

АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D070800 – Нефтегазовое дело
Джатыковым Темирланом Ермековичем

Разработка комплексной методологии проектирования, выполнения и анализа гидроразрыва пласта

Актуальность работы.

Общеизвестно, что одним из наиболее эффективных методов интенсификации добычи является гидравлический разрыв пласта, в частности проппантовый ГРП. Данный вид обработки является высокотехнологическим методом, включающий множество этапов, оборудования и материалов. Так, существует множество важных факторов, влияющих тем или иным образом на технологию проведения ГРП, например, выбор оборудования для ГРП, системы забойной компоновки, логистика и менеджмент, интегрирование ГРП в динамическую модель месторождения и другие. Основными же факторами при проектировании и выполнении ГРП, влияющими на конечную эффективность работы, выраженной в виде прироста дебита, выделяют следующие этапы

- Создание геолого-геомеханической модели в разрезе скважины для моделирования оптимальной геометрии трещины ГРП;
- Выбор материалов для проведения ГРП, а именно жидкостей ГРП и проппантов, причем, под заданные условия пластов и скважины;
- Анализ давлений при диагностических закачках для калибровки геолого-геомеханической модели, модели геометрии трещины ГРП, плана закачки, объемов жидкостей и проппантов;
- Построение графика закачки проппанта для различных пластовых условий и заданной геометрии трещины ГРП;
- Прогноз потенциального прироста дебита в зависимости от модели трещины и параметров закачки ГРП.

На сегодняшний день научным и инженерным сообществом произведено множество исследований, касающихся вышеперечисленных этапов. Повсеместно успешно закачаны миллионы тонн проппанта и жидкости, разработаны большое количество методов диагностики, моделирования, планирования и закачки ГРП. Несмотря на большое количество полученной информации в результате такого объема работ, все же существуют большое количество вопросов, создающих определенные ограничения. В частности, касательно вышеперечисленных пунктов выделяются следующие проблемы, для которых необходимо предложить решения:

- для создания геолого-геомеханической модели требуется использование большого объема данных, а именно данных по специальным керновым исследованиям на определение механических свойств горных пород, создание

регрессионных формул для выведения непрерывных данных геомеханических свойств по стволу скважины, что требует значительных ресурсов, что не всегда имеется в наличии, в том числе, частое отсутствие керна по заданной скважине; решением для данной проблемы может послужить создание альтернативной методологии создания одномерной геолого-геомеханической модели на основе имеющейся литологической колонки, откалиброванной одной диагностической закачкой;

- при выборе жидкости ГРП зачастую трудность заключается в оптимальном подборе компонентного состава, соответствующих концентраций, методах лабораторных исследований в зависимости от пластовых условий, технологии закачки ГРП, а также других факторов; систематизация данных, классификация компонентов, выделение условий и критериев, подбор системных лабораторных анализов, возможно, упростит подбор жидкостей ГРП;

- при выборе проппанта, существует значительная проблема, связанная с выносом проппанта после ГРП, что приводит к проблемам при эксплуатации скважины; в качестве решения здесь предлагается матрица и алгоритм по выбору того или иного материала для заполнения трещины;

- при анализе диагностических закачек ГРП, возникает множество неопределенностей в процессе интерпретации поведения падения давления после остановки закачки, в частности, используемая при анализе G-функция не анализируется с привязкой к литологии; использование же G-функции в привязке с литологией, возможно, позволит уточнять распластовку по литологии;

- имеющаяся на сегодняшний день методология планирования графика закачки недостаточно подходит для низкопроницаемых карбонатных пластов, находящихся под аномально высокими горными и пластовыми давлениями; решением может послужить анализ аналогичных работ и выявление параметров закачек, способствующих успешной закачке ГРП;

- существующие методы прогнозирования потенциального прироста дебита после ГРП имеют ограничения из-за множества допущений, ограниченность по литологии, точность методов относительна, требуется большое количество входных данных; систематизация же путем классификации методов, возможно, даст обобщенную методологию прогнозирования.

Поэтому создание интегрированной методологии проектирования и выполнения проппантового ГРП требует дополнительных исследований, путем комплексного подхода и оптимизации выше приводящихся факторов, влияющих на общую технологию ГРП и конечную добычу.

Цель: Создание интегрированной комплексной методологии проектирования и выполнения проппантового гидроразрыва пласта на нефтяных и газовых месторождениях с учетом состава геологии пласта, жидкости ГРП, закачиваемого проппанта, тестовых и диагностических закачек,

а также метода закачки основной проппантной массы для достижения повышения продуктивности скважин.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- Разработка метода построения одномерной геолого-геомеханической модели вдоль ствола скважины, основанного на применении каротажных данных совместно с анализом данных мини-ГРП;

- Обзор современных химических реагентов для жидкостей ГРП с последующим проведением лабораторных экспериментов по подбору жидкости ГРП с сопутствующим получением рекомендательных норм;

- Составление матрицы и соответствующего алгоритма принятия решения для выбора того или иного метода в борьбе с выносом проппанта на основе систематизации технологий заполнения трещины проппантом, применяемым материалам при закачках, оборудованию для закачки;

- Разработка способа для тестирования и исследования структурных свойств проппантных пачек методом царапания образцов спекшегося проппанта

- Изучение и анализ метода мини-ГРП, в частности, анализа и нового подхода к интерпретации G-функции для эффективной калибровки геометрии трещины, уточнения литологии пласта, определения давления закрытия трещины, эффективности жидкости ГРП;

- Разработка способа закачки проппанта для низкопроницаемых карбонатных пород при аномально высоких пластовых давлениях и напряжениях;

- Исследование и обзор методов прогнозирования увеличения дебита в результате ГРП и выявление наиболее значимых факторов.

Методика проведения исследования.

Для решения поставленных задач был использован комплекс теоретических и экспериментальных исследований, состоящий из обобщения и анализа литературных данных, анализа опыта проводимых проппантовых гидроразрывов на месторождениях западного Казахстана, а также путем проведения аналогии, моделирования, количественного и качественного наблюдения, лабораторных исследований, проведения многофакторного эксперимента, обработка данных методами математической статистики. Помимо этого применялись методы построения алгоритмов, блок-схем. Были использованы средства обработки информации на основе компьютерных программных продуктов.

Научная новизна диссертации.

1. Разработана интегрированная комплексная методология проектирования и выполнения проппантового гидроразрыва пласта на нефтяных и газовых месторождениях с учетом состава геологии пласта, жидкости ГРП, закачиваемого проппанта, тестовых и диагностических закачек, а также метода закачки основной проппантной массы для достижения повышения продуктивности скважин.

2. Разработан метод для построения одномерной геолого-геомеханической модели вдоль ствола скважины, основанного на применении каротажных данных совместно с анализом данных мини-ГРП. Создание одномерной геологической, петрофизической и геомеханической модели для моделирования гидроразрыва пласта может быть осуществлено с помощью использования минимального количества входных данных.

3. Исследованы жидкости ГРП в зависимости от пластовых условий и параметров закачки:

- Установлен комплекс лабораторных методов для тестирования жидкостей ГРП: тест на термостабильность, тест на чувствительность к сдвигу, тест на чувствительность к изменениям концентрации брейкера, тест на эффективность эмульгатора

- Подобрана оптимальная процедура подбора жидкости ГРП, удовлетворяющая трем основным задачам: выполнять требуемые технологические функции, сохранять фильтрационно-емкостные характеристики пласта, эффективно выноситься из пласта

- Исследована жидкость ГРП и подобран компонентный состав для частного случая глубокозалегающий пластов с высокой температурой выше 100 С.

4. Разработана матрица и алгоритм принятия решения для выбора того или иного метода в борьбе с выносом проппанта:

- Систематизированы четырнадцать ныне актуальных превентивных методов борьбы с выносом проппанта

- Построена таблица в качестве матрицы принятия первичного решения, которая позволяет с некоторой точностью и допущениями провести первичный скрининг для выбора метода борьбы с выносом проппанта для заданного месторождения углеводородов заблаговременно до начала работ по ГРП

- Разработан и протестирован алгоритм, позволяющий работать с матрицей принятия решений. Предложенный алгоритм может использоваться в качестве инженерного метода.

5. Разработан способ для тестирования и исследования структурных свойств проппантных пачек методом царапания образцов спекшегося проппанта

- Разработано устройство для испытания образцов проппанта на спекаемость

- Получены результаты проведения эксперимента и соответствующий анализ свойств прорезиненного проппанта, а именно его прочностные характеристики

- Установлено, что температура спекания является наиболее значимым фактором при спекании проппантной пачки, сила сжатия проппанта при спекании – второй наиболее значимый фактор, время спекания – наименее значимый из трех рассматриваемых факторов, влияющий на спекаемость проппантной пачки.

6. Исследован метод мини-ГРП, в частности, дан анализ и новый подход к интерпретации G-функции падения давления после остановки закачки ГРП

- Выявлены зависимость поведения G-функции от литологической колонки до основного момента закрытия трещины и дано соответствующее объяснение, связанное с механизмом закрытия трещины в многослойных пластах

- Показан пример применения данной методики на наблюдаемых данных многопластового месторождения углеводородов юрских отложений терригенных пород

7. Разработан способ закачки проппанта для низкопроницаемых карбонатных пород при аномально высоких пластовых давлениях и напряжениях

- Получен оптимальный график закачки основного ГРП для увеличения эффективности закачки проппанта и получения требуемой трещины

- Определена блок-схема подготовки перед закачкой основного ГРП

8. Исследованы методы прогнозирования увеличения дебита в результате ГРП и выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на потенциальный прирост, такие как проницаемость пласта, проводимость трещины, безразмерная проводимость трещины, геометрия трещины, связь трещины со скважиной.

Научные положения и результаты, вынесенные на защиту.

1. Разработанная автором новая интегрированная комплексная методология проектирования и выполнения проппантового гидроразрыва пласта на нефтяных и газовых месторождениях с учетом состава геологии пласта, жидкости ГРП, закачиваемого проппанта, тестовых и диагностических закачек, а также метода закачки основной проппантной массы для достижения повышения продуктивности скважин.

2. Принципы реализации одномерной геолого-геомеханической модели вдоль ствола скважины, основанного на применении каротажных данных совместно с анализом данных мини-ГРП.

3. Рекомендации по оптимальному подбору жидкости ГРП и соответствующие результаты лабораторных экспериментов, удовлетворяющей трем основным задачам: выполнять требуемые технологические функции, сохранять фильтрационно-емкостные характеристики пласта, эффективно выноситься из пласта.

4. Рекомендации по выбору метода борьбы с выносом проппанта на основе матрицы и алгоритма принятия решения.

5. Результаты лабораторных экспериментов для тестирования и исследования структурных свойств проппантных пачек методом царапания образцов спекшегося проппанта, а также новое устройство для проведения соответствующих лабораторных тестов.

6. Анализ и новый подход к интерпретации G-функции падения давления после остановки закачки ГРП.

7. Рекомендации по планированию закачки проппанта для низкопроницаемых карбонатных пород при аномально высоких пластовых давлениях и напряжениях.

8. Условия применения методов прогнозирования увеличения дебита в результате ГРП, а также установленные зависимости от наиболее значимых факторов.

Практическая значимость

1. Метод построения и калибровки одномерной геолого-геомеханической модели способствует ускорению калибровки модели трещины, уменьшению количества необходимых данных для ее построения, оперативному принятию решения о дальнейшей закачке ГРП.

2. Рекомендации по оптимальному подбору жидкости ГРП могут быть использованы при планировании работ ГРП на этапе выбора типа жидкости и ее параметров.

3. Полученная рецептура жидкости для ГРП может быть использована как базовая рецептура при подборе для работ ГРП.

4. Алгоритм и матрица для выбора метода для борьбы с выносом проппанта является превентивной методикой, которая может быть использована на промыслах на стадии проектирования ГРП, тем самым способствуя оптимизации дизайна ГРП при подборе заполнителя трещины.

5. Полученный способ и устройство по методу царапания для определения структурных свойств проппанта может быть использован в промысловых и полевых лабораториях для контроля качества применяемого проппанта, для определения его механических характеристик, может быть дополнением к алгоритму и матрицы для выбора метода борьбы с выносом проппанта.

6. Новый подход к интерпретации G-функции может способствовать улучшению понимания литологического строения, уменьшать вероятность проникновения в подошвенные воды, оптимизации геометрии трещины.

7. Рекомендации по планированию закачек проппанта в низкопроницаемые нетрадиционные карбонатные пласты могут быть использованы на аналогичных месторождениях.

8. Предложена процедура по подбору метода расчета потенциального роста дебита после ГРП имеет практическую значимость для предварительной оценки необходимости ГРП и соответствующих параметров и геометрии трещины.

Личный вклад автора

- Моделирование одномерной геолого-геомеханической модели вдоль ствола скважины
- Теоретические и экспериментальные исследования по оптимальному подбору жидкости ГРП

- Теоретические и экспериментальные исследования по оптимальному подбору заполнителей трещины ГРП для борьбы с выносом проппанта
- Создание матрицы и алгоритма первичного выбора способа борьбы с выносом проппанта
- Создание способа и устройства для тестирования спекшегося проппанта
- Разработка метода анализа G-функции и объяснение поведения функции до закрытия основной трещины
- Исследование и разработка рекомендаций по планированию закачки проппанта и вызова притока для низкопроницаемых карбонатных пород при аномально высоких пластовых давлениях и напряжениях
- Обобщение условий применения методов прогнозирования увеличения дебита в результате ГРП, а также установление зависимостей от наиболее значимых факторов
- Обзор литературных источников и обобщение данных
- Постановке задач исследований
- Обоснование методических подходов
- Написание статей и участие в конференциях

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных научно-практических конференциях и форумах:

- На Международной научно-практической конференции «SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference 2019» (Manama, Bahrain, 2019);

- На XLII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, 2021);

- На XVI Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, 2021);

- На L Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, 2021);

Публикации

Основные положения работы по диссертации представлены в 10 публикациях, в том числе 3 – в научных изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК, 1 – в научных журналах, входящих в информационную базу компании Scopus, 1 – в других научных журналах, 4 – в материалах международных конференций, 1 – патент на полезную модель.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Современные особенности проведения гидроразрыва пласта как эффективного метода интенсификации добычи углеводородов. (Журнал Нефть и газ Казахстана №3. 2017 г. Алматы. (ISSN 1562-2932)).

2. Геологическая и геомеханическая модель при проектировании гидроразрыва пласта. (Журнал Нефть и газ Казахстана №6. 2018 г. Алматы. (ISSN 1562-2932)).

3. Hydraulic Fracturing in a Devonian Age Carbonate Reservoir: A Case Study. (SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 2019, Proceedings, Manama, Bahrain <https://doi.org/10.2118/194942-MS>).

4. Оперативное определение оптимального заполнителя трещины при гидроразрыве пласта. (Журнал Нефть и газ Казахстана №6. 2020 г. Алматы. (ISSN 1562-2932)).

5. Комплексная интерпретация и анализ параметров закачки при проведении диагностического гидроразрыва пласта на юрские отложения песчаников. (Сборник статей XVI-й международной научно-практической конференции «Современные научные исследования», стр. 49-55, 2021, Пенза).

6. Hydraulic fracturing design improvements by proppant flowback mitigation method application during hydrocarbon production. (Rudarsko-Geolosko-Naftni Zbornik, 36, 2021, p. 99–109. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.1.8>).

7. Результаты экспериментального анализа свойств прорезиненного проппанта методом динамического измерения параметров. (Сборник статей XLII-й Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» с. 50-54, 2021, Пенза).

8. Пат. РК №6224. Устройство для испытания образцов проппантов на спекаемость и способ его осуществления / Джатыков Т.Е. опубл. 02.03.2021

9. Case Study: An Approach for Hydraulic Fracturing Minifrac G-Function Analysis in Relation to Facies Distribution in Multilayered Clastic Reservoirs. (SPE Production & Operations, 2021; Paper number: SPE-206751-PA. Published on 26.10.2021. <https://doi.org/10.2118/206751-PA>)

10. Важные этапы при проектировании проппантового гидроразрыва пласта для интенсификации добычи углеводородов. (Сборник статей L Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» с. 46-52, 2021, Пенза).

Структура и объем работы

Диссертация содержит введение, обозначения и сокращения, 8 разделов, заключение, список использованной литературы. Диссертация изложена на 131 страницах компьютерного набора, включая 42 рисунка и 26 таблиц, список литературы из 102 наименований, 4 приложений.

Краткое содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и представлены ее основные положения.

В первом разделе диссертации показан обзор существующих подходов и приемов по проектированию и выполнению проппантового ГРП, определены и рассмотрены значимые факторы, обуславливающие проблемы при проектировании ГРП. Рассмотрены такие основные моменты как порядок дизайна ГРП, подходы к моделированию геолого-геомеханических свойств, систематизации подбора жидкостей ГРП, разнообразные методы борьбы с выносом проппанта, методы определения структурных свойств проппанта, анализы мини-ГРП, проблемы проектирования в карбонатных пластах, методы прогнозирования дебита после ГРП. Вследствие такого анализа, поставлены цель и задачи диссертации.

Во втором разделе рассматривается вопрос построения одномерной геолого-геомеханической модели для дизайна ГРП. Представленный в данном разделе метод является систематической последовательностью, позволяющей рассчитать и построить петрофизическую, геологическую и геомеханическую модель пласта для моделирования ГРП. В приведенной методике используются стандартный набор каротажных данных, а также результаты анализа мини-ГРП, не требуя иных или дорогостоящих объемов данных, таких как, например, широкополосной акустики или наличия керновых исследований.

В третьем разделе показаны результаты экспериментальных исследований для разработки методики по подбору жидкости ГРП. Для решения поставленной задачи были выбраны и проведены серии лабораторных испытаний для подбора того или иного реагента для определенных условий, выбраны необходимые реагенты, найдены и заданы требования к жидкости ГРП. При этом для демонстрации методики была решена частная задача подбора жидкости для определенных условий. Условия задаются по требованиям режима закачки, свойствам пласта, а также оптимального режима вывода скважины на режим.

Четвертый раздел посвящен разработке матрицы и алгоритма для борьбы с выносом проппанта из пласта. Так одной из проблем, связанных с проппантом, является его вынос после ГРП в течение всего периода добычи, что приводит ко многим проблемам, описанных в данном разделе. Для решения поставленной задачи были изучены и систематизированы превентивные методы борьбы с выносом проппанта. На основе систематизации четырнадцати методов построена таблица в качестве матрицы принятия первичного решения, а также алгоритм, которые позволяют с некоторой точностью и допущениями провести первичный скрининг для выбора метода борьбы с выносом проппанта для заданного месторождения заблаговременно во время проектирования самого ГРП.

Пятый раздел посвящен разработке экспериментального способа и устройства для определения структурных свойств проппантов. Здесь предлагается оптимальный способ и устройство для исследований проппантов, приводится методика проведения эксперимента и результаты

демонстрационного испытания прорезиненного проппанта. Были выявлены несколько интересных закономерностей, таких как значительное влияние температуры, силы сжатия, а также время самого спекания для прочностные свойства проппантной пачки. В результате осуществления испытания с помощью данного способа и устройства повышается информативность получаемых данных, само устройство является автономным, а также многофакторным.

Шестой раздел охватывает детальную интерпретацию данных мини-ГРП на основе G-функции и разработку нового метода анализа и интерпретации данной функции. Показана интерпретация с помощью распластовки и интегрированного анализа G-функции с геологической точки зрения. Это позволило описать строение литологической колонки, что помогает с точки зрения интерпретации геолого-геомеханических параметров. При этом анализируется не только сама G-функция, но и ее производная, усиленная G-функция, литологическая колонка, а также известные данные по пласту из других методик. Такой подход уменьшает неопределенности при построении модели трещины.

В седьмом разделе приводится способ закачки проппанта для низкопроницаемых карбонатных пород при аномально высоких пластовых давлениях и напряжениях. Для этого использовался симулятор ГРП на основе реальных данных с проведенной работы по закачки проппанта в карбонатный пласт. На основе такого подхода был разработан оптимизированный график закачки, позволяющий наилучшим образом разместить проппант в таких сложных геологических условиях.

В восьмом разделе проводятся исследования методов прогнозирования увеличения дебита после воздействия на пласт методом ГРП. Показано обоснование адаптивного метода для прогнозирования дебита или эффекта от ГРП, а именно на примере конкретных условий было показано ограничение метода Экономидеса без применения адаптации. Был дан определенный алгоритм применения нового метода, при этом выделены параметры, изменение которых в существенных пределах, позволяет провести достоверную адаптацию.

В заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.