

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 в.ш.т.м, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____ А.М. Кривцов

«__» _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

«АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ НА РОСТ ТРЕЩИНЫ АВТОГРП»

по направлению 01.04.03 Механика и цифровое математическое моделирование
профиль 01.04.03_03 Механика и цифровое производство

Выполнила
студентка гр. 3640103/80301

Д.Р.Ткаченко

Руководитель
к.ф.-м.н., доцент

И.Б. Сулова

Санкт-Петербург
2020

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор в.ш.т.м.

А.М. Кривцов

« » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Ткаченко Дарье Романовне, гр. 3640103/80301

1. Тема работы: Анализ влияния режима работы нагнетательной скважины на рост трещины автоГРП.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 08.06.2020
3. Исходные данные по работе: имеющаяся проблематика в области разработки месторождений.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): анализ режимов распространения трещин автоГРП на основе данных по закачкам жидкости в скважину, изучение распространения трещин автоГРП в двух пластах при неизменной разнице давлений, создание модели роста трещины автоГРП в высоту на основе 1-D геомеханической модели.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): отсутствуют.
6. Консультанты по работе: Шель Е.В., ведущий специалист ООО «Газпромнефть НТЦ».
7. Дата выдачи задания: 22.01.2020

Руководитель ВКР

(подпись)

И.Б. Сулова

Задание принял к исполнению 22.01.2020

(дата)

Студент

(подпись)

Д.Р. Ткаченко

РЕФЕРАТ

На стр. 38, 16 рисунков, 0 таблиц, 0 приложений, 13 литературных источника.

ТРЕЩИНА АВТОГРП, НАГНЕТАТЕЛЬНАЯ СКВАЖИНА, ЗАВОДНЕНИЕ ПЛАСТА, АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В работе предоставлена аналитическая модель режимов распространения трещины автоГРП на основе полевых данных. Проведено сравнение вычисленных полудлин трещин с данными исследований КПД. Определена зависимость роста трещин автоГРП в двухпластовой системе при неизменной разнице давлений, выведено соотношение расходов двух трещин автоГРП, находящихся в разных пластах. Предложен алгоритм нахождения высоты трещины на основе данных 1D геомеханической модели, который показывает изменения высоты трещины при обводнении пласта.

THE ABSTRACT

38 pages, 16 pictures, 0 tables, 0 application, 13 references.

WATER-INDUCED FRACTURE, INJECTION WELL, FLOODING, ANALYTICAL MODEL

The paper provides an analytical model of auto-fracturing crack propagation modes based on field data. The calculated half lengths of cracks are compared with the data of efficiency studies. The dependence of the growth of auto-fracturing fractures in a two-layer system with a constant pressure difference is determined, the ratio of the flow rates of two auto-fracturing fractures located in different layers is derived. An algorithm is proposed for finding the height of the crack based on the data of the 1D geomechanical model, which shows the changes in the height of the crack during flooding.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИН АВТОГРП.	7
1.1. Методы обнаружения трещин автоГРП.	7
1.2. Моделирование трещин автоГРП.....	8
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ АВТОГРП В ДЛИНУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО ЗАКАЧКАМ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ.	16
2.1. Постановка задачи.	16
2.2. Аналитическое решение.....	16
2.3. Результаты аналитического преобразования с использованием данных по закачкам жидкости в скважину.	19
ГЛАВА 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ В ДВУХ ПЛАСТАХ. ..	24
3.1. Постановка задачи.	24
3.2. Распространение естественных трещин автоГРП в двух пластах при неизменной разнице давлений.....	24
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ АВТОГРП В ВЫСОТУ - ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.	28
4.1. Постановка задачи.	28
4.2. Механизм роста трещины в высоту.	31
4.3. Моделирование роста трещины автоГРП в высоту.	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	38

ВВЕДЕНИЕ

Во время работы нефтедобывающих скважин для эффективной добычи сырья необходимо постоянное поддержание пластового давления. Одним из способов решения данной задачи является перевод добывающих скважин в нагнетательный режим. Этот метод часто используется при разработке месторождений, но он имеет некоторые отрицательные моменты. На большинстве добывающих скважин перед переходом в нагнетательный режим был произведен гидроразрыв пласта (ГРП), что подразумевает закачку жидкости в пласт под большим давлением, превышающим прочность породы, для появления трещиноватости и увеличения добычи сырья. Следовательно, в большинстве добывающих скважин при переходе в нагнетательный режим существуют трещины закрепленные пропантом. Таким образом, когда происходит заводнение пласта в нагнетательных скважинах, необходим жесткий контроль давления на забое и в устье, так как если давления закачки превысят прочность и минимальные сжимающие горизонтальные напряжения горных пород, то может начаться рост естественных трещин в пласте или развитие новых трещин в призабойной зоне скважины. Данное явление самопроизвольного образования или раскрытия трещин называется эффектом автоГРП и сопровождается увеличением охвата пласта по высоте и по площади. Такие трещины могут достигать в длину несколько километров и быть сравнимы с расстоянием между соседними скважинами.

С помощью гидродинамических исследований скважин (ГДИС) было подтверждено нахождение трещин автоГРП в большинстве нагнетательных скважин. Неконтролируемый рост данных трещин в длину может привести к прорыву в соседнюю добывающую скважину, что приведет к ее обводнению. Особенно это заметно, если трещины данных скважин направлены навстречу друг к другу. Так же существует проблема заколонного перетока, возникающего из-за роста трещины в верхние и нижние пропластки. При этом жидкость начинает перетекать в нескольких пластах и может возникнуть

ошибка при расчетах из-за рассмотрения возможности распространения трещины только в одном пласте. Поэтому для большей эффективности эксплуатации добывающих скважин и разработке новых месторождений, важно учитывать данные процессы и уметь контролировать их.

Таким образом, *целью* данной работы является создание быстрых аналитических средств оценки роста трещины автоГРП в длину и высоту по полевым данным.

Объектом исследования является область разработки, в которой находятся добывающие и нагнетательные скважины с трещинами автоГРП. *Предметом исследования* является полудлина трещины автоГРП.

Задачи, которые нужно выполнить для достижения данной цели:

- 1) Обзор литературы по теме обнаружения, моделирования и развития трещин автоГРП.
- 2) Анализ режимов распространения трещин автоГРП на основе полевых данных.
- 3) Распространение трещин автоГРП в двух пластах при неизменной разнице давлений.
- 4) Создание модели роста трещины автоГРП в высоту на основе 1D геомеханической модели.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИН АВТОГРП.

1.1. Методы обнаружения трещин автоГРП.

Обнаружение трещин автоГРП на нагнетательных скважинах нужно для того, чтобы уменьшить количество обводненных добывающих скважин, правильно планировать обводнение пласта, использовать полученные данные при разработке месторождений и тд. Одним из более популярных методов выявления трещин автоГРП и оценка их влияние на разработку является гидродинамическое исследование скважин (ГДИС).

ГДИС – это комплекс работ, с помощью которого можно определить развитие трещины ГРП. В данной время этот комплекс методов проводится на скважинах с установившимся и неуставившимся режимах фильтрации. Метод регистрации индикаторной диаграммы (ИД) является исследованием скважин на установившихся режимах фильтрации. Он заключается в последовательной отработке скважины до стабилизации забойного давления и дебита на нескольких режимах работы. Метод регистрации кривой восстановления/падения давления в добывающей или нагнетательной скважинах (КВД, КВУ, КСД, КПД) является исследованием на неуставившихся режимах фильтрации. Он заключается в измерении и анализе реакции давления в период остановки или запуска скважины в эксплуатацию [5].

Проведено много исследований ГДИС, результаты которых показывают рост трещины автоГРП и влияние на обводнение добывающих скважин. В статье [3] рассматривается один из случаев, когда добывающая и нагнетательная скважины направлены перпендикулярно минимальным напряжениям. В результате получили, что с 99% вероятностью возможно обводнение скважины при таком исходе. Но также возможен случай, когда

трещина из нагнетательной скважины растет не прямо, а имеет сложную геометрию, то вероятность обводнения скважины очень мала [2].

Помимо рассмотрения случаев обводнения скважин за счет роста трещин автоГРП, существуют исследования на тему схлопывания данных трещин из-за изменения режима работы нагнетательной скважины. В которых показывается, что при варьировании расхода и забойного давления, можно добиться уменьшения длины трещины автоГРП [1].

Во время разработки очень важно в самом начале учесть влияние трещины автоГРП и её возможное развитие. Напряжено-деформированное состояние в пласте определяет рост трещины в длину и высоту, если при выборе системы разработки исходить из ориентации относительно преимущественного развития трещины, то можно избежать случаев с ростом трещины. [7] Также зная приблизительно геометрию трещины автоГРП, можно оптимизировать систему разработки с помощью правильного расположения скважин.

1.2. Моделирование трещин автоГРП.

В 1955 году были заложены основы теории ГРП в работах С.А.Христиановича и Ю.П. Желтова (модель Желтова-Христиановича), позже в 1961 году исследователями Т.К. Perkins и L.R. Kern была разработана более распространенная модель Перкинса-Керна.

На основе работ по теории ГРП появляются первые статьи, посвященные эффекту автоГРП. Одна из первых таких статей [11] описывает моделирование трещин на нагнетательных скважинах. Рассматривается плоско-деформированная задача, из-за предположения о малости полудлины трещины по сравнению с толщиной пласта. На Рис. 1.1а видно, что трещина представляется в форме эллипса, который находится под воздействием сжимающих напряжений на бесконечности. Поровое давление задавалось с

помощью экспоненциальной функции с учетом граничных условий на трещине ($p = p_f$) и на бесконечности ($p = p_e$) (Рис 1.1б).

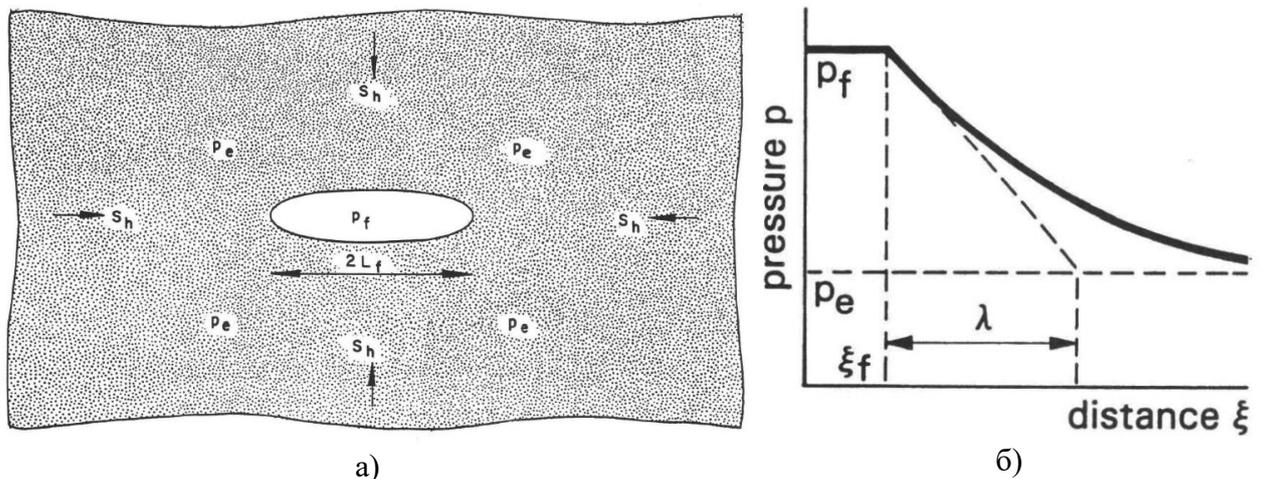


Рис. 1.1. а) Линейная трещина в пороупругой среде; б) Профиль порового давления.

Производится решение задачи механики трещины в линейно-пороупругой однородной изотропной среде, в итоге которого получаем сумму трех функций упругих напряжений и специальной функции пороупругих напряжений, что позволяет найти раскрытие трещины (1.1):

$$w_f = \frac{2(1 - \nu^2)L_f}{E} \left(p_f - s_h - \frac{\lambda}{1 + 2\lambda} A(p_f - p_e) \right) \quad (1.1)$$

где L_f – полудлина трещины, E – модуль Юнга, s_h – минимальное горизонтальное напряжение,

$$\lambda = \frac{L_p}{L_f} \quad (\lambda \ll 1), \quad \lambda = \ln\left(\frac{2L_p}{L_f}\right) \quad (\lambda \gg 1),$$

L_p – глубина проникновения давления, A – пороупругая константа.

Также можно найти давление закрытия (1.2):

$$p_{foc} = s_h + \frac{\lambda}{1 + 2\lambda} A(p_{foc} - p_e) \quad (1.2)$$

И давление распространения трещины (1.3):

$$p_{fp} = p_{foc} + \frac{K_{Icr} / \sqrt{\pi L_f}}{\left(1 - \frac{\lambda}{1 + 2\lambda} A\right)} \quad (1.3)$$

где K_{Icr} – трещиностойкость породы.

Было замечено, линейный разрыв в пороупругой среде принимает эллиптическую форму, как в случае непористой среды, а за счет увеличения глубины проникновения давления происходит расширение породы, что ведет к сокращению ширины трещины автоГРП. Давление открытия/закрытия трещины для малого проникновения равно напряжению сжатия, перпендикулярного трещине. Давление растёт при увеличении давления проникновения. Для полного проникновения этот рост составляет примерно четверть перепада давления между трещиной и пластом. Давление распространения трещины выше, чем давление открытия/закрытия. Эта разница увеличивается с увеличением проникновения давления и уменьшается с увеличением длины трещины. Для длинных трещин давление распространения трещины практически равно давлению открытия/закрытия трещины.

Важное исследование распространения трещин, вызванных нагнетанием жидкости в скважине, было представлено в статье [12]. Они объединили аналитическую модель трещины с численной моделью пласта и изучили скорость распространения трещины. Был сделан вывод, что обычная модель Картера [8] для одномерных утечек, перпендикулярных трещине, как правило, не всегда верна. То есть, если скорость давления, проходящего через пласт, имеет порядок скорости распространения трещины, распределение утечек будет двумерным в плоскости пласта. Позже Перкинс и Гонсалес представили полуаналитическую модель трещины, вызванной обводнением одной скважины в бесконечном резервуаре. Их модель имеет две важные

особенности. Во-первых, распространение утечек является двумерным, при этом переходный процесс давления эллиптически перемещается наружу в пласт по отношению к растущему разрыву. Во-вторых, учитывается влияние термоупругих изменений на напряжение породы пласта и, следовательно, на давление распространения трещин. Было показано, что охлаждение пластовой породы после закачки холодной воды может привести к тому, что трещины станут очень длинными.

В статье [13] рассматривается аналитическая модель роста трещины автоГРП, распространение которой происходит в бесконечном пласте. Данная модель используется, как для одномерных утечек (модель Картера), перпендикулярных трещине, так и для радиальных двумерных утечек.

В начале статьи рассматривается модель трещины автоГРП, которая распространяется в бесконечном объеме в отсутствии изменений напряжения. Берется приближенное уравнение баланса изменения объема, не учитывая скорость изменения объема трещины из-за ее малости, и предположение, что трещина распространяется при постоянном давлении, утечки одномерны и перпендикулярны трещине, пласт бесконечен, а нагнетательная жидкость имеет такую же подвижность, что и пластовая. Исходя из этого получаем, что длина трещины равна квадратному корню времени с точностью до коэффициента, и имеет прямоугольную форму (1.4). Модель Картера показывает, что скорость распространения трещины больше скорости распространения пластового давления.

$$L = \alpha\sqrt{t} \quad (1.4)$$

где $\alpha = \frac{q\mu\sqrt{\pi\eta}}{2\pi kh\Delta p}$, q - расход жидкости, μ - вязкость жидкости, η - коэффициент гидравлической диффузии, k - проницаемость пласта, h - толщина пласта, Δp - разница забойного и пластового давлений, L - полудлина трещины.

Модель Картера перестает быть верной, когда скорость распространения трещины становится меньше скорости пластового давления. В этом случае фронт проникновения давления в пласт берется радиальным относительно медленно растущей трещины, которую рассматривают квазистационарной. Предполагается верным, что скорость закачки постоянна и давление в трещине является равномерным (бесконечная проводимость), тогда давление в трещине можно рассчитать, как приближенное решение эллиптического потока. Длина трещины в этом случае будет пропорциональна квадратному корню времени (1.5).

$$L = 3 \exp\left(-\frac{2\pi kh \Delta p}{q\mu}\right) \sqrt{\pi\eta} \quad (1.5)$$

После в статье [12] показали, что в бесконечном пласте при любой скорости распространения трещины, длины всегда будет пропорциональна квадратному корню времени, различия будут только в коэффициентах. Там также был численно рассчитан график с помощью симулятора пласта, связанного с аналитической моделью трещины.

Аналитическое выражение (1.6) для нахождения давления с постоянной скоростью расхода в стационарной трещине бесконечной проводимости представили в статье [10].

$$\Delta p_d = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{L_d} \{ \operatorname{erf}(0.134L_d) + \operatorname{erf}(0.866L_d) \} - 0.067 \operatorname{Ei}(-0.08L_d^2) - 0.433 \operatorname{Ei}(-0.750L_d^2), \quad (1.6)$$

где $\Delta p_d = 2\pi kh \frac{p_f - p_i}{q\mu}$, $L_d = \frac{1}{\sqrt{t_d}}$, $t_d = \frac{\eta t}{L^2}$, $q_d = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi\eta}}$ - безразмерный расход жидкости, p_f - забойное давление, p_i - пластовое давление.

Используя свойства функции ошибки и экспоненциального интеграла, показали, что из выражения (1.6) можно получить решение Картера и двумерное радиальное решение при определенных условиях (Рис. 1.2)

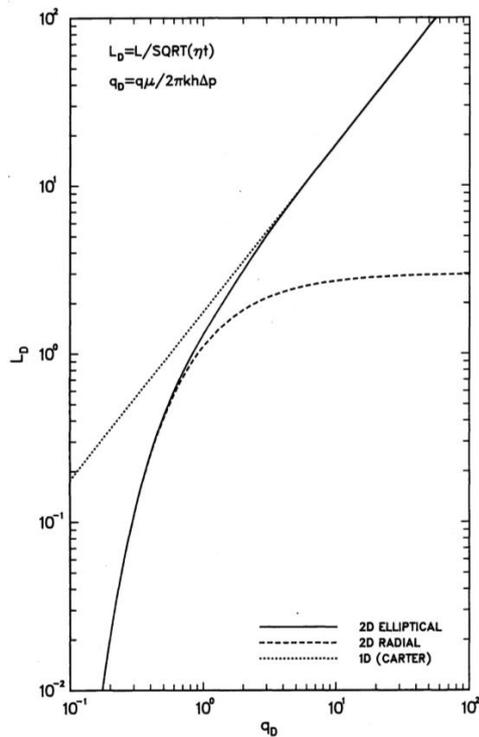


Рис.1.2 Распространение трещины в различных моделях утечек.

Также в статье [13] рассматривается влияние поро- и термоупругих напряжений на давление распространения трещины. Трещина представляется клиновидной формы, который является эллипсом в горизонтальном сечении и прямоугольником в вертикальном сечении (Рис. 1.3).

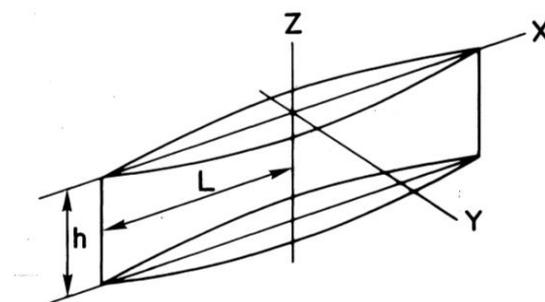


Рис. 1.3 Геометрия трещины

Если давление в трещине и горизонтальное напряжение в пласте равномерно распределены по всей поверхности трещины, то давление распространения трещины имеет вид (1.7):

$$p_f - s_h = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi L}} \quad (1.7)$$

где s_h – горизонтальное напряжение пласта, K_{IC} – коэффициент интенсивности критического напряжения.

Повлиять на состояние напряжения в пласте может изменение температуры и давления в нем. Так, когда пласт охлаждается, порода начинает сжиматься и, следовательно, происходит термоупругое уменьшение горизонтальных напряжений пласта, и наоборот. Это предположение рассматривалось в статьях [2,3,6,13] и результатом было то, что изменения горизонтального напряжения в пласте зависит от соотношения высоты трещины и глубины проникновения давления/фронта температур.

Если произвести замену (1.8), то можно учесть влияние изменения поро- и термоупругих напряжений:

$$s_h = s_{hi} + \Delta\sigma_{yp} + \Delta\sigma_{yT} \quad (1.8)$$

где s_{hi} – начальное горизонтальное напряжение, $\Delta\sigma_{yp}, \Delta\sigma_{yT}$ – поро- и термоупругие изменения полного напряжения. Данная замена допустима, если поро- и термоупругие напряжения рассчитываются с учетом граничного условия нулевого смещения, перпендикулярного границе трещины. В статье [13] аналитически рассчитали пороупругие напряжения с постоянным изменением температуры для эллиптической области, которые сошлись с численными результатами.

Делается предположение о плоской деформации, и изменения пороупругого напряжения на границе разлома становятся (1.9):

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{ypD}^{(ps)} &= \frac{1}{2}\Delta p_D(o) - \frac{1}{4}; \\ \Delta\sigma_{xpD}^{(ps)} &= \frac{1}{2}\Delta p_D(o) + \frac{1}{4} \end{aligned} \quad (1.9)$$

где $\Delta\sigma_{(x,y)pD} = \frac{\Delta\sigma_{(x,y)p} 2\pi kh}{A_p q\mu}$, $\Delta p_D(o) = \frac{\Delta p(o)}{q\mu} 2\pi kh$, ps – плоская деформация, A_p – константа пороупругости.

Когда происходит изменение граничных условий на бесконечности в решении с плоской деформацией, осесимметричные изменения давления/температуры начинают отклоняться от условий плоской деформации. Измененные граничные условия показывают, что на бесконечности напряжения становятся равны равномерному изменению напряжения дальнего поля ΔS_{HpD} . Таким образом, поправки к поро- и термоупругим напряжениям на поверхности разрыва (1.10) имеют вид:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{ypD} &= \frac{1}{2}\Delta p_D(o) - \frac{1}{4} + \Delta S_{HpD}; \\ \Delta\sigma_{xpD} &= \frac{1}{2}\Delta p_D(o) + \frac{1}{4} + \Delta S_{HpD}\end{aligned}\tag{1.10}$$

где $\Delta S_{HpD} = \frac{1}{2}\Delta p_D(o) + \frac{1}{4}Q(R_e) - \frac{1}{4}Q\left(\frac{L}{2}\right)$, $Q(u) = 2a\sinh\frac{h}{u}$,

$R_e(t) = 1.5\sqrt{\eta t}$ – радиус проникновения трещины, h – высота резервуара.

При различных типах нагнетания (нефтяной, холодной воды, теплой воды) также рассчитали данные напряжения, учитывая разные значения подвижности жидкости.

При обводнении пласта рост трещины автоГРП может происходить не только по горизонтали, но также и в вертикальном направлении. В статье [4] рассматривается алгоритм прогноза роста трещины автоГРП в высоту и определяются безопасные параметры эксплуатации нагнетательных скважин.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ АВТОГРП В ДЛИНУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО ЗАКАЧКАМ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ.

2.1. Постановка задачи.

Рассматривается распространение трещины автоГРП в однопластовой системе. Для определения длины трещины автоГРП было найдено несколько аналитических решений: радиальная модель, линейная модель и эллипсоидальная модель. Каждая из данных моделей может работать только в определенных ограничениях для безразмерной полудлины трещины при постоянном расходе. Поставим задачу о нахождении безразмерной полудлины трещины автоГРП на основе данных по закачкам жидкости в скважину.

2.2. Аналитическое решение.

В самом начале, чтобы понять в каком режиме распространяется трещина автоГРП, нужно найти ограничения на действие каждой модели в данной среде. Для данной задачи вводятся некие предположения: постоянное давление в трещине, утечки одномерны и перпендикулярны стенке трещины, пласт бесконечен, нагнетательная жидкость имеет такую же подвижность, что и пластовая жидкость. Учитывая все предположения, был произведен анализ Gringarden [10] и определена формула распространения трещины автоГРП в эллипсоидальном режиме при постоянном расходе. (2.1)

$$\Delta p_d = \frac{1\sqrt{\pi}}{2L_d} \{erf(0.134L_d) + erf(0.866L_d)\} - 0.067 Ei(-0.08L_d^2) - 0.433 Ei(-0.750L_d^2), \quad (2.1)$$

где $\Delta p_d = 2\pi kh \frac{p_f - p_i}{q\mu}$, $L_d = \frac{1}{\sqrt{t_d}}$, $t_d = \frac{\eta t}{L^2}$

L – полудлина трещины,
 t - время закачки жидкости(с),
 q - расход жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$),
 μ - вязкость жидкости ($\text{Па} \cdot \text{с}$),
 η - коэффициент гидравлической диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$),
 k - проницаемость пласта (м^2),
 h - толщина пласта (м),
 p_f - забойное давление (Па),
 p_i – пластовое давление (Па).

Используя свойства функции ошибки и экспоненциального интеграла из выражения (2.1) можно увидеть, что исходя из данных закачки, когда безразмерные утечки и безразмерная полудлина трещины автоГРП имеет ограничения (2.2):

$$\begin{aligned}
 L_d &> 7.9 \\
 t_d &< 0.016
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Выражение (2.1) вырождается в линейный режим Картера (2.3):

$$\begin{aligned}
 L &= \alpha\sqrt{t}, \\
 L_d &= \frac{q_d}{\pi},
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

где $\alpha = \frac{q\mu\sqrt{\pi\eta}}{2\pi kh\Delta p}$ - некий коэффициент,

$q_d = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi\eta}}$ - безразмерный расход жидкости.

Если у нас безразмерные утечки и безразмерная полудлина трещины автоГРП имеет ограничения (2.4):

$$\begin{aligned}
 L_d &< 0.58, \\
 t_d &> 3.0
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Тогда выражение (2.1) вырождается в радиальный режим (2.5):

$$L = 3 \exp\left(-\frac{2\pi kh\Delta p}{q\mu}\right) \sqrt{\pi\eta}$$

$$L_d = 3 \exp\left(-\frac{1}{q_d}\right) \quad (2.5)$$

Данные режимы распространения трещины характеризуются соотношением между скоростью распространения трещины автоГРП и скоростью пластового давления. При радиальном режиме скорость распространения трещины автоГРП много ниже скорости пластового давления. С увеличением скорости распространения трещины и выходом из ограничений для радиального давления, наступает эллипсоидальный режим. Далее если скорость распространения трещины автоГРП становится много больше скорости пластового давления наступает линейный режим. В каждом из режимов трещина имеет примерно определенную форму. Сначала в радиальном режиме трещина округлая, при переходе в эллипсоидальный режим она начинает вытягиваться в форму эллипса, а при линейном режиме трещина становится похожа на подобие прямоугольника.

Но все эти формулы могут предсказать длину трещины автоГРП только при постоянном расходе, а исходные данные по закачкам берутся из месячных эксплуатационных рапортов (МЭР). Сравнение с реальными полевыми данными показало, что расход непостоянен так как происходит обводнение пластов, что в свою очередь ведет к непостоянному давлению в трещине, также из-за эффектов пороупругости, взаимодействию трещин с окружением и возможный выход на стационарный режим трещины автоГРП вблизи нагнетательных и добывающих скважин. Следовательно, расход становится зависим от времени и нельзя использовать формулы (2.1, 2.3, 2.5) напрямую.

Чтобы использовать исходные модели для расхода, зависящего от времени, данные формулы (2.1, 2.3, 2.5) представляем, как сумма приращений кусочно-непрерывной функции (Рис.2.1).

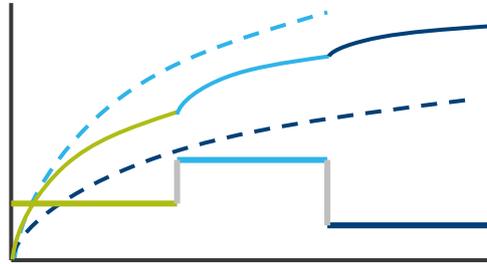


Рис.2.1 Представление суммы приращение кусочно-непрерывной функции.

- $L(t, q) = f(t, q)$

(2.5)

- $\frac{\partial L}{\partial t} = f'(t, q)$

- $L(t, q) = \int f'(t, q(t))dt = \sum_{i=0}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} f'(t, q(t_i))dt = \sum_{i=0}^n f(t, q(t_i)) \Big|_{t_i}^{t_{i+1}}$

С помощью аналитического преобразования (2.6) можно рассчитывать длину трещины автоГРП по исходным данным закачки из месячных эксплуатационных рапортов (МЭР) используя модифицированные решения (2.1, 2.3, 2.5).

2.3. Результаты аналитического преобразования с использованием данных по закачкам жидкости в скважину.

Для нахождения полудлины трещины автоГРП использовались данные по режиму закачки – месячные эксплуатационные рапорты (МЭР) и технический режим скважины (Техрежим). Выбирались скважины с уже подтвержденными трещинами автоГРП на основе гидродинамического исследования скважины (ГИС) – кривой падения давления(КПД). В

программы Excel с помощью этих данных на каждом шаге формулы (2.6) находилось значение безразмерных утечек в данное время и определялся режим, на которые вышла трещина автоГРП. Далее на основе полученных данных были построены зависимости роста полудлины трещины автоГРП от времени в месяцах для разных скважин и сравнение нашего результата от результата полученного с помощью КПД (Рис. 2.2, 2.3).



Рис.2.2



Рис.2.3

Из рис.2.2 и рис.2.3 видно, что у большинства скважин аналитическое решение получилось достаточно близко к значению по КПД. Ошибка составляет примерно 20%. Нами было замечено, что в большей части скважин режим роста трещины автоГРП почти сразу выходит на линейный. Также существуют скважины, где аналитическое решение не совпадало с КПД. (рис.2.4)



Рис.2.4

Данный алгоритм не сработал на 3 из 14 проверенных скважин. Это можно объяснить несколькими причинами:

- трещина могла перейти в стационарный режим еще где-то в самом начале
- не учитывались остановки закачки, в которые трещина могла «схлопнуться»
- не учитывается многопластовость

Следовательно, выход на стационарный режим, «схлопывание» трещины и многопластовость не могут быть рассмотрены в данной задаче и являются ее границей применимости.

Так как в начале все расчеты происходили в программе Excel, была произведена работа написания программы на языке Python для более быстрых расчетов (Рис.2.4).

$$L_d$$

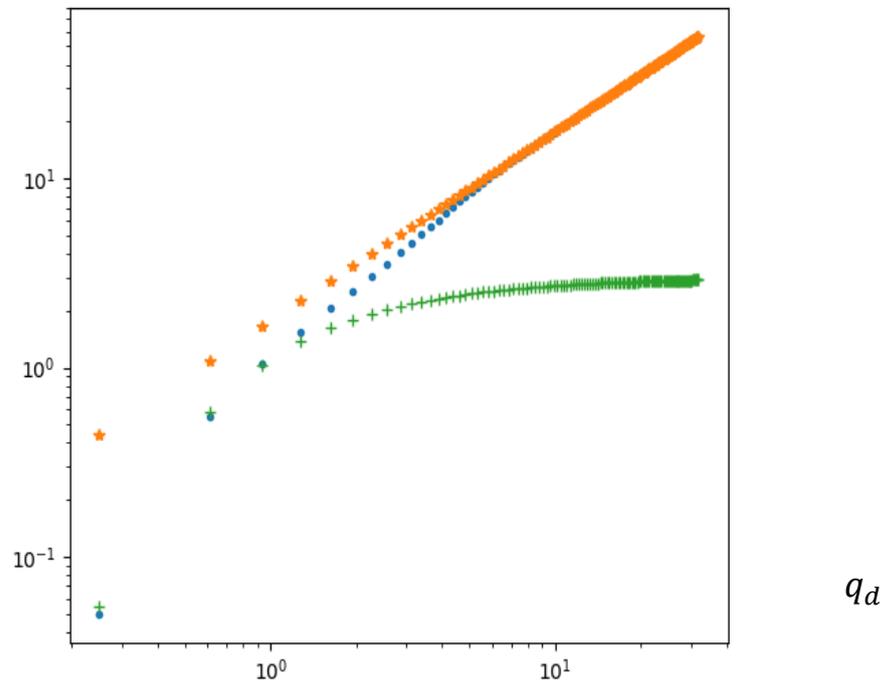


Рис.2.5 Логарифмическая зависимость безразмерной полудлины трещины от безразмерного расхода жидкости.

На рис.2.5 обозначение:

- * - линейный режим(Картера)
- - эллиптический режим (Грингартен)
- + - радиальный режим.

На рис.2.5 хорошо прослеживается переход эллиптического режима в 2 частных - линейный и радиальный. С помощью этого графика можно определять примерные границы действия каждой из моделей. Далее данная программа на языке Python была модернизирована. В ней реализован алгоритм, который рассчитывает полудлину трещины, исходя из загруженных в него файлов МЭР, что в разы облегчает задачу по нахождению трещин автоГРП в действующих нагнетательных скважинах.

ГЛАВА 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ В ДВУХ ПЛАСТАХ.

3.1. Постановка задачи.

Одной из причин расхождения полудлины трещины автоГРП, рассчитанной аналитическим путем, с полудлинной трещины автоГРП, найденной по исследованиям КПД, является многопластовость месторождений. При нагнетании скважины, исходя из матбаланса, весь объем жидкость должен уходить в пласт и, следовательно, давление в пласте увеличивается, но это не всегда происходит. Действующая нагнетательная скважина может проходить через 2 и более пластов с разной проницаемостью, толщиной, пористостью и другое. В этих пластах могут формироваться новые или начать расти естественные трещины автоГРП вне зависимости друг от друга. Поставим задачу об анализе независимого роста естественных трещинных автоГРП, находящихся в двухпластовой системе.

3.2. Распространение естественных трещин автоГРП в двух пластах при неизменной разнице давлений.

Рассматривается задача, когда нагнетательная скважина проходит через 2 пласта с естественной трещиноватостью (Рис.3.1).

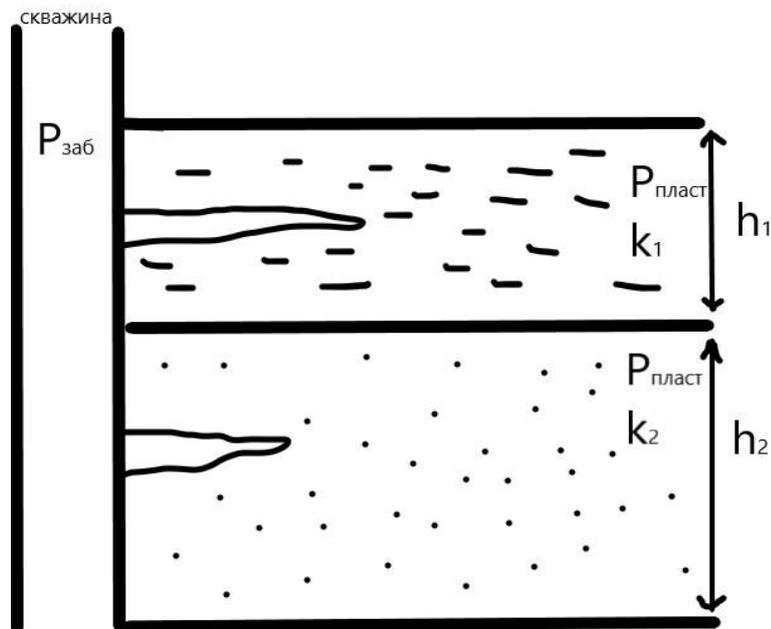


Рис.3.1. Пересечение нагнетательной скважиной 2 пласта с естественной трещиноватостью.

Данная задача имеет определенные ограничения: постоянное давление в трещинах, утечки одномерны и перпендикулярны стенке трещины, пласты бесконечны, нагнетательная жидкость имеет такую же подвижность, что и пластовая жидкость. Так же разница между пластовым давлением и забойным давлением постоянно. В каждом пласте есть уже естественная трещина определенной длины L_1 и L_2 . Тогда с учетом всех ограничений при анализе Картера можно получить уравнение потока для двух пластов:

$$q_1 = \frac{2 * k_1 * h_1 * L_1 * \Delta p}{\mu * \sqrt{\pi}} \quad (3.1)$$

$$q_2 = \frac{2 * k_2 * h_2 * L_2 * \Delta p}{\mu * \sqrt{\pi}} \quad (3.2)$$

где $L_{1,2}$ – начальная полудлина естественной трещины (м),

$q_{1,2}$ - расход жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$),

μ - вязкость жидкости ($\text{Па} * \text{с}$),

$k_{1,2}$ - проницаемость пласта (м^2),

$h_{1,2}$ - толщина пласта (м),

Δp - разница между забойным и пластовым давлениями (Па).

Основное различие между пластами в толщине и проницаемости. Для удобства введем их произведение (3.3):

$$\varepsilon = k * h \quad (3.3)$$

Перепишем уравнение (2.1) для потока и получим (3.4, 3.5):

$$q_1(L_{d1}) = \frac{2 * \pi * \varepsilon_1 * \Delta p}{\mu * F_1(L_{d1})} \quad (3.4)$$

$$q_2(L_{d2}) = \frac{2 * \pi * \varepsilon_2 * \Delta p}{\mu * F_2(L_{d2})} \quad (3.5)$$

где $L_{d1,2}$ – полудлина трещины автоГРП (м),

$F_{1,2}(L_{d1,2})$ – правая часть формулы (2.1).

В двухпластовой системе у нас есть две трещины в двух пластах, следовательно, расход будет делиться между ними (3.6):

$$q_1 + q_2 = q \quad (3.6)$$

Так как было замечено, что большинство трещин автоГРП почти сразу начинают распространяться в линейном режиме, то преобразуем нашу правую часть формулы (2.1) для режима Картера (3.7).

$$F_{1,2}(L_{d1,2}) = \sqrt{\pi} * q_d \quad (3.7)$$

где $q_d = \frac{q * \mu}{2 * h * k * \pi * \Delta p}$ - безразмерный расход.

Теперь мы имеем 5 уравнений (3.1,3.2,3.4,3.5,3.6) и 5 неизвестных Δp , $q_{1,2}$, $L_{d1,2}$. Это система уравнений решается и получаем результат (3.8, 3.9):

$$L_{d1} = \frac{L_1 * q}{2 * \pi * \Delta p * (\varepsilon_1 L_1 + \varepsilon_2 L_2)} \quad (3.8)$$

$$L_{d2} = \frac{L_2 * q}{2 * \pi * \Delta p * (\varepsilon_1 L_1 + \varepsilon_2 L_2)} \quad (3.9)$$

Мы получили формулу полудлины трещины автоГРП, которая начала расти из естественной трещины в пласте при постоянной разнице давлений. Найдем соотношение полученных полудлин трещин (3.10):

$$\frac{L_{d1}}{L_{d2}} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3.10)$$

Как видно из соотношения (3.10) разница в росте двух независимых трещин в двухпластовой системе при неизменной разнице давлений будет

зависеть только от начальной длины естественной трещины. Далее найдем соотношение в деление расхода в пласте на начале нагнетания скважины. Для этого поделим уравнение (3.1) на (3.2), получаем соотношение расходов в трещинах (3.11):

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{L_1 * \varepsilon_1}{L_2 * \varepsilon_2} \quad (3.11)$$

Из соотношения (3.11) видно, что разделение расхода на две естественные трещины в двух соответствующих пластах напрямую зависит от изначальной длины трещины и характеристик данного пласта.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ АВТОГРП В ВЫСОТУ - ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

4.1. Постановка задачи.

Если рассматривать горизонтальный пласт, то можно заметить, что по своей структуре он неоднороден и имеет разные упругие свойства (Рис 4.1).

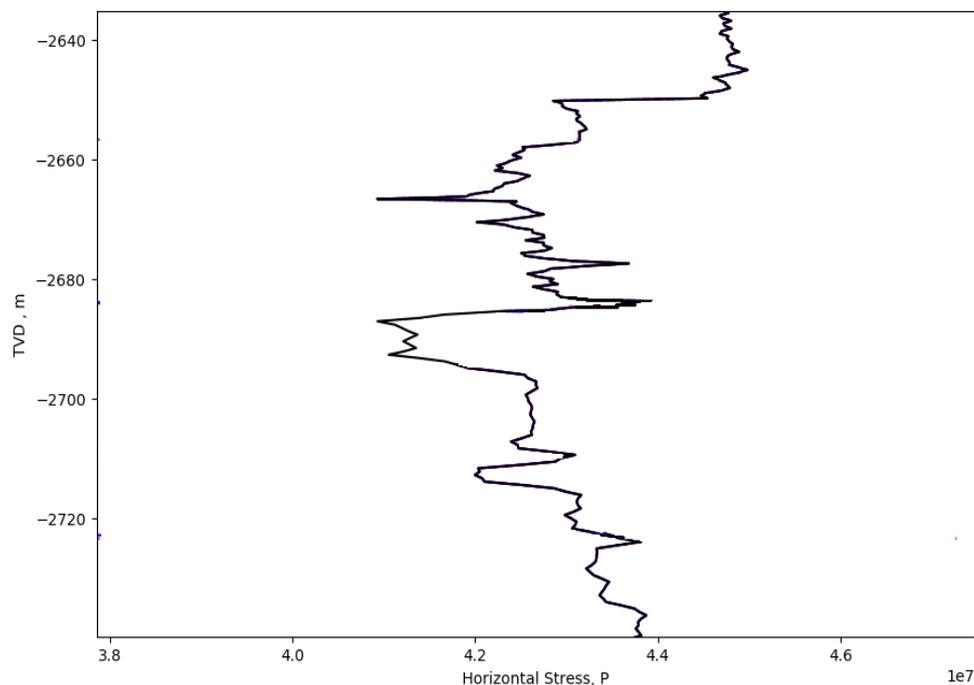


Рис. 4.1 Изменение горизонтального напряжения от глубины скважины.

Учитывая особенности представленные на рис.4.1, пласт можно разбить на определенные пропластки. (Рис.4.2.)

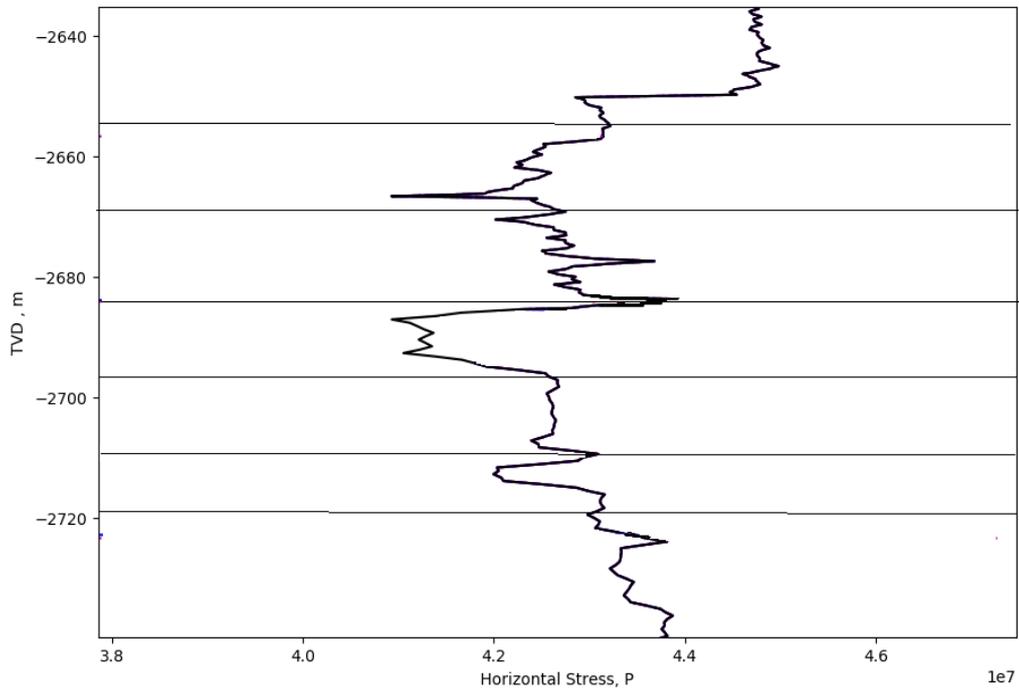


Рис. 4.2. 1-D геомеханическая модель с пропластками.

Как правило, при расчете роста трещина автоГРП в длину, высота трещины h считается постоянной, она берется равной общей толщине пласта (проницаемой). Но, учитывая неоднородность сжимающих напряжений пласта по вертикали, истинное значение высоты трещины может значительно отличаться от проницаемой толщины пласта. Возможны как изменения высоты трещины со временем, так и прорывы трещины автоГРП в соседние пропластки из-за недостаточного контраста напряжений с проницаемым пластом.

Моделирование роста трещины автоГРП в высоту имеет критическое значение для гидродинамической модели. Прорыв трещины автоГРП может привести к перетоку нагнетаемой жидкости в соседний пласт, что сильно скажется на матбалансе обоих пластов. Также конкретная величина высоты трещины автоГРП важна для расчета роста скорости трещины в длину (4.1):

$$L = \frac{q * t^{\frac{1}{2}}}{\pi * C * h} \quad (4.1)$$

где L – длина трещины автоГРП, q – объемная скорость потока, C – коэффициент потери жидкости, h – высота трещины автоГРП, t – время.

В соответствии со статьей Koning E.J.L. [13] формула (4.1) может использоваться, если распространение трещины определяется линейным режимом утечек. Условие выполнения этого режима оценивается, как ограничение на безразмерный параметр $q_d > 7.9\pi$. Параметр q_d определяется следующей формулой (4.2):

$$q_d = \frac{q\mu}{2\pi kh(p_f - p_i)} \quad (4.2)$$

где q – объемная скорость потока, μ – вязкость жидкости, k – проницаемость, h – высота трещины автоГРП, p_i – забойное давление, p_f – пластовое давление.

Для оценки скорости роста трещины автоГРП данный параметр является ключевым. По факту рост трещины автоГРП в полубесконечном пласте с равномерным начальным поровым давлением может быть описан следующей зависимостью (4.3):

$$L = L_d(q_d)\sqrt{\kappa t} \quad (4.3)$$

где κ – коэффициент пьезопроводности пласта, t – время закачки жидкости, а $L_d(q_d)$ безразмерная функция на коэффициент скорости роста трещины, заданная в работе [13] неявно. При малых q_d коэффициент скорости роста трещины L_d экспоненциально стремится к нулю. Если коэффициент q_d выбранного режима закачки меньше, чем коэффициент равновесного режима трещины для данной системы разработки $q_d < q_{crit} \sim 0.2 \div 0.5$, то рост трещины автоГРП в длину остановится из-за компенсации закачки отборами с соседних скважин.

Тем не менее, это не гарантирует от прорыва трещины автоГРП в высоту. Для моделирования данного процесса нужно рассмотреть вертикальную неоднородность. Постановка задачи заключается в нахождение высоты трещины автоГРП с учетом вертикальной неоднородности.

4.2. Механизм роста трещины в высоту.

Если сравнивать характерные параметры трещины автоГРП с обычным ГРП, то можно заметить, что при автоГРП вязкость и скорость расхода жидкости заметно ниже. Следовательно, в первом приближении можно принять, что трещина автоГРП имеет почти постоянную высоту по длине, так как соответствует по безразмерным параметрам модели РКН [16]. Однако, с течением времени может реализоваться 2 механизма роста трещины в высоту.

Первый механизм роста в высоту реализуется из-за накопившегося за счет сил вязкого трения дополнительного давления в самой трещине. Если дополнительное давление в трещине превысило разницу давлений с соседним пластом, то нагнетательная жидкость прорвется в соседний пласт. Этот механизм позволяет трещине автоГРП приобщить весь или почти весь целевой пласт, но, как правило, не позволяет ей прорваться в соседний пласт.

Второй механизм роста в высоту реализуется из-за того, что с течением времени закачки эффективное пластовое давление может повышаться за счет заводнения пласта. Из-за того, что пластовое давление успевает подняться только в проницаемом пласте, а также из-за более высокого коэффициента Био в проницаемом пласте, эффективное сжимающее напряжение поднимается в основном в проницаемом пласте. Таким образом, с течением времени повышение эффективного давления может привести к выдавливанию трещины автоГРП в соседние пласты из-за эффекта пороупругости (back-stress). В соседние пласты трещина автоГРП может прорваться именно по этому механизму.

4.3. Моделирование роста трещины автоГРП в высоту.

Для учета обоих эффектов был разработан алгоритм оценки роста трещины автоГРП в высоту на заданный момент времени. Алгоритм принимает на вход данные о текущем эффективном пластовом давлении и данные из 1D модели с разбиением на пропластки толщиной 0,1 м. Преобразование данных 1D модели происходит с учетом эффекта пороупругости. Исходя из полученных данных, выделяется целевой пласт, и в нём выбирается точка перфорации.

$$\Delta p = P - \sigma_3 \quad (4.4)$$

где Δp - чистое давление в трещине, P - давление в трещине, σ_3 - минимальные горизонтальные напряжения.

Для нахождения чистого давления трещины автоГРП (разницы давления в трещине со сжимающими напряжениями горной породы на бесконечности) в данной точке используется формула (4.5), приведенная в статье [9]

$$\Delta p = 4 * \left[\frac{2 * G^3 * \mu * q^2}{\pi^3 * (1 - \nu)^3 * C * h^5} \right]^{\frac{1}{4}} * t^{\frac{1}{8}} \quad (4.5)$$

где Δp – чистое давление в трещине, G – модуль плоской деформации породы, ν – коэффициент Пуассона.

Далее происходит сравнение давления в точке перфорации с давлениями в граничных пропластках. Если давление в точке превышает давление в одном из пропластков, то происходит прорыв трещины в данном направлении по вертикали. Но с увеличением высоты трещины автоГРП, исходя из формулы (4.5), ее чистое давление становится меньше, и в определенный момент времени давление в граничных пропластках начинает превышать давление

трещины автоГРП, что приводит к остановке роста трещины в высоту. (рис. 4.3).

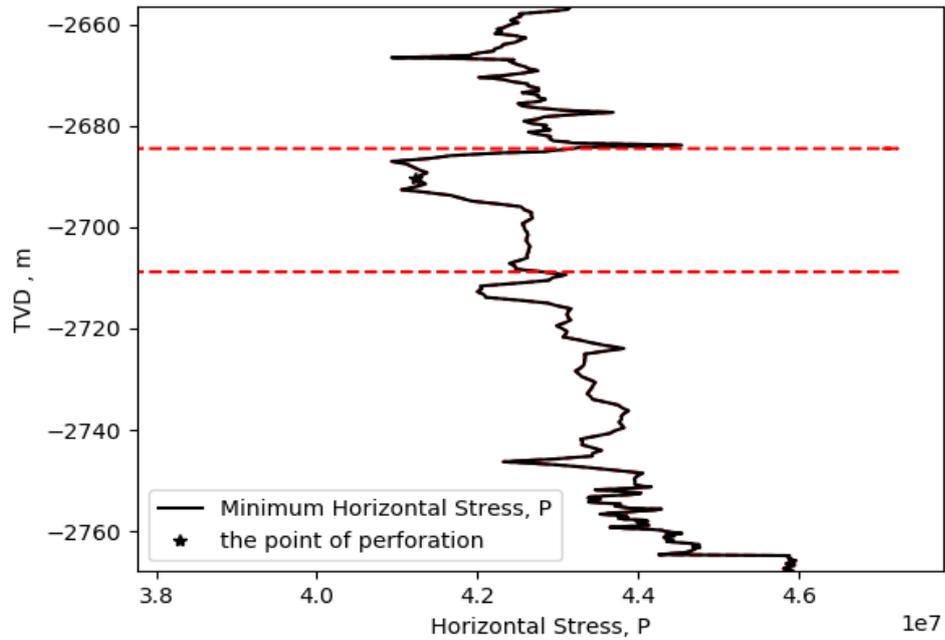


Рис.4.3. Высота закрепленной трещины автоГРП.

При долгой работе нагнетательных скважин происходят обводнения прилегающих пластов, что в свою очередь начинает менять пластовое давление и давление в трещине. Заводнение прилегающих пластов может привести к стремительному прорыву трещины автоГРП в высоту (рис. 4.4).

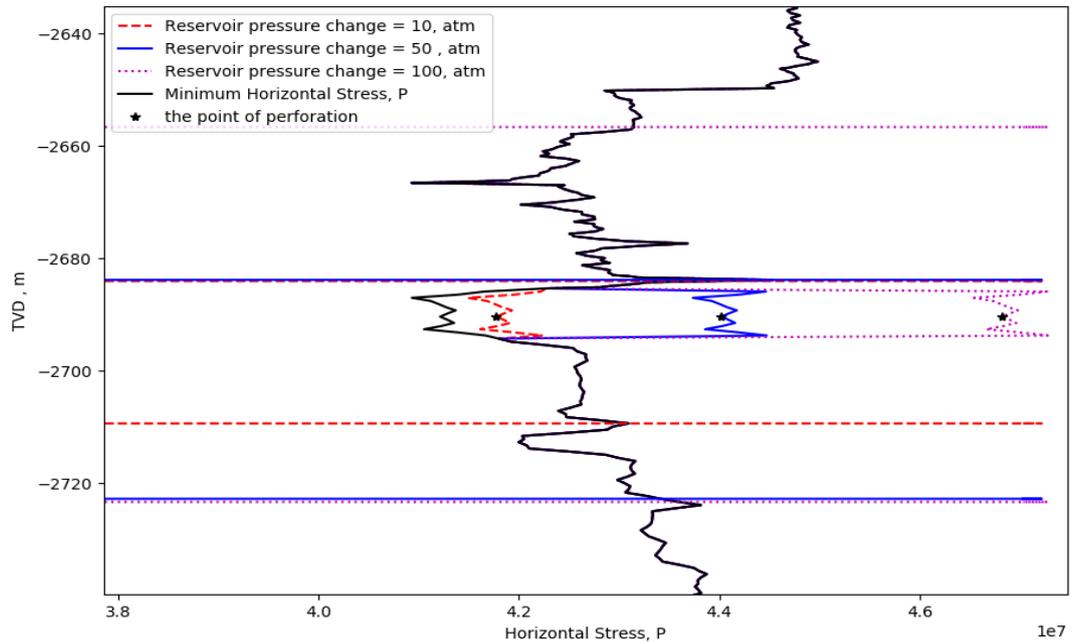


Рис.4.4 Высоты трещины автоГРП при разной обводненности пласта.

Как видно из рис.4.4., чем сильнее обводненность пласта, тем больше прорыв трещины автоГРП в высоту. В данном алгоритме можно варьировать расход, эффективное изменение пластового давления и время, но из формулы чистого давления (4.5) видно, что зависимость чистого давления в трещине слабая. Таким образом, со временем высота трещины автоГРП будет меняться в основном из-за заводнения пласта и изменения полных напряжений в нём.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследовательской работы было реализовано несколько алгоритмов по нахождению длины и высоты трещины автоГРП в нагнетательных скважинах по исходным данным, полученных из Техрежима и МЭР. Для более быстрой работы алгоритмов были написаны программы на языке Python. В работе были решены поставленные задачи:

- 1) Произведен литературный обзор на тему возможного возникновения, нахождения и моделирования трещин автоГРП.
- 2) Задача роста трещины в длину решалась с помощью предположений относительно малого расхода жидкости, не учитывалась вязкость жидкости и потери на трение, не было проникновения в соседние пласты. Ранее в литературе [13] имелась модель, которая предполагала, что сжимающие напряжения постоянно действуют на трещину, следовательно, и поток в трещине постоянен из-за неизменной разницы забойного и пластового давлений. Сравнение с реальными полевыми данными показало, что расход непостоянен ввиду эффектов пороупругости, непостоянному давлению в трещине из-за заводнение прилегающих пластов, взаимодействию трещин с окружением и возможный выход на стационарный режим трещины вблизи нагнетательных и добывающих скважин. Во второй главе при использовании предположения о квазистационарности на основе модели (2.1) была разработана модель, учитывающая непостоянный расход. По МЭР были рассчитаны длины на определенных промежутках времени. Данные расчеты сравнивались с результатами интерпретации КПД, проведенных на некоторых нагнетательных скважинах. Ошибка в достоверность модели оценивается примерно в 20%. Также данный алгоритм не сработал на 3 из 14 скважин. На этих скважинах предполагается выход трещины автоГРП на стационарный режим. Следовательно, выход на стационарный режим и взаимодействие с

окружением трещины не может быть рассмотрено в данной задаче и является ее границей применимости.

Обнаружение трещин часто происходит с помощью интерпретации исследований КВД, но это исследование плохо определяет длину трещины в условиях многопластовости. В нагнетательных скважинах во время закачки весь объем должен идти в пласт, тем самым увеличивая пластовое давление, но это происходит не всегда. Возможно несколько случаев возникновения данной проблемы.

- 3) Первый случай описанный в третьей главе, когда у нас есть несколько естественных трещин и нужно определить, как развиваются эти трещины и как между ними делится расход жидкости при постоянной разнице забойного и пластовых давлений. Данная задача решается с помощью системы уравнений: уравнение потока, модифицированное уравнение Gringarten и уравнения расхода жидкости. В результате получаем, что развитие двух естественных трещин в двух пластах будет напрямую зависеть от изначальной длины трещины. Соотношение полученных длин трещин пропорционально соотношению изначальных длин естественных трещин. А соотношение расхода будет зависеть от соотношения произведений характеристик пласта (проницаемости, толщина) и изначальной длины естественной трещины.
- 4) Второй случай описывающий прорыв трещины в высоту рассматривается в четвертой главе. На поздних стадиях закачки может начать меняться давление в трещине автоГРП и напряжения в пласте. Это может привести к изменению в разнице пластового давления и давления трещины и самопроизвольному прорыву трещины в высоту. В данной задаче была представлена модель, которая может показать изменение высоты трещины автоГРП в зависимости от обводненности пласта. Получается, чем сильнее обводненность пласта, тем больше

высота трещины автоГРП. На данную модель есть ограничения если пласт неоднороден.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байков В.А., Давлетбаев А.Я., Асмандияров Р.Н., Усманов Т.С., Степанова З.Ю. Специальные гидродинамические исследования для мониторинга за развитием трещин ГРП в нагнетательных скважинах. Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2011. №1. С. 65-75.
2. Давлетбаев А. Я., Асалхузина Г. Ф., Иващенко Д. С., Федоров А. И., Фурсов Г. А., Назаргалин Э. Р., Слабецкий А. А., Сергейчев А. В., Ямалов И. Р., Валеева Э. З. Гидродинамические методы контроля за развитием трещин автоГРП при заводнении в низкопроницаемых коллекторах. 2015. SPE-176562.
3. Давлетбаев А. Я., Байков В. А., Бикбулатова Г. Р., Асмандияров Р. Н., Назаргалин Э. Р., Слабецкий А. А., Сергейчев А. В., Нуриев Р. И. Промысловые исследования по изучению самопроизвольного развития техногенных трещин в нагнетательных скважинах. 2014. SPE-171232.
4. Давлетова А.Р., Федоров А.И., Щутский Г.А. Анализ риска самопроизвольного роста трещины гидроразрыва пласта в вертикальном направлении, Электронный научный журнал "Нефтяное хозяйство". 2019. С 50-53
5. Курочкин В.И., Санников В.А., «Теоретические основы и анализ гидродинамических исследований скважин.» 2015. 372 с. ISBN 978-5-4344-0305-4.
6. Тримонова М., Дубиня Н., Основные закономерности развития трещины автоГРП. 2015. SPE-176638-RU.
7. Хасанов М.М., Краснов В.А., Мусабилов Т.Р., Мухамедшин Р.К. Техничко-экономический анализ систем разработки, сформированных скважинами с трещинами ГРП. Нефтяное хозяйство. 2009 г. № 2. С. 92-96.
8. Carter R.D. Derivation of the general equation for estimating the extent of the fractured area, Appendix of «Optimum Fluid Characteristics for Fracture Extension», by Howard, G.C., and Fast, C.R., Drilling and Production Practice. API, 1957. 261-268 p.
9. Nordgren R.P., Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture, SPE august 1972, 306-314

10. Gringarten A. C., Ramey H. J., & Raghavan R. Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Well With a Single Infinite-Conductivity Vertical Fracture. Society of Petroleum Engineers. 1974
11. Hagoort J. Waterflood-induced hydraulic fracturing. PhD. Thesis, Delft Technical University, 1981.]
12. Hagoort J., Weatherill B.D. and Settari A. Modeling the propagation of waterflood-induced hydraulic fractures. Soc. Petroleum Eng. J. 20, (4), 1980. 293–303 pp
13. Koning E.J.L. Fractured water-injection wells. Analytical modelling of fracture propagation. SPE 14684, 1985.
14. Koning E.J.L. Poro- and thermo-elastic rock stresses around a wellbore. 1985.
15. Perkins T.K., Gonzalez, J.A. The effect of thermo-elastic stresses on injection well fracturing. SPEJ, Feb. 1985, 78-88.
16. Perkins T. K., Kern L. R. Widths of Hydraulic Fractures, SPE 89, September 1961, 937 – 949