Слайд 1.

Тема моей выпускной квалификационной работы: «Моделирование перераспределения потоков между трещинами гидроразрыва пласта».

Слайд 2.

При эксплуатации месторождения перевод добывающих скважин в нагнетание может спровоцировать рост техногенных трещин автоГРП. Если ранее на этой скважине уже был проведён многостадийный гидроразрыв пласта, то тогда часто одновременно растут несколько трещин автоГРП: по одной из каждого порта, на которых ранее был проведён гидроразыв.

Такой неконтролируемый рост нескольких трещин автоГРП может привести к существенному снижению эффективности эксплуатации месторождения, если трещина автоГРП прорвётся к добывающей скважине.

С другой стороны, при грамотно контролируемом росте трещин автоГРП можно наоборот увеличить площадь охвата заводнением и повысить эффективность эксплуатации месторождения.

Поэтому важно научиться моделировать одновременный рост нескольких трещин автоГРП.

Слайд 3.

Целью моей работы является построение модели совместного роста нескольких трещин автоГРП.

Для достижения поставленной цели проводится обзор имеющихся моделей роста трещины гидроразрыва; осуществляется выбор модели, которая наиболее подходит для моделирования роста трещин автоГРП; строится физико-математическая модель роста нескольких трещин автоГРП и численный алгоритм решения; проводится анализ результатов.

Слайд 4.

Любая полная модель трещины ГРП состоит из пяти основных компонентов: баланса объёма жидкости, уравнения течения жидкости в трещине, уравнение упругости для горной породы, условие распространения трещины и транспорт проппанта.

Для трещин автоГРП не рассматриваем транспорт проппанта (так как закачиваем просто воду) и уравнение течения жидкости (так как пренебрегаем вязкостью воды).

В качестве закона сохранения используется закон сохранения объёма, так как вводится предположение, что жидкость несжимаема.

Уравнение упругости связывает давление в трещине и раскрытие этой трещины. Обычно записывается в глобальной форме, т.е. любое локальное изменение открытия меняет давление глобально во всей трещине.

Условие распространения трещин задаётся с помощью классического результата Механики Линейно-Упругого Разрушения (LEFM). На самом деле вблизи кончика есть нелинейные процессы и даже зона пластичности. Но мы предполагаем, что эта зона мала по сравнению с размером трещины и можем использовать результаты Механики Линейно-Упругого Разрушения, т.е. напряжение $\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$ и раскрытие вблизи кончика $w = \sqrt{\frac{32}{\pi}}\frac{K_I\left(1-\nu^2\right)}{E}\sqrt{r}$, где K_I – коэффициент интенсивности напряжений. Когда раскрываем трещину, растёт коэффициент интенсивности напряжения. Когда он превышает некое значение K_{Ic} (называемое трещиностойкостью породы), трещина распространяется.

Слайд 5.

Исторически первой была получена классическая модель Христиановича для трещины ГРП. В этой модели предполагается, что высота трещины много больше её длины, у трещины прямоугольное вертикальное сечение и верно допущение плоской деформации в горизонтальной плоскости. Т.е. поведение трещины одинаково во всех горизонтальных сечениях. Таким образом, задача сводится к одномерной.

Первое уравнение – закон баланса объёма жидкости. Первое слагаемое отвечает за изменение объёма трещины вследствие изменения раскрытия, второе слагаемое – за счёт изменения расхода вдоль трещины и третье слагаемое позволяет учесть утечки из трещины в пласт по модели Картера. $t_0(x)$ – это время, за которое фронт трещины достиг координаты x. В правой части равенства источниковое слагаемое.

Второе уравнение – уравнение движения ньютоновской жидкости вдоль трещины. Получено при условии прилипания на стенках трещины.

$$\begin{gathered}
v = v_x(y); \\
\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \text{ (уравнение движения)}; \\
\tau = \mu\frac{\partial v}{\partial y} \text{ (для ньютоновской жидкости)}; \\
v|_{y=\pm w/2} = 0 \text{ (условие прилипания)} \\
\text{Общее решение: } v = \frac{\partial p}{\partial x}\frac{y^2}{2} + Ay + B. \text{ При заданном условии: } v = -\frac{\partial p}{\partial x}\frac{w^2-4y^2}{8\mu}. \\
\text{Суммарный поток: } q = \int_{-w/2}^{w/2} v(y)dy = -\frac{w^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x}.
\end{gathered} \tag{1}$$

Третье уравнение – уравнение упругости. Интегральная связь между давлением в трещине и раскрытием. Локальное раскрытие влияет глобально на давление во всей трещине. σ_0 – сжимающие напряжения, действующие на трещину снаружи (со стороны породы).

Четвёртое уравнение – условие распространения. Условие в виде предела на кончике. На основе результатов Механики Линейно-Упругого разрушения (LEFM) корневая зависимость раскрытия от расстояния на кончике.

Данная модель не может быть применена для моделирования роста трещин автоГРП, так как длина трещин автоГРП обычно больше высоты, а в основном предположении модели Христиановича наоборот длина много меньше высоты.

Слайд 6.

В модели радиальной трещины уравнения похожи на уравнения модели Христиановича. Основное отличие в том, что теперь рассматривается другая геометрия в цилиндрической системе координат. В данном случае геометрия осесимметричная. Такого рода геометрии могут быть при закачке жидкости из точечного перфорационного интервала и при неограниченном по всем направлениям однородном пласте.

В реальности же высота пласта ограничена, поэтому модель с такой осесимметричной геометрией не применима для трещин автоГРП, у которых длина трещины много больше высоты.

На слайде в уравнениях полные эллиптические интегралы первого и второго рода:

$$K(m) = \int\limits_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - m^2 \sin^2\varphi}} \text{ и } E(m) = \int\limits_0^{\pi/2} \sqrt{1 - m^2 \sin^2\varphi}\, d\varphi \text{ соответственно.}$$

Слайд 7.

В следующей модели, называемой моделью Перкинса-Керна-Нордгрена (или моделью трещины постоянной высоты), вводятся два основных предположения: первое предположение – то, что длина трещины много больше фиксированной высоты H; второе предположение – то, что в любом вертикальном сечении давление постоянно.

Из постоянства давления в вертикальном сечении следует эллиптичность профиля трещины, что позволяет перейти от двумерной системы уравнений к одномерной, которая представлена на слайде. Этот переход осуществляется как бы аналитическим решением вдоль направления оси Oz путём усреденения. В представленных на слайде уравнениях раскрытие w и поток q усреденены по высоте трещины. Оператор усреденения представлен в рамке на примере раскрытия.

В данной работе в качестве базовой выбрана модель Перкинса-Керна-Нордгрена для моделирования роста трещин автоГРП, так как основные предположения этой модели соответствуют поведению трещин автоГРП (длина трещины много больше постоянной высоты H).

Также модель может быть расширена до так называемой улучшенной модели Перкинса-Керна-Нордгрена, когда трещина не ограничена границами пласта, а может распространяться в близлежащие слои породы. Дополнительно есть расширения модели PKN, которые учитывают степенные жидкости, жидкости Гершеля-Балкли, жидкости Карро, эффект отставания фронта жидкости от фронта трещины, эффект турбулентного течения, эффект утечки зависящей от давления и т.д.

В данной работе буду использовать модель PKN без дополнительных расширений.

Слайд 8.

В работе Егора Владимировича Донцова, название которой представлены на слайде

Слайд 9.

Слайд 10.

Для моделирования перераспределения потоков между трещинами автоГРП я использую законы Кирхгофа, в которых учитывается падение давления на трение и падение давления на перфорациях.

Слайд 11.

Слайд 12.

Слайд 13.

Слайд 14.

Слайд 15.

По вектору невязок и вектору расходов составляется матрица Якоби. И итеративная процедура решения с помощью метода Ньютона.

В качестве начального приближения закачиваемый расход перераспределяется по трещинам одинаково, а забойное давление равно сжимающему напряжению, действующему на трещину со стороны породы. Условие остановки представлено на слайде.

Слайд 16.

Слайд 17.

Слайд 18.

Слайд 19.

Слайд 20.

Слайд 21.