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 ТМ, д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

А. М. Кривцов

«___»_____2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

УЧЁТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

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 А. А. Свешникова

Руководитель

Доцент ВШ ТМ, к. ф-м. н. Е. Ю. Журавлёва

Санкт-Петербург

2020

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

УТВЕРЖДАЮ
Директор ВШ ТМ, д.ф.-м.н.,
чл.-корр. РАН
А.М. Кривцов
« 3 » февраля 2020 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Свешниковой Анастасии Андреевне, группы 3630103/60201
фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: Учёт температурных эффектов при моделировании гидроразрыва пласта

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 без учета температурных эффектов, программа моделирования роста трещины гидроразрыва пласта в слоистой среде с учетом температурных эффектов на физико-химические свойства жидкости гидроразрыва, табличные лабораторные данные с физико-химическими свойствами жидкости гидроразрыва в зависимости от температуры.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

Расчет геометрии трещины в программном модуле Planar3D, не учитывающем температурные эффекты.

Расчет геометрии трещины в программном модуле Planar3D-T, учитывающем температурные эффекты.

Сравнение результатов для двух моделей, качественный и количественный анализ влияния температурных эффектов на геометрию трещины гидроразрыва пласта.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): отсутствует

6. Консультанты по работе: отсутствуют

7. Дата выдачи задания 3 февраля 2020 год

Руководитель ВКР _____ Е.Ю. Журавлёва
(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 3 февраля 2020 года
(дата)

Студент _____ А.А. Свешникова
(подпись) инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 29 с., 18 рисунков, 7 таблиц

ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА, ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ, МОДУЛЬ PLANAR3D, СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

В данной работе рассмотрено влияние температурных эффектов на геометрию трещины гидроразрыва пласта. При нагревании жидкости меняются её свойства. Проведены расчёты в двух программах: базовом модуле Planar3D и Planar3D-T, учитывающего зависимость свойств жидкости от температуры. Проанализировано влияния температуры на химию жидкости и эволюцию трещины.

THE ABSTRACT

29 pages, 18 pictures, 7 tables

HYDRAULIC FRACTURING, TEMPERATURE EFFECTS, MODULE PLANAR3D, FLUID PROPERTIES

In this paper, the influence of temperature effects on the geometry of a hydraulic fracture is considered. When a liquid is heated, its properties change. Calculations were performed in two modules: the base Planar3D and Planar3D-T, which takes into account the temperature dependence of the fluid properties. The effects of temperature on fluid chemistry and fracture evolution are analyzed.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ 10
1.1. Базовый модуль Planar3D 10
1.2. Основные предположения модуля Planar3D 11
1.3. Решаемые уравнения модуля Planar3D 11
1.4. Температурный модуль Planar3D 12
1.5. Основные предположения для температурного модуля Planar3D 13
1.6. Решаемые уравнения в температурном модуле Planar3D - T 13
1.7. Условие задачи 15
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 17
2.1. Поля распределений свойств жидкости и температуры 17
2.2. Параметры проведённых расчётов 18
2.3. Трехслойная несимметричная среда 19
2.4. Многослойная несимметричная среда 24
2.5. Учёт переноса проппанта 28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 31

ВВЕДЕНИЕ

Нефтедобыча в наши дни является важным высокотехнологичным процессом, который активно и непрерывно развивается.

В последние годы запасы легко извлекаемой нефти стремительно сокращаются. В следствие этого исследование трудно извлекаемых запасов (ТРИЗ) нефти, обусловленных неблагоприятными для извлечения геологическими условиями залегания нефти или физическими свойствами, является актуальной проблемой [5]. К таким запасам относится сланцевая нефть – лёгкая нефть, содержащаяся в плотных коллекторах с низкой проницаемостью. По оценкам специалистов ВНГИРИ, общие ресурсы такой нефти составляют около 36 миллиардов тонн [4].

Гидроразрыв пласта – ГРП – сложный высокотехнологичный процесс создания техногенной трещины в пласте при высоком давлении нагнетания жидкости гидроразрыва. Созданная трещина закрепляется проппантом. В процессе проведения ГРП применяется широкий спектр специальных технологических жидкостей для инициации трещины, доставки проппанта в трещину и последующего разрушения геля-проппантоносителя.

Такой высокотехнологичный и дорогостоящий процесс требует тщательной предварительной подготовки мероприятия. Нефтяные компании широко применяют компьютерное моделирование ГРП. В процессе моделирования и проведения полевых операций решаются обратные задачи и восстанавливаются параметры пласта (проницаемость, пластовое давление, геомеханические свойства). На сегодняшний существует несколько общепринятых упрощенных подходов к моделированию ГРП:

Модель KGD (модель Христиановича — Гиртсма — де Клерка). Модель справедлива при допущении, что высота трещины значительно превышает длину, пренебрегается влиянием верхних и нижних границ. Горизонтальные

сечения трещины считаются одинаковыми, при описании деформации пласта используется двумерная задача теории упругости (рисунок 1).

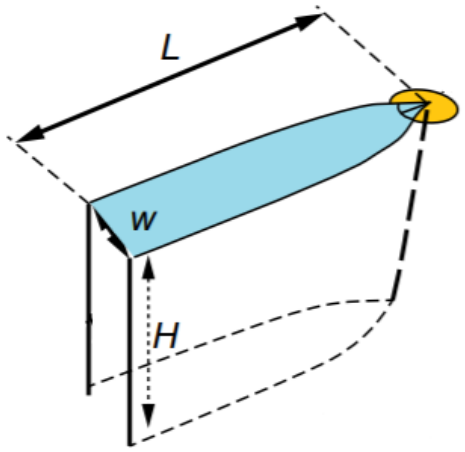


Рисунок 1. Модель KGD [10]

Модель PKN (модель Перкинса — Керна — Нордгрена). Предполагается, что трещина гидроразрыва имеет постоянную высоту, значительно меньшую общей длины трещины, изменение параметров трещины вдоль её длины считается незначительным, деформация пласта рассматривается в каждом вертикальном сечении, как плоское деформированное состояние (рисунок 2).

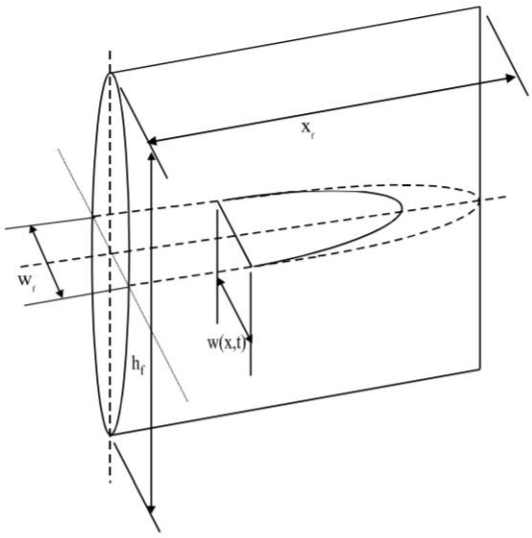


Рисунок 2. Модель PKN [14]

Модель Radial (рисунок 3) - модель осесимметричной трещины. Эта модель применяется в неглубоких пластах. Скорость закачки и давление жидкости в трещине предполагаются постоянными. Была решена Снеддоном, а позже уточнена Линьковым [12].

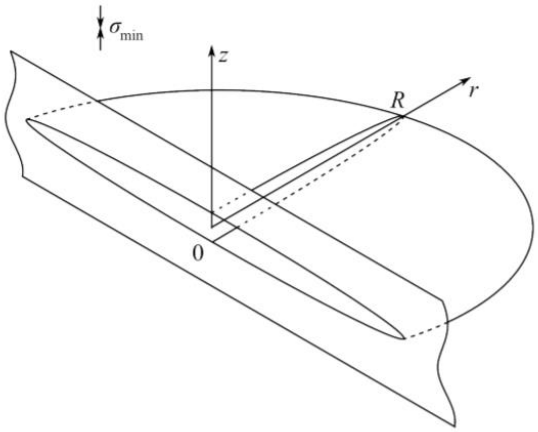


Рисунок 3. Модель Radial [1]

Вышеуказанные упрощенные модели необходимы для понимания процесса ГРП, но они не позволяют качественно прогнозировать геометрию трещины ГРП, поэтому в настоящее время мало используются на практике.

Для более качественного компьютерного моделирования используются трехмерные математические модели:

Модель Pseudo3D (рисунок 4). Учитывается однородный поток жидкости, используется предположение о том, что длина трещины должна быть значительно больше её высоты, отличается от модели PKN тем, что трещина может распространяться в соседний пласт. Данный подход прост, расчёты занимают мало времени, но из-за ограничений нет возможности исследовать некоторые месторождения, где важно учитывать рост трещины в высоту.

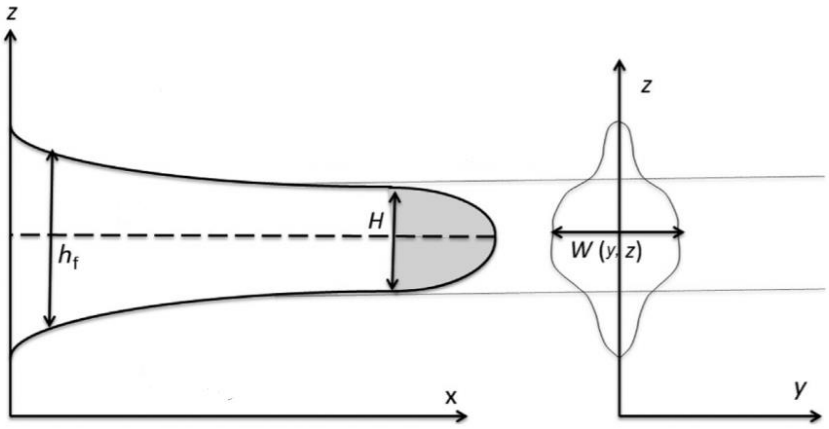
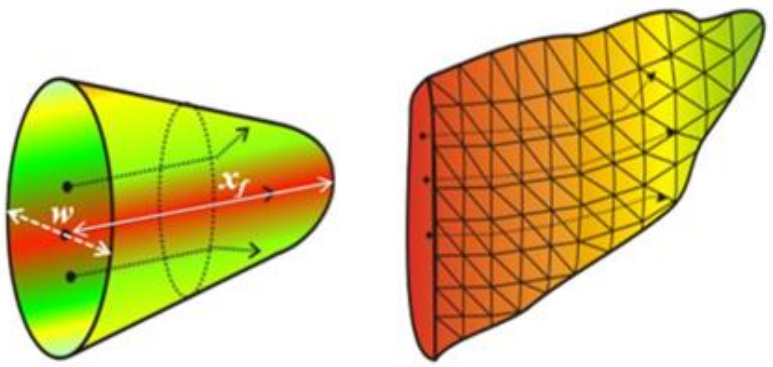


Рисунок 4. Модель Pseudo3D [10]

Модель Planar3D (рисунок 5*а*). Рассматривается двумерный поток, моделируется развитие трещины как в длину, так и в высоту. Такой подход позволяет намного точнее моделировать распределение проппанта в трещине.

Модель Full3D (рисунок 5*б*). Учитывает трехмерное движение жидкости. Эта модель ресурсозатратна, требует большого количества дополнительных исходных данных, поэтому в настоящее время она остаётся малореализуемой.



(*а*) (*б*)

Рисунок 5. Модель Planar3D (*а*) и модель Full3D (*б*) [7]

Современная практика моделирования ГРП ориентируется на подход Planar3D, являющийся оптимальным на сегодняшний день компромиссом между числом учитываемых эффектов и скоростью расчёта.

Проведение ГРП на малодебитных, часто нерентабельных скважинах, позволяет увеличить дебит нефти в несколько раз. Технология широко применяется в России. Ежегодно в нашей стране проводится более 6 тысяч процедур ГРП. Однако, при осуществлении операции ГРП могут возникать различные технологические проблемы, значительно снижающие эффективность метода. Поэтому важной задачей является оценка влияния различных факторов на проведение ГРП.

При моделировании гидроразрыва обычно используется предположение о том, что жидкость в трещине ГРП обладает неизменными во времени свойствами. На практике, технологические жидкости закачиваются с поверхности в скважину с начальной температурой сопоставимой с температурой окружающей среды (обычно порядка 20 градусов Цельсия). В процессе проведения ГРП жидкость постепенно прогревается до температуры пласта. Пластовая температура для глубин залегания 1.5 – 3 км составляет 60 – 120 градусов Цельсия. При нагревании технологической жидкости ГРП будут происходить изменения ее свойств, в частности вязкости. Это сказывается на процессе роста трещины и способности жидкости переносить проппант. Следует определить, на сколько важно учитывать влияние температурных эффектов на изменения свойств жидкости ГРП по сравнению с традиционным подходом моделирования данной процедуры.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной дипломной работе исследуется трехмерная модель техногенной трещины ГРП в продуктивном пласте. Изучается динамика раскрытия трещины и её геометрия с учётом нестационарного температурного поля жидкости ГРП. Для моделирования задачи использовался модуль Planar3D–T. Полученные результаты сопоставлялись с расчетами в базовом модуле Planar3D (модуль без учета влияния температуры). Данные модули разработаны в научно-образовательном центре "Газпромнефть-Политех". Визуализация расчётов была выполнена в пакете прикладных программ MATLAB.

1.1. Базовый модуль Planar3D

Численное моделирование процесса ГРП активно начало развиваться с конца 1950-х. К середине 1960-х годов ГРП стал считаться одним из самых эффективных методов увеличения нефтеотдачи для низкопроницаемых коллекторов. Математические модели процесса развивались от простых двумерных геометрических постановок (PKN и KGD), предсказывающих форму и размер трещины ГРП с учётом свойств породы пласта и закачиваемой жидкости, до сложных трёхмерных, способных моделировать трещины произвольной формы и ориентации

В современных моделях учитываются следующие параметры, влияющие на процесс распространения трещин: трещиностойкость породы, вязкость жидкости гидроразрыва, проницаемость пласта, которая определяет способность породы пропускать жидкость или газ из трещины (утечки). Контраст сжимающих напряжений в пласте приводит к неравномерному распространению трещины, трещина распространяется предпочтительно в слоях с меньшим напряжением.

Модуль Planar3D позволяет оценить геометрию и динамику распространения трещины в пласте, для этого решается система

дифференциальных уравнений, для интегрирования по времени применяется явная схема интегрирования.

1.2. Основные предположения модуля Planar3D

Скважина представлена точечным источником. Предполагается, что пласт состоит из горизонтальных слоёв, каждый из которых изотропен и однороден по механическим свойствам, характеризуется собственным значением минимального сжимающего напряжения. Трещина распространяется без запаздывания (фронты трещины и жидкости совпадают), под давлением закачиваемой несжимаемой жидкости (реология жидкости описывается степенным законом), перпендикулярно плоскости пласта. Перенос жидкости в трещине описывается уравнениями теории смазки, не учитывается сила тяжести [15].

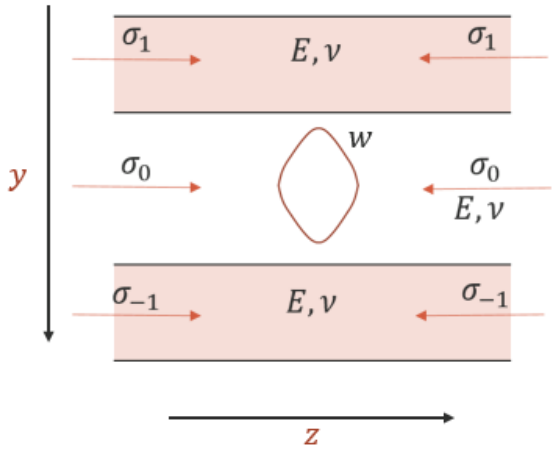


Рисунок 1.2.1. Схематичное изображение пласта

1.3. Решаемые уравнения модуля Planar3D

Так как среда считается однородной по упругим модулям, уравнения теории упругости, описывающие перемещение и поле напряжений твердого тела, могут быть сведены к гиперсингулярному интегралу, связывающему давление и раскрытие скважины [11, 13]:

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

где $p(x, y, t)$ −давление в точке с координатой (x, y) в момент времени t, $\sigma -$ минимальные сжимающие напряжения в пласте, перпендикулярные плоскости трещины, $E' = \frac{E}{1-\nu^2} -$ модуль плоской деформации, $E -$ модуль Юнга, ν −коэффициент Пуассона, w −раскрытие скважины.

Уравнение сохранения массы с учётом того, что течение может быть описано обобщённым уравнением Пуазейля принимает следующий вид [15]:

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

где $n -$ показатель степени реологии жидкости, $\mu' = 2(4 + \frac{2}{n})^n \mu$ − обобщённый коэффициент динамической вязкости, $Q(0,0, t)$ описывает закачку жидкости в трещину.

В качестве граничного условия используется симметрия левого и правого крыльев трещины.

Для решения системы уравнений используется пространственная дискретизация с фиксированным размером ячейки равномерной расчетной сетки [15].

1.4. Температурный модуль Planar3D

При нагревании жидкости ГРП, меняется её вязкость, это в свою очередь влияет на конечную форму трещины и на динамику распространения.

Данный модуль позволяет оценить температуру жидкости в трещине ГРП и породы в окрестности трещины, используя известные данные о теплофизических свойствах породы и рабочей жидкости гидроразрыва.

1.5. Основные предположения для температурного модуля Planar3D

В модуле используются все предположения, описанные раннее в пункте 1.2. Для учёта температурных деформаций делаются следующие допущения: перенос тепла внутри трещины осуществляется только за счёт конвекции. Тепло в пласте распространяется в направлении, перпендикулярном плоскости трещины. Теплообмен жидкости и пласта происходит по закону Ньютона-Рихмана [8]. При этом толщина поверхности, на которой происходит теплообмен, изменяется со временем по следующему закону [3, 9]:

$$\mathrm{D(t)} = \sqrt{\frac{\lambda_R t}{C_v^R \rho_R}},$$

где λ_R – коэффициент теплопроводности пласта (0.4 - 5.2 Вт/(м·град)), t – время, прошедшее с начала закачки (с), C_v^R – коэффициент удельной теплоёмкости пласта (0.7 - 3.4 Дж/(кг·град)), ρ_R – плотность породы пласта (2250-2670 кг/м^3). Указанные значения приведены для песчаника [2].

1.6. Решаемые уравнения в температурном модуле Planar3D - T

Решаются, уравнения, описанные в пункте 1.3.

Сдвиговые напряжения неньютоновской жидкости описываются степенным законом [6]:

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

где $K-$ коэффициент динамической вязкости, $\frac{\partial u}{\partial y}-$скорость сдвига или градиент скорости, $n-$индекс поведения. Зависимость K от температуры представлена в таблице 1.6.1. и на рисунке 1.6.1:

Таблица 1.6.1. Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры

T, °C	K, Па*с^n	n
20	0.400	0.600
40	0.226	0.683
60	0.112	0.770
80	0.046	0.873
100	0.010	1.000

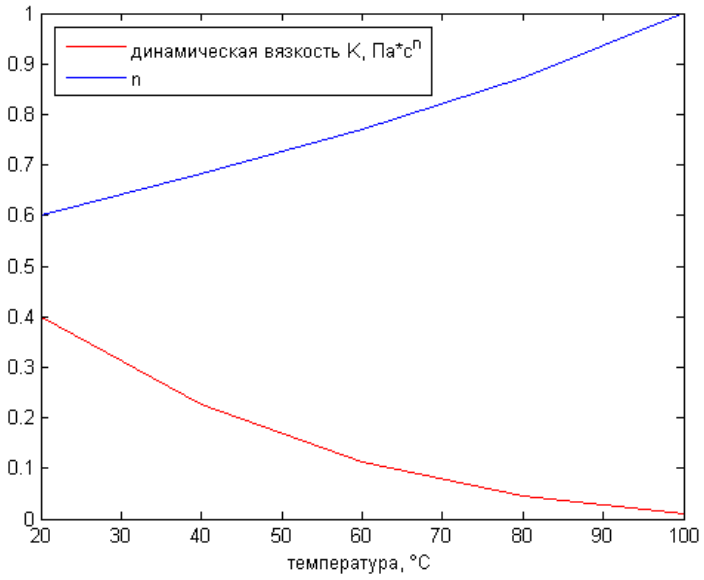


Рисунок 1.6.1 Зависимости коэффициента динамической вязкости и индекса поведения от температуры

Уравнение баланса энергии для жидкости в трещине и пласта в окрестности трещины [9]:

$$\rho_F C_v^F T'_F(t) = -\rho_F C_v^F \frac{V'_p(t)}{V_p(t)} (T_F(t) - T_F^0) H\left(-(t - t_p)\right) + c\left(T_R(t) - T_F(t)\right)$$

$$\rho_R C_v^R T'_R(t) = -\rho_R C_v^R \frac{V'_R(t)}{V_R(t)} (T_R(t) - T_R^0) - c\left(T_R(t) - T_F(t)\right)$$

Где t_p – время закачки, C_v^F – удельная теплоёмкость жидкости, C_v^R – удельная теплоёмкость породы, ρ_F – плотность жидкости, ρ_R – плотность породы, $T_F(t)$

– температура жидкости в трещине, $T_R(t)$ – температура пласта, c – переменный коэффициент теплоотдачи из закона Ньютона-Рихмана, $V_p(t)$ – объём жидкости, закачиваемый в трещину, $V_R(t)$ – объём пласта, с которым жидкость обменивается теплом. Функция Хевисайда $H(t)$ в данном случае используется для моделирования остановки роста площади поверхности трещины .

Неизвестные функции $T_F(t)$ и $T_R(t)$ находятся из приведенной системы (*).

Начальные условия:

$$T_R(0) = T_R^0,$$

$$T_F(0) = T_F^0.$$

1.7. Условие задачи

В Planar3D и температурном модуле Planar3D-T было проведено 18 расчётов. В каждом эксперименте закачивалась одна из двух жидкостей: вода (коэффициент динамической вязкости 0.01 Па*с^n), линейный гель (коэффициент динамической вязкости 0.4 Па*с^n). Показатель в законе реологии n берётся равный 0.6 (линейный гель, – неньютоновская жидкость) или 1 (вода, – ньютоновская жидкость). Расход постоянный, 1 или 5 м^3/мин. Время моделируемого ГРП: 5, 7 и 10 минут.

Минимальные сжимающие напряжения в центральном слое равны 30 МПа, мощность центрального слоя постоянна во всех экспериментах и равна 10 метрам. Контраст напряжений не превышает 7 МПа. Были рассмотрены три расчёта контрастов по минимальным сжимающим напряжениям: однородная трёхслойная среда (напряжения 30 МПа), трехслойная несимметричная среда (в верхнем слое напряжение равно 31 МПа, в среднем – 30 МПа, в нижнем – 34 МПа), многослойная несимметричная среда (11 слоёв, значения напряжений указаны от верхнего слоя к нижнему: 35, 32, 29, 34, 32, 30, 31, 32,

33, 34, 35 МПа соответственно, мощность слоёв, кроме центрального составляет 6 м). Модуль Юнга и коэффициент Пуассона постоянные, 30 ГПа и 0.25 соответственно.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура пласта равна $T_R^0 = 100°C$. Осуществляется закачка холодной жидкости с температурой $T_F^0 = 20°C$ со свойствами $K = 0.4$ Па*с^n, $n = 0.6$. В процессе проведения ГРП жидкость претерпевает нагрев от 20°C до 100°C, её свойства меняются и со временем становятся приближенными к свойствам воды: $K = 0.01$ Па*с^n, $n = 1$.

2.1. Поля распределений свойств жидкости и температуры

Результаты расчётов модуль Planar3D-T были визуализированы в пакете прикладных программ MATLAB. Примеры полей распределения коэффициента динамической вязкости, индекса поведения и температуры для тестового расчёта приведены на рисунках 2.1.1*а*, 2.1.1*б* и 2.1.2 соответственно.

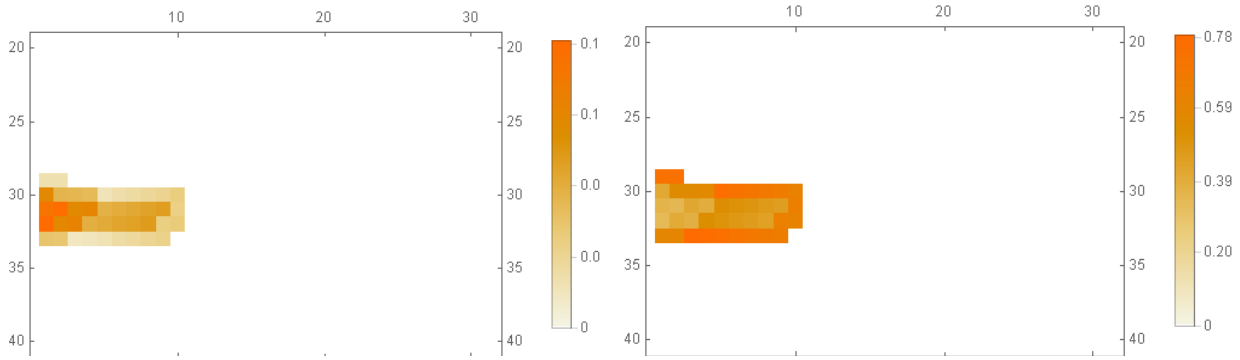


Рисунок 2.1.1. Поле распределения коэффициента динамической вязкости (*а*) и поле распределения индекса поведения (*б*)

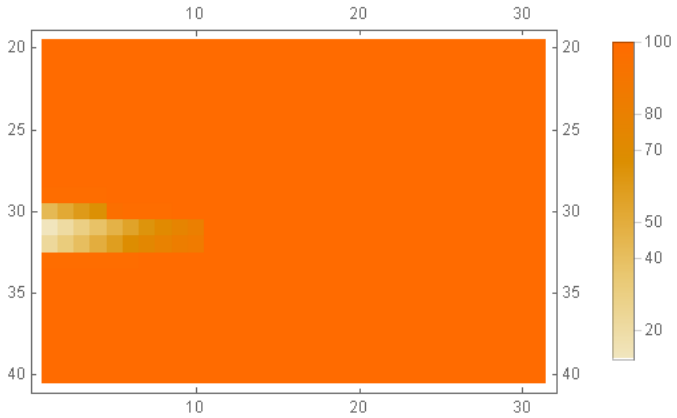


Рисунок 2.1.2. Поле распределения температуры

2.2. Параметры проведённых расчётов

Расчёты были проведены в двух модулях: Planar3D и, для учёта температурных эффектов, в Planar3D-T. В рассмотренных вариантах расчётов переменными параметрами приняты: динамическая вязкость жидкости *K*, индекс поведения жидкости *n*, температура жидкости *T*. Часть расчетов отличались по времени проведения ГРП и скорости закачки.

Из-за ограничения вычислительной мощности Planar3D-T были рассмотрены относительно небольшие времена проведения гидроразрыва (в пределах 10 минут).

Planar3D.

1 расчёт. Полагаем, что T=const, 20 °C. Коэффициент динамической вязкости *K*=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости *n*=0.6, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 5 мин.

2 расчёт. Полагаем, что T=const, 20 °C. Коэффициент динамической вязкости *K*=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости *n*=0.6, скорость закачки $Q=5$ м^3/мин, время ГРП 5 мин.

3 расчёт. Полагаем, что T=const, 100 °C. Коэффициент динамической вязкости *K*=0.01 Па*с^n, индекс поведения жидкости *n*=1, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 5 мин.

4 расчёт. Полагаем, что T=const, 100 °C. Коэффициент динамической вязкости *K*=0.01 Па*с^n, индекс поведения жидкости *n*=1, скорость закачки $Q=5$ м^3/мин, время ГРП 5 мин.

5 расчёт (рисунок 2.1.1). Полагаем, что T=const, 20 °C. Коэффициент динамической вязкости *K*=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости *n*=0.6, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 10 мин.

6 расчёт. Полагаем, что T=const, 100 °C. Коэффициент динамической вязкости K=0.01 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=1, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 10 мин.

7 расчёт (рисунок 2.1.1). Полагаем, что T=const, 20 °C. Коэффициент динамической вязкости K=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=0.6, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 7 мин.

8 расчёт. Полагаем, что T=const, 100 °C. Коэффициент динамической вязкости K=0.01 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=1, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 7 мин.

Planar3D-T.

9 расчёт. Полагаем, что T меняется от 20 °C до 100°C. Коэффициент динамической вязкости K=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=0.6, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 5 мин.

10 расчёт. Полагаем, что T меняется от 20 °C до 100°C. Коэффициент динамической вязкости K=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=0.6, скорость закачки $Q=5$ м^3/мин, время ГРП 5 мин.

11 расчёт. Полагаем, что T меняется от 20 °C до 100°C. Коэффициент динамической вязкости K=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=0.6, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 10 мин.

12 расчёт. Полагаем, что T меняется от 20 °C до 100°C. Коэффициент динамической вязкости K=0.4 Па*с^n, индекс поведения жидкости n=0.6, скорость закачки $Q=1$ м^3/мин, время ГРП 7 мин.

2.3. Трехслойная несимметричная среда

Решается задача для трехслойной несимметричной среды (в верхнем слое напряжение равно 31 МПа, в среднем 30 МПа, в нижнем 34 МПа,).

Сравнение расчётов 1 и 9 (см. рисунок 2.3.1 и 2.3.2): с учётом температуры раскрытие в точке закачки уменьшилось с 4.38 до 3.71 мм, на 15%, остальные параметры изменились незначительно (+/- 2%). Профиль раскрытия стал более узким и вытянутым.

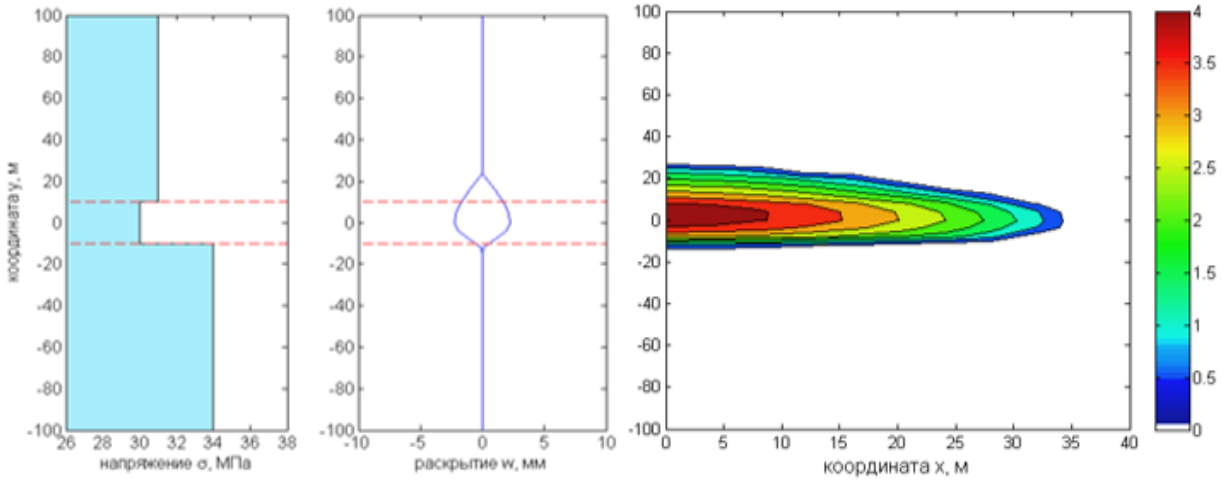


Рисунок 2.3.1. Планшет литологии и раскрытие трещины, базовый модуль Planar3D, 1 расчёт

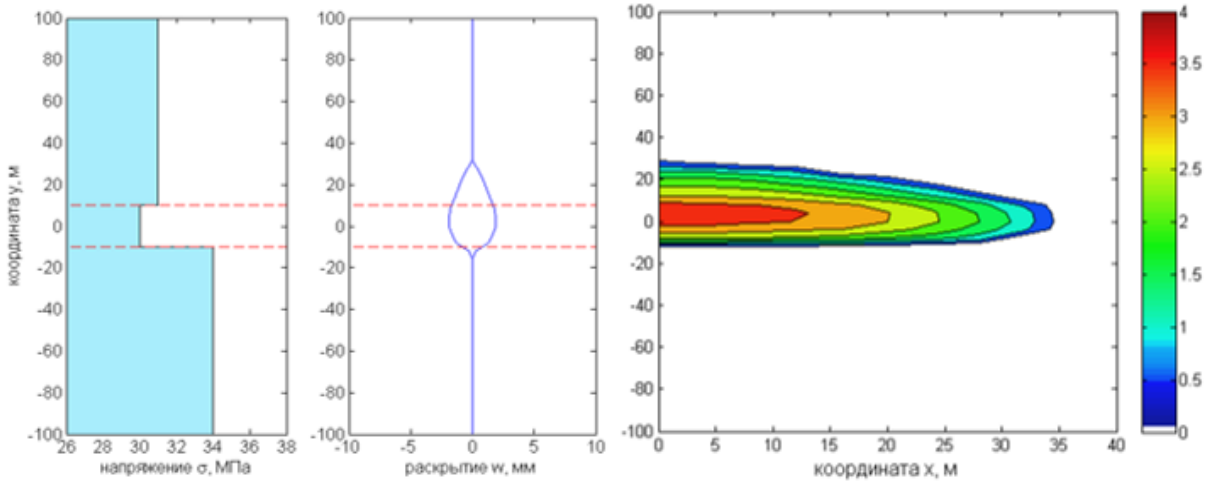


Рисунок 2.3.2. Планшет литологии и раскрытия трещины, температурный модуль Planar3D-T, 9 расчёт

Сравнение расчётов 2 и 10 (см. рисунок 2.3.3 и 2.3.4): с учетом температуры длина трещины уменьшилась на 4%, раскрытие уменьшилось на 11%, высота увеличилась на 6%, Aspect Ratio (AR, отношение длины к высоте) уменьшилось на 4%. Профиль раскрытия стал более гладким и вытянутым.

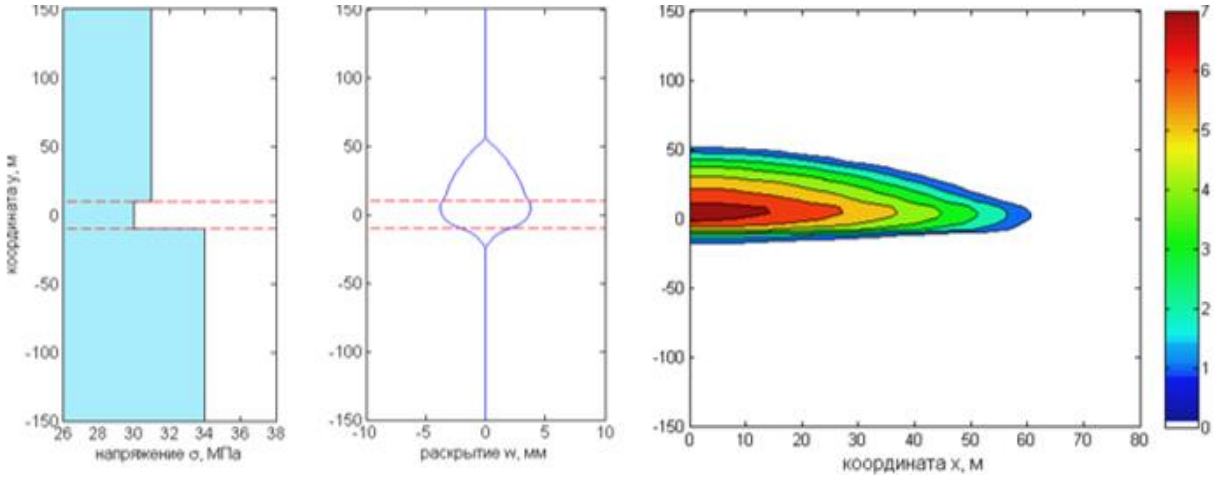


Рисунок 2.3.3. Планшет литологии и раскрытие трещины, базовый модуль Planar3D, 2 расчёт

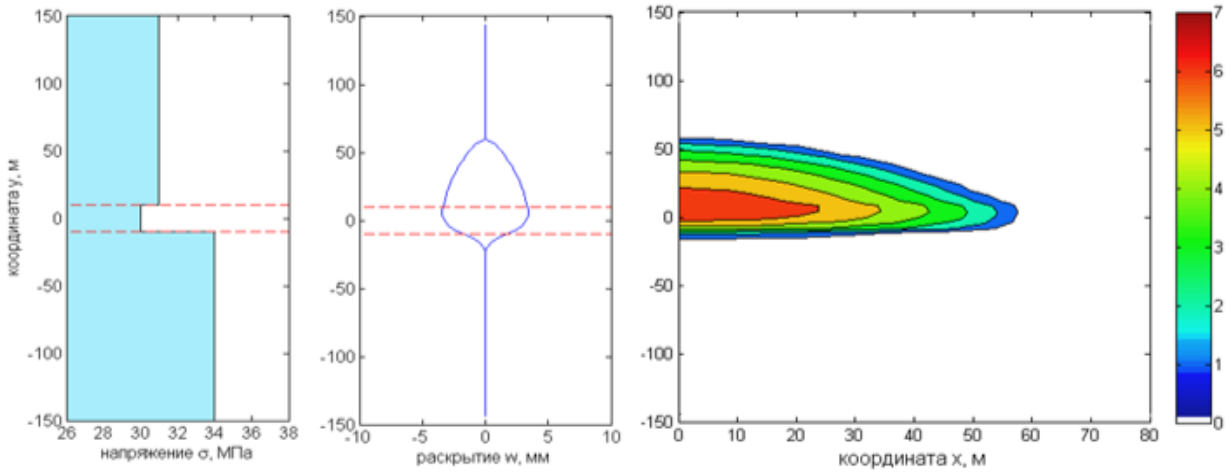


Рисунок 2.3.4. Планшет литологии и раскрытия трещины, температурный модуль Planar3D-T, 10 расчёт

Увеличение скорости закачки приводит к более существенному изменению геометрии трещины ГРП, но всё ещё находящегося в пределах погрешности +/- 10%.

Можно сделать вывод, что учёт влияние температурных эффектов в данных расчётах играет незначительную роль.

Приведено сравнение расчетов для трех расчётов: Planar 3D – жидкость имеет постоянные свойства при T=20 °C, Planar 3D-T – жидкость нагревается от 20 °C до 100 °C, происходит изменение свойств во времени, Planar 3D - жидкость имеет постоянные свойства при T=100 °C.

Таблица 2.3.1. Оценка влияния температурных эффектов

Рас-чёт	Модуль	Темпе-ратура, °C	Q, $м^3/мин$	K, Па*$с^n$	n	Время ГРП, мин	Раскрытие в точке закачки, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	Planar 3D	20	1	0.4	0.6	5	4,38	68,76	43,76	1,57
9	Planar 3D-T	20-100	1	0.4	0.6	5	3,71	69,14	43,04	1,60
3	Planar 3D	100	1	0.01	1	5	2,14	135,45	43,18	3,14

Из таблицы 2.3.1. видно, что при сопоставлении расчётов 1 и 9: раскрытие трещины меньше на 15%, остальные параметры изменились незначительно (+/- 2%). При сопоставлении расчётов 9 и 3: раскрытие трещины меньше на 42%, длина - на 95%, AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) - на 95%, высота не отличается.

Увеличим скорость закачки до Q=5 $м^3/мин$.

Таблица 2.3.2. Оценка влияния температурных эффектов

Рас-чёт	Модуль	Темпе-ратура, °C	Q, $м^3/мин$	K, Па*$с^n$	n	Время ГРП, мин	Раскрытие в точке закачки, мм	Длина, м	Высота, м	AR
2	Planar 3D	20	5	0.4	0.6	5	7,32	124,10	75,69	1,64
10	Planar 3D-T	20-100	5	0.4	0.6	5	6,51	118,67	79,96	1,48
4	Planar 3D	100	5	0.01	1	5	3,41	244,88	88,01	2,78

Из таблицы 2.3.2. видно, что при сравнении расчётов 10 и 2: раскрытие отличается на 11%, длина и высота изменились менее значительно (+/- 5%), AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) уменьшился на 10%. Из

сравнения расчётов 10 и 4: раскрытие уменьшилось на 48%, длина уменьшилась на 106%, высота – на 10%, AR – на 87%.

При увеличении скорости закачки общая картина сохраняется. Для времени проведения ГРП 5 минут, влиянием температурных эффектов на жидкость ГРП можно пренебречь.

Увеличим время проведения ГРП до 10 минут.

Таблица 2.3.3. Оценка влияния температурных эффектов

Рас-чёт	Модуль	Темпе-ратура, °C	Q, $м^3/мин$	K, $Па*с^n$	n	Время ГРП, мин	Раскрытие в точке закачки, мм	Длина, м	Высота, м	AR
5	Planar 3D	20	1	0.4	0.6	10	4,99	96,54	56,32	1,71
11	Planar 3D-T	20-100	1	0.4	0.6	10	4,42	95,40	58,04	1,64
6	Planar 3D	100	1	0.01	1	10	2,37	212,15	56,58	3,75

Из таблицы 2.3.3. видно, что общая картина сохраняется. При сопоставлении расчётов 5 и 11: раскрытие трещины меньше на 46%, длина - на 122%, AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) – на 128%, высота – незначительно (+/- 3%).

Для трёхслойной несимметричной среды результаты сравнения расчётов в модуле Planar 3D-T и Planar 3D с начальной температурой жидкости ГРП дают практически идентичную геометрию трещины, раскрытие меняется на 10 – 15%. Полученные результаты соответствуют кратковременному проведению ГРП (10 – 15 минут), жидкость не успела нагреться, её свойства остались неизменными.

2.4. Многослойная несимметричная среда

Решается задача для многослойной несимметричной среды (11 слоёв, значения напряжений указаны от верхнего слоя к нижнему: 35, 32, 29, 34, 32, 30, 31, 32, 33, 34, 35 МПа соответственно, мощность слоёв кроме центрального составляет 6 м).

Сравнение расчётов 1 и 9 (см. рисунок 2.4.1 и 2.4.2): с учётом температуры раскрытие в точке закачки уменьшилось с 4.43 до 2.96 мм на 33%, длина трещины уменьшилась с 65.71 до 59.61 м на 9%, высота – на 11%, с 45.33 до 40.55 м. AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) изменился незначительно (+/- 2%). Профиль раскрытия стал более узким и вытянутым.

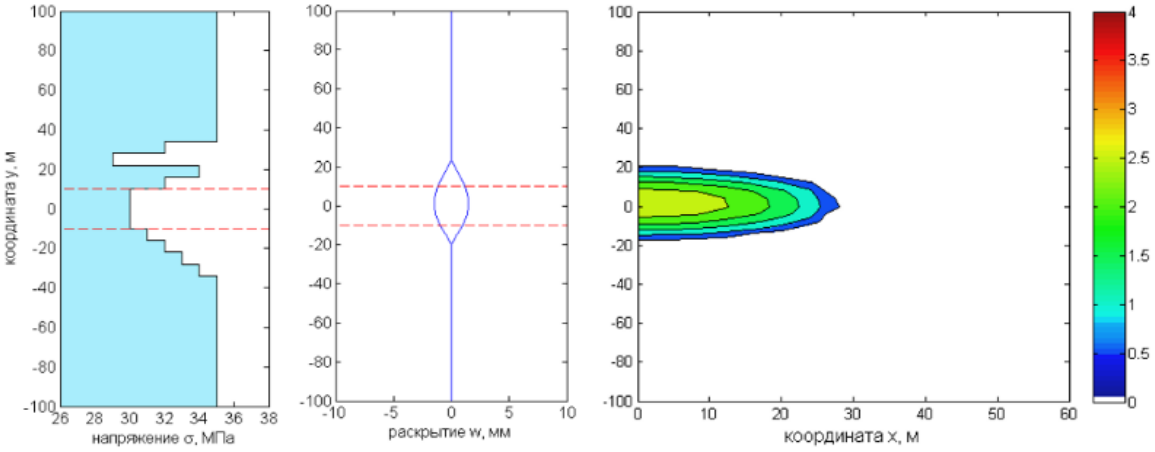


Рисунок 2.4.1. Планшет литологии и раскрытие трещины, базовый модуль Planar3D, 1 расчёт

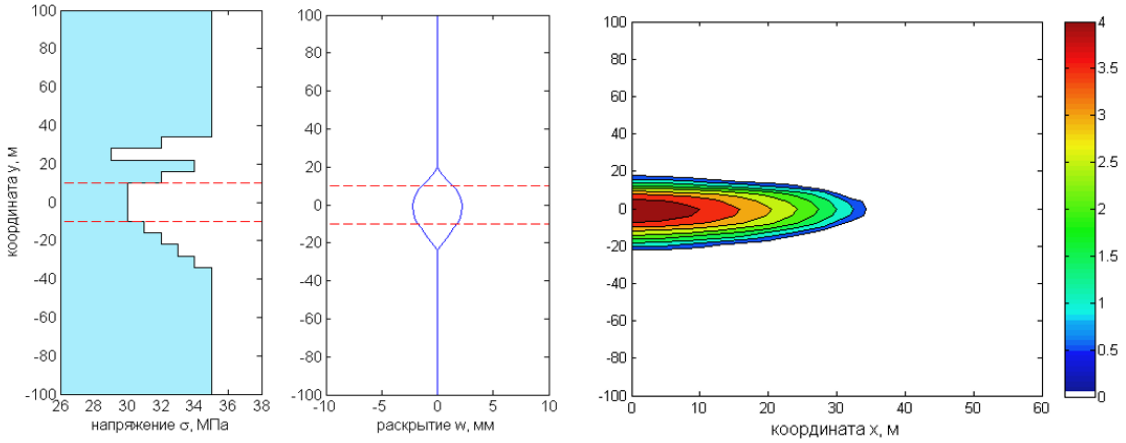


Рисунок 2.4.2. Планшет литологии и раскрытия трещины, температурный модуль Planar3D-T, 9 расчёт

При сравнении расчётов 2 и 10 (см. рисунок 2.4.3 и 2.4.4) видно, что раскрытие трещины уменьшилось с 7.87 5.51 мм – на 30%, длина уменьшилась с 124.33 до 116.8 м – на 6%, высота – с 74.31 до 61.69 м, на 16%, AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) увеличилось с 1.67 до 1.89, то есть на 13%.

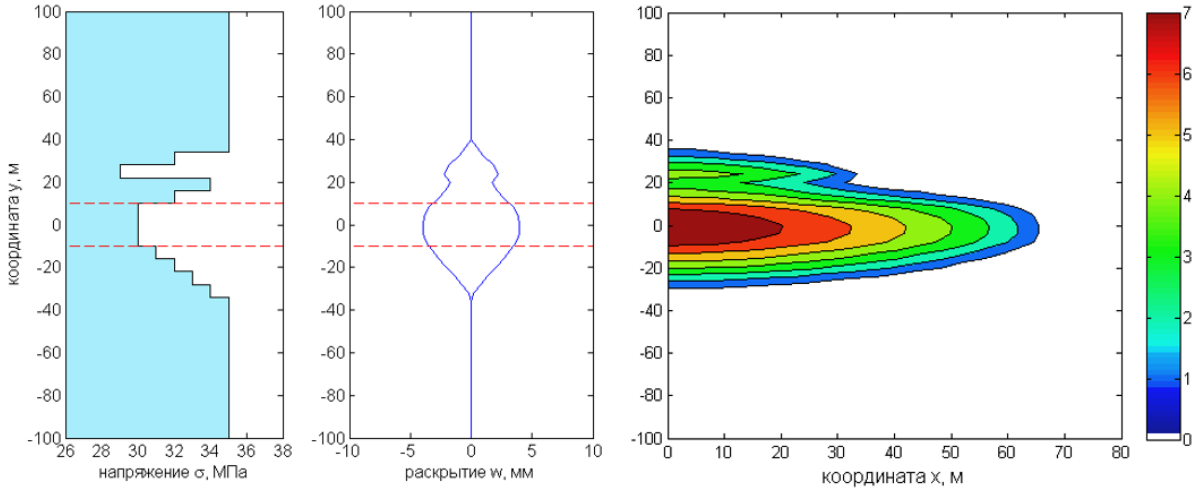


Рисунок 2.4.3. Планшет литологии и раскрытие трещины, базовый модуль Planar3D, 2 расчёт

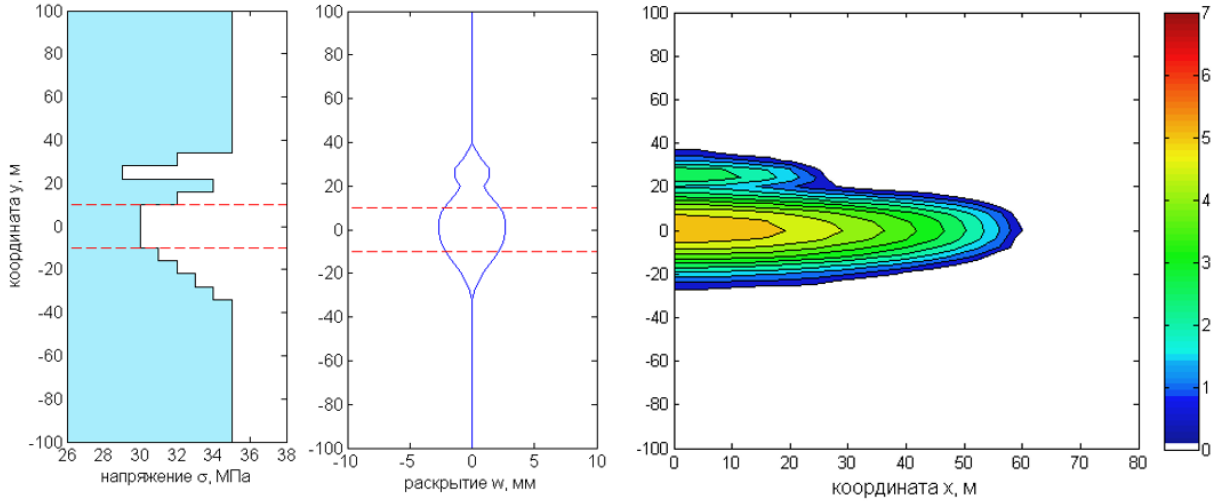


Рисунок 2.4.4. Планшет литологии и раскрытия трещины, температурный модуль Planar3D-T, 10 расчёт

При увеличении скорости закачки увеличивается значение AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте), трещина ГРП распространяется в длину больше, чем в соседние слои.

Можно сделать вывод, что при учёте температурных эффектов в данных вариантах расчетов, изменяется геометрия трещины (её длина и высота, а также раскрытие).

Приведено сравнение расчетов для трех вариантов: Planar 3D – жидкость имеет постоянные свойства при T=20 °C, Planar 3D-T – жидкость нагревается от 20 °C до 100 °C, происходит изменение свойств во времени, Planar 3D - жидкость имеет постоянные свойства при T=100 °C.

Таблица 2.4.1. Оценка влияния температурных эффектов

Рас-чёт	Модуль	Темпе-ратура, °C	Q, $м^3/мин$	K, $Па*с^n$	n	Время ГРП, мин	Раскрытие в точке закачки, мм	Длина, м	Высота, м	AR
1	Planar 3D	20	1	0.4	0.6	5	4,43	65,71	45,33	1,45
9	Planar 3D-T	20-100	1	0.4	0.6	5	2,96	59,61	40,55	1,47
3	Planar 3D	100	1	0.01	1	5	2,24	141,87	37,17	3,82

Сравнение расчётов 9 и 1 (см. таблицу 2.4.1.): с учётом температуры раскрытие в точке закачки меньше на 33%, длина трещины – на 9%, высота - на 11%. AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) изменился незначительно (+/- 2%). Сравнение расчётов 9 и 3: с учётом температуры раскрытие в точке закачки уменьшилось на 24%, длина трещины – на 154%, высота - на 19%, AR – на 217%.

Можно сделать вывод, что температурные эффекты существенно влияют на длину трещины ГРП.

Рассмотрим скорость закачки Q=5 $м^3/мин$.

Таблица 2.4.2. Оценка влияния температурных эффектов

Ва-риант	Модуль	Темпе-ратура, °C	Q, $м^3/мин$	K, Па*$с^n$	n	Время ГРП, мин	Раскрытие в точке закачки, мм	Длина, м	Высота, м	AR
2	Planar 3D	20	5	0.4	0.6	5	7,87	124,32	74,31	1,67
10	Planar 3D-T	20-100	5	0.4	0.6	5	5,51	116,8	61,68	1,89
4	Planar 3D	100	5	0.01	1	5	4,14	297,59	49,53	6

Из таблицы 2.4.2. видно, что при сравнении расчётов 10 и 2: раскрытие меньше на 30%, длина – на 6%, высота – на 17%, AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) уменьшился на 13%. Из сравнения расчётов 10 и 4: раскрытие уменьшилось на 24%, длина уменьшилась на 154%, высота-на 20%, AR на 217%.

Общая картина сохраняется, учёт температуры влияет на длину трещины ГРП.

Рассмотрим меньшую закачку, но большее время ГРП – 7 минут.

Таблица 2.4.3. Оценка влияния температурных эффектов

Рас-чёт	Модуль	Темпе-ратура, °C	Q, $м^3/мин$	K, Па*$с^n$	n	Время ГРП, мин	Раскрытие в точке закачки, мм	Длина, м	Высота, м	AR
7	Planar 3D	20	1	0.4	0.6	7	4,86	78,68	46,79	1,68
12	Planar 3D-T	20-100	1	0.4	0.6	7	4,24	68,30	43,28	1,57
8	Planar 3D	100	1	0.01	1	7	2,4	174,92	44,17	3,96

При сравнении расчётов 12 и 7 (см. таблицу 2.4.3.): с учётом температурных эффектов раскрытие трещины меньше на 12%, длина – на 13 %, высота – на 10%, AR (Aspect Ratio, отношение длины к высоте) – на 6%. При сравнении расчётов 12 и 8: раскрытие трещины уменьшилось на 43%, длина – на 156%, AR – на 150%, высота изменилась незначительно (+/- 2%).

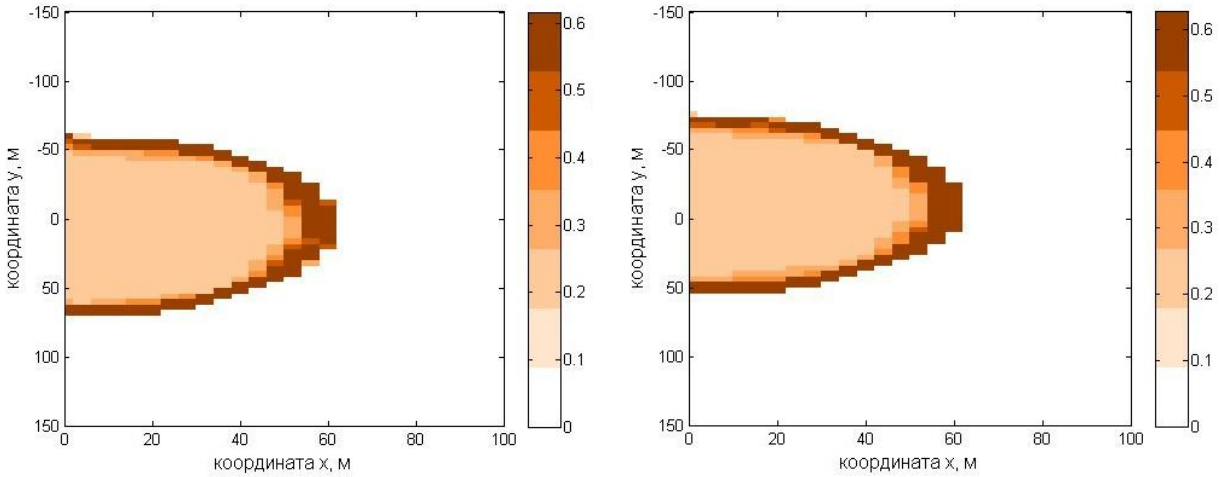
Учёт температурных эффектов существенно влияет на длину трещины ГРП и раскрытие в точке закачки.

Можно сделать вывод, что в многослойной среде учёт температурных эффектов на жидкость ГРП важен, так как они оказывают заметное влияние на геометрию трещины.

2.5. Учёт переноса проппанта

Для расчёта переноса проппанта была рассмотрена однородная трёхслойная среда (напряжения во всех слоях равняется 30 МПа), проведён эксперимент со следующими параметрами: коэффициент динамической вязкости жидкости $K = 0.01$ Па*с^n, индекс поведения жидкости $n = 1$, скорость закачки жидкости $Q = 1$ м^3/мин, концентрация проппанта как доля закачки 500 кг/м^3, плотность проппанта 2500 кг/м^3, время проведения ГРП 60 минут.

При расчёте движения проппанта большую роль играют свойства жидкости, которая его несёт. Если свойства жидкости ГРП меняются, то распределение проппанта по трещине тоже изменится (см. рисунок 2.5.1).



(*а*) (*б*)

Рисунок 2.5.1. Распределение проппанта, построенный в базовом модуле Planar3D (*а*) и в температурном модуле Planar3D-T (*б*)

Результаты эксперимента свидетельствуют о заметном влиянии температурных эффектов на транспорт проппанта. Представляет интерес дальнейшее исследовании темы для определения границ этого влияния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе была исследована трехмерная модель техногенной трещины гидроразрыва пласта в продуктивном пласте. Была проведена серия компьютерных вычислений в базовом модуле Planar3D и модуле Planar3D-T, дополнительно учитывающем влияние температуры на свойства жидкости гидроразрыва. Изучена динамика роста трещины и её конечная длина с учётом нестационарного температурного поля. Для каждого варианта расчёта построены графики литологии и профили раскрытия, проведён количественный анализ.

Были сформулированы следующие выводы для трёхслойного несимметричного пласта: результаты сравнения расчётов в модуле Planar3D-T и Planar3D с начальной температурой жидкости ГРП (при увеличении скорости закачки до 5 и времени проведения ГРП до 10 минут) дают практически идентичную геометрию трещины, раскрытие меняется на 10 – 15%. Полученные результаты демонстрируют влияние температурных эффектов при проведении мини-ГРП (ГРП продолжительностью 10-15 минут). Показано, что как увеличение расхода закачиваемой жидкости, так и увеличение времени закачки приводят к более значительному влиянию температурных эффектов. Ожидается, что при типичных временах проведения ГРП (часы) отсутствие учёта температурных зависимостей свойств жидкостей может приводить к значительным погрешностям в результатах.

Показано, что для многослойного пласта влияние температурных эффектов оказывается более существенным, чем для трехслойной среды. Нагрев жидкости от пласта приводит к заметному изменению длины и раскрытия трещины ГРП, так как от свойств жидкости зависят условия прорыва трещины в соседний слой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций: Пер. с фр. – Мир, 1968. – 464 с.

3. Слепян Л. И. Нестационарные упругие волны. – Л.: Судостроение, 1972. – 374 с.

4. Фомин П. Д., Габдрахманов А. Т. Проблемы и перспективы разработки доманиковых отложений // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 2. – С. 283-288.

5. Шмелев П. ТРИЗ как объективная реальность // Сибирская нефть –2018. – №149. – С. 16-23.

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

7. AlObaidi K. Induced Fractures Modelling in Reservoir Dynamic Simulators // Master Thesis. – UK: Heriot-Watt University. – 2015. – 96 p.

8. 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.

9. Babenkov M. B. Temperature of rock formation and fracturing fluid during the hydraulic fracturing process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2018. – V. 193. – №. 1. – P. 012076.

10. Belyadi H., Fathi E., Belyadi F. Hydraulic fracturing in unconventional reservoirs: theories, operations, and economic analysis. – Gulf Professional Publishing, 2019. – 632 p.

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

12. Linkov A. Bench-mark solution for a penny-shaped hydraulic fracture driven by a thinning fluid // arXiv: 1508.07968 – 2015.

13. Peirce A., Detournay E. An implicit level set method for modeling hydraulically driven fractures // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2008. – V. 197. – №33-40. – PP. 2858-2885

14. Rahman M. M., Rahman M. K. A review of hydraulic fracture models and development of an improved pseudo-3D model for stimulating tight oil/gas sand //Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2010. – T. 32. – №. 15. – C. 1416-1436.

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.