

На правах рукописи



ФАИК СААД АЛААЕЛЬДИН ФАИК

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ
И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ
В СКВАЖИНАХ С БОЛЬШЕОБЪЁМНЫМ ГИДРОРАЗРЫВОМ
ПЛАСТА**

Специальность 25.00.17 - Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2018 г.

Работа выполнена на кафедре «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Саранча Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: **Насыбуллин Арслан Валерьевич**
доктор технических наук, доцент,
Татарский научно-исследовательский и
проектный институт нефти (ТатНИПИнефть)
публичного акционерного общества «Татнефть»
имени В.Д. Шашина / отдел развития
информационных технологий и моделирования
пластовых систем, начальник

Зиновьев Алексей Михайлович
кандидат технических наук ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический
университет» / кафедра «Разработка и
эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений», заместитель заведующего
кафедрой по учебной работе

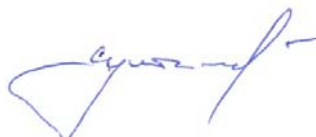
Ведущая организация: ГАНУ "Институт стратегических исследований
Республики Башкортостан" (г. Уфа)

Защита диссертации состоится «20» сентября 2018 года в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день на нефтяных месторождениях Западной Сибири сосредоточено значительное количество остаточных трудно извлекаемых запасов, особенно в зонах неравномерной выработки неоднородных высокообводнённых пластов, а также слоистых и линзовидных глинистых пластах Ачимовских толщ. Несмотря на распространённое применение в последнее время затратной технологии гидроразрыва пласта (ГРП) для горизонтальных скважин, в сложных экономических условиях по-прежнему большое внимание уделяется и более экономичной технологии супергидроразрыва для нерентабельных, низкодебитных скважин в пластах с ухудшенными фильтрационно-ёмкостными свойствами, а также со значительными загрязненными зонами притока или обводненных наклонно-направленных скважин старого фонда.

Технология создания супертрещин в наклонно-направленных скважинах с закачкой сотен тонн расклинивающего агента имеет ряд сложностей при их создании и эксплуатации. В связи с тем, что большеобъёмный гидроразрыв пласта (БОГРП) оказывает кардинальное влияние на изменение конфигурации потоков и режимов течения, необходимо производить оптимизацию, контроль и прогнозирование эффективности для конкретных геолого-технологических условий разработки.

Данная технология была успешно реализована на Ярайнерском, Повховском, Приобском, Приразломном, Харампурском, Фестивальном, Восточно-Уренгойском, Кулешевском месторождениях, при этом параметры трещин в несколько раз выше стандартных ГРП. На многих месторождениях реализованы ГРП с глубокопроникающими трещинами и закачкой проппанта более 400 тонн проппанта по технологии высокопроводящих трещин (кластерный ГРП), что эквивалентно 700 тоннам по традиционной технологии.

Однако на практике достаточно часто встречаются случаи, когда прогнозная оценка повышения продуктивности скважины с БОГРП не соответствует фактическим значениям. Таким образом, прогнозирование продуктивности, и исследование нестационарных процессов в скважинах с БОГРП продолжает оставаться актуальной задачей для нефтегазовой отрасли.

Степень разработанности проблемы

К началу работы над диссертацией имелись сведения о применяемых подходах интерпретации кривых восстановления давления и методах, учитывающих влияние стационарной фильтрации и т.д. Большой вклад в развитие данного направления внесли отечественные ученые: Иктисанов В.А., Молокович Ю.М., Кульпин Л.Г., Мясников Ю.А., Бузинов С.Н., Умрихин И.Д., Хайруллин М.Х., Овчинников М.Н и др.

Аналізу нестационарного давления в скважинах, пересекаемых бесконечными однородными потоками и вертикальными трещинами конечных проводимостей, посвящены работы известных отечественных и зарубежных ученых, таких как: Скотт (1963), Россил и Труит (1964), Раймонд и Биндер (1967), Тинслейи др. (1969), Рамейи Кобб (1971), Эарлауфер и др. (1973, 1977), Грингартен, Рамей и Рагаван (1974), Рагаван и Гадиного (1978), Грингартен (1978), Баркер и Рамей (1978), Синко-Лей и др. (1978, 1981, 1982), Лии Брокинбро (1981) и Каневская Р.Д. (1998), Насыбуллин А.В., Салимов О.В., Карнаухов М.Л. (1998-2006) и Саранча А.В. (2007).

Тем не менее, среди общепринятых подходов отсутствуют методики интерпретации кривых восстановления давления, учитывающие стационарную и нестационарную фильтрацию пластовой жидкости в системе «пласт-трещина-скважина» после проведения БОГРП.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Область исследований диссертационной работы автора соответствует паспорту специальности 25.00.17 – «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», а именно: пункту 3 - «Научные аспекты и средства обеспечения системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования и мониторинга процессов разработки месторождений»; пункту 5 – «Научные основы компьютерных технологий проектирования, исследования, эксплуатации, контроля и управления природно-техногенными системами, формируемыми для извлечения углеводородов из недр или их хранения в недрах с целью эффективного использования методов и средств информационных технологий, включая имитационное моделирование геологических объектов, систем выработки запасов углеводородов и геолого-технологических процессов».

Цель и задачи работы

Цель работы - повышение надёжности прогнозирования продуктивности скважин после большеобъемного гидроразрыва пласта путём совершенствования процедуры дизайна, учитывающей стационарные и нестационарные процессы фильтрации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1 Исследование стационарной и нестационарной фильтрации пластовой жидкости в системе «пласт-трещина-скважина» после проведения БОГРП.
- 2 Разработка модели стационарной фильтрации пластовой жидкости для прогнозирования увеличения продуктивности скважин после проведения БОГРП.
- 3 Изучение процессов фильтрации пластовой жидкости в системе «пласт-трещина-скважина» для трещин конечной и бесконечной проводимости, а также влияние двух типов скин-эффектов: внутри трещины и вокруг трещины.
- 4 Проверка существования влияния различных режимов фильтрации пластовой жидкости на созданной гидродинамической модели «пласт-трещина-скважина», учитывающей реальные фильтрационно-емкостные свойства и геометрические параметры трещины, что необходимо для решения различных стационарных и нестационарных задач, связанных с БОГРП.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются скважины после проведения БОГРП в нефтенасыщенных коллекторах ачимовской толщи месторождений Ханты-Мансийского автономного округа.

Предметом исследования являются результаты поведения давления и продуктивности скважин после проведения БОГРП.

Научная новизна

1 Обоснована необходимость учета несовершенства вскрытия скважиной продуктивного пласта для более точного прогнозирования увеличения продуктивности скважины после проведения БОГРП.

2 Разработан комплекс моделей для определения увеличения продуктивности скважин после проведения БОГРП в условиях ачимовской толщи месторождений Ханты-Мансийского автономного округа.

3 Установлено отсутствие псевдорадиального режима течения к вертикальным скважинам после БОГРП с полудлинами трещин более 100 метров при ограниченном контуре питания с расстоянием между скважинами менее 500 метров.

Основные защищаемые положения

1 Доказательство достоверности установленной зависимости стационарного состояния распределения давления вблизи трещины и пласте от безразмерной проводимости.

2 Модели прогнозирования продуктивности, эквивалентной проводимости и оптимальной проводимости в скважинах с БОГРП в зависимости от безразмерных параметров трещины: протяжённость, бесконечная и конечная проводимость, соотношение сторон элемента системы разработки и/или латеральной анизотропии пласта.

3 Зависимости нестационарного состояния распределения дебита в трещины от безразмерной проводимости и безразмерного времени.

Методология и методы исследования

Исследование проводилось посредством таких методов, как математический анализ, численные методы, компьютерное моделирование с помощью самостоятельно разработанных программ. В качестве теоретической базы используются общие законы и основные представления классической подземной гидродинамики и теории нестационарной фильтрации жидкости и газа.

Практическая значимость работы

С использованием разработанной модели стационарной фильтрации пластовой жидкости в системе «пласт-трещина-скважина» проведена прогнозная оценка увеличения продуктивности четырех скважин после проведения БОГРП нефтяных месторождениях, расположенных в Пуровском районе Тюменской области.

Полученные данные использованы для оценки эффективности проведения интенсификации притока. Проведено обоснование объема закачиваемого расклинивающего агента для создания оптимальной длины трещины, что позволило обеспечить дополнительную добычу 109 тыс. тонн нефти.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных, а также оригинальных методов и методик, экспериментальных

исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием современных статистических методов обработки геолого-промысловых материалов и анализа результатов лабораторных и промысловых испытаний.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: IX-й международной научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации)» (г. Тюмень, 2014г.); международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири» (г. Тюмень, 2015 г.); научно-техническом совете института геологии и нефтегазодобычи (г. Тюмень, 2015 г.); семинаре кафедры «Моделирование и управления процессами нефтегазодобычи» (г. Тюмень, 2015 г.); семинаре кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», (г. Тюмень, 2015 г.); международной научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации), посвящённая 60-летию ТИУ» (г. Тюмень, 2016 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе 7 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Личный вклад автора

В диссертационной работе автором проведен анализ опыта и исследование механизма стационарной фильтрации пластовой жидкости в системе «трещина-пласт» после большеобъемных гидравлических разрывов пласта (БОГРП), проведённых на месторождениях Западной Сибири.

Разработана модель для прогнозирования продуктивности скважин с БОГРП, а также трещиной конечной и бесконечной проводимости и определения эквивалентной проводимости для непостоянной проводимости трещины и определения оптимальной проводимости трещины и анализ нестационарной фильтрации пластовой жидкости в системе «трещина-пласт».

Объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка используемых источников, включающих 92 наименований. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста, включая 53 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко охарактеризованы актуальность темы диссертации, цель работы и основные задачи исследований, научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения диссертационной работы и их апробация.

Первая глава посвящена анализу и обобщению существующих технологий увеличения продуктивности скважин, предложенных российскими и зарубежными учеными. Особое внимание уделено описанию эволюции технологии ГРП и результатов гидродинамических исследований скважин, интерпретации кривых восстановления давления.

Анализ литературных источников показал, что для прогнозирования продуктивности скважин по-прежнему широко используются диагностические графики на основе кривых МкГуаера и Сикора, которые демонстрируют преимущества увеличения продуктивности скважин с ГРП в зависимости от длины трещины (проникновения) и относительной проводимости трещины. В 1960 годах они установили влияние вертикальных трещин ГРП конечной проводимости на продуктивность скважин в расширяющихся пластах с жидкостным накопителем (то есть поведение псевдо-стационарного состояния).

В 1961 году Пратс представил аналитическую модель для стационарного поведения вертикальных трещин конечной проводимости, которая была основана на модели коллектора, разделенной на две области различной проницаемости: I - домен трещины; II - домен пласта. Позднее Пратс ввел понятие эффективного радиуса ствола скважины и обосновал оптимальное соотношение длины и ширины (безразмерной проводимости) для заданного объема трещины, соответствующей максимальной продуктивности. В последствии последовало большое разнообразие работ по анализу нестационарного давления в скважинах, пересекаемых

бесконечными однородными потоками и вертикальными трещинами конечных проводимостей.

Во **второй главе** рассматриваются задачи, связанные со стационарной фильтрацией пластовой жидкости к вертикальной скважине с трещинами ГРП.

Для решения данных задач, построена сеточная модель фильтрации пластовой жидкости к вертикальной скважине, с трещиной ГРП в картезианских координатах. При исследовании стационарных процессов уравнение Лапласа имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

где: P – давление, Па; x, y – координаты.

С помощью этой численной модели, выше указанные уравнения были решены итеративно, решение было принято после пятидесяти циклов (FORTRAN 90®, Microsoft Developer Studio).

Таким образом, для заданной геометрии, эффективность трещины описывается параметром «безразмерной проводимости – $C_{fd} = (w_f k_f / k x_f)$. Для эффективной трещины параметр относительного потенциала имеет большие значения и приближается к предельному значению бесконечности для бесконечной проницаемости трещин, а для несущественных трещин, имеющих низкую безразмерную проводимость, параметр C_{fd} приближается к нулю для предельного случая без трещины. На практике при значениях параметра $C_{fd} < 100$ - проницаемость трещин такая же, как у проппанта, используемого в обработке ГРП. В случае, когда нарушаются фильтрационно-ёмкостные свойства пласта вокруг трещины в результате обработки ГРП, добавляются еще параметры. Для упрощения представления результатов исследований эффекты скважины и распределение давления в трещине не учитываются.

Для более четкого представления механизма исследованию подлежат два момента: 1) распределение давления внутри и вблизи трещины, что позволит получить общую картину и понимание влияния трещины на распределение

давлений в пласте; 2) количественное определение воздействия трещины на такие параметры, как величина падения давления в трещине и увеличение дебита.

Безразмерный перепад давления между концом трещины и любой точкой трещины, по существу, не зависит от размера пласта. Однако это падение давления в значительной степени зависит от величины параметра безразмерной проводимости C_{fD} , которое задается формулой:

$$\Delta p_D(x_f, x) = \frac{kh}{q\mu} \left(p_{fD}|_{x_f} - p_{fD}|_x \right) \quad (2)$$

где: $p_{fD}|_{x_f} - p_{fD}|_x$ является перепадом давления между концом трещины в точке ($x = x_f$) в системе координат и любой точки трещины, расположенной на расстоянии x от оси скважины.

Выявлено, что чем меньше проводимость C_{fD} , тем больше перепад давления в трещине и в результате чего получается поток радиального характера. С другой стороны, чем выше проводимость C_{fD} , тем меньше становится перепад давления в трещине. При малых $\Delta p_{(x_f, x)}$, перепад давления в трещине незначителен, в случае если проппант не загрязнен мелкими частицами из пласта, либо в ходе обработки ГРП или после того, как скважина введена в эксплуатацию. Исключение делается только для предельного случая в трещине, заданной кривой для нулевой проводимости, скважина работает как вертикальная и формируется радиальный приток в близи скважины. Другой случай, когда трещина обладает максимальными проводимостями - поток эллиптического типа. Два других случая для безразмерной проводимости равной 1 и 10 промежуточные между радиальным и эллиптическим притоком.

Далее мы определили псевдостационарное состояние, как условие в конечном замкнутом коллекторе при постоянном производстве «каждая точка в пласте в конечном итоге испытывала постоянную скорость снижения давления». Безразмерное давление псевдостационарного состояния в системе разработки может быть записано в следующем виде:

$$p_D = 2\pi t_{DA} + 1/J_D \quad (3)$$

$$1/J_D = 1/2 \ln \left(\frac{4A}{e^{\gamma} C_A r_w^2} \right) \quad (4)$$

где: p_D - безразмерное давление; $t_{DA} = \frac{kt}{c_2 \phi \mu A}$ - безразмерное время на основе площади; J_D - безразмерный коэффициент продуктивности; A - дренажная площадь, m^2 ; γ - постоянная Эйлера, $\gamma = 0,5772156649$; C_A - коэффициент формы; r_w - эффективный радиус скважины, м.

Безразмерный коэффициент продуктивности для скважины, расположенной в центре прямоугольного пласта определяется:

$$1/J_D = \frac{\pi}{6} \lambda - \frac{\pi}{4} \lambda I_x (1 + x_D^2) + \frac{\pi}{4} \lambda I_x^2 (\frac{1}{3} + x_D^2) + \frac{\pi}{6} \frac{1}{\lambda I_x} - \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\lambda I_x} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-2n\pi\lambda I_x(1-x_D)}}{n^2 [1 - e^{-2n\pi\lambda}]} [1 - e^{-2n\pi\lambda(1-I_x)}] [1 - e^{-2n\pi\lambda I_x x_D}] \quad (5)$$

где: $\lambda = 2x_e/2y_e$ - соотношение сторон; $I_x = 2x_f/2x_e$ - проникновение; $x_D = x/x_f$ - безразмерная координата; x_e, y_e - координаты, м; x_f - полудлина трещины, м.

На рисунке 1 показано установленное увеличение продуктивности скважины с ростом вытянутости элемента системы разработки (латеральной анизотропии проницаемости элементов пласта). Как показывает нижняя линия крайне неэффективными являются элементы разработки, при которых трещина расположена поперёк прямоугольного элемента. Наименее эффективными являются квадратные элементы ($\lambda = 1$). Для вытянутых элементов с трещиной вдоль элемента системы разработки эффективность зависит от степени проникновения трещины в прямоугольнике.

Модель системы “Трещина-Пласт” была основана на модели коллектора, разделенной на две области различной проницаемости. Первая область принадлежит региону трещины, вторая – региону пласта. Суммарная система сопротивлений в регионе трещины и пласта, действуют параллельно. Границы пласта играют роль источника.

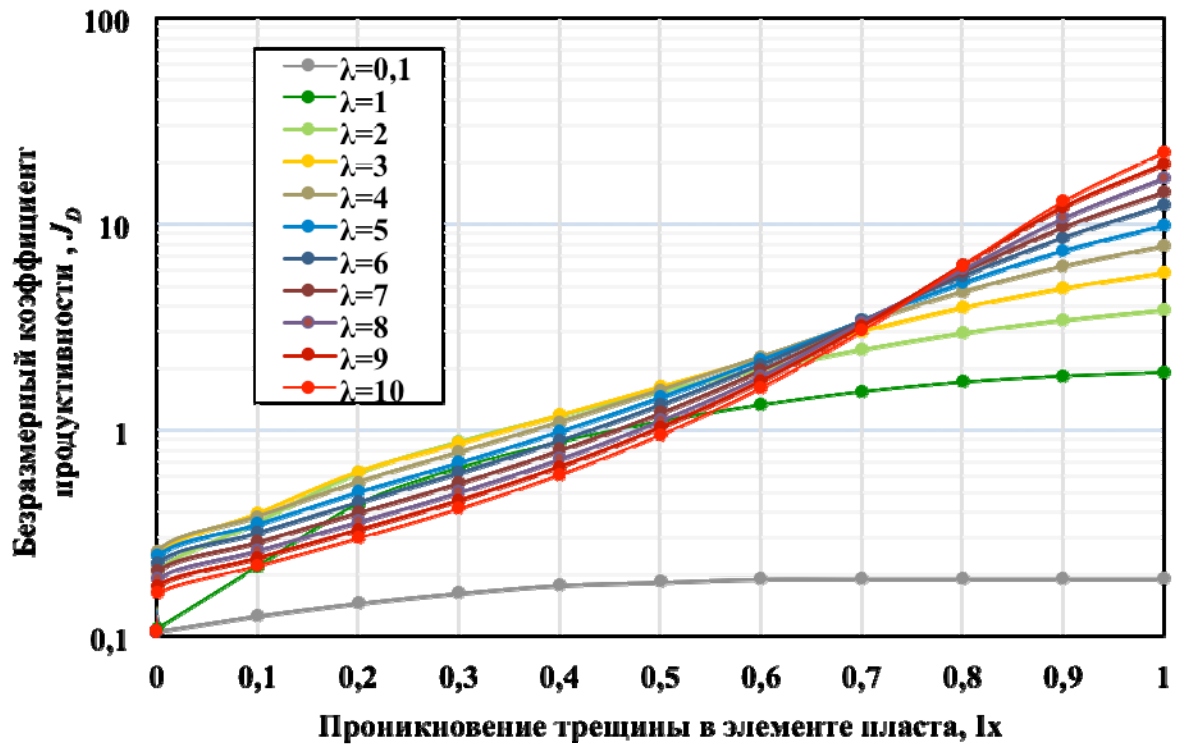


Рисунок 1 - Коэффициент продуктивности скважины (J_D) с трещиной бесконечной проводимости в зависимости от коэффициентов проникновения (I_x) и соотношения сторон участка пласта (λ)

С помощью этого аналогового метода, мы могли рассчитать коэффициент продуктивности скважин с трещиной конечной проводимости с помощью коэффициента продуктивности для бесконечной проводимости трещины как функции безразмерной проводимости $C_{fD} = (w_f k_f / k x_f)$ проникновения I_x и соотношения сторон элемента пласта λ (или латеральной анизотропии проницаемости элемента).

На рисунках 2 и 3 показан коэффициент продуктивности скважины с ГРП трещиной конечной проводимости как функция безразмерной проводимости C_{fD} , безразмерной полудлины трещины I_x при разном соотношении сторон элемента пласта λ .

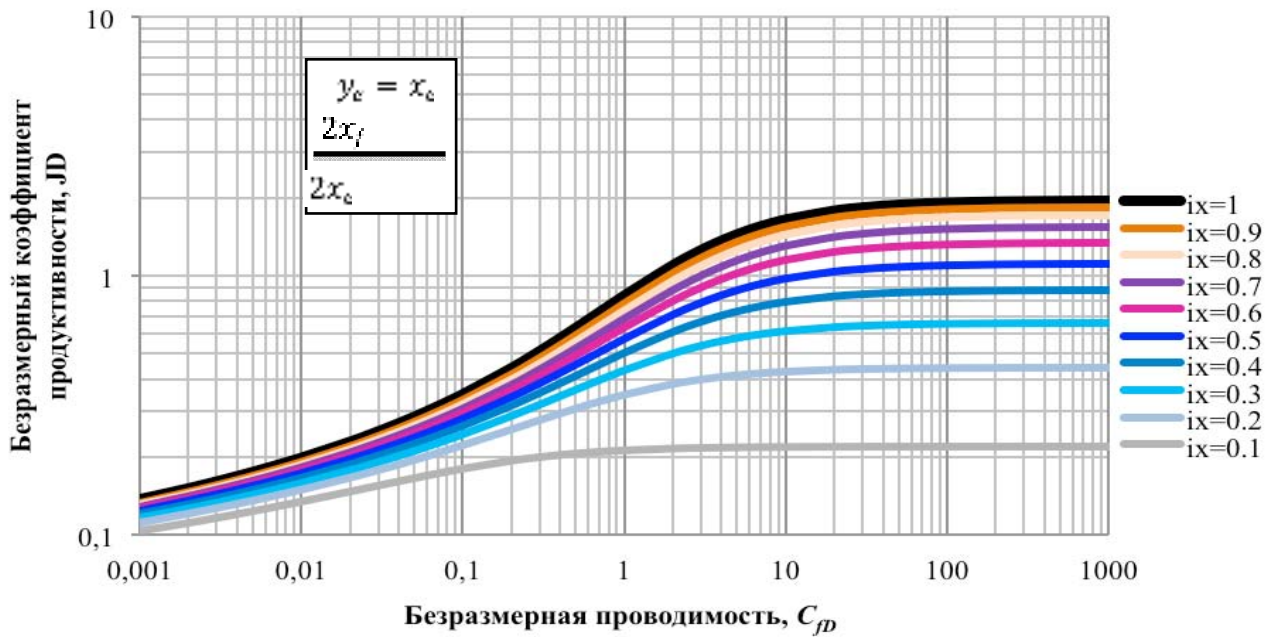


Рисунок 2 - Безразмерный коэффициент продуктивности (J_D) в функции безразмерной проводимости (C_{fd}) и проникновения (I_x) при $\lambda = 1$

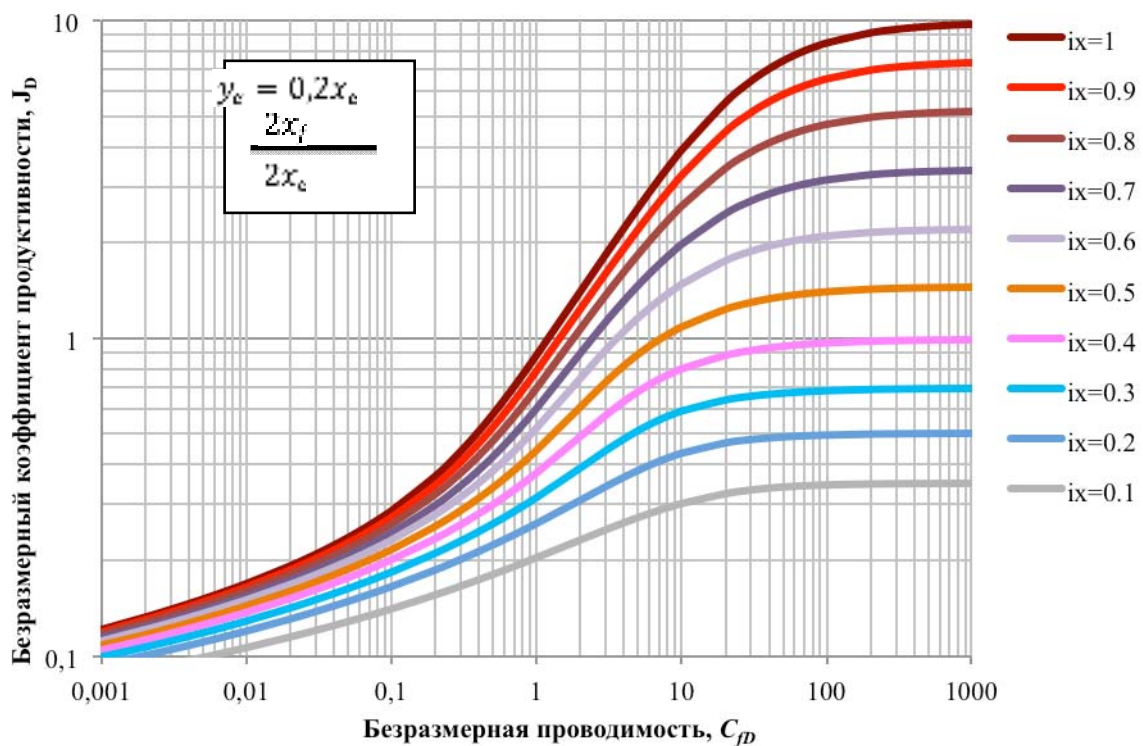


Рисунок 3 - Безразмерный коэффициент продуктивности (J_D) в функции безразмерной проводимости (C_{fd}) и проникновения (I_x) при $\lambda = 5$

По теории Пратса эффективный радиус скважины на основе скин-трещины определяется по следующему выражению:

$$r'_w = r_w e^{-S_f} \quad (6)$$

r_w - радиус скважины, м; S_f - скин-трещины.

На рисунке 4 показан общий вид безразмерного эффективного радиуса скважины как функции безразмерной проводимости. Показано, что безразмерный эффективный радиус скважины $r'_w / x_f \rightarrow 1/2$, когда проводимость трещины ($C_{fD} \rightarrow \infty$) и эффективный радиус скважины асимптотически приближается к радиусу скважины, когда проводимость трещины приближается к нулю.

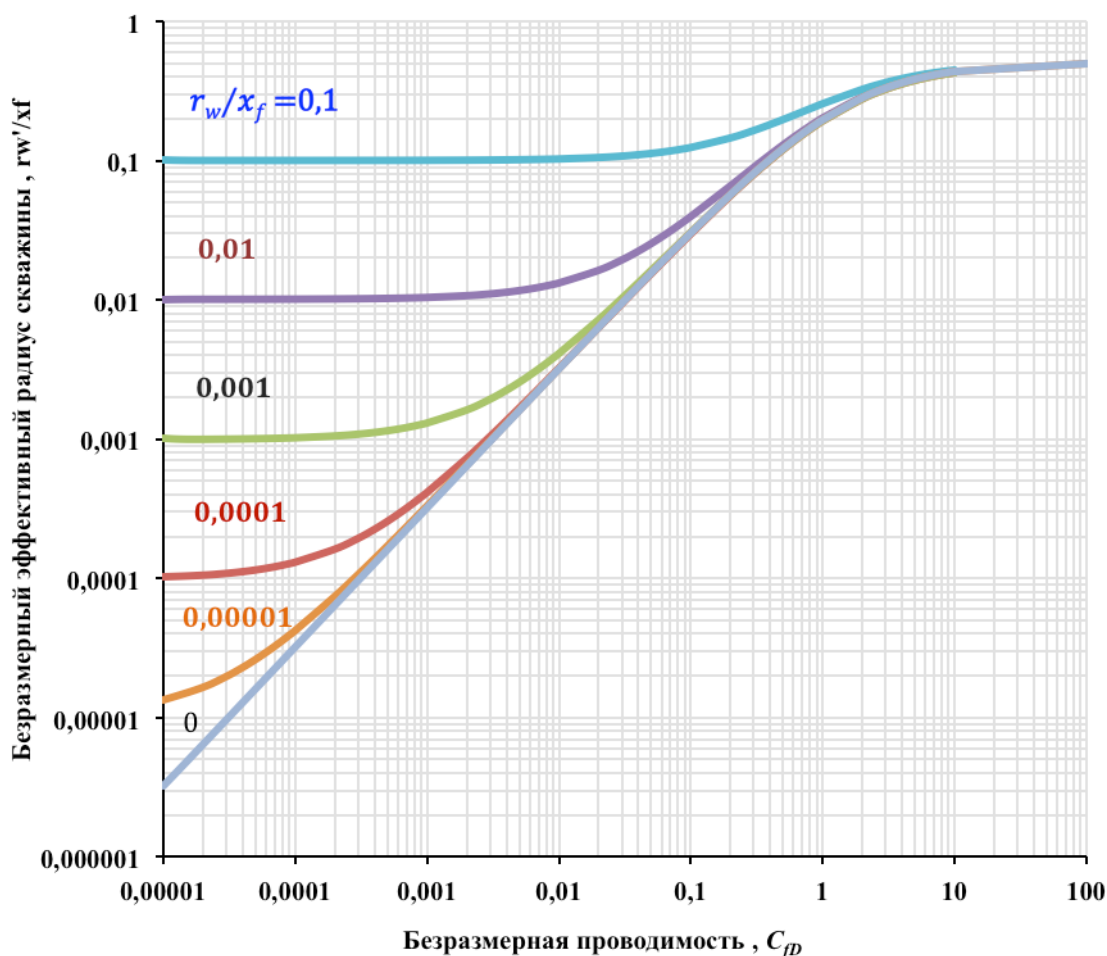


Рисунок 4 - Безразмерный эффективный радиус ствола скважины (r'_w / x_f) для различного радиуса скважины (r_w / x_f) по отношению к полудлины трещины против безразмерной проводимости C_{fD}

Далее были проведены исследования влияния переменной проводимости трещины. Средняя безразмерная проводимость трещин определяется, как среднее арифметическое по длине трещины и определяется по формуле:

$$\overline{C_{fD}} = \int_0^1 C_{fD}(x_D) dx_D \quad (7)$$

Эквивалентная проводимость трещин для поведения псевдостационарного состояния определяется:

$$C_{fD}|_e = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{e^{4s_f} - 1} \right) \quad (8)$$

Для нахождения наиболее эффективного распределения неравномерной проводимости трещин прямоугольной, эллипсоидальной, клиновидной, обратной клиновидной формы провели математический анализ, в результате чего получили данные распределения соотношений средней проводимости по трещине в целом в сравнении с эффективной проводимостью (таблица 1). Первые четыре случая переменной проводимости для прямоугольной трещины с максимальным значением в скважине и убывающими к концу трещины проводимостями в элементах. Первый случай для самых низких проводимостей, четвёртый для максимальных проводимостей.

Таблица 1. Сопоставление средней переменной проводимости трещин с эффективной проводимостью

| Случай | Зона 1 C_{fD1} | Зона 2 C_{fD2} | Зона 3 C_{fD3} | Зона 4 C_{fD4} | — C_{fD5} | $C_{fD} _6$ |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|-------------|
| 1 | 1,0 | 0,5 | 0,375 | 0,125 | 0,5 | 0,7809 |
| 2 | 10,0 | 5,0 | 3,75 | 1,25 | 5,0 | 5,718 |
| 3 | 100,0 | 50,0 | 37,5 | 12,5 | 50,0 | 49,77 |
| 4 | 1000,0 | 500,0 | 375,0 | 125,0 | 500,0 | 486,2 |
| 5 | 15,0 | 2,5 | 1,5 | 1,0 | 5,0 | 3,999 |
| 6 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 15,0 | 5,0 | 1,262 |
| 7 | 2,5 | 1,0 | 15,0 | 1,5 | 5,0 | 2,149 |
| 8 | 2,5 | 1,5 | 15,0 | 1,0 | 5,0 | 2,407 |
| 9 | 2,5 | 15,0 | 1,5 | 1,0 | 5,0 | 3,036 |
| 10 | 5,0 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | 3,75 | 1,782 |
| 11 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | 5,0 | 3,75 | 1,107 |

Установлено, что эквивалентная проводимость при низких ее значениях больше укладывается в сторону проводимости вблизи скважины, чем средняя. Полученные результаты подобны для данных типов распределений таким образом, что эффективная проводимость практически совпадает со средней проводимостью и близка проводимости второй зоны.

В таблице 2 показана эффективная проводимость трещин в зависимости от максимальной проводимости ствола скважины для эллипсоидальных и клиновидных трещин. Показано, что для низкопроводимых трещин эквивалентное значение смещается больше в сторону максимальной проводимости скважины, в то же время как при больших проводимостях эквивалент приблизительно равен средней проводимости трещин для клиновидных трещин и примерно на 12% больше средней проводимости для трещин эллипсоидальной формы. Решение показало, что $C_{fd} |_{\epsilon} / C_{fd} = 2 / e^{\gamma} = 1,12$, т.е. примерно на 12% больше, чем средняя проводимость.

Основное различие в нашем решении состоит в том, что при малых проводимостях эквивалентная проводимость взвешивается по отношению к проводимости ствола скважины. Это следует из того, что эффективный радиус ствола скважины не зависит от длины трещины для низкой проводимости трещин.

Таблица 2 - Эквивалентная безразмерная проводимость трещин для эллипсоидальных и клиновидных трещин по сравнению с максимальной проводимостью

| Максимум в скважине $C_{fd} _{\max}$ | Эллипсоидальная трещина ГРП | | Клин -трещина ГРП | |
|--|-----------------------------|---|--------------------------|---|
| | средний — C_{fd5} | эквивалент уравнение 8 $C_{fd} _{\epsilon}$ | средний — C_{fd} | эквивалент уравнение 8 $C_{fd} _{\epsilon}$ |
| 0,01 | 0,00785 | 0,00999 | 0,005 | 0,00986 |
| 0,10 | 0,0785 | 0,0989 | 0,05 | 0,0927 |
| 1 | 0,785 | 0,946 | 0,5 | 0,770 |
| 10 | 7,85 | 8,94 | 5 | 6,00 |
| 100 | 78,5 | 87,8 | 50 | 52,3 |
| 1000 | 785 | 876 | 500 | 504 |

При сравнении клиновых и перевернутых клиновидных проводимостей трещин показано, что трещина клина имеет максимальную проводимость в скважине, тогда как перевернутый клин имеет максимальное значение на вершине трещины (таблица 3). Установлено, что уменьшающийся клин всегда будет превосходить возрастающий случай для данной средней проводимости.

Таблица 3 - Эквивалентная безразмерная проводимость трещин для клиновых и перевернутых клиновидных трещин по сравнению со средней проводимостью

| Средний — C_{FD} | Клин, > | | Перевернутый клин, < | |
|--------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| | Диапазон проводимости от скважины до кончика | Эквивалент $C_{FD} _{\epsilon}$ | Диапазон проводимости от скважины до кончика | Эквивалент $C_{FD} _{\epsilon}$ |
| 0,01 | 0,015-0,005 | 0,0148 | 0,005 - 0,015 | 0,00508 |
| 0,1 | 0,15-0,05 | 0,141 | 0,05 - 0,15 | 0,0547 |
| 1,0 | 1,5-0,5 | 1,24 | 0,5 - 1,5 | 0,666 |
| 10 | 15-5 | 11,3 | 5 - 15 | 7,54 |
| 100 | 150-50 | 111 | 50 - 150 | 77,0 |
| 1000 | 1500-500 | 1110 | 500 - 1500 | 772 |

Представленные данные иллюстрируют то, что для переменной проводимости трещин средняя их удельная проводимость может не всегда представлять собой эквивалентную проводимость. Также очевидно, что для большой проводимости трещин, среднее является хорошим представлением, тогда как для низкой проводимости трещин эквивалентное значение больше смещается в сторону скважины.

Далее были проанализирована зависимость эффективного радиуса ствола скважины для трещины с зоной повреждения жидкостью ГРП. Полученные результаты сравнивались с методикой Синко-Лей, где эффективный радиус ствола скважины для повреждённой трещины в бесконечном пласте зависит от безразмерной проводимости в повреждённой области и различных соотношений безразмерных полудлин повреждённой зоны и всего крыла (рисунок 5).

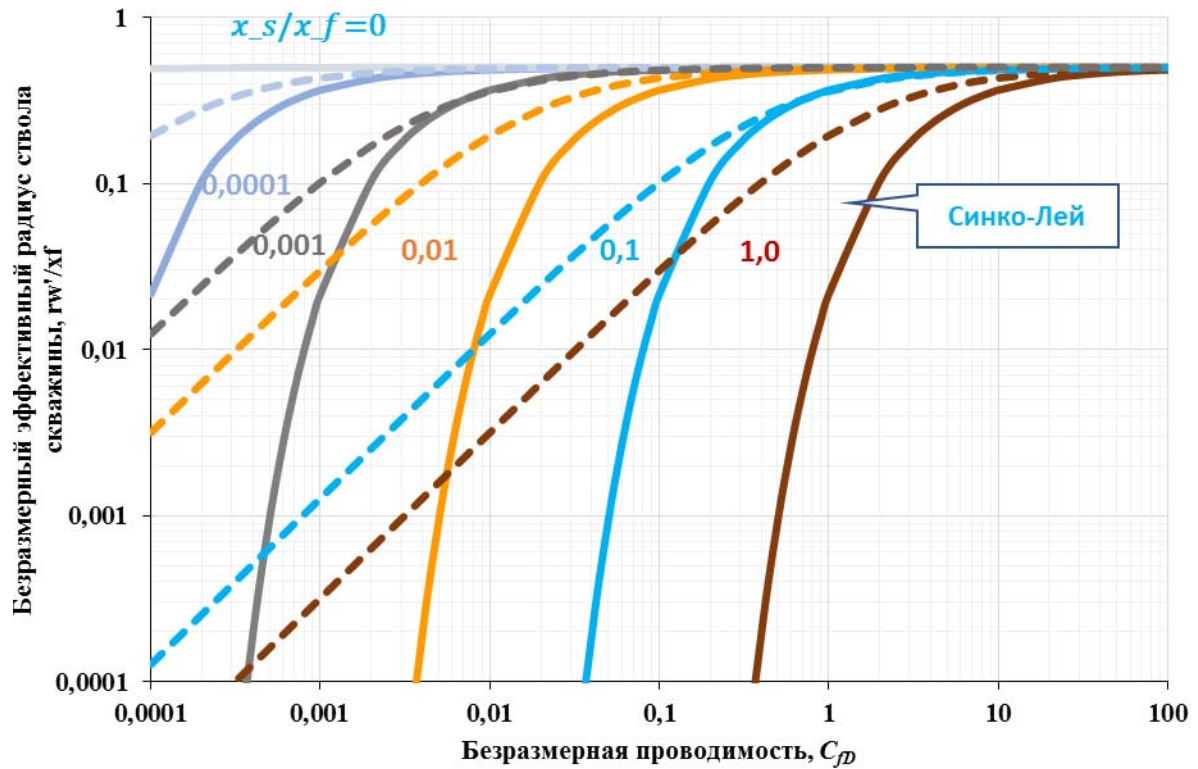


Рисунок 5 - Эффективный радиус ствола скважины (r_w' / x_f) от безразмерной проводимости C_{fD} и поврежденной зоны (x_s / x_f)

На рисунке 5 показано отношение эффективного радиуса ствола скважины для повреждённой трещины в неограниченном или бесконечном пласте в зависимости от безразмерной проводимости в повреждённой области и различных безразмерных расстояниях трещин (x_s / x_f). Число проппанта для прямоугольного пласта задается формулой:

$$n_{\text{проп}} = \frac{2V_{\text{проп}} k_f}{V_{\text{рес}} k} = C_{fD} I_x^2 \lambda \quad (12)$$

где $V_{\text{проп}} = 2 x_f w_f h$; $V_{\text{рес}} = 4 x_e y_e h$; w_f - ширина трещины, м; h - высота пласта, м.

На рисунке 6 показан безразмерный коэффициент продуктивности, как функция безразмерной проводимости и числа проппанта.

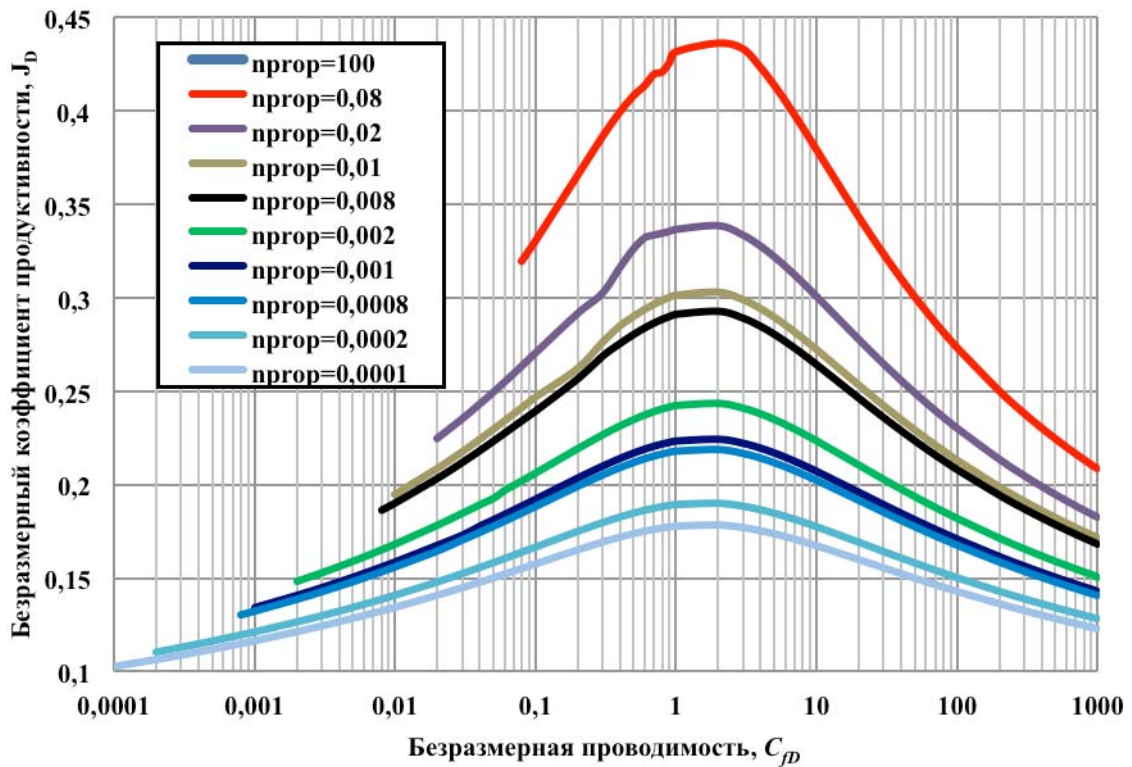


Рисунок 6 - Безразмерный коэффициент продуктивности (J_D) в функции безразмерной проводимости (C_{FD}) и числа проппанта (n_{prop})

Таким образом, для фиксированного объема закачиваемого проппанта – число проппанта будет постоянным. Оптимальную проводимость трещин для данного объема трещины можно найти, дифференцируя коэффициент продуктивности относительно C_{FD} для постоянного числа проппанта.

$$\left. \frac{d(J_D)}{dC_{FD}} \right|_{n_{prop} = \text{const.}} = 0 \quad , \quad (13)$$

Данное уравнение решается численно с использованием модифицированного метода Ньютона. В результате получаем оптимальную проводимость максимальной продуктивности для заданного объема (или массы). На рисунке 7 показаны оптимальная безразмерная проводимость и оптимальное проникновение как функции числа проппанта для различных соотношений сторон элемента пласта (латеральной анизотропии проницаемостей пласта).

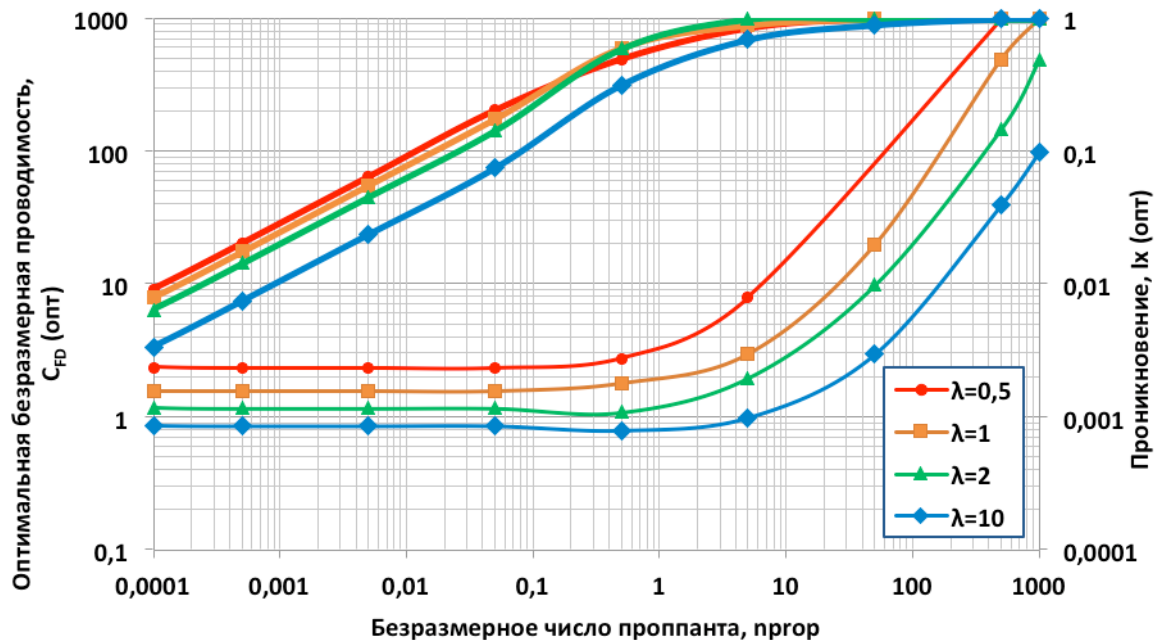


Рисунок 7 - Оптимальная безразмерная проводимость (C_{FD}) и проникновение (I_x) в функции числа трещины для различных соотношений сторон (λ)

В **третьей главе** представлен теоретически разработанный аналитический метод, обладающий повышенной точностью анализа эффективности нестационарного поведения давления в трещине за счет объединения потока среды в пласте и трещине. В полуаналитическом методе трещина сначала дифференцируется на несколько небольших сегментов.

$$\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \phi c_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (15)$$

С граничными условиями

$$\begin{aligned} p(x \rightarrow \infty, y \rightarrow \infty, t_D) &= p_i \\ \frac{kh}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0} &= q_f, \quad -x_f \leq x \leq x_f \\ p(x, y, t = 0) &= p_i \\ \frac{\partial^2 p_f}{\partial x^2} + \frac{\mu}{k_f} \frac{q_f(x', t)}{w_f h} &= \frac{\phi_f \mu c_{f1}}{k_f} \frac{\partial p_f}{\partial t} \end{aligned} \quad (16)$$

С граничными условиями

$$\left. \frac{\partial p_f}{\partial x} \right|_{x=x_f} = 0$$

$$\left. \frac{k_f w_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{2} q_w$$

где C_c - сжимаемость пласта 1/Па; h - суммарная высота, м; k - проницаемость пласта, Д; k_f - проницаемость трещины, Д; p - давление, Па; p_c - начальное пластовое давление, Па; q_w - дебит, м³/сек; q_f - дебит трещины, м³/сек; t - время, с; w_c - ширина трещины, м; r_c - радиус пласта, м; x_f - полудлины трещины, м; μ - вязкость, кг/(м.с); c - пористость/

Для бесконечной проводимости трещин и равномерного потока в бесконечных и прямоугольных пластах предполагается, что поток флюида в трещину с равномерной скоростью на единицу площади поверхности трещины и перепадом давления в трещине (в плоскости трещины). Безразмерное давление в трещине рассчитывается из формулы:

$$p_D(t_{Dx_f}) = \frac{1}{2} \sqrt{\pi t_{Dx_f}} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{1-x_D}{2\sqrt{t_{Dx_f}}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{1+x_D}{2\sqrt{t_{Dx_f}}} \right) \right\} - \frac{(1-x_D)}{4} E_i \left(\frac{(1-x_D)^2}{4t_{Dx_f}} \right) - \frac{(1+x_D)}{4} E_i \left(\frac{-(1+x_D)^2}{4t_{Dx_f}} \right) \quad (17)$$

где безразмерное положение трещины определяется как $x_D = x/x_f$.

Безразмерное давление в стволе скважины для вертикальной трещины ГРП равномерного потока в системе с бесконечным действием основывается на решении бесконечной проводимости и предполагает, что трещина имеет бесконечную проницаемость и постоянное давление равномерно во всей трещине.

Для конечной проводимости, уравнения для пласта и трещины могут быть решены в области Лапласа с помощью исходных функций соответственно, и интегрирование посредством модифицированной функции Бесселя.

$$\int_0^\zeta K_0(t) dt (\gamma + \ln(\zeta/2)) \zeta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\zeta/2)^{2k}}{(k!)^2 (2k+1)} + \zeta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\zeta/2)^{2k}}{(k!)^2 (2k+1)^2} + \zeta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\zeta/2)^{2k}}{(k!)^2 (2k+1)} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{k} \right) \quad (18)$$

На границе раздела трещин можно получить уравнения непрерывности, приводящие к линейной системе уравнений. Решая данную систему уравнений, можно получить поток в каждом сегменте, который подставляется в первый сегмент

для определения забойного давления в области Лапласа. Далее используются, пространственные решения в реальном пространстве Лапласа, алгоритм Стехфеста.

$$p_{wD}(t_{Dxf}) = \frac{\ln 2}{t_{Dxf}} \sum_{i=1}^{ns} F_i \bar{p}_{wD}(s_i), \quad (19)$$

где

$$s_i = \frac{\ln 2}{t_{Dxf}} i$$

$$F_i = (-1)^{ns/2+i} \sum_{j=(i+1)/2}^{\min(i, ns/2)} \frac{j^{ns/2} (2j)!}{(ns/2 - j)! j! (j - 1)! (i - j)! (2j - i)!}$$

Так же при малых временах, расход жидкости из пласта в трещину меньше общего расхода скважины. Этот результат от влияния ствола трещины при средних и больших значениях t_{Dxf} , скорость потока в скважину создается увеличением мощности системы наружной стороны трещины. При больших значениях t_{Dxf} плотность потока стабилизируется.

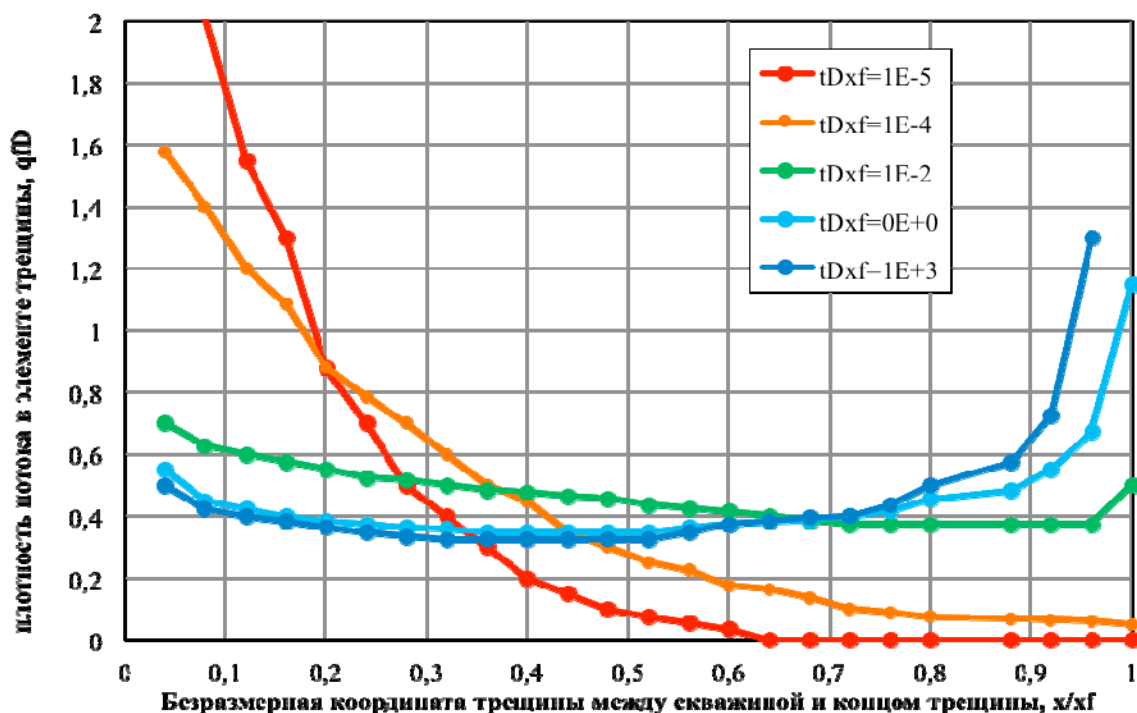


Рисунок 8 - Распределение плотность потока при $C_{FD} = 20$

Например, при низкой проводимости трещины $C_{FD} = 2C$ (рисунок 8) 70% потока придёт из ближайшей половины трещины. Однако приблизительно две трети целого потока придёт от дальнейшей половины для высоких проводимостей

трещины ($C_{fd} \geq 30$). Анализ полученных результатов демонстрирует влияние проводимости трещины на стабилизацию плотности потока вдоль трещины. Для высокой проводимости трещины плотность потока высока на участках вдали от скважины. Когда проводимость трещины уменьшается, плотность потока изменится таким образом, что поток, входящий в части трещины вблизи ствола скважины становится более устойчивым.

Это подчеркивает важность создания высокой проводимости трещин, чтобы преодолеть ограничения потока, созданные загрязнением околоскважинной зоны.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Исследование процесса стационарной фильтрации пластовой жидкости в системе «скважина - пласт-трещина» после БОГРП, с полудлинами трещин более 100 метров, указывает на существенный перепад давления по длине трещины, следствием которого является то, что 70 % притока приходится на первую половину трещины.

2 Разработанная модель стационарной фильтрации пластовой жидкости в пласте и трещине после БОГРП, позволяет прогнозировать увеличения продуктивности скважин с учетом как стандартного набора параметров трещины и окружающей пластовой системы, так и особенностей, связанных с несовершенством вскрытия скважиной продуктивного пласта.

3 Выявлено отсутствие «линейного» режима течения пластовой жидкости в пласте к трещине конечной проводимости, связанное с существенными перепадами давления по ее длине и зависящее от проводимости расклинивающего агента. Данное обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации результатов исследований, проводившихся на нестационарных режимах фильтрации.

4 Доказано отсутствие псевдорadiaльного режима течения к вертикальным скважинам с ограниченным контуром питания, то есть на месторождениях с расстоянием между скважинами менее 500 метров, имеющих протяженные трещины с полудлиной более 100 метров.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных трудах:

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Саад Фаик, Интерпретация диаграмм поведения с применением эталонных кривых Реми и других методов в нефтяных скважинах / Мохаммед Джавад Зейн

Аль-Абидин, Саад Фаик, М.Л. Карнаухова и Ш.Ж. Мирбобоев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2015. - №4. - С. 45-50.

2. Фаик С.А. Применение первого массивованного ГРП в России / А.В. Саранча, С.А. Фаик // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. - URL: www.science-education.ru/129-22136.

3. Фаик С.А. Определение увеличения продуктивности вертикальной скважины после МГРП с трещиной бесконечной проводимости и нулевым значением скин-эффекта до интенсификации / А.В. Саранча, С.А. Фаик, Д.А. Митрофанов, В.А. Огай // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №2; URL: www.science-education.ru/129-22133.

4. Фаик С.А. Определение направления потоков воды при заводнении пласта / М.Л. Карнаухова, С.А. Фаик // Известия высших учебных заведений. Нефть и Газ. - 2016. - №1. - С. 50-52.

5. Фаик С.А. Определение продуктивности и поведение давления в вертикальной скважины с трещиной бесконечной проводимости/ С.А. Фаик А.В. Саранча // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2017. - №5.- С. 96-99.

6. Фаик С.А. Определение продуктивности и поведение давления в вертикальной скважины с трещиной конечной проводимости / С.А. Фаик // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2017. - №6. - С. 106-112.

7. Фаик С.А. и Саранча А.В. Переменной проводимости трещины, поврежденной трещины и оптимизация / С.А. Фаик, А.В. Саранча // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2018. -№1. - С.68-74.

в сборниках тезисов докладов научных конференциях :

8. Фаик С.А. Определение режима работы залежи нефти на основе геолого-промыслового анализа разработки месторождений / С.А. Фаик // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Тюмень: ТюмГНГУ. - 2014. - С. 110-114.

9. Фаик С.А. Определение увеличения продуктивности вертикальной скважины после МГРП с трещиной конечной проводимости и положительным значением скин-фактора до интенсификации / А.В. Саранча, С.А. Фаик, Д.А. Митрофанов, В.А. Огай // Фундаментальные исследования. - 2015. - №9. С 507-511.

10. Фаик С.А. Анализ эффективности первого массивованного ГРП в Западной Сибири / А.В. Саранча, С.А. Фаик, Д.А. Митрофанов, В.А. Огай // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Т.2. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений / ТюмГНГУ; отв. ред. П.В. Евтин. – Тюмень: ТюмГНГУ. - 2015. – С. 77-83.

11. Фаик С.А. Прогнозная оценка увеличения продуктивности в незагрязненной вертикальной скважине после МГРП с трещиной бесконечной проводимости / А.В. Саранча, С.А. Фаик, Д.А. Митрофанов, В.А. Огай // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Т. 2. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений / ТюмГНГУ; отв. ред. П.В. Евтин. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С.72-77.

12. Фаик С.А. Исследование реологических свойств водонабохающих гранулированных гелей в трещине / Г.А. Али С.А. Фаик //Международной научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации), посвящённая 60-летию ТИУ» (г. Тюмень, 2016) Том 2 С 19-23.