

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Высшая школа теоретической механики

Работа допущена к защите

директор ВШ, д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

А. М. Кривцов

« ____ » _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ
ГИДРОРАЗРЫВА НА ГЕОМЕТРИЮ ТРЕЩИНЫ

По направлению 01.03.03 «Механика и математическое моделирование»
по образовательной программе
01.03.03_02 Биомеханика и медицинская инженерия

Выполнил

студент гр. 3630103/60201

Руководитель

доцент ВШТМ, к. ф.-м. н.



В. В. Сорокина



Е. Ю. Журавлёва

Санкт-Петербург

2020

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Институт прикладной математики и механики

УТВЕРЖДАЮ

Директор высшей школы

А.М. Кривцов

« 3 » февраля 2020 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Сорокиной Валерии Владимировне, группы 3630103/60201
фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: Влияние нестационарных свойств жидкости гидроразрыва на геометрию трещины
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 15 июня 2020 года
3. Исходные данные по работе: Научные статьи по теме работы, динамическая система уравнений движения трещины гидроразрыва пласта, программа моделирования роста трещины гидроразрыва пласта в слоистой среде с учетом только стационарных свойств жидкости, программа моделирования роста трещины гидроразрыва пласта в слоистой среде с учетом нестационарных свойств жидкости гидроразрыва, табличные лабораторные данные с временными зависимостями физико-химических свойств жидкости гидроразрыва.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
Расчет геометрии трещины в программном модуле Planar3D, учитывающем только стационарные свойства жидкости.
Расчет геометрии трещины в программном модуле Planar3D, учитывающем нестационарные свойства жидкости.
Сравнение результатов для двух моделей, качественный и количественный анализ влияния нестационарных свойств жидкости на геометрию трещины гидроразрыва пласта.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): отсутствует
6. Консультанты по работе: отсутствует
7. Дата выдачи задания 3 февраля 2020 год

Руководители ВКР


(подпись)

Е.Ю. Журавлёва
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 3 февраля 2020 года

(дата)

Студент


(подпись)

В.В. Сорокина
инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 40 с., 20 рисунков, 13 таблиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА, PLANAR3D, ДЕГРАДАЦИЯ ЖИДКОСТИ

Тема выпускной квалификационной работы: «Влияние нестационарных свойств жидкости гидроразрыва на геометрию трещины». Данная работа посвящена исследованию деградации жидкости при проведении гидроразрыва пласта.

Задачи, которые решались в ходе исследования: определение влияния эффекта нестационарности свойств (деградации) жидкости на геометрию моделируемой трещины; проверка гипотезы о возможности статистической оценки геометрии трещины с помощью расчетов без явного учета деградации жидкости.

Проведены серии экспериментов при различных входных параметрах литологии и свойств жидкости гидроразрыва с помощью расчётного модуля Planar3D с учётом и без учёта деградации жидкости. По полученным данным построены графики, проведен качественный и количественный анализ.

ABSTRACT

40 pages, 20 figures, 13 tables

KEYWORDS: HYDRAULIC FRACTURING, PLANAR3D MODEL, FLUID DEGRADATION

The subject of the graduate qualification work is: “The influence of non-stationary properties of hydraulic fracturing fluid on the fracture geometry”. The given work is devoted to studying of fluid degradation during hydraulic fracturing.

The research set the following goals: to determine the effect of non-stationary fluid properties on the geometry of a fracture; to check the hypothesis about the

possibility of a statistical estimation of the fracture geometry using calculations without explicitly taking into account fluid degradation.

A series of numerical experiments was conducted with various input parameters of lithology and hydraulic fracturing fluid using the Planar3D calculation module, taking into account and without taking into account the fluid degradation effect. Based on the data obtained, a qualitative and quantitative analysis was conducted.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. МОДЕЛЬ PLANAR3D.....	8
1.1. Постановка задачи.....	8
1.2. Модуль Planar3D без учёта «старения» жидкости.....	9
1.3. Модуль Planar3D с учётом «старения» жидкости	10
1.4. Параметры расчёта.....	13
ГЛАВА 2. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	15
2.1. Графическое представление результатов	16
2.2. Анализ графиков	22
2.3. Трёхслойная несимметричная среда	24
2.4. Однородная среда.....	28
2.5. Одиннадцатислойная среда.....	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	39

ВВЕДЕНИЕ

В наше время нефтяная промышленность является неотъемлемой отраслью в мировом хозяйстве, от развития которой зависит не только экономическая, но и политическая картина мира; а нефть по праву считается одним из уникальных и значимых природных ископаемых. Результатом нефтепереработки являются такие важные продукты, как бензин, керосин, различные пластмассы, асфальт и многое другое.

С увеличением объёмов добычи нефти растёт и доля трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) [10]. Нет точного определения данного понятия, но примерами могут служить запасы, залегающие на глубине более 4000 м или находящиеся в коллекторах с коэффициентом извлечения менее 0.05 мкм², а также запасы высоковязкой нефти, которая отличается низкой подвижностью и сложностью подъёма на поверхность. В целом, к ТРИЗ относятся такие запасы месторождений и залежей, обладающие относительно неблагоприятными для добычи условиями залегания либо аномальными физическими свойствами самой нефти [4, 8]. Одним из методов разработки месторождений ТРИЗ выступает гидравлический разрыв пласта (ГРП), являющийся наиболее эффективным и актуальным механическим методом воздействия на пласт в целях увеличения коэффициента извлечения нефти и повышения продуктивности скважины, вскрывающей этот пласт [5].

Технология проведения ГРП включает в себя несколько этапов. На первом этапе проводится закачка жидкости разрыва в скважину под высоким давлением, превышающим давление разрыва нефтесодержащего пласта. Второй этап подразумевает создание трещины с высокой проводимостью, связывающей ствол скважины с продуктивным пластом, для обеспечения роста фильтрационной поверхности скважины и стимуляции притока флюида: газа, воды, нефти или их смеси. Третьим этапом является поддержание трещины в открытом состоянии после снятия избыточного давления благодаря расклинивающе-

му агенту, например пропанту или кварцевому песку. После успешного проведения ГРП дебит добывающей и приемистость нагнетательной скважин увеличиваются, как и конечная нефтеотдача [6]. Достижение поставленной цели и оптимизация ГРП для каждой скважины осуществляется подбором индивидуальных параметров. Вследствие недоступности прямого наблюдения за процессом раскрытия трещины ГРП для оценки её геометрических размеров применяют методы компьютерного моделирования. После проведения серии мини-ГРП опытные данные используются при выборе и калибровке модели роста трещины [7].

Распространёнными трёхмерными моделями являются Pseudo3D, Planar3D и Full3D [2, 3]. Модели имеют ограничения на распространяющийся поток жидкости: в Pseudo3D предполагается, что поток жидкости является одномерным, в Planar3D – двумерным, в Full3D поток жидкости может распространяться в любом направлении. Среди указанных подходов Pseudo3D – самый простой и быстрореализуемый, поскольку в нём используется допущение, что длина трещины существенно превышает её высоту. Это не всегда корректно на практике (пример - радиальная трещина), поэтому современные симуляторы ГРП часто ориентируются на Planar3D как более полную и точную в вычислениях двумерную модель, не имеющую ограничений на соотношение сторон трещины. Однако оба подхода допускают распространение трещины исключительно в плоскости. Для учёта более сложной геометрии требуется применение подхода Full3D, недостатком которого является высокая алгоритмическая сложность расчёта.

Не менее важным этапом при подготовке к проведению ГРП на практике, наряду с моделированием, являются подбор параметров жидкости гидроразрыва и дальнейшее её приготовление [1]. Эффективность применения какой-либо жидкости гидроразрыва требует проведения ряда опытов по определению реологических и других свойств жидкости. Для её приготовления используется, как правило, вода из пресных источников, причём важным условием является

короткий временной промежуток между взятием пробы воды для последующих исследований и непосредственным приготовлением. Определение вязкости может быть выполнено с помощью ротационного вискозиметра типа Куэтта. Также большое значение имеет оценка пропантоудерживающей и пропантонесущей способностей жидкости гидроразрыва [1, 9]. Для первого показателя ставят эксперимент с замером времени от предварительного перемешивания исследуемой жидкости до полного осаждения пропанта в объёме, для характеристики умения удерживать частицы пропанта при прекращении закачки. Второй показатель актуальнее для жидкостей с малым показателем вязкости, применяющихся при проведении ГРП в коллекторах с низкой проницаемостью. В лабораторных условиях с помощью специальной установки, представляющей собой прозрачную модель трещины, образованной при ГРП, происходит не только оценка несущей способности жидкости, но и подбор наиболее результативной скорости закачки.

При моделировании ГРП обычно предполагается, что жидкость не изменяет своих свойств с течением времени, то есть не учитываются фактор «старения» жидкости, при котором по мере увеличения времени её нахождения в трещине происходят изменения её реологических свойств. Этот процесс также можно описать как деградацию жидкости: разрушение со временем характеристик, заложенных на начальном этапе приготовления. Известным фактом является ухудшение при «старении» способности жидкости переносить пропант, что в свою очередь может влиять на саму геометрию трещины – на её высоту, длину и раскрытие.

Данная работа посвящена исследованию влияния нестационарных свойств жидкости ГРП на геометрию образующейся трещины.

ГЛАВА 1. МОДЕЛЬ PLANAR3D

1.1. Постановка задачи

На базе разработанных в научно-образовательном центре "Газпромнефть-Политех" расчётных модулей Planar3D требуется провести численные эксперименты и оценить влияние эффекта деградации жидкости гидроразрыва на геометрию моделируемой трещины ГРП с учётом и без учёта «старения», рассматривая также жидкости с различными реологическими свойствами.

В каждом из экспериментов получить верхнюю и нижнюю оценку размеров трещины, основанные на гипотезе, что верхней оценке соответствует закачке исключительно молодой жидкости, а нижней – закачка уже разрушившейся жидкости, при этом на протяжении всего моделирования свойства жидкости можно считать постоянными. Получение таких оценок размеров трещины ГРП представляет интерес, поскольку учёт старения», учёт нестационарности свойств жидкости, значительно усложняет расчеты и увеличивает их продолжительность. Сформулированная гипотеза подлежит проверке.

В ходе работы было необходимо выполнить следующий ряд задач:

1. Изучить литературу, описывающую подходы к моделированию гидроразрыва пласта.
2. Изучить расчетный модуль Planar3D.
3. Выполнить на базе расчетного модуля Planar3D ряд компьютерных экспериментов для нестационарной модели жидкости и двух стационарных моделей (с «молодой» и «состарившейся» жидкостями ГРП) при различных параметрах жидкости.
4. На основании полученных данных о геометрических размерах трещины в различные моменты времени построить графики, которые позволят наглядно определить необходимость учёта влияния исследуемого фактора на геометрию трещины.
5. Представить данные в виде таблиц для сравнения результатов и последующего анализа.

6. По итогам работы сделать заключение о справедливости гипотезы, упрощающей расчеты, и применимости верхней и нижней оценок геометрии трещины.

1.2. Модуль Planar3D без учёта «старения» жидкости

Используемый расчётный модуль построен на явной схеме интегрирования по времени, что является его ключевой особенностью [15]. Как известно, любая модель, описывающая реальный процесс, имеет ряд допущений. В нашей постановке прогнозирования роста трещины ГРП пласт моделируется как набор горизонтальных слоёв. Характеристиками каждого выступают значения упругих модулей и минимальных сжимающих напряжений. Упругие свойства будем считать квазиоднородными, описываемыми эффективным значением модулей плоской деформации (рассчитывается как взвешенное по мощности слоя среднее арифметическое). Механические свойства в рамках слоя при этом не только однородны, но и изотропны. Распространение трещины происходит в плоскости, перпендикулярной направлению минимальных сжимающих напряжений. Моделируемая жидкость описывается степенным реологическим законом и обладает свойством несжимаемости, а её движение в трещине подчиняется уравнению теории смазки без учёта силы тяжести. Деформирование пласта описывается линейной теорией упругости.

Входные параметры расчётного модуля Planar3D делятся на два типа. Первые относятся к слоям моделируемой породы: мощность слоя, определяемая координатами начала и конца слоя, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, минимальные сжимающие напряжения, характеризующие контраст между соседними слоями, а также трещиностойкость и коэффициент утечек в законе Картера. Вторые касаются характеристик закачки: скорость закачки, определяющая объём закачиваемой жидкости в минуту, индекс поведения жидкости, коэффициент динамической вязкости (в случае ньютоновской жидкости) либо коэффициент динамической консистенции (коэффициент густоты потока) для не-

ньютоновской жидкости. Для каждого слоя и каждой стадии закачки параметры задаются индивидуально.

В используемой постановке давление и раскрытие трещины связаны гиперсингулярным интегралом теории упругости [15]

$$p(x, y, t) = \sigma(y) + \frac{E'}{8\pi} \iint \frac{w(\hat{x}, \hat{y}, t)}{((x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2)^{3/2}} d\hat{x}d\hat{y},$$

где $p(x, y, t)$ – давление в точке с координатами (x, y) в момент времени t ; σ – сжимающие пластовые напряжения в направлении, перпендикулярном плоскости трещины; $E' = E/(1 - \nu^2)$ – модуль плоской деформации, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона; w – раскрытие трещины.

Согласно используемому предположению, что течение жидкости подчиняется обобщённому уравнению Пуазейля, баланс массы для жидкости можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} = \nabla \left(\left(\frac{w(x, y, t)^{2n+1}}{\mu'} \right)^{1/n} |\nabla p(x, y, t)|^{\frac{1}{n}-1} \nabla p(x, y, t) \right) + Q(0,0, t),$$

где $\mu' = 2 \left(4 + \frac{2}{n} \right)^n \mu$ – обобщённый коэффициент консистенции; n – показатель степени реологии; μ – коэффициент динамической вязкости; Q – объём закачки жидкости в трещину.

Для решения системы уравнений используем метод конечных разностей и пространственную дискретизацию с размером ячейки $(\Delta x, \Delta y = \Delta x)$.

1.3. Модуль Planar3D с учётом «старения» жидкости

Допущения расчётного модуля Planar3D с учётом «старения» жидкости совпадают с допущениями, изложенными в п. 1.2 для модуля без учёта данного фактора, за исключением лишь предположения, что жидкость с разными свойствами перетекает из одной ячейки в другую. При этом она «несёт» какое-то время, и при попадании в одну ячейку жидкостей с разными реологическими свойствами и временами, получаем на основании правила смесей жидкость с

уже отличными свойствами и временем, рассчитанными как взвешенное пропорционально объёму жидкости среднее арифметическое. Таким образом происходит «переток времени».

Одним из общих допущений расчётных модулей является подчинение неньютоновской жидкости степенному реологическому закону [13]

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n$$

где τ – напряжение сдвига; K – коэффициент динамической консистенции; $\frac{\partial u}{\partial y}$ – градиент скорости вдоль оси, перпендикулярной к плоскости сдвига слоёв жидкости; n – показатель поведения жидкости. В случае ньютоновской жидкости показатель $n = 1$ и коэффициент пропорциональности между напряжением сдвига и градиентом скорости называется коэффициентом вязкости и обозначается μ .

При учёте «старения» жидкости предполагается изменение как коэффициента консистенции K , так и показателя поведения n . Нестационарность данных свойств жидкости описана в табл. 1.1, а также показана на рис. 1.1.

Таблица 1.1

Изменения коэффициента консистенции K и показателя поведения n от времени

Время, мин	$K, \text{Па} \cdot \text{с}^n$	n
0	0.01	0.6
15	0.15	1.0
30	0.369	1.0
45	0.544	1.0
60	0.4	1.0

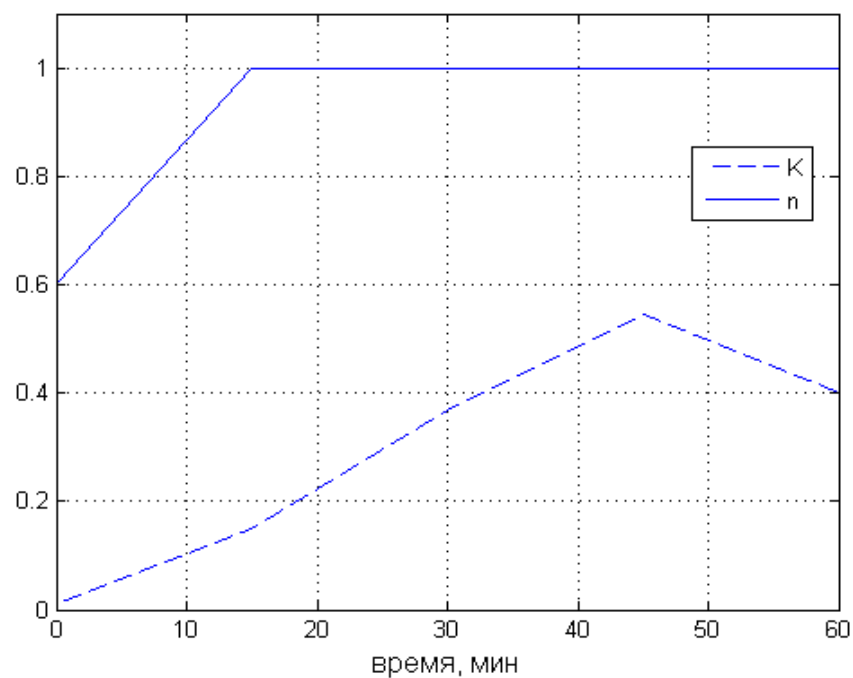


Рисунок 1.1 Зависимости коэффициента консистенции K и показателя поведения n от времени

Для наглядного понимания распределения жидкости по трещине с различным временем пребывания в ней соответствующее поле построено на рис.1.2.

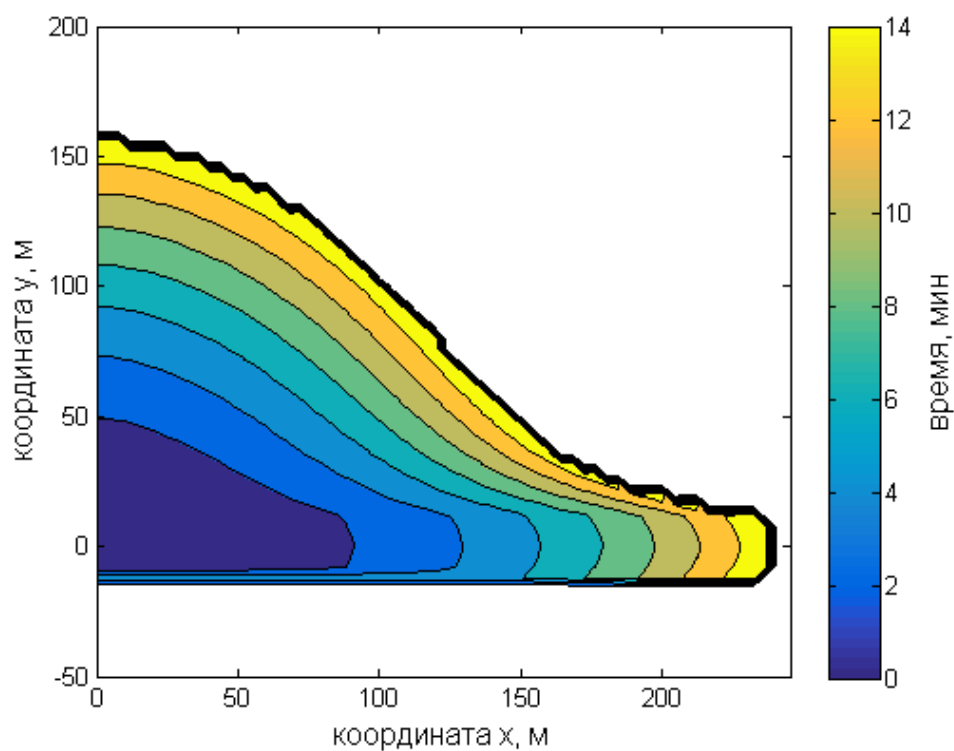


Рисунок 1.2 Распределения времени пребывания жидкости в трещине

Распространение трещины происходило в трёхслойной несимметричной среде с контрастами напряжений 1 МПа и 4 МПа при расходе 5 м³/мин. Начальными параметрами закачки являлись значения 0.01 Па · сⁿ для коэффициента консистенции и 0.6 для индекса поведения. Время моделирования составляло 15 мин.

Из графика видим, что в области границы трещины расположена жидкость с наибольшим временем нахождения эквивалентному времени моделирования, а в точке закачки с координатами (0;0) и её окрестности жидкость с временем пребывания меньше одной минуты.

1.4. Параметры расчёта

Серия экспериментов проводится в двух постановках: первая – без учёта «старения» жидкости, вторая – с учётом данного фактора. В каждом из экспериментов для первой постановки закачивается один из двух типов гелей: гель, приближенный к воде (значение вязкости 0.01 Па · сⁿ) или линейный гель (значение вязкости 0.4 Па · сⁿ). Показатель в законе реологии может принимать значения $n = 0.6$ для первого, что соответствует неньютоновской жидкости, и $n = 1$ для второго геля, что соответствует ньютоновской жидкости.

Во второй постановке задачи задаются начальные параметры меняющихся свойств жидкости гидроразрыва. Для всех экспериментов используется гель со значением вязкости 0.01 Па · сⁿ, а показатель реологии соответствует неньютоновской жидкости ($n = 0.6$). Расход постоянен для всего времени моделирования и равен либо 1 м³/мин, либо 5 м³/мин.

Исследуются три варианта контрастов по минимальным сжимающим напряжениям: однородная среда, трёхслойная несимметричная среда и многослойная несимметричная среда. В качестве последней была выбрана одиннадцатислойная среда. Минимальные сжимающие напряжения в центральном слое составляют 30 МПа, в то время как контраст варьируется в диапазоне 1-5 МПа. Мощность центрального слоя постоянна и равна 20 м. Модуль Юнга и

коэффициент Пуассона одинаковы для всех слоёв, не изменяются со временем и равны 30 ГПа и 0.25 соответственно.

Для иллюстрирования выбранных контрастов были составлены таблицы: для трёхслойной среды – табл. 1.2, для одиннадцатислойной среды – табл. 1.3. Равенства начальной координаты 1000 м, а конечной координаты -1000 м, означают, что граничные слои моделируются как полубесконечные.

Таблица 1.2

Координаты и контраст напряжений трёхслойной несимметричной среды

Начальная координата слоя, м	Конечная координата слоя, м	Сжимающие напряжения, МПа
1000	10	31
10	-10	30
-10	-1000	34

Таблица 1.3

Координаты и контраст напряжений одиннадцатислойной несимметричной среды

Начальная координата слоя, м	Конечная координата слоя, м	Сжимающие напряжения, МПа
1000	34	35
34	28	32
28	22	29
22	16	34
16	10	32
10	-10	30
-10	-16	31
-16	-22	32
-22	-28	33
-28	-34	34
-34	-1000	35

Всего было проведено 18 экспериментов, в 6 из которых учитывалось нестационарность свойств жидкости гидроразрыва. Минимальное время моделирования ГРП составляло 15 мин, максимальное – 30 мин.

ГЛАВА 2. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В п. 1.1. были поставлены две задачи. Первая – определить влияние эффекта «старения» жидкости гидроразрыва на геометрию трещины ГРП. Вторая – проверка гипотезы, что оценку характерных размеров трещины, образующейся при закачке деградирующей жидкости, можно провести по двум экспериментам с закачкой жидкости с постоянными на всём протяжении моделирования свойствами: только «молодой» и только «старой» жидкости. Если влияние деградации жидкости на геометрию трещины можно будет заменить, например, на взвешенное среднее арифметическое от результатов двух таких экспериментов с упрощенной постановкой, от явного учета нестационарности жидкостных свойств в расчетном модуле можно будет отказаться. Это позволит сократить число решаемых уравнений и упростить код такого модуля без пренебрежения эффектом деградации.

Чтобы решить обе задачи, для каждого варианта контрастов по минимальным сжимающим напряжениям была предложена нумерация экспериментов, приведённая в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Нумерация экспериментов с указанными свойствами закачиваемой жидкости

Номер эксперимента	Скорость закачки, м ³ /мин	Показатель поведения n	Коэффициент консистенции $K, \text{Па} \cdot \text{с}^n$
1	1	0.6	0.01
1*	1	0.6	0.01
2	1	1.0	0.4
3	5	0.6	0.01
3*	5	0.6	0.01
4	5	1.0	0.4

Эксперименты № 1, 2, 3, 4 рассчитываются в модуле Planar3D без учёта «старения» жидкости. Для данных вычислений параметры жидкости не меняются с течением времени.

Эксперименты «со звёздочкой» № 1* и 3* соответствуют расчётам в модуле Planar3D с учётом нестационарности свойств (см. табл. 1.1).

2.1. Графическое представление результатов

На основании полученных данных для всех расчётов были построены графики литологии с указанием координат слоёв и контраста пластовых напряжений. Вместе с этим производилось построение профилей раскрытия в двух взаимноперпендикулярных сечениях, одно из которых перпендикулярно стволу скважины. Последний график демонстрирует только одно крыло трещины в силу условия симметрии трещины. Графики были выполнены с помощью пакета прикладных программ MATLAB и представлены: для трёхслойной несимметричной среды на рис. 2.1 – 2.6, для однородной среды на рис. 2.7 – 2.12, для одиннадцатислойной среды на рис. 2.13 – 2.18.

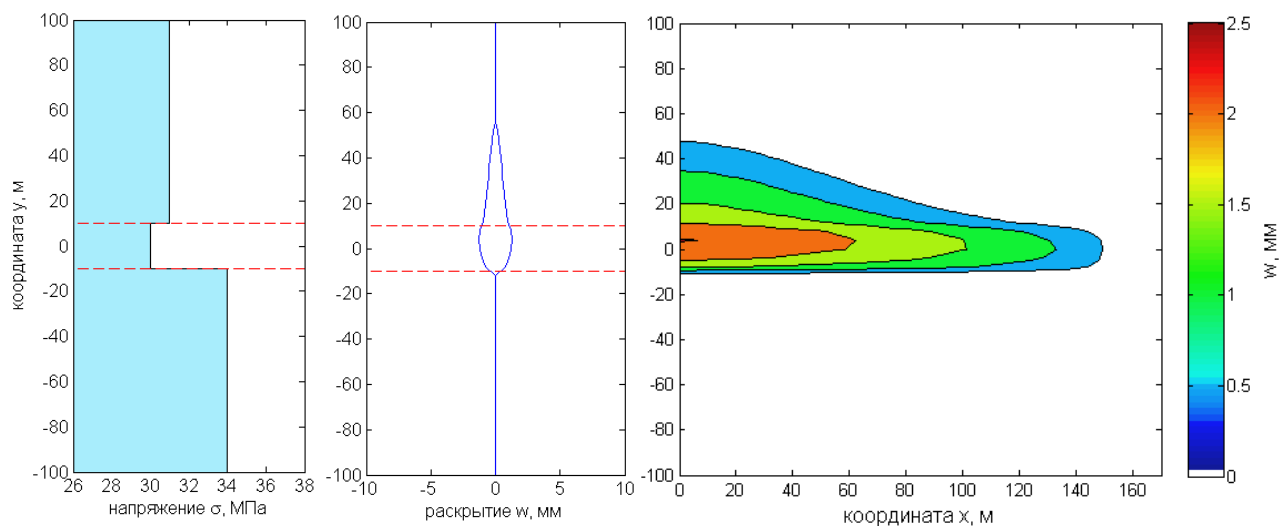


Рисунок 2.1 Эксперимент 1 для трёхслойной несимметричной среды

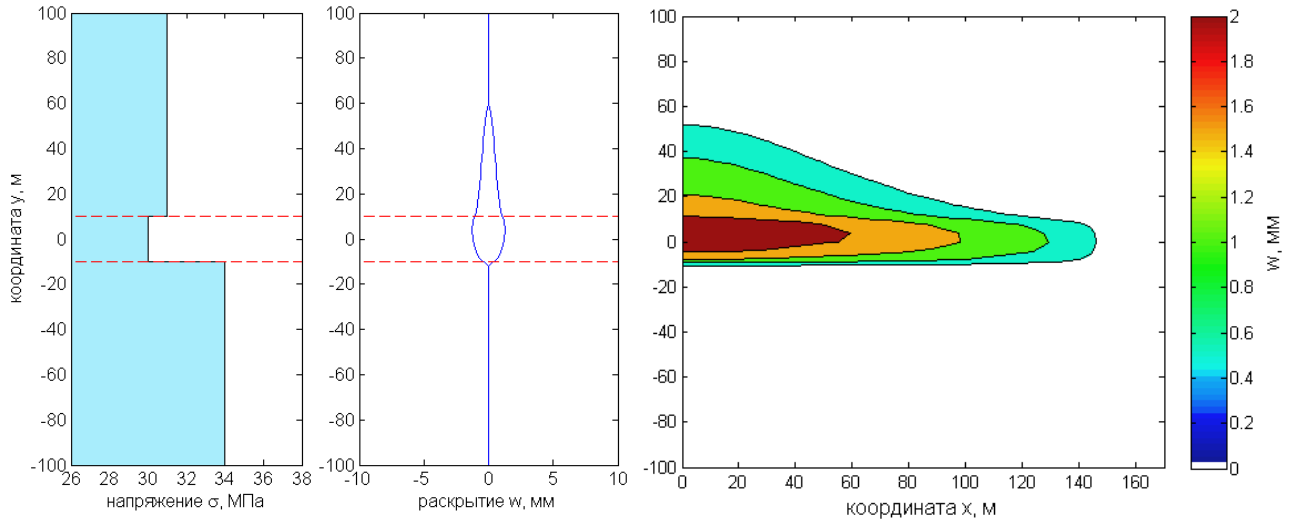


Рисунок 2.2 Эксперимент 1* для трёхслойной несимметричной среды

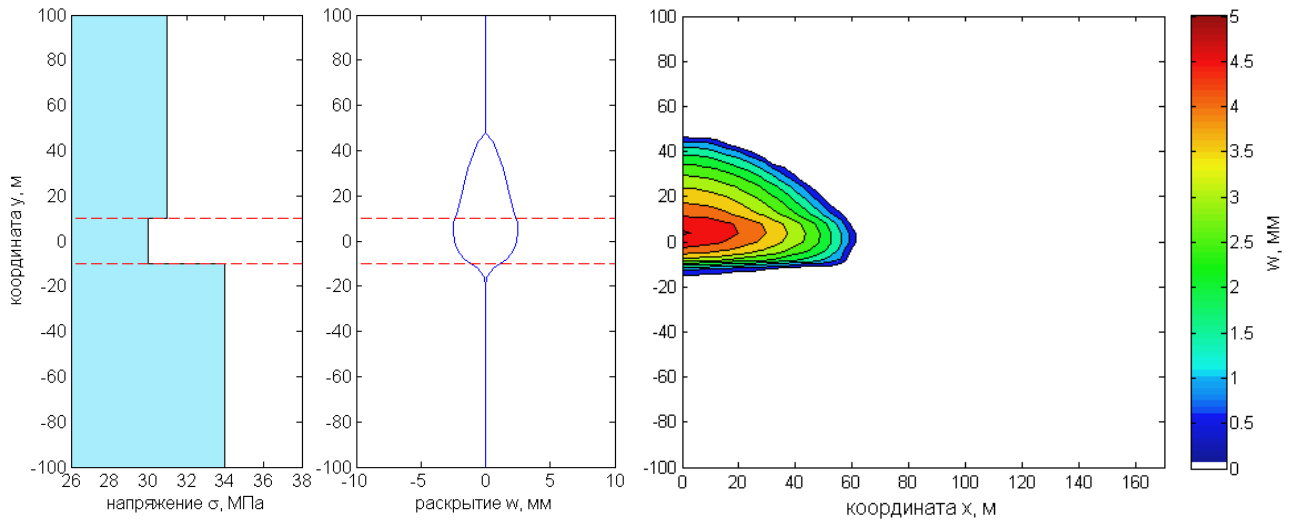


Рисунок 2.3 Эксперимент 2 для трёхслойной несимметричной среды

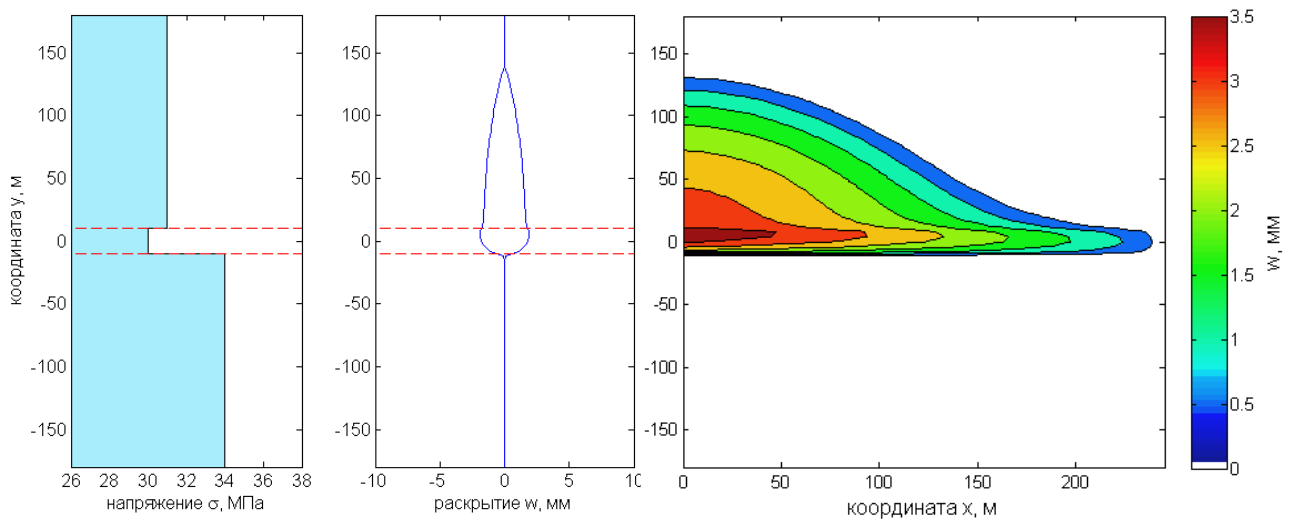


Рисунок 2.4 Эксперимент 3 для трёхслойной несимметричной среды

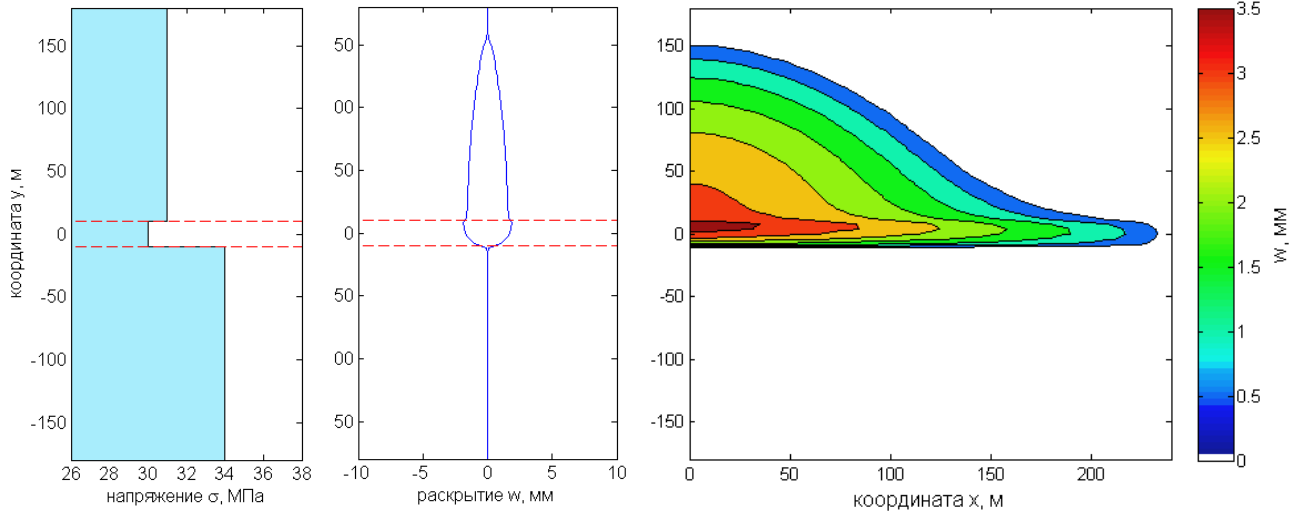


Рисунок 2.5 Эксперимент 3* для трёхслойной несимметричной среды

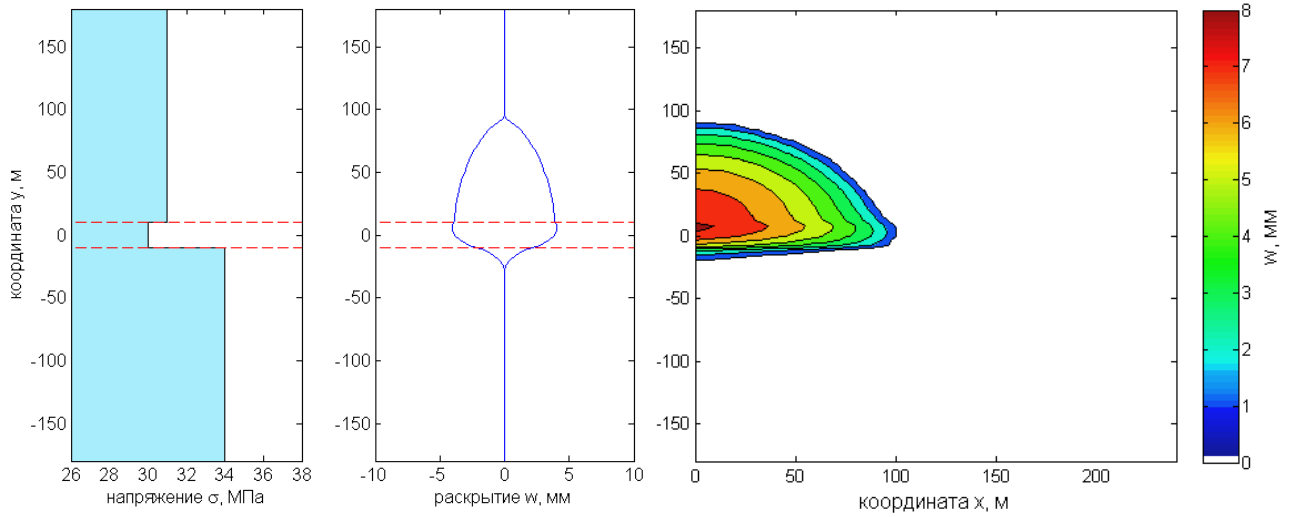


Рисунок 2.6 Эксперимент 4 для трёхслойной несимметричной среды

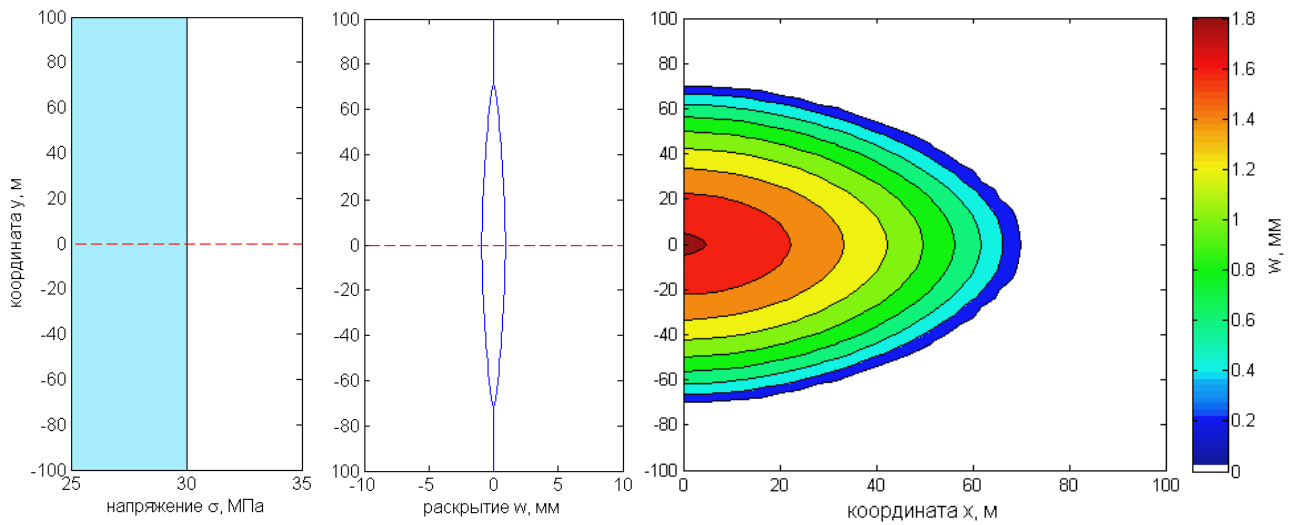


Рисунок 2.7 Эксперимент 1 для однородной среды

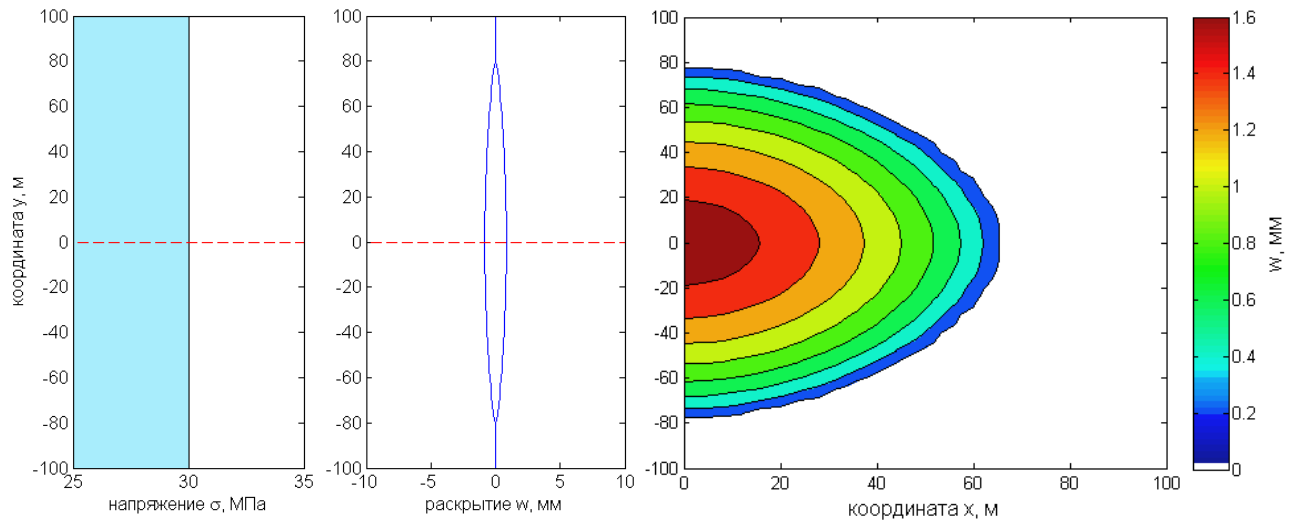


Рисунок 2.8 Эксперимент 1* для однородной среды

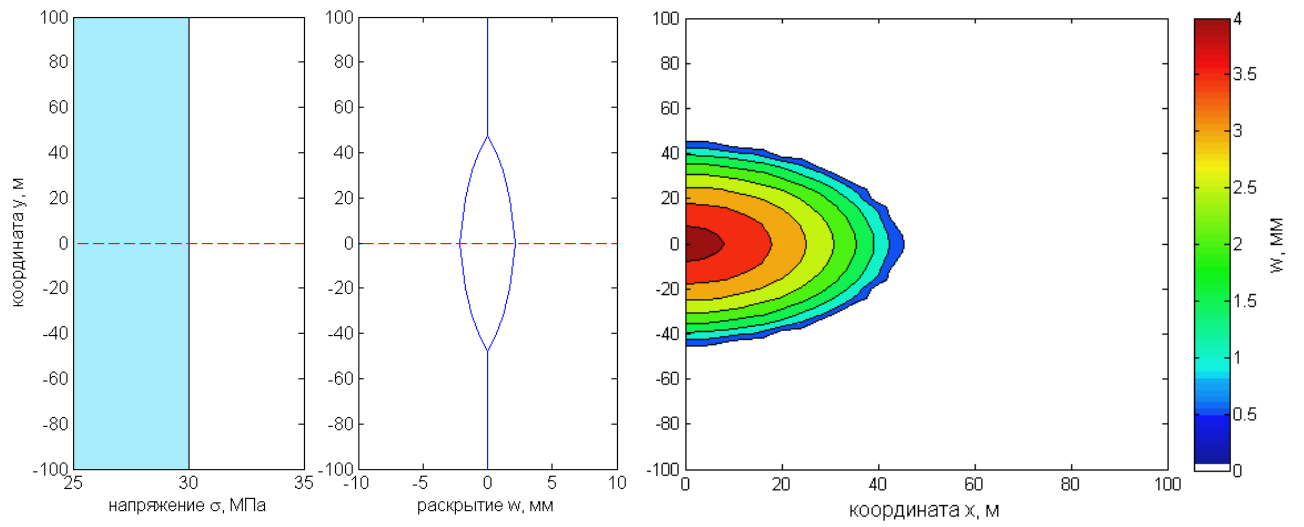


Рисунок 2.9 Эксперимент 2 для однородной среды

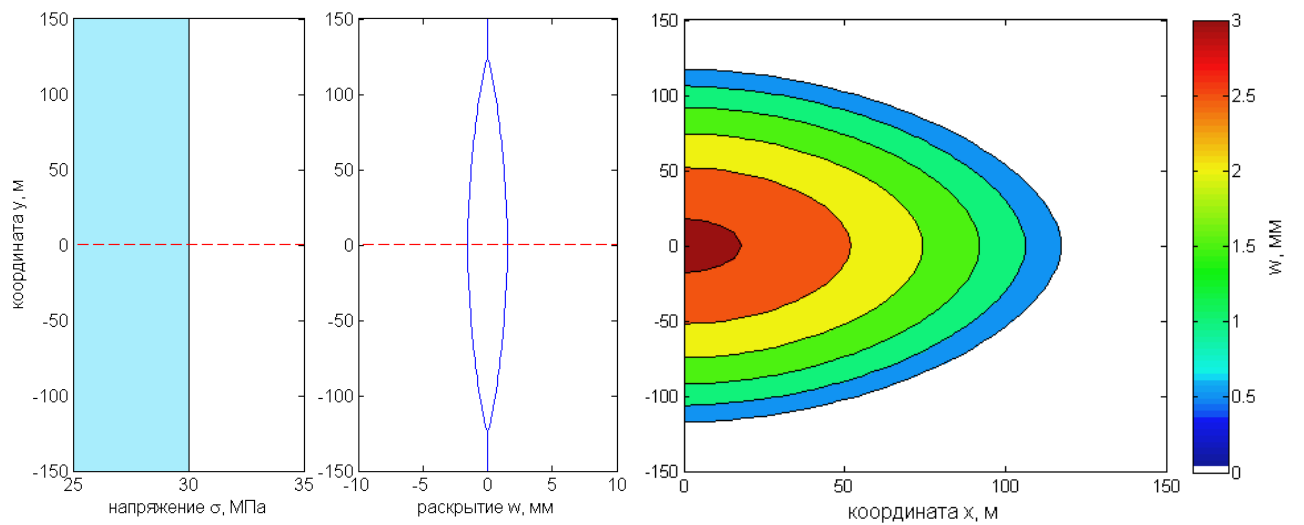


Рисунок 2.10 Эксперимент 3 для однородной среды

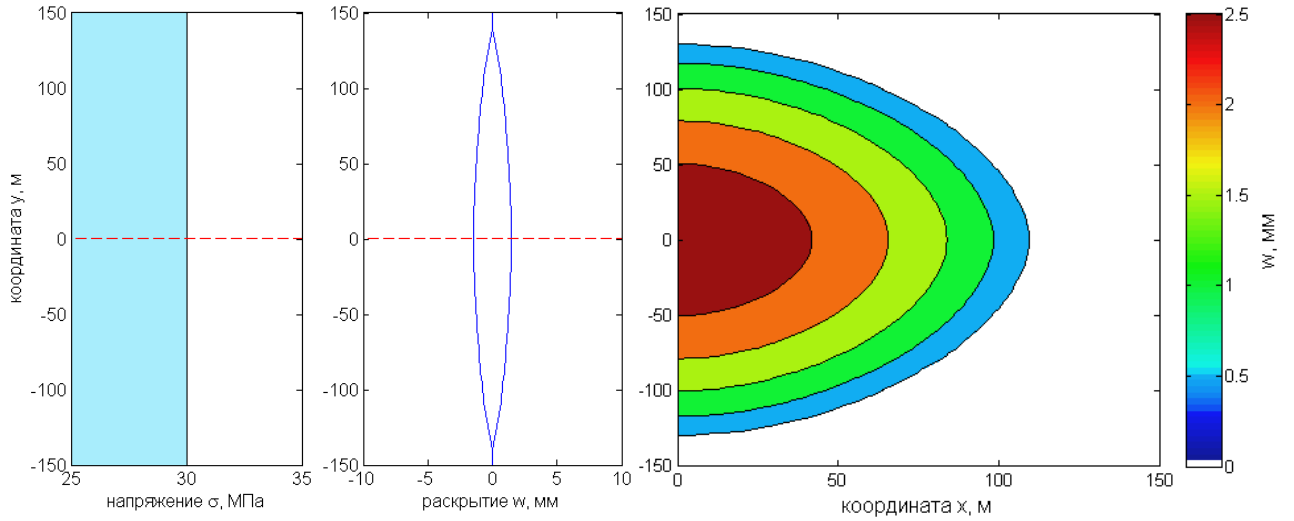


Рисунок 2.11 Эксперимент 3* для однородной среды

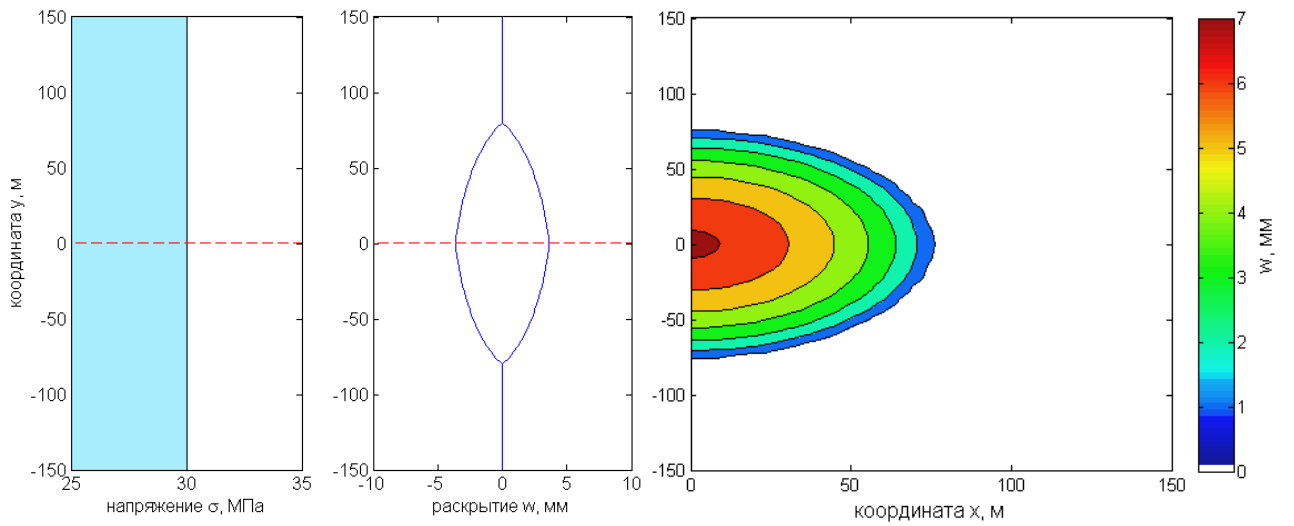


Рисунок 2.12 Эксперимент 4 для однородной среды

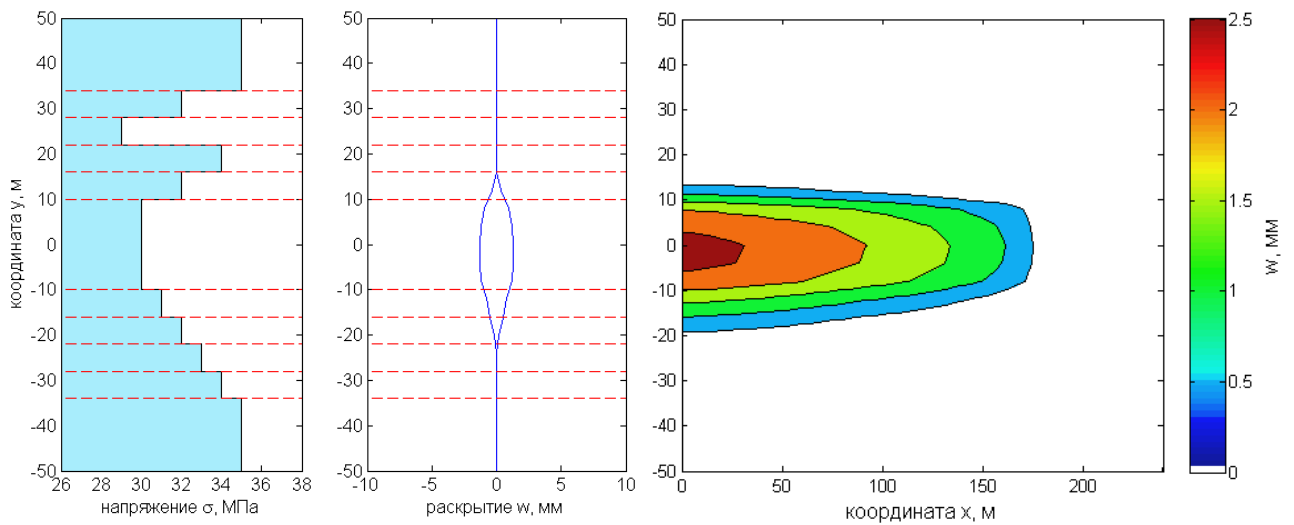


Рисунок 2.13 Эксперимент 1 для одиннадцатислойной среды

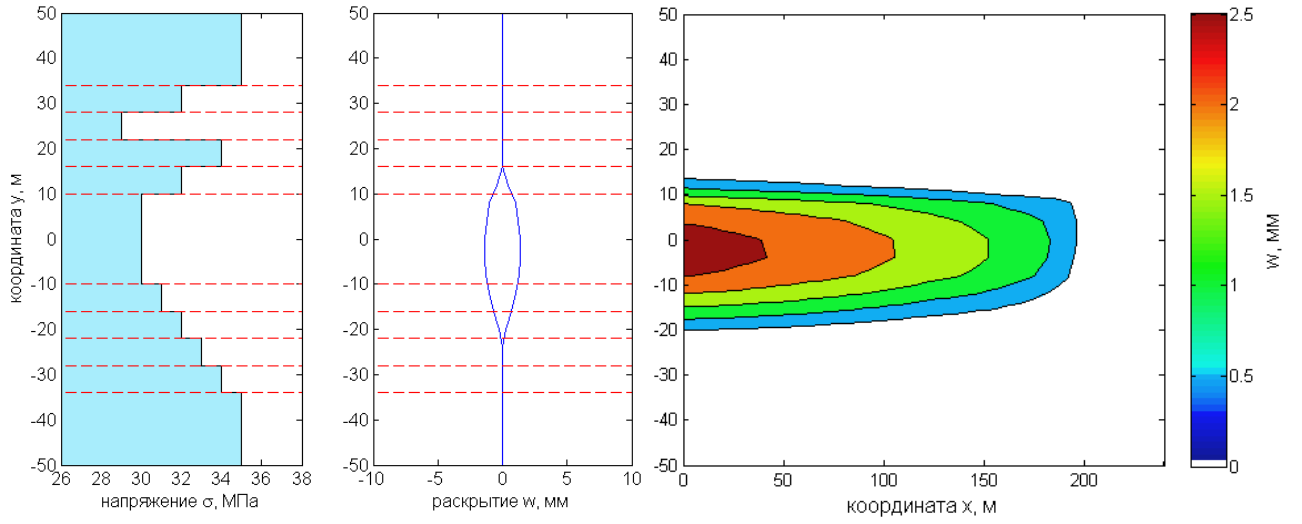


Рисунок 2.14 Эксперимент 1* для одиннадцатислойной среды

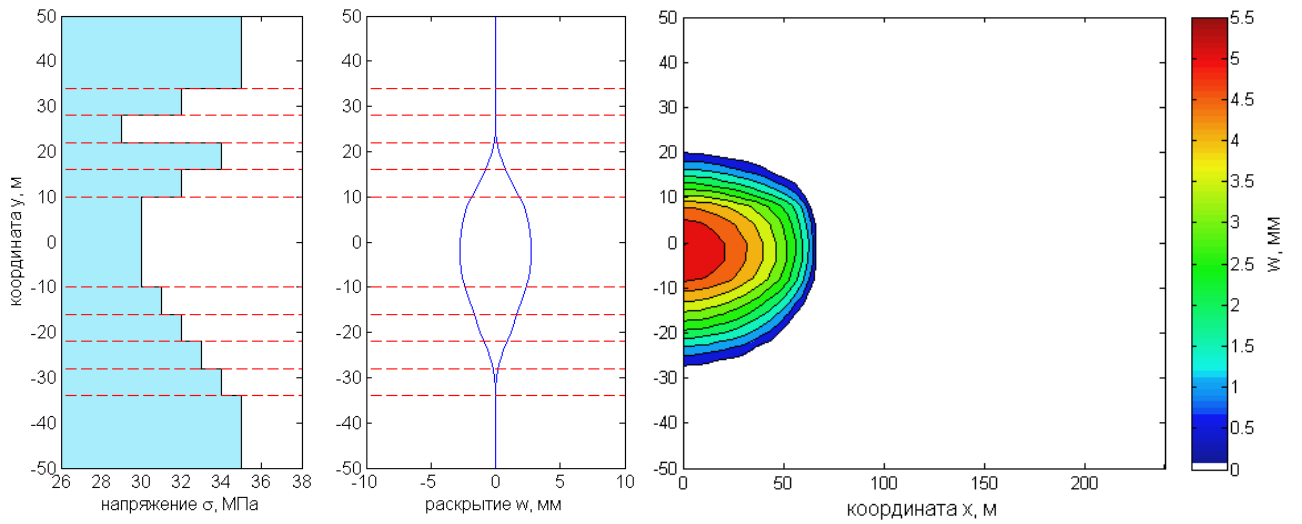


Рисунок 2.15 Эксперимент 2 для одиннадцатислойной среды

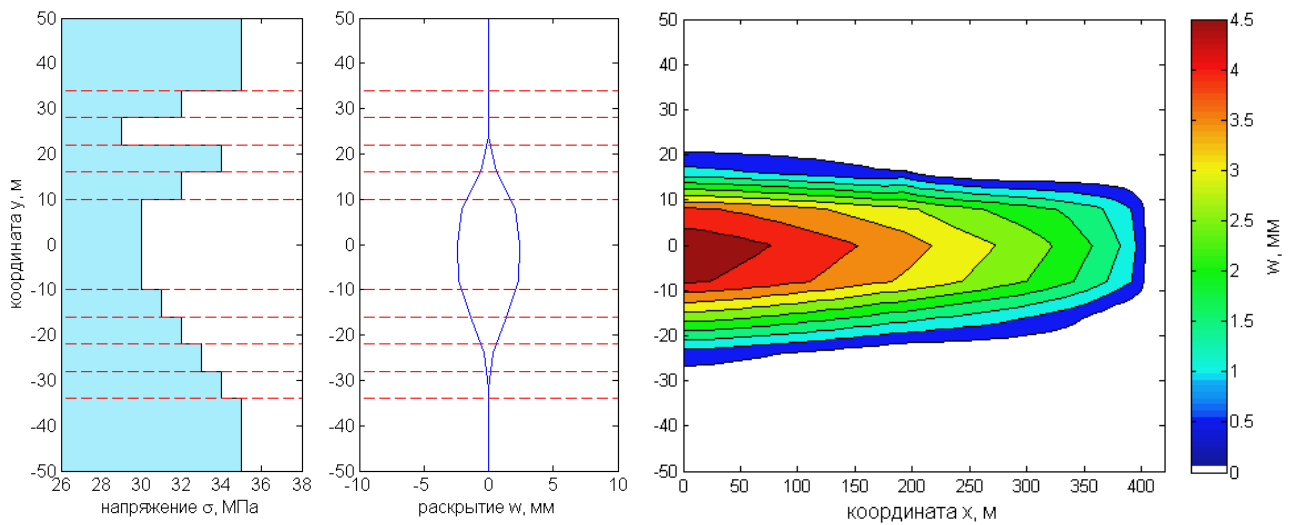


Рисунок 2.16 Эксперимент 3 для одиннадцатислойной среды

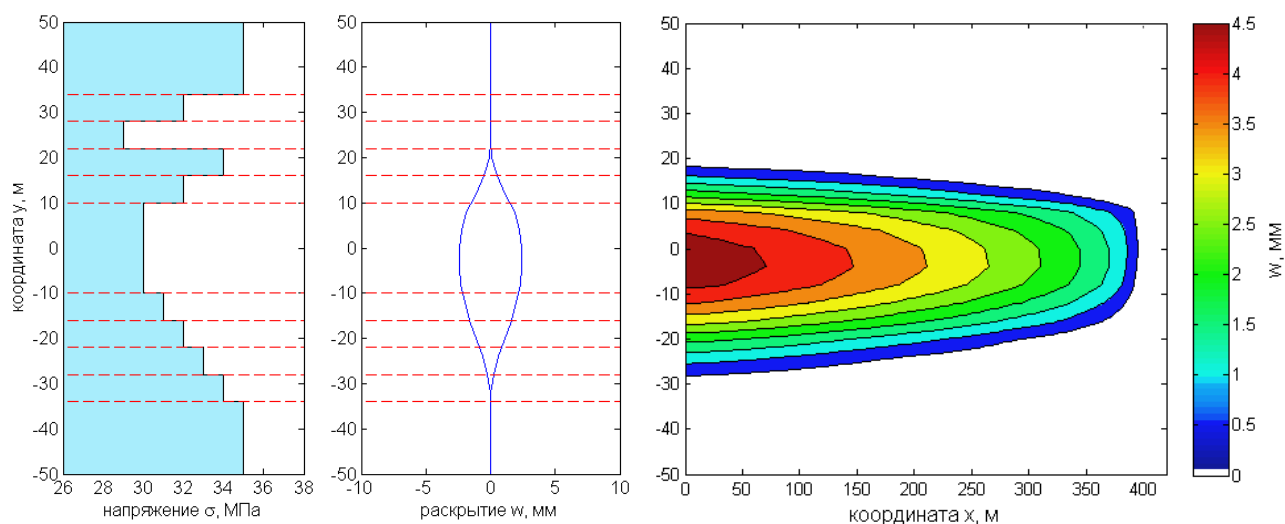


Рисунок 2.17 Эксперимент 3* для одиннадцатислойной среды

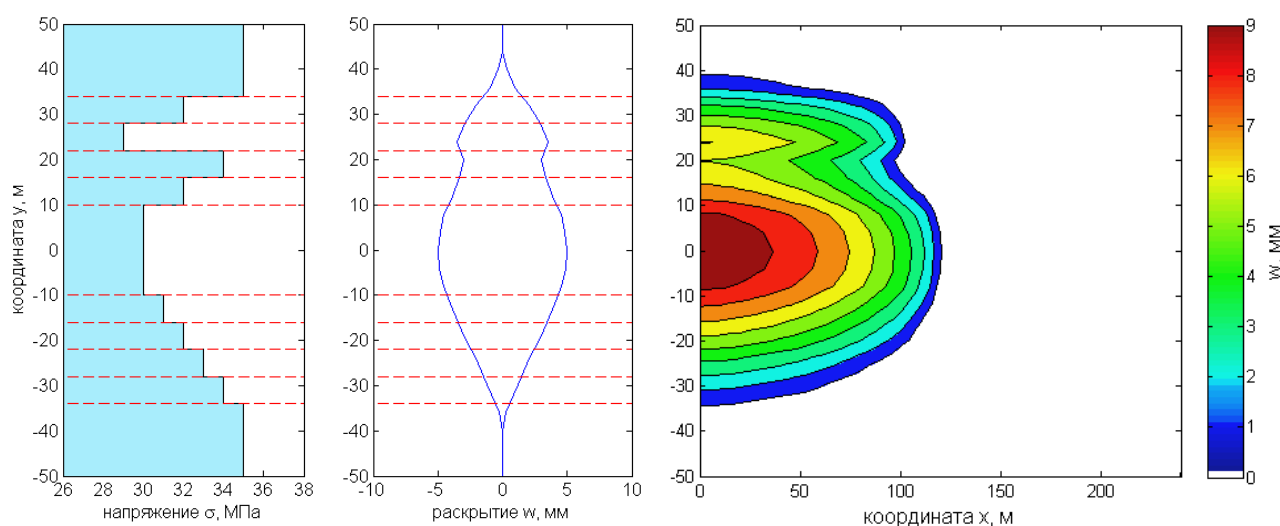


Рисунок 2.18 Эксперимент 4 для одиннадцатислойной среды

2.2. Анализ результатов

Для ответа на вопрос, как влияет учёт деградации жидкости на конфигурацию трещины ГРП, необходимо сопоставить пары расчётов 1 и 1*, 3 и 3* для каждого варианта контрастов напряжений.

При сравнении экспериментов с номерами 1 (см. рис. 2.1) и 1* (см. рис. 2.2) для трёхслойной несимметричной среды видим, что при учёте старения жидкости общий вид геометрии трещины не меняется, однако она становится менее раскрытой. При этом длина трещины (вдоль координаты x) уменьшается, а высота (вдоль координаты y) наоборот увеличивается.

Сравнивая эксперименты 1 (см. рис. 2.1), 1* (см. рис. 2.2) и 2 (см. рис. 2.3), следует обратить внимание, что геометрия трещины в эксперименте 2, соответствующему уже разрушившейся по свойствам жидкости, разительно отличается от 1 и 1*: трещина меньше по длине почти в 2 раза, высота практически не меняется, а максимальное раскрытие увеличивается примерно в 2 раза.

Эксперименты 1, 1* и 2 были выполнены для расхода жидкости равным 1 м³/мин. В рамках серии экспериментов 3, 3* и 4 расход был увеличен в пять раз, остальные параметры сохранены. При сравнении графиков, соответствующих экспериментам 3 (см. рис. 2.4) и 3* (см. рис. 2.5), можно сделать вывод, что геометрии трещин схожи и отличаются только высотой: в эксперименте 3* высота незначительно больше.

Сопоставляя эксперимент 4 (см. рис. 2.6) с опытами 3 (см. рис. 2.4) и 3* (см. рис. 2.5), наблюдаем очевидную разницу: длина и высота трещины уменьшаются, однако раскрытие увеличивается более чем в 2 раза. Формируется дополнительная область повышенного раскрытия после прорыва в слой с отрицательным контрастом напряжения.

Для среды без контрастов напряжений между слоями рассмотрим графики экспериментов 1 (см. рис. 2.7) и 1* (см. рис. 2.8). При учёте нестационарности свойств жидкости гидроразрыва раскрытие трещины в точке закачки с координатами (0;0) и её окрестности уменьшается. Характерные размеры трещины меняются: длина уменьшается, а высота увеличивается.

В серии экспериментов 1 (см. рис. 2.7), 1* (см. рис. 2.8) и 2 (см. рис. 2.9) трещины имеют радиальный вид геометрии. В опыте с изначально деградировавшей жидкостью размеры трещины в плоскости ХУ уменьшаются, а раскрытие увеличивается примерно в 2 раза.

Для экспериментов 3 (см. рис. 2.10) и 3* (см. рис. 2.11) в однородной среде наблюдаются идентичные отличия, что и в сопоставлении результатов опытов 1 и 1* в той же постановке.

При рассмотрении серии экспериментов 3 (см. рис. 2.10), 3* (см. рис. 2.11) и 4 (см. рис. 2.12), делаем аналогичные предыдущему сравнению опытов 1, 1* и 2 выводы при том же контрасте напряжений.

Для одиннадцатислойной конфигурации среды при сравнении экспериментов с номерами 1 (см. рис. 2.13) и 1* (см. рис. 2.14) графики раскрытия практически неразличимы.

При сравнении результатов эксперимента 2 (см. рис. 2.15) с результатами расчётов 1 (см. рис. 2.13) и 1* (см. рис. 2.14) наблюдаем резкое отличие геометрии: трещина увеличивается в раскрытии, длина уменьшается примерно в 3 раза, высота уменьшается, но не так сильно.

Вывод при сопоставлении графиков экспериментов 3 (см. рис. 2.16) и 3* (см. рис. 2.17) аналогичен для экспериментов 1 и 1* для той же постановки: геометрия фактически не изменяется.

При рассмотрении опыта 4 (см. рис. 2.18) с уже разрушившейся жидкостью геометрия меняется крайне сильно по сравнению с экспериментами 3 (см. рис. 2.16) и 3* (см. рис. 2.17). Трещина в этом случае прорывает в высоту все слои, раскрытие увеличивается в окрестности точки закачки примерно в 2 раза.

Чтобы точнее оценить эффект влияния «старения» жидкости на геометрию, а также проверить сформулированную нами гипотезу, необходимо более подробное численное сравнение результатов экспериментов.

2.3. Трёхслойная несимметричная среда

Рассмотрим подробнее трёхслойную несимметричную среду с различными объёмами закачки в минуту ($1 \text{ м}^3/\text{мин}$ для расчётов 1 и 2, и $5 \text{ м}^3/\text{мин}$ для расчётов 3 и 4). Для экспериментов 1 и 3, выполненных в модуле Planar3D без учёта «старения», для проведения ГРП использовалась жидкость с коэффициентом консистенции $0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ и индексом поведения $n = 0.6$. Для экспериментов 2 и 4, также выполненных в модуле Planar3D при стационарных свойствах жидкости гидроразрыва, применялась более вязкая жидкость ($0.4 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$)

с показателем реологии $n = 1$. В расчётах модуля Planar3D с учётом деградации жидкости 1* и 3* (со следующими расходами: для 1* – 1 м³/мин, для 3* – 5 м³/мин) в качестве начальных параметров жидкости выступали 0.01 Па · сⁿ для консистенции и $n = 0.6$ для реологии.

Далее приведём сравнения полученных результатов для раскрытия в точке закачки, высоты и длины трещины, а также безразмерного параметра AR ($AR = \frac{\text{длина трещины}}{\text{высота трещины}}$) при времени моделирования ГРП 15 минут.

1. Сравнение результатов экспериментов 1 и 1*

При рассмотрении эксперимента 1*, отличающегося учётом «старения» жидкости, заметны уменьшения раскрытия трещины в точке закачки с 2.4 мм на 1.1% и длины с 311 м на 2.5%. Высота же увеличилась с 68 м на 5.6%. Отношение AR с 4.6 уменьшилось на 7.7%.

2. Сравнение результатов экспериментов 3 и 3*

В данной паре экспериментов, отличающейся от предыдущей только увеличением скорости закачки жидкости, наблюдаются аналогичные изменения характерных размеров трещины. Произошли уменьшение раскрытия в точке закачки с 3.5 мм на 2.5% и увеличение высоты со 156 м на 8.3%. Размер трещины в длину почти не изменился: после 15 мин моделирования значение с 467 м увеличилось на 0.1%. Параметр AR в этом сравнении уменьшился с 3 на 7.5%, практически на такое же значение, что и в случае меньшей закачки.

Отметим общую тенденцию в сравнениях экспериментов 1 и 1*, 3 и 3* для трёхслойной несимметричной среды: «старение» жидкости (увеличение вязкости, а также её приближение по свойствам к ньютоновской жидкости) больше влияет на проращивание трещины в соседние слои, причём при увеличении расхода данный эффект более заметен.

3. Сравнение результатов экспериментов 1, 1*, 2

Дальнейшее сопоставление проводится для оценки результатов эксперимента 1*. Составим таблицу 2.2 с тремя характерными размерами трещины и отношением AR, где в качестве расчёта со свойствами молодой жидкости выступает опыт 1, со свойствами разрушившейся – опыт 2.

Таблица 2.2

Сравнение результатов расчётов 1, 1*, 2 для трёхслойной несимметричной среды

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	15	1	2.4	311	68	4.6
1*	15	1	2.4	303	72	4.2
2	15	1	4.9	123	65	1.9

Рассмотрим смоделированные значения эксперимента 1* для каждого параметра трещины отдельно. Раскрытие трещины в точке закачки противоречит гипотезе: при учёте времени оно меньше нижней и верхней границ на 1% и 51% соответственно. Значение длины трещины соответствует предложенной оценке, отличаясь от верхней границы уменьшением на 3%, а от нижней – увеличением на 146%. Изменение высоты также не подтверждает гипотезы, превышая обе границы: на 6% верхнюю и на 10% нижнюю. Показатель AR, как и длину трещины, возможно оценить результатами расчётов 1 и 3: AR на 8% меньше верхней, и на 123% выше нижней границ.

4. Сравнение результатов экспериментов 3, 3*, 4

Данная серия расчётов отлична от 1, 1* и 2 лишь повышенным расходом закачиваемой жидкости. Приведём аналогичную таблицу 2.3 результатов и анализ каждого параметра. Отметим, что для всех характерных размеров трещины промежутков, ограниченный верхней и нижней оценками (недеградирующей или исходно разрушившейся жидкостями), увеличивается, в то время как для показателя AR он сужается.

Таблица 2.3

Сравнение результатов расчётов 3, 3*, 4 для трёхслойной несимметричной среды

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
3	15	5	3.5	467	156	2.9
3*	15	5	3.4	467	168	2.8
4	15	5	7.7	204	119	1.7

Раскрытие трещины в точке закачки при учёте времени нахождения жидкости в трещине также не соответствует поставленным граничным оценкам: оно отличается уменьшением на 3% для нижней и на 55% для верхней границ. Оценка для значения длины трещины не нарушена, полученный результат расчёта 3* имеет разницу с верхней границей в 0.1%, разница с нижней границей составляет 129%. Высота превышает обе границы: на 8% верхнюю и на 42% нижнюю. Значения показателя AR согласуется с гипотезой: он на 8% меньше верхней и на 62% выше нижней границ. Как и в предыдущем сравнении, характеристики, попадающие в предложенную оценку, находятся ближе к верхней границе, что также объясняется сравнительно небольшим временем моделирования.

Для трёхслойной несимметричной среды при времени моделирования 15 минут увеличение расхода закачиваемой жидкости не влияет на соответствие геометрических размеров трещины предложенной оценке. Значения длины трещины и отношения AR согласуются с выдвинутой гипотезой.

Для случаев 1, 1* и 2 были также получены результаты при увеличении времени моделирования в 2 раза. Составим аналогичную таблицу 2.4.

Таблица 2.4

Сравнение результатов расчётов 1, 1*, 2 для трёхслойной несимметричной среды при времени моделирования 34 мин

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	34	1	2.7	476	102	4.7
1*	34	1	2.7	462	109	4.2
2	34	1	5.2	184	92	2.0

Отметим, что размеры областей между верхней и нижней границами при сравнении с меньшим временем моделирования для раскрытия и AR не изменяются, для длины и высоты трещины эти области увеличиваются. Это может быть объяснено тем, что трещина за первые 15 минут уже проникла во все слои, в случае многослойной среды данный вывод может быть несправедлив.

Увеличение времени моделирования не меняет тенденции полученных ранее выводов. Как длина трещины, так и отношение AR попадают в обозначенную оценку. В данном случае, результаты отличаются от верхних границ уменьшением на 3% и 10%, а от нижних границ – увеличением на 151% и 110% для длины и AR соответственно. Раскрытие также меньше обеих границ: на 2% нижней и на 48% верхней, в то время как высота трещины превышает обе оценки: на 8% верхнюю и на 20% нижнюю. Для величин, попадающих в интервал между предложенными границами, отличие в процентах от верхней границы увеличивается, а от нижней – уменьшается, что объясняется увеличением времени (дальнейшим «разрушением» свойств жидкости гидроразрыва).

2.4. Однородная среда

Рассмотрим однородную среду с одинаковыми по всем слоям минимальными сжимающими напряжениями 30 МПа при времени моделирования 15 мин. Номера расчётов и соответствующие им параметры идентичны трёхслойной несимметричной среде. Расчёты с номерами 1 и 3 отвечают проведению

ГРП с использованием молодой по свойствам жидкости, расчёты 2 и 4 – разрушившейся. В опытах 1* и 3* учитывается нестационарность свойств жидкости гидроразрыва.

Далее приведём такие же сравнения полученных результатов для высоты, длины, раскрытия в точке закачки и показателя AR, как и в случае с трёхслойной несимметричной средой, время проведения ГРП также составляло 15 минут.

1. Сравнение результатов экспериментов 1 и 1*

Анализ полученных данных показал, что при учёте «старения» жидкости в эксперименте 1* раскрытие трещины в точке закачки уменьшается со значения 1.8 мм на 5%. Таким же образом ведёт себя длина трещины: происходит уменьшение со 145 м на 6%. Высота же трещины увеличивается со 146 м на 9%. При данных изменениях высоты и длины трещины отношение AR меняет своё значение, уменьшаясь на 14% при показании 0.99 ~ 1 для эксперимента 1. Стоит отметить, что при учёте нестационарности свойств жидкости гидроразрыва, а именно вследствие различного характера изменения длины и высоты трещины, показатель AR становится отличным от единицы (трещина становится отличной от радиальной). Данный эффект может быть связан с известной неустойчивостью, в частности приводящей к так называемым «вязким пальцам». Неустойчивость образуется, так как более молодая жидкость (менее вязкая) обладает большей скоростью фронта, что видно из уравнения Пуазейля. Наложение фронтов жидкостей с разными вязкостями может приводить к отклонению в форме трещины в однородной среде.

2. Сравнение результатов экспериментов 3 и 3*

Данная серия расчётов аналогична предыдущим и отличается лишь увеличением расхода в 5 раз. При учёте деградации свойств жидкости в эксперименте 3* по сравнению с экспериментом 3 происходят увеличение высоты с 250 м на 10%, а также уменьшения длины трещины с 248 м на 6% и раскрытия в

точке закачки с 3 мм на 5%. Параметр AR в опыте 3* уменьшает своё значение с 0.99 на 15%.

Сравнение результатов экспериментов 1 и 1*, 3 и 3* в однородной среде показало, что «старение» жидкости в большей мере влияет на рост трещины в высоту, как и в трёхслойной несимметричной среде. Данное изменение возможно за счёт уменьшения других размеров трещины: её раскрытия и длины. Однако увеличение скорости закачки не меняет процентного различия между соответствующими результатами экспериментов при учёте деградации жидкости и без учёта данного фактора.

3. Сравнение результатов экспериментов 1, 1* и 2

Составим таблицу 2.5 с тремя характерными размерами трещин (раскрытие, длина, высота) и отношением AR ($AR = \frac{\text{длина трещины}}{\text{высота трещины}}$) для оценки результатов расчёта 1* (для нестационарной жидкости) по отношению к результатам опытов 1 и 2 со стационарными жидкостями.

Таблица 2.5

Сравнение результатов расчётов 1, 1*, 2 для однородной среды

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м3/мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	15	1	1.8	145	146	0.99
1*	15	1	1.7	136	159	0.85
2	15	1	4.3	92	92	0.99

Делаем вывод, что для рассматриваемого времени моделирования 15 мин только длина трещины соответствует нашей гипотезе: при учёте старения жидкости она отличается уменьшением на 6% от верхней границы и увеличением на 48% в сравнении с нижней границей. Раскрытие трещины в точке закачки меньше на 5% нижней и на 59% верхней границ. Высота превышает обе оцен-

ки: на 9% верхнюю и на 73% нижнюю. Показатель AR на 10% отличен от 0.99, полученной в вариантах 1 и 2.

4. Сравнение результатов экспериментов 3, 3* и 4

Указанная серия экспериментов отличается от 1, 1* и 2 повышенной скоростью закачки жидкости в скважину. Приведём таблицу 2.6 сравнения результатов для дальнейшего анализа каждого из параметров. Для всех геометрических размеров трещины промежутков, заключённый между верхней и нижней оценками (значениями расчётов с постоянными свойствами «молодой» и разрушившейся жидкостей соответственно), увеличивается, в то время как для показателя AR он не изменяется.

Таблица 2.6

Сравнение результатов расчётов 3, 3*, 4 для однородной среды

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
3	15	5	3.1	248	250	0.99
3*	15	5	3.0	232	274	0.85
4	15	5	7.3	157	159	0.99

Для однородной среды увеличение расхода не меняет ответ на вопрос, какие из параметров трещины попадают под сформулированную оценку. Характер отклонения величин от границ, а также соответствующие процентные разницы между этими значениями сохраняются.

Таким образом, для однородной среды при времени моделирования 15 мин гипотезу подтверждает только значение длины трещины.

При том же контрасте минимальных сжимающих напряжений были получены результаты для эксперимента продолжительностью 30 минут. Данные представлены в таблице 2.7 и таблице 2.8.

Таблица 2.7

Сравнение результатов расчётов 1, 1*, 2 для однородной среды при времени моделирования 30 мин

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	30	1	2.1	193	194	0.99
1*	30	1	2.0	181	212	0.85
2	30	1	4.6	125	127	0.99

Таблица 2.8

Сравнение результатов расчётов 3, 3*, 4 для однородной среды при времени моделирования 30 мин

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
3	30	5	3.5	330	331	0.99
3*	30	5	3.4	309	366	0.84
4	30	5	7.8	213	215	0.99

Расстояния между верхней и нижней границами предложенной оценки увеличиваются для соответствующих величин длины и высоты трещины, а для раскрытия в центре закачки и отношения AR не меняются при удвоении времени эксперимента для обоих расходов жидкости.

Для серии экспериментов 1, 1* и 2 разница между расчётами 1* и 1 практически совпадает со значениями процентных отклонений, рассчитанными ранее при моделировании 15 минут для соответствующих экспериментов. Отличия в этом случае составляют доли процента, причём при увеличении времени опыта разница в процентах увеличивается. При этом отклонения от нижней границы для всех представленных параметров трещины уменьшаются: раскрытие в точке закачки с 59% до 57%, длина с 48% до 45%, высота с 73% до 66%, а отношение AR с 14% до 13%.

При рассмотрении серии экспериментов 3, 3* и 4 выводы сохраняются: процентное отличие величин от верхних границ при увеличении времени моделирования незначительно (доли процента), а от нижних границ – уменьшается: для раскрытия с 59% до 57%, для высоты с 72% до 70%, для длины с 48% до 45%. Исключением является только отношение AR, которое отличается от варианта 4 на 15%.

Однако увеличение времени образования трещины ГРП не меняет сделанных ранее выводов: только длина трещины не противоречит поставленной гипотезе оценки расчёта с учётом «старения» жидкости. При этом указанное выше изменение отклонений от границ также объясняется изменениями свойств жидкости, то есть приближению к результатам расчёта с использованием разрушившейся по свойствам жидкости, однако явной зависимости от времени ГРП для данного процесса выявить не удалось.

2.5. Одиннадцатислойная среда

Рассмотрим более сложный вариант контрастов минимальных сжимающих напряжений: одиннадцатислойную среду, содержащую также отрицательный контраст напряжений. Номера расчётов и соответствующие им параметры идентичны трёхслойной несимметричной и однородной средам. Расчёты с номерами 1 и 3 также соответствуют моделированию трещины ГРП при неизменных свойствах жидкости. В опытах 1* и 3* учитывается «старение» жидкости гидроразрыва.

Для анализа расчётов в данной постановке задачи, приведём такие же сравнения полученных результатов для высоты трещины, её длины и раскрытия в точке закачки и показателя AR, как и ранее, при времени моделирования процесса ГРП 15 минут.

1. Сравнение результатов экспериментов 1 и 1*

При сопоставлении рассчитанных данных наблюдаем, что при учёте «старения» жидкости в эксперименте 1* раскрытие трещины в точке закачки

увеличивается со значения 2.7 мм на 0.6%. Также происходят увеличения длины трещины с 360 м на 11%. Высота при этом уменьшает своё значение с 42 м на 2%. При полученных изменениях высоты и длины трещины отношение AR увеличивается на 7% при показании 9 для эксперимента 1.

2. Сравнение результатов экспериментов 3 и 3*

В данной паре экспериментов, отличающейся от пары 1 и 1* увеличением расхода, при нестационарности свойств жидкости гидроразрыва произошли уменьшение раскрытия в точке закачки с 4.8 мм на 1% и увеличение длины трещины с 780 м на 1.6%. Высота трещины практически не изменилась: в конце моделирования значение с 54 м уменьшилось на 0.7%. Параметр AR увеличился с 14.5 на 2%.

Для экспериментов 1 и 1*, 3 и 3* для одиннадцатислойной несимметричной среды делаем выводы: «старение» жидкости слабо влияет как на раскрытие трещины в точке закачки, так и на её высоту. Эффект деградации жидкости больше отражается на значении длины трещины. При этом параметр AR, характеризующий конфигурацию трещины, увеличивается, что связано с ростом длины трещины и уменьшением её высоты. Для трёхслойной несимметричной и однородной сред наблюдалась противоположная тенденция в изменениях соответствующих параметров трещин.

3. Сравнение результатов экспериментов 1, 1*, 2

Сравнение данных экспериментов проводится для оценки результатов эксперимента 1*. Составим таблицу 2.9 для анализа значений характерных размеров трещины и AR.

Таблица 2.9

Сравнение результатов расчётов 1, 1*, 2 для одиннадцатислойной среды

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	15	1	2.7	360	42	9.0
1*	15	1	2.7	398	41	9.6
2	15	1	5.5	128	53	2.4

Раскрытие трещины в точке закачки согласуется с предложенной гипотезой: при учёте времени его значение меньше верхней границы на 51% и выше нижней границы на 0.6%. Длина трещины не соответствует оценке, превышая на 11% и на 211% верхнюю и нижнюю границы соответственно. Высота, как и длина, противоречит гипотезе, находясь за пределами нижней границы и отличаясь на 2% от нижней и на 23% от верхней. Показатель AR невозможно оценить результатами расчётов 1 и 3: AR на 7% больше верхней границы и на 300% выше нижней границы.

4. Сравнение результатов экспериментов 3, 3*, 4

Данная серия расчётов отлична от 1, 1* и 2 лишь объёмом закачиваемой жидкости на минуту времени. Приведём результаты (см. таблицу 2.10) и анализ каждого параметра. Для всех характерных размеров трещины и показателя AR происходит увеличение длины отрезка, концы которого – границы предложенной оценки.

Таблица 2.10

Сравнение результатов расчётов 3, 3*, 4 для одиннадцатислойной среды

Номер расчёта	Время моделирования, мин	Расход, м ³ /мин	Раскрытие, мм	Длина, м	Высота, м	AR
3	15	5	4.8	780	54	14.5
3*	15	5	4.8	793	54	14.8
4	15	5	9.3	228	102	2.2

В данной серии экспериментов ни одна из величин не поддаётся оценке согласно сформулированной гипотезе. При учёте деградации жидкости раскрытие трещины в точке закачки меньше обеих границ (на 1% меньше нижней и на 49% – верхней). Длина трещины превосходит обе границы (верхнюю – на 2%, а нижнюю – на 247%. Высота меньше обеих границ: на 0.7% меньше верхней и на 48% меньше нижней (граничные значения поменялись местами). Показатель AR на 2% превышает верхнюю и на 563% нижнюю границы.

Для одиннадцатислойной несимметричной среды при проведении полной серии экспериментов для моделирования 15 мин процесса ГРП предложенная гипотеза не подтвердилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данного исследования было определить, оказывает ли химическое разрушение жидкости со временем (изменении её свойств в ходе деградации) при проведении гидроразрыва пласта значительное влияние на геометрию трещины. В ходе работы проведена серия компьютерных экспериментов с помощью двух версий расчётного модуля, реализующего модель Planar3D. Первая версия расчётного модуля учитывала лишь стационарные свойства жидкости гидроразрыва, вторая версия определяла в каждой ячейке расчётной сетки индивидуальные свойства жидкости в соответствии со временем пребывания данного объёма жидкости в трещине. Конвективный перенос такого «времени» между ячеек рассчитывался по правилу смесей.

Параметры для численных экспериментов выбирались таким образом, чтобы отражать различные условия распространения трещины. Рассматривались большие и малые скорости закачки жидкости, а также несколько конфигураций пласта: однослойная среда, трёхслойная несимметричная среда и многослойная (11 слоёв) несимметричная среда.

Анализ результатов показал следующее.

1. Для трёхслойной несимметричной и однородной сред учёт деградации жидкости оказывает большее влияние на высоту трещины, чем на её длину и раскрытие. Для одиннадцатислойной несимметричной среды эффект данного фактора больше отразился на значении длины трещины.

2. При учёте нестационарности свойств жидкости форма трещины в однородной среде отличалась от радиальной, что может быть связано с наложением фронтов жидкостей с разной вязкостью (разной степенью разрушения).

3. Спрогнозировать геометрию трещины, неявно учитывая деградацию жидкости через статистическую оценку, не удалось.

4. Отклонение значений всех геометрических размеров трещины, рассчитанных при допущении стационарности свойств, не превосходят 11% от соответствующих размеров, полученных при условии изменения со временем свойств жидкости гидроразрыва. Данные отклонения характерны для относительно небольшого времени моделирования (15 мин) и с практической точки зрения являются незначительными.

Несмотря на проведение большой серии численных экспериментов (более 20), выявить однозначное и заметное влияние нестационарности свойств жидкости на геометрию трещины гидроразрыва не удалось. Интерес представляет влияние данного эффекта также на транспорт пропанта, однако, по описанным результатам моделирования можно предположить, что влияние также будет менее заметно на фоне других факторов (например, проскальзывания пропанта в потоке). Таким образом, учет нестационарности свойств жидкости гидроразрыва не является первостепенным требованием к современным системам моделирования процесса ГРП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борхович С. Ю., Коньков И.С., Колесова С. Б. Лабораторное тестирование жидкости разрыва // Приоритеты стратегии научно-технологического развития России и обеспечение воспроизводства инновационного потенциала Высшей школы, 2019. – С. 28-32.
2. Ерофеев А. А., Никитин Р. Н., Митрушкин Д. А. [и др.]. «Кибер ГРП» – программная платформа для моделирования, оптимизации и контроля операций гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 64-68.
3. Есипов Д.В., Куранаков Д.С., Лапин В.Н., Черный С.Г. Математические модели гидроразрыва пласта // Вычисл. технологии. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 33–61.
4. Ильюша А. В., Панков Д. А. Инновационные технологии освоения запасов высоковязкой нефти [Электронный ресурс] / Neftegaz.RU. – 2017. - №6. – Режим доступа: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/dobycha/551297-innovatsionnyetechnologii-osvoeniya-zapasov-vysokovязкой-nefti/>
5. Клубков С. В. Стимулирование разработки ТРИЗ поможет поддержать уровень добычи нефти в России. // Oil & Gas Journal Russia. – 2015. – №7. – С. 6-11.
6. Фаттахов И. Г., Малышев П. М., Шакурова А. Ф. [и др.]. Диагностический анализ вопроса эффективности проведения гидравлического разрыва пласта // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-27. – С. 6023-6029;
7. Хасанов М. М., Падерин Г. В., Шель Е. В. [и др.]. Подходы к моделированию гидроразрыва пласта и направления их развития // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 37-41.
8. Шарф И. В., Борзенкова Д. Н. Трудноизвлекаемые запасы нефти: понятие, классификационные подходы и стимулирование разработки // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-16. – С. 3593-3597.

9. Шипилов А. И., Крутихин Е. В., Гоголишвили О. Ш. Исследование вязкоупругих и пескоудерживающих свойств жидкости гидроразрыва пласта на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ. // Нефтепромысловое дело. – 2019. – №5. – С. 17-23.

10. Шмелев П. ТРИЗ как объективная реальность [Электронный ресурс] / Сибирская нефть. – №149 – Режим доступа: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-march/1489610/>

11. Яркеева Н. Р., Хазиев А. М. Применение гидроразрыва пласта для интенсификации притока нефти в скважинах // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16, №5. – С. 30-36.

12. Adachi J. et al. Computer simulation of hydraulic fractures // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – V. 44. – №5. – PP. 739-757.

13. Babenkov M. B., Starobinskii E. B. The non-stationary temperature field of the fracturing fluid during the propagation of planar 3D hydraulic crack //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – V. 2216. – №1. – P. 030002.

14. Hills D. A. et al. Solution of crack problems: the distributed dislocation technique. – Springer Science & Business Media, 2013. – 308 p.

15. Starobinskii E. B., Stepanov A. D. Adapting the explicit time integration scheme for modeling of the hydraulic fracturing within the Planar3D approach // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – V. 1236. – №1. – P. 012052.