

На правах рукописи

Базыров Ильдар Шамилевич



**КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ РОСТА
ТЕХНОГЕННЫХ ТРЕЩИН ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ
НЕФТИ ИЗ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

*Специальность 25.00.17 – Разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Хасанов Марс Магнаиевич

Официальные оппоненты:

Осипцов Андрей Александрович

доктор физико-математических наук, автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», лаборатория моделирования многофазных систем, доцент

Лутфуллин Азат Абузарович

кандидат технических наук, доцент, публичное акционерное общество «Татнефть» имени В.Д. Шашина, департамент разработки месторождений, заместитель начальника департамента

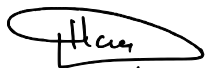
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 22 июня 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2021.1 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 22 апреля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ТАНАНЫХИН
Дмитрий Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В настоящее время в эксплуатацию вводятся все больше нефтяных месторождений с крайне низкими значениями проницаемости коллекторов. В таких условиях эффективность систем ППД падает, поскольку не удаётся обеспечить необходимую приёмистость нагнетательных скважин. Но переход к естественному режиму извлечения нефти также нежелателен, поскольку при этом резко уменьшается коэффициент извлечения нефти.

Имеется успешный промысловый опыт увеличения приёмистости нагнетательных скважин за счёт повышения давления закачки, но это часто приводит к образованию индуцированных трещин гидроразрыва (трещин автоГРП). Неуправляемый рост трещин автоГРП может привести к преждевременным прорывам нагнетаемой воды в добывающие скважины и, тем самым, снизить добычу и коэффициент извлечения нефти. Поэтому весьма актуальной является задача проектирования эффективной системы ППД с обеспечением оптимального баланса между приёмистостью нагнетательных скважин и длиной трещин автоГРП.

Корректное моделирование процесса заводнения низкопроницаемых залежей в настоящее время крайне затруднительно в связи с отсутствием аналитических моделей, способных учитывать эффект автоГРП. Существующие коммерческие симуляторы плохо приспособлены для моделирования трещин автоГРП в связи со сложностью учета геометрии трещин переменной длины.

В связи с этим необходимо разработать аналитические и полуаналитические модели, способные помочь в понимании основных физических механизмов инициации и роста трещин автоГРП, в определении основных влияющих параметров и разработке методов контроля и регулирования трещин автоГРП.

Опыт разработки низкопроницаемых коллекторов последних лет показал, что существенное влияние на эффективность заводнения в таких коллекторах оказывает наличие в пласте естественных трещин. Неверный выбор технологического режима нагнетательных скважин приводит к инициации естественных трещин, к быстрым прорывам воды в добывающие скважины. В связи с этим необходимо разработать модели, описывающие поведение естественных трещин при заводнении низкопроницаемых коллекторов.

Степень разработанности исследуемого направления.

Вопросы контроля и регулирования развития техногенных трещин и их влияние на разработку нефтегазовых месторождений интересуют исследователей достаточно давно. В разное время этими вопросами занимались многие отечественные и зарубежные ученые, такие как Салимов, Феткович, Байков, Давлетбаев, Кременецкий, Ипатов, Хасанов, Головин, Экономидес, Сеттари, Хагорт, Кёнинг, Картер, Эрлагер, Грингартен, Нолт и некоторые другие авторы. Однако некоторые аспекты остались не описанными в полной мере. К ним, например, относятся вопросы об учете пороупругих эффектов при моделировании развития техногенных трещин, решения задач развития техногенных трещин в трехмерной постановке, возможности совмещения аналитических, полуаналитических моделей и коммерческих симуляторов для решения задач развития техногенных трещин.

Объектом исследований в работе являются природно-техническая система: нефтяной пласт – скважины - трещины гидроразрыва при техногенном воздействии на нагнетательную скважину, а **предметом исследований** являются гидродинамические и геомеханические процессы, происходящие в природно-технической системе: нефтяной пласт – скважины - трещины гидроразрыва при техногенном воздействии на нагнетательную скважину.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов при их искусственном заводнении на основе разработанных аналитической и полуаналитической моделей, описывающих работу нагнетательных горизонтальных скважин с трещинами автоГРП, а также взаимодействие нагнетательных скважин с естественными трещинами.

Идея работы. Поставленная цель достигается путём определения характеристик равновесных индуцированных трещин гидроразрыва пласта, скорости роста индуцированной трещины на основе интегрированных моделей и асимптотического анализа, а также определения оптимального давления закачки на нагнетательных горизонтальных скважинах для предотвращения ранних прорывов воды в трещиноватых коллекторах.

Задачи исследований:

1. Провести анализ современных технологий заводнения нефтяных пластов.

2. Исследовать равновесные характеристики индуцированных трещин гидроразрыва в фиксированной системе разработки.

3. Сформулировать критерии устойчивости равновесного состояния индуцированных трещин гидроразрыва пласта в фиксированной системе разработки

4. Разработать методы контроля скорости роста индуцированной трещины гидроразрыва пласта на ранних и поздних стадиях.

5. Провести математическое моделирование процесса заводнения нефтяных пластов в фиксированной системе разработки с индуцированными трещинами гидроразрыва пласта.

6. Разработать модель для определения оптимального давления закачки на нагнетательных горизонтальных скважинах для предотвращения ранних прорывов воды в трещиноватых коллекторах.

Научная новизна работы:

1. Для условий нагнетательной скважины и стационарного поля давлений получены зависимости давления гидроразрыва пласта от полудлины трещины, показывающие наличие области устойчивого роста трещины автоГРП до критической полудлины трещины 100 метров.

2. На основе комплексирования численных фильтрационной и геомеханической моделей и уравнений роста трещины в длину и высоту была разработана физико-математическая модель развития трещин автоГРП на нагнетательных скважинах в нетрещиноватых коллекторах.

3. На основе аналитической модели расчёта тензора напряжений, критерия Кулона-Мора и критерия прочности на предельное растягивающее напряжение была разработана физико-математическая модель активации естественных трещин для условий трещиноватых пород.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложены расчётные алгоритмы, которые позволяют спроектировать оптимальные системы разработки низкопроницаемых пластов с увеличением продуктивности скважин за счёт использования эффекта автоГРП.

2. Разработаны алгоритмы управления режимами работы нагнетательных скважин с целью снижения темпов обводнения и повышения КИН в низкопроницаемых залежах.

3. Разработан алгоритм управления режимами работы

нагнетательных скважин с целью уменьшения обводнённости в низкопроницаемых трещиноватых залежах.

4. По результатам выполненных работ разработанная модель апробирована на пилотном участке одного из месторождений Западной Сибири. Были рассчитаны ограничения по забойному давлению и объемам закачки, использованные в дальнейшем при эксплуатации скважины для снижения риска развития трещин автоГРП.

5. Разработана и запатентована технология подбора определения траектории бурения скважины на основе учёта напряженного состояния в прискважинной зоне и активности трещин - Пат. 2728039 Российская Федерация, МПК E21B 44/00, E21B 47/02, G06F 30/20. Способ (варианты) и система (варианты) определения траектории бурения скважины / Лукин С.В., Овчаренко Ю.В., Жигульский С.В.; Базыров И.Ш., Ротару А.В., Нигматуллин Р.Р., Морозов Д.О., Грибанов В.А.; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-Технический центр» (ООО «Газпромнефть НТЦ» – № 2019145573; заявл. 30.12.2019; опубл. 28.07.2020. – 6 н. и 24 з.п. ф-лы, 3 ил.

Методология и методы исследования. Задачи решались на основе теоретических и промысловых исследований, а также анализа геологопромыслового материала с использованием гидрогеомеханического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полученные зависимости давления гидроразрыва пласта от полудлины трещины позволяют выделить диапазоны забойного давления на нагнетательной скважине для устойчивого роста трещины автоГРП до критической полудлины трещины 100 метров.

2. Создана совместная гидро-геомеханическая модель развития трещин автоГРП на нагнетательных скважинах в нетрещиноватых коллекторах, позволяющая выбрать оптимальное забойное давление нагнетательной скважины без риска прорыва индуцированных трещин гидроразрыва пласта в добывающие скважины.

3. Разработана физико-математическая модель активации естественных трещин в призабойной зоне, позволяющая определить диапазон значений забойного давления нагнетательной скважины для предотвращения ранних прорывов воды в добывающие скважины для условий трещиноватых пород.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждена теоретическими исследованиями, проведенными на современных программных комплексах для создания и расчета моделей нефтегазовых месторождений.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих российских и международных конференциях и семинарах: Международной конференции XXVII International Conference «Mathematical and Computer Simulations in Mechanics of Solids and Structures Fundamentals of Static and Dynamic Fracture» (г. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2017 г.), 7-ой научно-технической конференции молодых ученых ООО «Газпромнефть НТЦ» (г. Санкт-Петербург, ООО «Газпромнефть НТЦ», 2018 г.), Международной конференции «Молодежная конференция по математическому моделированию и информационным технологиям» (г. Казань, TGT Oilfield Services, 2019 г.), Международной конференции «Future Petroleum Engineers forum» 2019 г. (г. Пекин, Китайский нефтяной университет, 2019 г.), Международной конференции «Coupled thermo-hydro-mechanical problems of fracture mechanics» (г. Новосибирск, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2019 г.), Совместном семинаре ООО «Газпромнефть НТЦ» (г. Санкт-Петербург) и ИГиЛ СО РАН (г. Новосибирск) «Математическое моделирование ГРП» под руководством д.ф.-м.н. С.В.Головина (г. Санкт-Петербург, ООО «Газпромнефть НТЦ», 2019 г.), Российской нефтегазовой технической конференции SPE 2019 г. (г. Москва, Society of Petroleum Engineers, 2019 г.).

Личный вклад соискателя: автором выполнен сбор, анализ и обобщение результатов ранее опубликованных материалов исследований; сформулированы задачи исследований; проведены теоретические исследования на современных программных комплексах для создания и расчета моделей нефтегазовых месторождений; работа апробирована на пилотном участке одного из месторождений Западной Сибири; выполнена обработка и интерпретация полученных результатов; сформулированы основные защищаемые положения и выводы.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на

соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 5 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science; получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 151 наименование. Материал диссертации изложен на 112 страницах машинописного текста, включает 7 таблиц, 56 рисунков и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяются цель, идея, задачи, излагаются защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

Первая глава представляет аналитический обзор научно-технической литературы, посвященной изучению процесса инициации и развития техногенных трещин гидроразрыва пласта в нагнетательных скважинах. Также проведен обзор методов, позволяющих регистрировать и контролировать процесс развития техногенных трещин в скважинах. Уделено большое внимание физическим принципам процесса гидроразрыва пласта, а также влиянию распределения порового давления и тензор горных напряжений. Проведен обзор различных подходов для гидрогеомеханического моделирования процессов в нефтяных залежах. Исходя из обзора существующих методов моделирования, можно подвести итог, что аналитические модели могут быть использованы только при определенных предположениях о распределении порового давления, напряженно-деформированном состоянии пласта и рассматриваемой области решения. Численные методы позволяют избежать эти предположения, однако являются более вычислительно затратными. Помимо аналитических и численных подходов существует полуаналитический, который позволяет совмещать численные решения для решения задачи установившейся фильтрации в пласте с аналитической моделью роста и инициации трещины.

Во второй главе представлена разработанная полуаналитическая модель для анализа эффективности заводнения залежи нагнетательными горизонтальными скважинами с поперечными

трещинами многостадийного ГРП на участке низкопроницаемой залежи. Модель была разработана для конкретной системы разработки (Рисунок 1).

Распределение давлений в области вокруг трещины при стационарном поле давлений будет определяться уравнением Лапласа с граничными условиями (1):

$$\begin{cases} \Delta p(x, y) = 0 \\ p|_{\Gamma_p} = p_b, \\ p|_{\Gamma_f} = p_f \end{cases} \quad (1)$$

где Γ_p - граница трещин на нагнетательных скважинах, Γ_f - граница трещин на добывающих скважинах, p_b и p_f забойные давления на добывающей и нагнетательной скважинах.

В ходе решения этих уравнений было получено решение гидродинамической задачи о стационарной фильтрации в области вокруг трещины, а затем решены уравнение равновесия и уравнение пороупругости (2):

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = (\lambda\theta + \alpha p)\delta_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} \\ \partial_j \sigma_{ij} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Здесь α это коэффициент Био, θ – объёмная деформация, ϵ_{ij} – тензор малых деформаций.

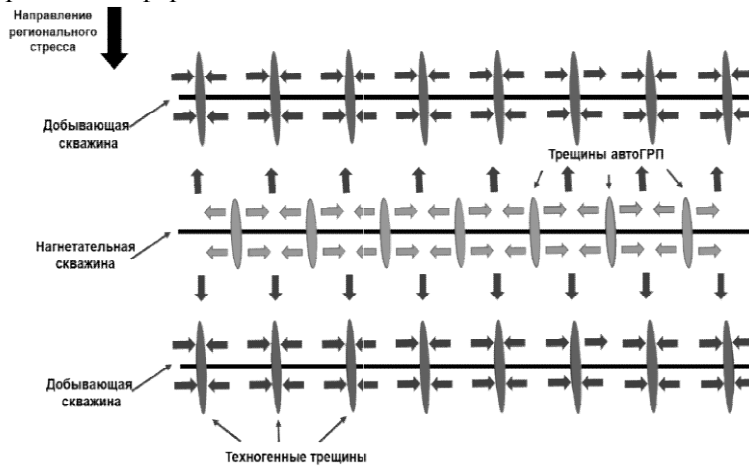


Рисунок 1 — Схема расположения добывающих и нагнетательной скважин на участке низкопроницаемой залежи

Давление распространения трещины находится по формуле (3):

$$p_{fp} = p_{foc} + K_{Ic} / \sqrt{\frac{8K_{Ic}^2}{h\pi}} \quad (3)$$

где σ_0 – первоначальное минимальное горизонтальное напряжение, Н – высота пласта, K_{Ic} – коэффициент трещиностойкости породы.

При характерных значениях $\sigma_0 = 40$ МПа, $K_{Ic} = 1$ МПа $\sqrt{м}$, $H = 20$ м $p_{fp} = 40,36$ МПа. Видно, что в уравнении (2.19) второе слагаемое намного меньше первого. Таким образом, можно предположить, что рост трещины будет происходить при превышении давления смыкания трещины на кончике трещины (минимального горизонтального напряжения).

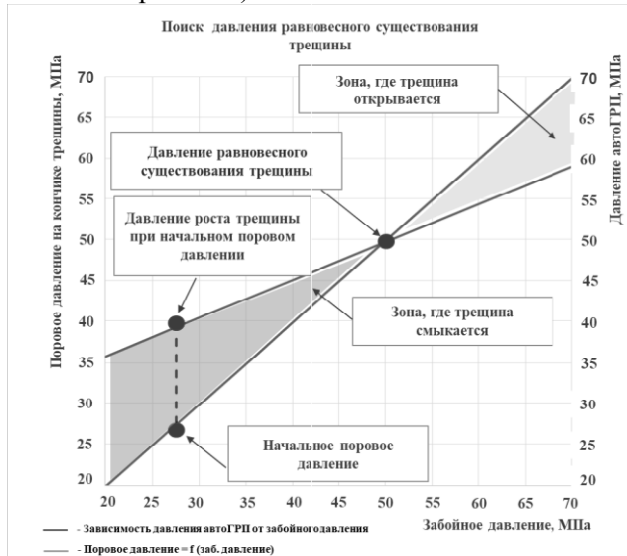


Рисунок 2 - Поиск давления равновесного существования трещины

Решение гидрогеомеханической задачи позволило построить на рисунке 2 красную линию, которая описывает зависимость давления автоГРП от значений забойного давления на нагнетательной скважине. Синяя линия на рисунке 2 описывает зависимость давления жидкости на кончике трещины от забойного давления. Точка пересечения этих двух линий позволили найти точку давления равновесного существования трещины автоГРП. Под равновесием подразумевается

такое состояние трещины, при котором её полудлина не изменяется со временем при постоянном забойном давлении.

Равновесное давление p_{eq} было найдено для всех полудлин трещин, не превышающих, расстояние от нагнетательной скважины до соседних добывающих скважин. В результате были найдены характеристики различных равновесных индуцированных трещин гидроразрыва пласта (Рисунок 3). Равновесные характеристики трещины автоГРП – это размеры трещины в устойчивом состоянии, когда отборы будут компенсироваться закачкой, и задача о фильтрации выйдет на стационарное решение, которое не зависит от времени. Существует критическая длина равновесного существования трещин, после которой равновесные состояния трещины автоГРП являются неустойчивыми. Были формализованы математически критерии для критического давления равновесного существования трещины:

- $\frac{\partial p_{eq}}{\partial l} > 0$ – спонтанное приращение давления не приведет к неконтролируемому росту трещины автоГРП.

- $\frac{\partial p_{eq}}{\partial l} < 0$ – спонтанное приращение давления приведет к неконтролируемому росту трещины автоГРП.

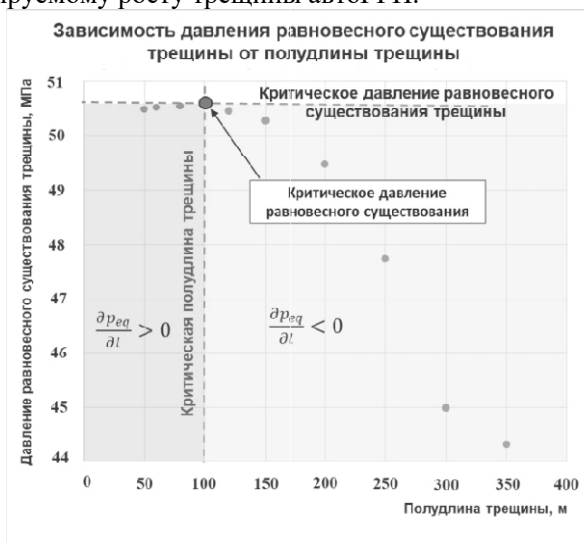


Рисунок 3 - Зависимость давления равновесного существования трещины от полудлины трещины

В интервале полудлины от 0 до 100 метров трещина будет находиться в устойчивом состоянии. В этом интервале рост трещины можно контролировать давлением и расходом (рисунок 3). В интервале свыше 100 метров трещина будет не контролируема.

Предложенные результаты масштабируются критериями подобия на аналогичные системы разработки для разных параметров месторождения по формуле (4):

$$\begin{cases} Q_{eq} \sim \frac{kH}{\mu} \\ Q'_{eq} = \frac{\frac{k'H'}{\mu'}}{\frac{kH}{\mu}} \end{cases} \quad (4)$$

где Q_{eq} , k , H - равновесный расход жидкости, проницаемость, толщина пласта для опорного участка Q'_{eq} , k' , H' - равновесный расход жидкости, проницаемость, толщина пласта для нового участка.

В третьей главе описывается метод определения оптимального давления закачки на нагнетательных горизонтальных скважинах для предотвращения ранних прорывов воды в трещиноватых коллекторах. Был рассмотрен случай заводнения низкопроницаемой залежи расположенной перпендикулярно региональному стрессу нагнетательной горизонтальной скважиной без индуцированных техногенных трещин, однако, в данном случае скважину пересекает естественная трещина (Рисунок 4).

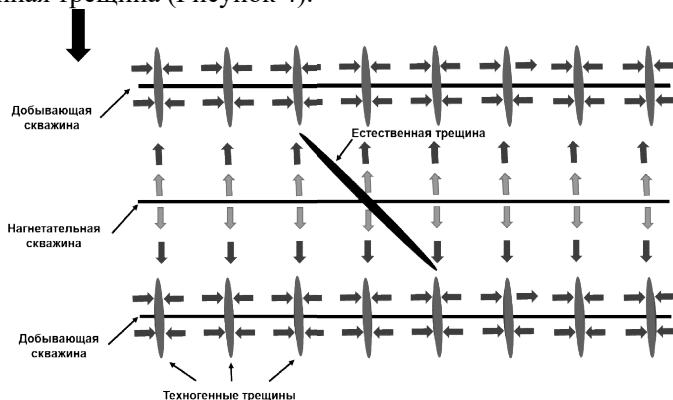


Рисунок 4 — Схема расположения добывающих скважин и нагнетательной скважины, которую пересекает естественная трещина, на участке низкопроницаемой залежи

Классическое понимание активации трещин, вызванных нагнетанием, в первую очередь связано с критерием разрушения Мора-Кулона и теорией эффективных напряжений. Выражение для закона Кулона-Мора выглядит следующим образом (5):

$$\tau \geq \sigma_n \tan \gamma + C \quad (5)$$

где C – когезия при сдвиге, γ – угол внутреннего трения породы; σ_n – нормальное напряжение, τ – напряжение сдвига.

Еще один механизм активации естественной трещины возможен, если давление внутри трещины, которое можно принять равное внутрискважинному в случае пересечения трещины и ствола скважины, превысит нормальные напряжения..

Критерий прочности на предельное растягивающее напряжение можно записать в следующем виде (6):

$$p_w \geq A\sigma_n + B \quad (6)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, которые могут быть подобраны в ходе полевых испытаний, σ_n – нормальное напряжение, p_w – внутрискважинное давление.

Беря в учёт оба критерия, давление активации трещины будет определяться (7):

$$p_{fa} = \min(p_{ws}; p_{wn}) \quad (7)$$

где p_{ws} – внутрискважинное давление, необходимое для выполнения критерия на сдвиг, p_{wn} – внутрискважинное давление, необходимое для выполнения критерия прочности на предельное растягивающее напряжение.

Трещину можно представить как плоскость с нормалью к координатным осям (Рисунок 7). Нормальное и сдвиговое напряжение рассчитывается из 9 компонент тензора напряжений (8-10):

$$\sigma_n = \sigma_x^1 l_2^2 + \sigma_y^1 m_2^2 + \sigma_z^1 n_2^2 + 2\tau_{xy}^1 l_2 m_2 + 2\tau_{yz}^1 m_2 n_2 + 2\tau_{zx}^1 n_2 l_2 \quad (8)$$

$$p^2 = (\sigma_x^1 l_2^2 + \tau_{yz}^1 m_2 + \tau_{zx}^1 n_2)^2 + (\sigma_x^1 l_2^2 + \tau_{yz}^1 m_2 + \tau_{zx}^1 n_2)^2 + (\sigma_x^1 l_2^2 + \tau_{yz}^1 m_2 + \tau_{zx}^1 n_2)^2 + (\sigma_x^1 l_2^2 + \tau_{yz}^1 m_2 + \tau_{zx}^1 n_2)^2 \quad (9)$$

$$\tau = \sqrt{p^2 - \sigma_n^2} \quad (10)$$

где p – полное напряжение, l_2, m_2, n_2 – направляющие косинусы площадки трещины в трансформированной системы координат, σ_i^1, τ_{ij}^1 – преобразованные компоненты тензора напряжений.

Трещину можно представить как плоскость с нормалью к координатным осям (Рисунок 5). Для получения преобразованного

тензора напряжений в уравнениях 8-10 необходимо решить следующие задачи: преобразование матрицы при переходе в систему координат, связанную со скважиной; расчёт перераспределения региональных напряжений на кольцевое пространство рассматриваемой скважины; перевода тензора напряжений из цилиндрической системы координат в декартову; расчёта направляющих косинусов площадки трещины в трансформированной системе координат.

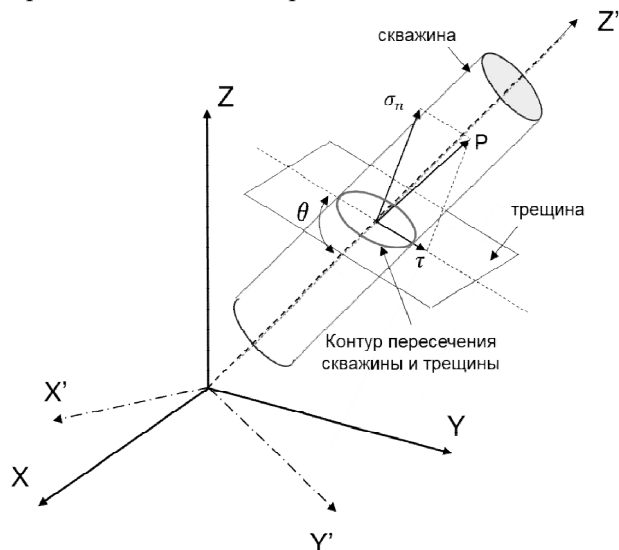
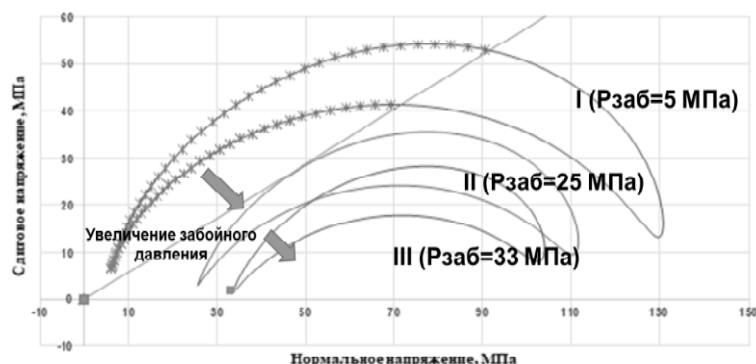


Рисунок 5 - Схематическая иллюстрация пересечения ствола скважины и трещины

На рисунке 6 показано, как изменяется напряженное состояние точек на контуре пересечения трещины и скважины. Если взаимосвязь нормального и сдвигового напряжений превышает так называемую линию минимального сопротивления «сухого трения» или превышает предел прочности на растяжение, то в данной области трещина испытывает перемещения по поверхности и вследствие возникающих растягивающих или сжимающих деформаций может стать проводящей. Предложенная модель позволяет определить оптимальное забойное давление для любой комбинации траектории нагнетательной скважины относительно положения естественной трещины с целью избегания прорывов воды по естественным трещинам.

Напряженное состояние точек на контуре пересечения трещины и скважины



- I - напряженное состояние точек при внутрискважинном давлении = 5 МПа ▀ - точки, инициированные «сдвиговым» критерием
- II - напряженное состояние точек при внутрискважинном давлении = 25 МПа ▀ - точки, инициированные «нормальным» критерием
- III - напряженное состояние точек при внутрискважинном давлении = 33 МПа

Рисунок 6 – Изменение напряженного состояния в точках на контуре пересечения трещины и скважины

В четвертой главе предлагаются подходы в ходе разработки месторождения для реализации оперативных мероприятий для снижения рисков прорыва трещин автоГРП, а также на первоначальном этапе проектирования системы разработки месторождения в ходе оптимизации технико-экономических показателей проекта. На одном из месторождений Западной Сибири перед запуском скважины в нагнетание на основе совмещенного гидро-геомеханического моделирования были рассчитаны ограничения по забойному давлению и объемам закачки, использованные в дальнейшем при эксплуатации скважины для предотвращения развития трещин автоГРП.

На рисунке 7 показан результат совмещенного гидро-геомеханического моделирования - зависимость критического давления от объема закаченной жидкости, которая легла в основу ограничений на забойное давление при закачке воды в нагнетательную ГС с МГРП на участке ОПР. Увеличение критического давления на рисунке 5 связано с постепенным ростом пластового давления в прискважинной области по мере увеличения объема закаченной жидкости.

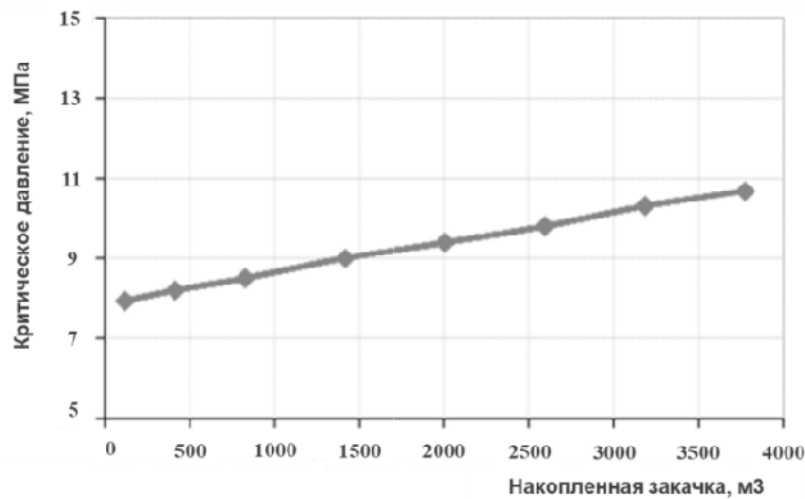


Рисунок 7 - Зависимость давления от объёма закаченной жидкости

В данной главе также рассматриваются алгоритмы для оценки коэффициента извлечения нефти с учётом динамики параметров трещин автоГРП. Основная идея прогноз динамики роста трещин автоГРП заключается в оценке роста трещины асимптотическим анализом на ранних и поздних стадиях разработки месторождения. На ранних стадиях рост трещин соответствует росту в бесконечном пласте, а на поздних стадиях время трещина взаимодействует с добывающими скважинами, и рост трещины происходит медленнее, чем в модели бесконечного пласта. Полудлина трещины автоГРП растёт в соответствии с формулой (11):

$$x_f = L_d(q_d)\sqrt{\kappa t} \quad (11)$$

Здесь $\kappa = \frac{k}{\mu c_t}$ коэффициент пьезопроводности, а L_d – безразмерный коэффициент, который зависит от безразмерного параметра q_d (12):

$$q_d = \frac{\mu Q}{2\pi k H (\sigma_{min} - p_0)} \quad (12)$$

Здесь p_0 – начальное пластовое давление. Чем больше q_d , тем больше L_d и больше скорость роста трещины. Точная зависимость $L_d(q_d)$ может быть взята из [E.J.L. Koning, 1985]. При параметре $q_d > 1$, что обычно и соответствует авто-ГРП в промысловых условиях,

зависимость следующая (13):

$$L_d = \sqrt{\pi} q_d \quad (13)$$

На основе закона изменения длины трещины автоГРП от времени была решена гидродинамическая задача для определения коэффициента извлечения нефти (КИН). Для разных равновесных длин трещины было найдено значение КИН (Рисунок 8). Несмотря на то, что максимальный КИН был получен для полудлины 350 метров, для точек после 100 метров высок риск раннего обводнения добывающих скважин из-за нестабильного роста трещин авто-ГРП. Таким образом, реальный максимально достижимый КИН для данной системы разработки достигается при конечной полудлине трещины 100 м и оценивается величиной 0.23.

Зависимость КИН от полудлины трещины

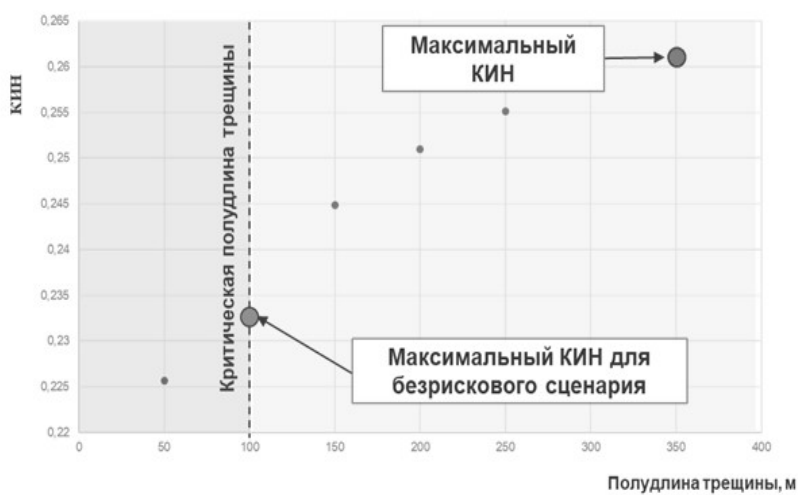


Рисунок 8 - Зависимость КИН от полудлины трещины автоГРП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов при их искусственном заводнении за счёт контроля и регулирования роста техногенных трещин на нагнетательных скважинах.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Разработана полуаналитическая модель для анализа эффективности заводнения нагнетательными горизонтальными скважинами с поперечными трещинами многостадийного ГРП. Модель апробирована на пилотном участке низкопроницаемой залежи. Для заданных параметров строения залежи, из всех исследованных равновесных состояний системы трещин устойчивыми оказались только те, в которых полудлины трещин на нагнетательных скважинах не превышали 100 метров. При этом максимально возможное забойное давление для устойчивого существования трещин автоГРП постоянной длины не превышало критическое давление равновесного существования трещины, а максимальный расход не превышал критический расход. Превышение критических значений приводит к неустойчивому росту трещин автоГРП. Получено выражение, позволяющее оценить параметры устойчивого равновесия системы трещин для аналогичных систем разработки при других ФЕС.

2. Проведено математическое моделирование процесса заводнения нефтяных пластов в фиксированной системе разработки с индуцированными трещинами гидроразрыва пласта. Получено, что максимальный возможный КИН в условиях образования устойчивых равновесных трещин автоГРП длиной 100 м составит для изученного случая 0.23 д.е.

3. На основе асимптотических оценок скорости роста трещин на ранних и поздних временах был предложен метод управления нагнетательной скважиной для образования устойчивой трещины автоГРП. Метод подразумевает динамический контроль расхода и давления ниже критических.

4. Выполненные исследования позволили подготовить программу по снижению рисков прорыва трещин автоГРП в добывающие скважины при переводе в нагнетание горизонтальной скважины с поперечными трещинами многостадийного ГРП на одном из месторождений Западной Сибири.

5. Предложена аналитическая модель для определения оптимального давления закачки на нагнетательных горизонтальных скважинах для предотвращения ранних прорывов воды в трещиноватых коллекторах. Для предотвращения ранних прорывов воды в трещиноватых коллекторах был разработан метод определения

оптимального давления закачки на нагнетательных горизонтальных скважинах. Предложенный метод позволяет определить оптимальное забойное давление для любой комбинации траектории нагнетательной скважины относительно положения естественной трещины. Разработана и запатентована технология подбора определения траектории бурения скважины на основе учёта напряженного состояния в прискважинной зоне и активности трещин.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Базыров, И.Ш.** Анализ эффективности заводнения низкопроницаемых коллекторов нагнетательными горизонтальными скважинами с поперечными трещинами многостадийного ГРП / **И.Ш. Базыров**, Е.В. Шель, М.М. Хасанов // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2020. – № 2. – С. 52-60.

2. Шель, Е.В. Моделирование инициации и распространения трещины гидроразрыва пласта в нагнетательной скважине в условиях нетрещиноватых терригенных пород на примере Приобского месторождения / Е.В. Шель, П.К. Кабанова, Д.Р. Ткаченко, **И.Ш. Базыров**, А.В. Логвинюк // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2020. – № 2. – С. 36-42.

3. **Базыров, И.Ш.** Моделирование инициации трещин в трещиноватом коллекторе в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах. **И.Ш. Базыров**, А.С. Гунькин, Ю.В. Овчаренко, С.В. Лукин, Д.В. Альчибаев, А.А. Шаповалова, И.П. Болгов // Нефтяное хозяйство. 2019. – № 12. – С. 56-60.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

4. **Bazyrov, I.S.** Dynamic Control of the Efficiency of Waterflooding of Low-Permeability Reservoirs by Horizontal Injection Wells With Transverse Multi-Stage Hydraulic Fractures / **I. Bazyrov**, R. Galeev., A. Ipatov, I. Kayeshkov, S. Simakov, I. Fayzullin, E. Shel, A. Sheremeev, A. Shurunov, A. Yakovlev, M. Bikkulov, R. Gayaztdinov, R. Uchuev, A. Logvinyuk – DOI: 10.2118/196739-MS // SPE Russian Petroleum Technology Conference 2019, RPTC.–2019.

5. Martemyanov, A. Conditions of Secondary Fracture Reorientation for Cases of Vertical and Horizontal Wells / A. Martemyanov., E. Shel, V. Bratov, G. Paderin, I. Chebyshev, **I. Bazyrov** – DOI:

10.2118/196966-MS // SPE Russian Petroleum Technology Conference 2019, RPTC.–2019.

6. **Bazyrov, I.S.** Time-Dependent Hydro-Geomechanical Reservoir Simulation of Field Production / **I.S. Bazyrov**, A.E. Glazyrina, S.V. Lukin, D.V. Alchibaev, M.V. Salishchev, Yu.V. Ovcharenko, – DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.035 // Procedia Structural Integrity.–2017. – №6. – P.228-235.

7. Alchibaev, D. Application of 3D and near-wellbore geomechanical models for well trajectories optimization / D. Alchibaev, A. Glazyrina, Yu. Ovcharenko, O. Kalinin, S. Lukin, A. Martemyanov, S. Zhigulskiy, I. Chebyshev, A. Sidelnik, **I. Bazyrov**– DOI: 10.2118/187830-MS// SPE Russian Petroleum Technology Conference 2017, RPTC.–2017.

8. **Bazyrov, I.S.** Case Study on waterflooding of low-permeability reservoirs by horizontal wells with water-injection induced fractures / **I.S. Bazyrov**, E.V. Shel, A.A. Gimazov, A.P. Roshchektaev, M.M. Khasanov // American rock mechanics association - 54th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.–2020.

Публикации в прочих изданиях:

9. **Базыров, И.Ш.** Расчёт эволюции давления авто-ГРП с помощью трехмерного геомеханического моделирования : тезисы докладов Международной конференции «Молодежная конференция по математическому моделированию и информационным технологиям», г. Казань, 25-26 апреля 2019 г. / **И.Ш. Базыров** // TGT Oilfield Services, 2019. – С. 13-14.

10. **Bazyrov, I.** Fracture closure pressure evolution prediction in water-injection wells using hydrogeomechanical modeling: тезисы докладов Международной конференции «Future Petroleum Engineers forum», г. Пекин, 18-19 мая 2019 г. / **I. Bazyrov**, I. Chebyshev // Китайский нефтяной университет, 2019. – С. 1-19.

Патент:

11. Патент № 2728039 Российская Федерация, МПК E21B 44/00 (2020.02), E21B 47/02 (2020.02), G06F 30/20 (2020.02). Способ (варианты) и система (варианты) определения траектории бурения скважины: заявлен 30.12.2019 : опубликован 28.07.2020/ С.В. Лукин, Ю.В. Овчаренко, С.В. Жигульский; **И.Ш. Базыров**, А.В. Ротару, Р.Р. Нигматуллин, Д.О. Морозов, В.А. Грибанов . – 40 с. : 3 ил.