. G. Fattakhov, A.V. Kochetkov, I.G. Andaryanov, L.S. Kuleshova, I.F. Galiullina, A.R. Safiullina, I.R. Gizatullin//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons and Materials, ETSaP, 2020. - 12044

5. Фаттахов, И. Г. Комплексирование результатов моделирования ГРП при проведении гибридных кислотно-пропантных обработок и при одновременной инициации трещины ГРП в разделенных интервалах/И. Г. Фаттахов, Л.С. Кулешова, Р.Н. Бахтизин, В.В. Мухаметшин, А.В. Кочетков//SOCAR Proceedings Special Issue, 2021. - №2 - с. 103-111

6. Фаттахов, И. Г. Оценка рисков проведения ГРП в скважинах для ряда значений зенитного угла ствола скважины на основе статистического анализа/ И. Г. Фаттахов, А. В. Кочетков, Р. Р. Степанова, И. Ф. Галиуллина //Нефтепромысловое дело, 2022. - №2 - с. 31-36

7. Fattakhov, Irik Solution of the problem of modeling acid hydraulic fracturing with a planned technological stop during the pumping process using standard software/ Irik Fattakhov, Alexander Kochetkov, Julia Kareeva//Proceedings of STCCE: Lecture Notes in Civil Engineering, 2022. - 291с. 209-217

8. Кочетков, А. В. Математическая модель линейного и нелинейного повышения концентрации пропанта при проведении ГРП - решение для последовательной закачки ряда типов пропанта/ А. В. Кочетков, И.Г. Фаттахов, В.В. Мухаметшин, Л.С. Кулешова, Ш.Г. Мингулов//Записки горного института, 2022. - том 254 - с. 210-216

9. Фаттахов, И. Г. Переинтерпретация профиля минимального горизонтального напряжения с учетом изменения пороупругой компоненты механических напряжений пласта/ И. Г. Фаттахов, А.В. Кочетков, Р.Р. Степанова, Ф.А. Ихсанова//Нефтяная провинция, 2022. - № 3(31) - с. 79-90

10. Kochetkov, A. V. Justification for proppant concentration choice during hydraulic fracturing/ A. V. KochetkovI. G. Fattakhov, L. S. Kuleshova, R. R. Stepanova, A.R. Safiullina//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022. - 1412055

11. Кочетков, А. В. Определение и адаптация программы закачки пропантного ГРП к условиям проведения процесса/ А. В. Кочетков, И.Г. Фаттахов//Научно-издательский центр «Актуальность.РФ»: LI Международная научно-практическая конференция Advances in Science and Technology, 2023. - с. 106-108

12. Kochetkov, A. Совершенствование работы с выходными данными симулятора ГРП для случаев гибридных и многотрещинных ГРП/ A. Kochetkov, R. Khusnutdinov, I. Fattakhov//Norwegian Journal of development of the International Science, 2023. - с. 25-26
13. Кочетков, А. В. Факторы снижения информативности тестовых закачек при проведении пропантных ГРП с использованием полимерных жидкостей на водной основе/ А. В. Кочетков//Нефтяная провинция, 2023. - №2(34) -с. 191-207
14. Kochetkov, A. Short distance between the bottomhole and the perforation interval as a hindering factor for hydraulic fracturing/ A. Kochetkov/Journal of science. Lyon, №45/2023, <https://doi.org/10.5281/zenodo.8290073>
15. Кочетков, А. В. Применение статистического анализа для подтверждения и оценки степени влияния осложняющих факторов при проведении ГРП/ А. В. Кочетков, И.Г. Фаттахов//УГНТУ: Международная научно-практическая конференция «Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче», Уфа, 2023.
16. Кочетков, А. В. Расчет масштаба обработки при моделировании гидроразрыва пласта с использованием пропанта/ А. В. Кочетков//Семинар ЦСМС ПАО «Татнефть» по секции «Текущий, капитальный ремонт скважин и ПНП», Альметьевск, 2016
17. Лутфуллин, А. А. Проектирование ГРП: Методические указания по проведению практических занятий для магистров направления 21.04.01 «Нефтегазовое дело» программы подготовки «Гидроразрыв пласта»/ А.А. Лутфуллин, А.В. Кочетков// Альметьевск: АГНИ, 2019. – 41 с.
18. Кочетков А. В. Проектирование ГРП: Методические указания по проведению лабораторных занятий и организации самостоятельной работы для магистров направления 21.04.01 «Нефтегазовое дело» направленности (профиля) программы «Гидроразрыв пласта» / А. В. Кочетков, А. Т. Габдрахманов// Альметьевск: АГНИ, 2020. – 49 с.
19. Габдрахманов, А. Т. Материалы и реагенты ГРП: Методические указания по проведению практических занятий и организации самостоятельной работы для магистров направления 21.04.01 «Нефтегазовое дело» направленности (профиля) программы «Гидроразрыв пласта»/ А. Т. Габдрахманов, А. В. Кочетков// Альметьевск: АГНИ, 2021. – 39 с.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611231. Вероятность возникновения эффекта автоГРП / О. В. Салимов, Р. З. Зиятдинов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков. – Заявка №2015661977. Дата поступления 8 декабря 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28 января 2016 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611233 Расчет нагрузки при спуске (подъеме) труб в наклонной скважине / О. В. Салимов, Р. З. Зиятдинов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков. – Заявка №2015661974. Дата поступления 8 декабря 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28 января 2016 г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661801 Программа для расчета промывки скважины / О. В. Салимов, И. Х. Махмутов, Р. З. Зиятдинов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков. – Заявка №2014616208. Дата поступления 27 июня 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 ноября 2014 г.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660658 Электропрогрев призабойной зоны / О. В. Салимов, Р. З. Зиятдинов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков. – Заявка №2015617530. Дата поступления 17 августа 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 5 октября 2015 г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613284 Программа для определения коэффициента сжимаемости / О. В. Салимов, В. Г. Салимов, А. В. Кочетков. – Заявка №2015610363. Дата поступления 29 января 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 марта 2015 г.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615237 Оценка проницаемости пласта по коэффициенту продуктивности скважины / О. В. Салимов, Р. З. Зиятдинов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков. – Заявка №2016612520. Дата поступления 22 марта 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19 мая 2016 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615238 Расчет возможности ГРП при пароциклическом воздействии на залежь природных битумов неглубокого залегания / О. В. Салимов, Р. З. Зиятдинов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков. – Заявка №2016612519. Дата поступления 22 марта 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19 мая 2016 г.