

Общая информация.

Видеолекции курса доступны по ссылке: [GO TO HYDRAULIC FRACTURING](#).

Решение для радиальной трещины ГРП: [GO TO CLOSED-FORM SOLUTION IN MATLAB](#).

Оригинальная лекция Энтони Пирса: [GO TO LECTURE RECORDING](#).

Содержание

1 Лекция 16.02.2021 (Донцов Е.В.)	4
1.1 Из чего состоит любая модель ГРП? Основные компоненты	5
1.1.1 Модель утечки по Картеру	6
1.1.2 Течение жидкости в трещине ГРП	9
1.1.3 Равновесие (упругость) горной породы. Уравнение упругости	10
2 Лекция 02.03.2021 (Донцов Е.В.)	12
2.1 Из чего состоит любая модель ГРП? Продолжение	12
2.1.1 Равновесие (упругость) горной породы. Уравнение упругости	12
2.1.2 Условие распространения трещины ГРП	14
2.2 Модель плоской трещины ГРП (= модель Христиановича-Желтова-Гиртсма-де Клерка = KGD модель)	16
2.3 Возможные геометрии (модели) трещины ГРП. Краткий обзор	17
2.3.1 Полубесконечная трещина (semi-infinite модель) и плоская трещина (KGD модель)	17
2.3.2 Модель Перкинса-Керна-Нордгрена (PKN модель)	17
2.3.3 Модель радиальной трещины ГРП, псевдо-3D модель и модель планар-3D	18
2.3.4 Multi-fracture и multi-well модели	18
2.3.5 Более сложные модели	19
2.4 Промежуточная систематизация материала лекций	19
2.5 Математическая модель плоской трещины ГРП	20
2.6 Математическая модель полубесконечной трещины ГРП	21
3 Лекция 09.03.2021 (Донцов Е.В.)	24
3.1 Математическая модель полубесконечной трещины ГРП. Продолжение	24
3.2 Математическая модель плоской трещины ГРП. Продолжение	28
4 Лекция 16.03.2021 (Донцов Е.В.)	34
4.1 Математическая модель радиальной трещины ГРП	34
4.2 Математическая модель Перкинса-Керна-Нордгрена (модель PKN)	38
5 Лекция 23.03.2021 (Донцов Е.В.)	46
5.1 Математическая модель EP3D (Enhanced pseudo-3D model)	46
5.2 Краткое повторение рассмотренных моделей	50

6 Лекция 02.04.2021 (Валов А.В.)	53
6.1 Модель Planar3D ILSA	53
6.1.1 Предположения модели	53
6.1.2 Вспомогательные обозначения	53
6.1.3 Основные уравнения	53
6.1.4 Граничные условия	54
6.1.5 Дискретизация области моделирования. Классификация элементов	57
6.1.6 Дискретизация уравнений	58
7 Лекция 08.04.2021 (Валов А.В.)	60
7.1 Модель Planar3D ILSA: дискретизация, поиск фронта, алгоритм	60
7.1.1 Дискретизация уравнений. Продолжение	60
7.1.2 Зачем вводили классификацию элементов?	62
8 Лекция 13.04.2021 (Байкин А.Н.)	64
8.1 Модель Planar3D Biot: постановка задачи, перенос граничных условий	64
9 Лекция 20.04.2021 (Байкин А.Н.)	65
9.1 Модель Planar3D Biot: слабая постановка, штраф, пороупругие эффекты	65
10 Лекция 27.04.2021 (Байкин А.Н.)	66
10.1 Перенос проппанта: постановка задачи, обезразмеривание, оседание	66
11 Лекция 30.04.2021 (Байкин А.Н.)	67
11.1 Перенос проппанта: осреднение, численный алгоритм, бриджинг	67
12 Лекция 11.05.2021 (Байкин А.Н.)	68
12.1 Моделирование течения жидкости в скважине	68
12.1.1 Зачем моделировать скважину?	68
12.1.2 Предположения модели	70
12.1.3 Определяющие уравнения	71
12.1.4 Численный алгоритм	72
12.1.5 Вычисление средней скорости	76
12.1.6 Средняя скорость для степенной жидкости	77
12.1.7 Коэффициент трения Фаннинга для ламинарного и турбулентного течений	78
12.1.8 Расчёт давления	82
12.2 Разделение потоков между трещинами	85
12.2.1 Два закона Кирхгофа	87
12.2.2 Давление на i -ой трещине	88
12.2.3 Падение давления на перфорациях	90
12.2.4 Падение гидростатического давления	91
12.2.5 Падение давления на трение	91
12.2.6 Векторная форма	92
12.2.7 Итеративная процедура решения	93

12.2.8	Начальные приближения метода Ньютона	93
12.2.9	Эффекты, связанные с распределением потоков	94
12.3	Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине	96
12.3.1	Введение	96
12.3.2	Математическая модель: законы сохранения	98
12.3.3	Математическая модель: граничные условия	99
12.3.4	Примеры расчётов	102
12.3.5	Заключение	106
12.3.6	Список источников	107
13	Лекция 18.05.2021 (Байкин А.Н.)	108
13.1	Модели инициации трещины гидроразрыва	108
13.1.1	Моделирование гидроразрыва	108
13.1.2	Инициация трещины	109
13.1.3	Расчёт напряжённо-деформированного состояния	110
13.1.4	Численные решения уравнений упругого равновесия	111
13.1.5	Приближённые решения (2D)	112
13.1.6	Приближённые решения (3D)	115
13.1.7	НДС для перфорированной скважины	117
13.1.8	Примеры для перфорированной скважины	118
13.1.9	Дополнительные эффекты	119
13.1.10	Серийные численные расчёты	121
13.1.11	Критерии инициации трещины	124
13.1.12	Учёт эффекта размера	126
14	Условие задачи	129
14.1	Законы Кирхгофа для перераспределения потоков между трещинами	129
14.2	Формула для давления $p_{net,i}$ на i -ой трещине	129
14.3	Формула для падения давления $\Delta p_{perf,i}$ на перфорациях	130
14.4	Формула для гидростатического давления $\Delta p_{h,i}$	130
14.5	Формула для падения давления $\Delta p_{fric,i}$ на трение	130
14.6	Итеративная процедура решения с помощью метода Ньютона	130

Гидроразрыв пласта

Конспект лекций и семинаров

Муравцев А.А.¹ Донцов Е.В.² Валов А.В.³ Байкин А.Н⁴

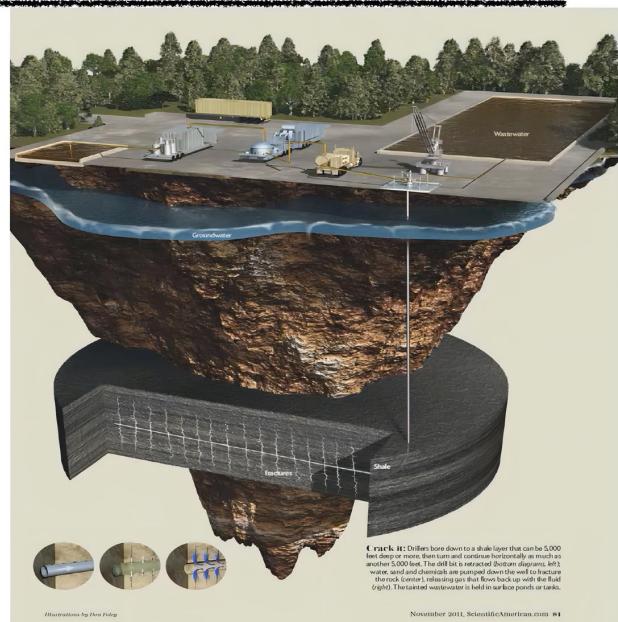
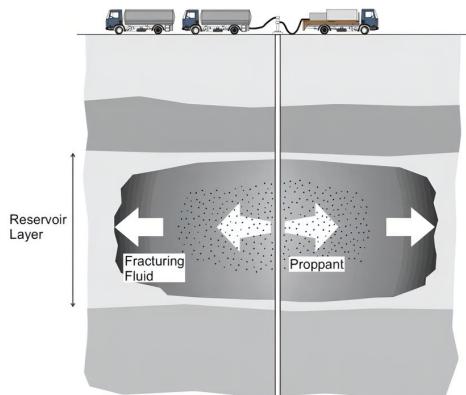
20 февраля 2023 г.

1 Лекция 16.02.2021 (Донцов Е.В.)

План на сегодня: рассказать про основные компоненты моделирования ГРП (HF = hydraulic fracturing), про основные используемые уравнения и основные геометрии.

Hydraulic fracturing (HF)

- ▶ Essential components of HF modeling
- ▶ Governing equations
- ▶ Basic HF model geometries



В двух словах разница между conventional и unconventional:

- 1) conventional – то, что было, грубо говоря, до 2000-х годов – вертикальная скважина, пласт, рвём гидроразрывом пласта, обычно одна трещина;
- 2) unconventional – когда сланцы, например, то бурится горизонтальная скважина, проводится многостадийный ГРП (за одну стадию можем сделать несколько трещин (несколько портов),

¹конспектирует; email: almuravcev@yandex.ru

²W.D. Von Gonten Laboratories, Houston, USA

³Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН

⁴Новосибирский государственный университет, Россия

затем поставить перегородку, сделать ещё несколько трещин (портов) и так далее); можем также сделать несколько скважин.

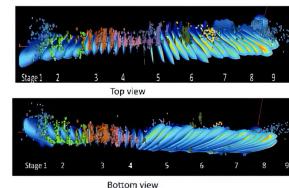
Концептуально с точки зрения математики разницы между conventional и unconventional практически нет. У нас либо одна трещина (conventional) или множество трещин (unconventional), т.е. с точки зрения моделирования unconventional моделировать дольше, сложнее. Но повторюсь, что концептуально основная физика везде одинакова.

1.1 Из чего состоит любая модель ГРП? Основные компоненты

Essential pieces of a hydraulic fracture model

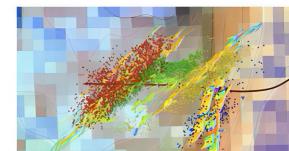
1. Volume balance of the injected fluid (incompressible):

$$\text{Volume injected} = \text{Fracture volume} + \text{leak-off}$$



2. Fluid flow equations:

Viscous pressure drop inside the fracture

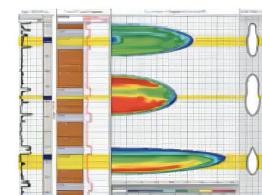


3. Rock equilibrium (elasticity):

$$\text{Fluid pressure} = \text{Stress} + \text{Stiffness} * \text{FracWidth}$$

4. Propagation condition:

Some parameter reaches a critical value near the front



5. Proppant transport (not covered):

Particles flow with fluid + gravitational settling

Основные компоненты любой модели гидроразрыва пласта:

- 1) закон сохранения жидкости; в 99% случаев предполагается, что жидкость несжимаема, тогда выполняется закон сохранения объёма; но бывают случаи сжимаемых жидкостей (например, когда ГРП делают газом или делают пенный ГРП), тогда выполняется закон сохранения массы, т.е. закачиваемый объём жидкости равен объёму жидкости в трещине плюс утечки (трещину ГРП делаем в пористом резервуаре, поэтому есть утечки из трещины в резервуар – в зависимости от пористости и других параметров утечки могут либо доминировать, либо нет: например, 90% закачиваемой жидкости может утекать в пласт или наоборот оставаться в трещине);
- 2) уравнение течения жидкости в трещине; допустим мы уже создали трещину в резервуаре (обычно она очень узкая и длинная: например, 1 сантиметр в ширину и порядка сотни метров в длину) и закачиваем в неё жидкость (которая часто бывает довольно вязкой), тогда у нас может быть существенное падение давления от скважины до кончика трещины (так как грубо говоря, всю эту жидкость нужно пропихнуть по всей трещине); необходимы уравнения течения жидкости в зависимости от реологии жидкости;
- 3) равновесие (упругость) горной породы; когда мы открываем трещину в упругом материале, то мы предполагаем, что порода линейно упругая (по крайней мере в первом приближении); чтобы открыть трещину (т.е. просто открыть (как надуть шарик), а не распространить), нам

необходимо приложить какое-то давление на стенки трещины (это давление и есть давление жидкости внутри трещины); у нас получается некое распределение давления внутри трещины, и оно как-то неравномерно открывает эту трещину; чем сильнее мы хотим открыть трещину, тем больше должно быть давление жидкости внутри;

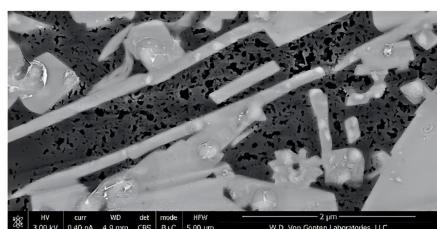
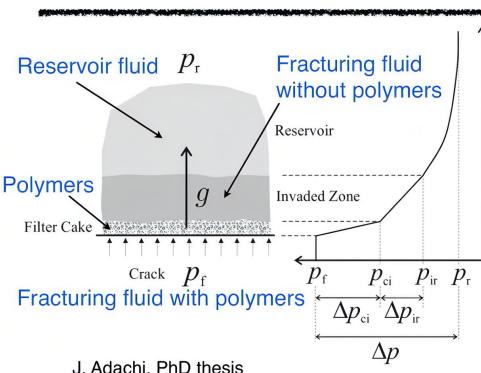
концептуальное уравнение: Fluid Pressure = Stress + Stiffness * FracWidth – давление жидкости должно превысить напряжение в породе + жёсткость трещины (которая напрямую зависит от модуля Юнга породы), умноженную на среднее открытие трещины; но большую часть составляет именно напряжение в породе, а дополнительное слагаемое с жёсткостью обычно много меньше (но тем не менее очень важно для моделирования);

4) условие распространения трещины; грубо говоря, продолжая аналогию с шариком – это критерий, при котором шарик лопнет; при достижении критического значения некого параметра около кончика трещины начнётся распространение трещины;

5) транспорт проппанта; это тоже очень важный компонент физики модели ГРП; высокопроводимый проппант нужен для того, чтобы при смыкании трещины ГРП остались проводимые каналы; с точки зрения моделирования внутри жидкости течёт суспензия; обычно частицы проппанта (часто используется песок или керамический проппант с примерной плотностью 2.65 г/см³) тяжелее жидкости (у воды плотность приблизительно 1 г/см³), поэтому интересно моделировать процесс оседания проппанта.

1.1.1 Модель утечки по Картеру

Carter's leak-off model



Flow through filter cake:

$$g_c = \alpha \frac{dh_c}{dt}$$

this equation says that the growth rate of the filter cake is linearly proportional to the amount of fluid leaked from the fracture (the constant of proportionality is related to the content of polymers)

$$g_c = \frac{\kappa_c}{\mu} \frac{\Delta p_{ci}}{h_c}$$

this is Darcy's law (quasi-static flow)

$$\text{Solution: } g_c = \frac{C_c}{\sqrt{t}}$$

$$C_c = \sqrt{\frac{\alpha \kappa_c \Delta p_{ci}}{2 \mu_b}}$$

Flow through invaded zone:

$$g_i = \frac{\kappa}{\mu_{\text{filt}}} \frac{\Delta p_{ir}}{h_i}$$

this is Darcy's law (quasi-static flow)

$$g_i = \phi \frac{dh_i}{dt}$$

this is volume balance that states that the volume of fluid leaked into the formation determines the size of the invasion zone

$$\text{Solution: } g_i = \frac{C_i}{\sqrt{t}}$$

$$C_i = \sqrt{\frac{\phi \kappa_r \Delta p_{ir}}{2 \mu_b}}$$

Давайте рассмотрим модель утечки по Картеру. Эта модель является доисторической для рассматриваемой области (для моделирования ГРП), её развил Картер ещё в 1956-1957 годах (тогда ещё только зарождался ГРП). Первый коммерческий ГРП был сделан примерно в 1950-х годах. Но тем не менее модель Картера и сейчас очень часто (почти повсеместно) используется при моделировании ГРП, потому что она очень простая и очень много физики в себе несёт.

В левом верхнем углу на слайде изображен рисунок (из PhD диссертации J. Adachi), на котором

изображена область вблизи трещины. Обычно жидкость ГРП состоит из основной жидкости (base fluid) и полимеров (их добавляют, чтобы химия или реология совпадала с той, которая нужна для дизайна ГРП, например, для нужной длины трещины или нужного транспорта проппанта и так далее). Идея в том, что есть жидкость с полимерами. Когда эта жидкость начинает фильтроваться в породу, то происходит следующее: в классической модели считаем, что полимеры большие, длинные и с трудом залезают в поровое пространство, т.е. полимеры в основном осаждаются на стенке трещины. В итоге, образуется Filter Cake, который состоит из полимеров, добавляемых в жидкость ГРП.

Далее идёт Invaded Zone, в которой жидкость ГРП без полимеров затекает в породу и вымешивает жидкость резервуара.

Далее идёт сам резервуар, в котором давление поднялось (так как мы вытеснили часть жидкости из Invaded Zone в резервуар).

Таким образом, концептуально график зависимости давления от вертикальной координаты y выглядит следующим образом: на стенке трещины давление равно давлению жидкости, на бесконечности – давление резервуара; давление жидкости больше, чем давление резервуара (иначе не смогли бы сгенерировать трещину ГРП); есть падение давления на корке Filter Cake (предполагается, что оно линейное); есть падение давления в Invaded Zone (тоже предполагается, что оно линейное); и дальше есть падение давления в резервуаре.

Итак, есть три характерных падения давления. Может быть так, что какое-то из них много меньше, чем другое; какое-то давление доминирует; может быть отсутствие Filter Cake (если в жидкости ГРП нет полимеров). Но мы рассмотрим более общий случай и пройдёмся по уравнениям. На слайде в левом нижнем углу представлена картина пористости сланца, полученная с помощью электронного микроскопа (маленькие поры, различные минералы и видно, что через эти поры жидкость утекает).

Первым делом рассмотрим течение через корку Filter Cake.

Первое уравнение

$$g_c = \alpha \frac{dh_c}{dt} \quad (1.1)$$

говорит нам о том, что скорость роста корки Filter Cake линейно пропорциональна количеству жидкости, утекающему из трещины за единицу времени (или другими словами, линейно пропорциональна скорости утечки), а константа пропорциональности определяется экспериментально. По сути α связана с концентрацией полимеров.

Второе уравнение

$$g_c = \frac{\kappa_c}{\mu} \frac{\Delta p_{ci}}{h_c} \quad (1.2)$$

это закон Дарси для течения жидкости через корку Filter Cake (полагаем, что падение давления на корке связано со скоростью утечек по линейному закону Дарси).

Приравнивая уравнения (1.1) и (1.2) и решая полученное обыкновенное дифференциальное уравнение, получаем

$$g_c = \frac{C_c}{\sqrt{t}} \quad C_c = \sqrt{\frac{\alpha \kappa_c \Delta p_{ci}}{2\mu}} \quad (1.3)$$

т.е. скорость утечек обратно пропорциональна \sqrt{t} .

Далее рассмотрим следующую зону Invaded Zone.

Опять же предполагаем, что распределение давления линейное (довольно тонкая зона Invaded Zone) и выполняется линейный закон Дарси

$$g_i = \frac{\kappa_r}{\mu} \frac{\Delta p_{ir}}{h_i} \quad (1.4)$$

В качестве второго уравнения возьмём закон сохранения объёма

$$g_i = \varphi \frac{dh_i}{dt} \quad (1.5)$$

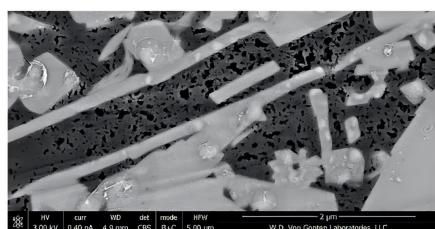
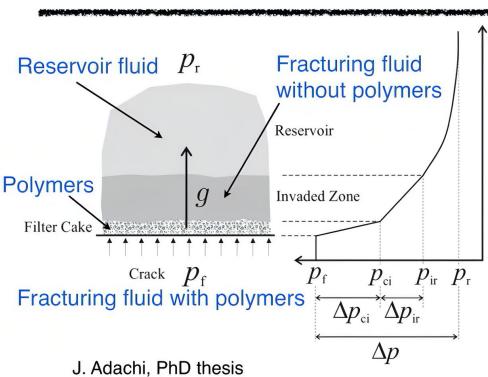
(т.е. объём жидкости, утекающей из корки Filter Cake, определяет размер зоны Invaded Zone)

Приравнивая уравнения (1.4) и (1.5) и решая полученное обыкновенное дифференциальное уравнение, получаем

$$g_i = \frac{C_i}{\sqrt{t}} \quad C_i = \sqrt{\frac{\varphi \kappa_r \Delta p_{ir}}{2\mu}} \quad (1.6)$$

(подобно корке Filter Cake в Invaded Zone скорость утечек обратно пропорциональна \sqrt{t}).

Carter's leak-off model



Flow in reservoir:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \quad \text{1D diffusion equation (volume balance + Darcy)} \\ p|_{t=0} = p_r \quad \text{initial condition} \quad D = \frac{\kappa_r}{\mu_r c_t \phi} \quad \text{diffusion coefficient} \\ p|_{y=0} = p_{ir} \quad \text{boundary condition}$$

To solve this equation, introduce new variable:

$$\xi = \frac{y}{\sqrt{4Dt}} \implies -\frac{y}{2t\sqrt{4Dt}} p' = \frac{D}{4Dt} p'' \implies -2\xi p' = p''$$

Solution of the above differential equation is:

$$p = p_r + (p_{ir} - p_r) \operatorname{erfc}(\xi) \quad \operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

The leak-off flux is then (from Darcy):

$$g_r = -\frac{k_r \partial p}{\mu_r \partial y}|_{y=0} = \frac{C_r}{\sqrt{t}} \quad C_r = \sqrt{\frac{k_r c_t \phi}{\pi \mu_r}} (p_{ir} - p_r)$$

I

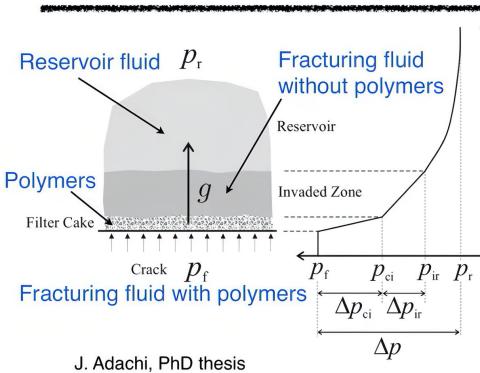
Последний аспект физики здесь – это поведение жидкости в резервуаре. Одно из главных предположений модели Картера: предполагаем, что диффузия одномерная и перпендикулярная стенке трещины (т.е. рассматриваем изменение давления только по оси y). Но на самом деле это не совсем так: если вы представите себе кончик трещины, то у него будет некая двумерная диффузия (или даже трёхмерная диффузия) вокруг кончика.

При каких условиях мы можем использовать предположение одномерности модели Картера? Тогда, когда характерное расстояние, на котором осуществляется падение давления много меньше, чем длина трещины. Вблизи кончика модель может не выполняться, но в где-то в середине

трещины модель вполне себе применима.

Итак, рассматриваем одномерную модель, т.е. решаем уравнение одномерной диффузии, перпендикулярной стенке трещины. Уравнение диффузии (диффузия в пороупругом материале) – это опять таки закон Дарси плюс закон сохранения объёма.

Carter's leak-off model



Combined result if all the mechanisms are present:

$$g = \frac{C_l}{\sqrt{t}}, \quad C_l = \frac{2\bar{C}_c\bar{C}_i\bar{C}_r}{\bar{C}_c\bar{C}_i + \sqrt{\bar{C}_c^2\bar{C}_i^2 + 4C_r^2(\bar{C}_c^2 + \bar{C}_i^2)}},$$

In the above result, the individual leak-off coefficients are computed by using the total pressure drop, i.e.

$$\bar{C}_c = \sqrt{\frac{\alpha\kappa_c\Delta p}{2\mu_b}}, \quad \bar{C}_i = \sqrt{\frac{\phi\kappa_i\Delta p}{2\mu_b}}, \quad \bar{C}_r = \sqrt{\frac{\kappa_r c_t \phi}{\pi\mu_r} \Delta p}.$$

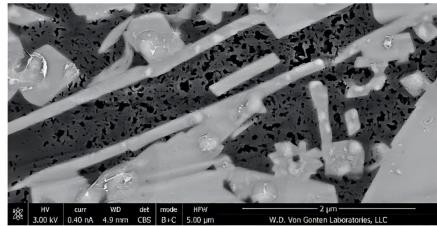
Recall the main assumptions of the model:

1D diffusion, i.e. the diffusion length scale should be much smaller than the fracture size

The net pressure is often neglected, whereby $\Delta p = \sigma_0 - p_r$

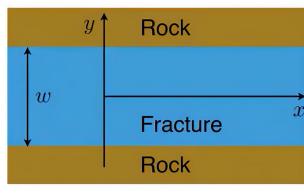
It is implicitly assumed that one type of fracturing fluid is used

More reading: Economides&Nolte 2000, section 6-4.



1.1.2 Течение жидкости в трещине ГРП

Fluid flow



$$v = v_x(y)$$

given the geometry, we have only one component of the velocity vector that varies only across the channel

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

this comes from Navier-Stokes equations or equilibrium equations

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

this states that the rheology is Newtonian

$$\text{Herschel-Bulkley } \tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$$

$v|_{y=\pm w/2} = 0$ this is no-slip boundary condition at the fracture walls

$$\text{Power-law } \tau = k\dot{\gamma}^n$$

General solution:

Actual solution:

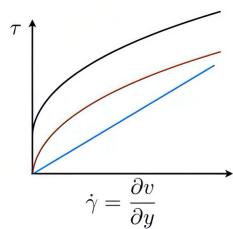
$$v = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{y^2}{2} + Ay + B$$

$$v = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{w^2 - 4y^2}{8\mu}$$

$$\text{Total flux is: } q = \int_{-w/2}^{w/2} v(y) dy = -\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\text{HB fluid: } q_{\text{HB}} = -\frac{w^{2+1/n}}{M'^{1/n}} \frac{\partial p}{\partial x} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{1/n-1} \left(1 - \frac{2\tau_0}{w} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{-1} \right)^{1+1/n} \left(1 + \frac{2\tau_0}{w} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{-1} \frac{n}{n+1} \right)$$

$$M' = \frac{2^{n+1}(2n+1)^n}{n^n} k,$$

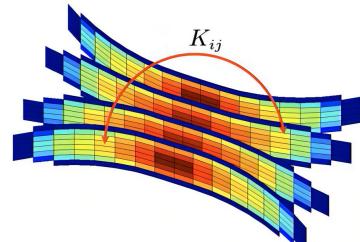


Каждая модель ГРП должна включать в себя течение жидкости. Обычно рассматривается следующая проблема. Допустим мы открыли трещину, есть некое открытие трещины w и течение вдоль оси x (допустим, что она одномерное). Открытие трещины обычно измеряется в миллиметрах, а длина трещины обычно составляет десятки или сотни метров. Т.е. получается очень

узкая трещина и именно поэтому мы предполагаем, что в каждой точке трещины течение стационарно. Т.е. необходимо решить стационарное уравнение Навье-Стокса.

1.1.3 Равновесие (упругость) горной породы. Уравнение упругости

Elasticity



Elasticity equation ensures that rock surrounding open fracture(s) is in equilibrium.

Every open element induces a stress change (all components) in the whole space.

The interaction coefficient (induced stress divided by aperture) depends on the elastic properties and the distance from the element and generally decays quickly $\sim 1/r^3$ for 3D geometry.

For a plane strain fracture, the elasticity equation reads:

$$p = \sigma_0 - \frac{E'}{4\pi} \int_{-l}^l \frac{w(s) ds}{(x-s)^2} \quad E' = \frac{E}{1-\nu^2}$$

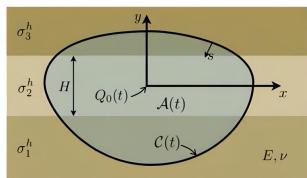
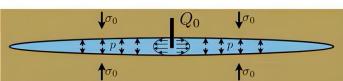
1

For a planar fracture, the elasticity equation reads:

$$p(x, y, t) = \sigma^h(y) - \frac{E'}{8\pi} \int_{\mathcal{A}(t)} \frac{w(x', y', t) dx' dy'}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2]^{3/2}},$$

For general expressions in 3D, see Crouch and Starfield, 1983

For expressions in layered materials, see Peirce and Siebrits, 2000



Уравнение упругости. Почему это сложно? Потому что мы решаем уравнение упругости вокруг всей трещины. Т.е. мы решаем уравнение упругости в 3D (или как минимум в 2D) вокруг трещины. До этого у нас всё было одномерное: одномерные утечки Картера, одномерное течение жидкости в трещине. А всё что одномерное, то просто. Здесь же упругость как минимум двухмерная (а в большинстве случаев трёхмерная). А в большинстве случаев решать трёхмерные задачи (особенно аналитически) не сильно весело, но можно.

В двух словах: пусть у нас есть несколько трещин (может быть одна трещина) и есть некоторое количество численных элементов, в которых трещина открыта. Если приоткроем один из элементов ещё больше, то изменим поле напряжений везде в материале. Т.е. у нас есть коэффициенты взаимодействия: как открытие любого из рассматриваемых элементов влияет на сжимающие напряжения в каждом другом элементе.

Аналогия с шариками: есть несколько тесно соединённых друг с другом шариков; мы надуваем один из шариков и в это же время все остальные сжимаются.

Т.е. суть уравнения упругости – это посчитать коэффициенты взаимодействия (коэффициенты влияния) между элементами. Ясно, что эти взаимодействия угасают с расстоянием, но тем не менее формально каждый элемент меняет поле напряжений во всём трёхмерном пространстве. Обычно уравнение упругости относительно сложное (нелокальное) и оно обычно относительно медленно считается (в некоторых случаях по крайней мере).

Но я покажу вывод для плоской трещины (plain strain) – предполагаем, что у нас двухмерная модель с некоторым открытием трещины. Есть некое давление распределённое по оси x . Есть сжимающие напряжения. Мы выведем связь между распределением давления вдоль оси x , сжимающими напряжениями снаружи σ_0 и формой открытия трещины $w(x)$. Нелокальная связь в

том, что давление в точке зависит от интеграла открытия по всей трещине. Т.е. изменение давления в произвольной ячейке приведёт к изменению давления по всей трещине. Важная особенность в том, что интеграл в формуле гиперсингулярный и его нужно понимать в смысле главного значения.

Для планарной трещины аналогично.

2 Лекция 02.03.2021 (Донцов Е.В.)

2.1 Из чего состоит любая модель ГРП? Продолжение

Давайте вспомним предыдущую лекцию.

В модели ГРП есть **несколько основных концепций**, несколько основных физических процессов, которые необходимо описать и которые любой симулятор ГРП описывает (не важны тип геометрии, количество трещин, способ решения явный/неявный – главное: учесть правильную физику/механику).

Первое: закон сохранения жидкости. Предполагается, что она несжимаемая: закачиваем некий объём жидкости в скважину, часть этого объёма генерирует трещину и плюс часть жидкости утекает в виде утечек

Второе: градиент давления внутри трещины, который образуется из-за вязкого течения жидкости.

Третье: уравнение упругости. Мы деформируем породу вокруг трещины; считаем породу линейно-упругим материалом; после деформаций должно выполняться условие равновесия.

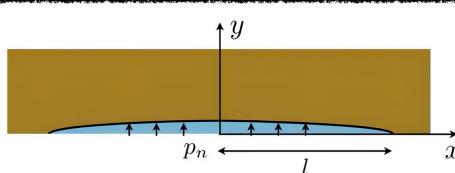
Четвёртое: критерий распространения. Аналогия с шариком: уравнение упругости показывает соотношение давления в шарике с его объёмом, а критерий распространения – это условие при котором шарик лопнет. То же самое с трещиной: упругость даёт нам соотношение между давлением жидкости внутри и открытием трещины, а критерий распространения позволяет найти условие, при котором трещина будет распространяться.

Пятое: транспорт проппанта.

В прошлый раз мы подробно остановились на модели утечек Картера и на уравнениях течения жидкости в трещине. Сейчас продолжим говорить про упругость и критерии распространения.

2.1.1 Равновесие (упругость) горной породы. Уравнение упругости

Derivation of elasticity equation (plane strain)



Hooke's law

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 2\mu\epsilon_{xx} + \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}), \\ \sigma_{yy} &= 2\mu\epsilon_{yy} + \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}), \\ \sigma_{xy} &= 2\mu\epsilon_{xy}\end{aligned}$$

Equilibrium equations

$$\begin{aligned}\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial x} &= 0\end{aligned}$$

Normal stress continuity

$$\sigma_{yy}|_{y=0} = -p_n = -(p - \sigma_0)$$

Boundary conditions

$$u_y|_{y=0} = \frac{w}{2} \quad \sigma_{xy}|_{y=0} = 0$$

Need to solve for

$$\sigma_{yy}|_{y=0} - ?$$

Governing equations in terms of displacements

$$\begin{aligned}(2\mu + \lambda)\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + (\lambda + \mu)\frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \mu\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} &= 0, \\ (2\mu + \lambda)\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + (\lambda + \mu)\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + \mu\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} &= 0\end{aligned}$$

Apply Fourier transform

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(g) &= \hat{g}(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{-ikx} dx, \\ \mathcal{F}\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right) &= ik\mathcal{F}(g), \quad \mathcal{F}\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}\right) = -k^2\mathcal{F}(g),\end{aligned}$$

System of ODEs

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{u}_x}{\partial y} &= \hat{d}_x, \\ \frac{\partial \hat{u}_y}{\partial y} &= \hat{d}_y,\end{aligned}$$

$$\boxed{\mathbf{Y}' = \mathbf{A}\mathbf{Y}}$$

$$\frac{\partial \hat{d}_x}{\partial y} = \frac{2\mu + \lambda}{\mu} k^2 \hat{u}_x - \frac{\lambda + \mu}{\mu} ik\hat{d}_x + \frac{\mu}{2\mu + \lambda} k^2 \hat{u}_y,$$

$$\frac{\partial \hat{d}_y}{\partial y} = -\frac{\mu + \lambda}{2\mu + \lambda} ik\hat{d}_x + \frac{\mu}{2\mu + \lambda} k^2 \hat{d}_x + \frac{\mu}{2\mu + \lambda} k^2 \hat{u}_y,$$

Упругость: порода вокруг трещины должна быть в равновесии в зависимости от того, какое у трещины открытие или сдвиговое смещение в каждом элементе трещины.

В чём сложность расчёта теории упругости? В том, что этот процесс очень нелокальный. Например, если у нас есть несколько трещин, несколько элементов (множество элементов в каждой трещине), то изменение открытия в каждом элементе влечёт за собой изменение поля напряжений во всём пространстве. Т.е. если мы немного изменим степень открытости одного из элементов, то у нас будет влияние на все элементы. С практической точки зрения коэффициент взаимодействия уменьшается довольно быстро с расстоянием ($\sim 1/r^3$ для трёхмерной геометрии). Т.е. с точки зрения практики можем задать некий радиус, после которого будем обрезать взаимодействия. Но тем не менее всё равно взаимодействие будет нелокальным. В этом сложность упругости.

Для плоской трещины у нас есть довольно простое выражение.

Если рассматриваем плоскую трещину и двухмерную задачу, то давление в трещине равно сжимающему напряжению на бесконечности и плюс дополнительный интеграл от открытия трещины (как функции координаты) с сингулярным ядром.

Т.е. открытие в любой точке трещины влияет на давление по всей трещине.

Для планарной трещины есть более сложное выражение, которое выводится абсолютно аналогично выражению для плоской трещины.

Далее выведем выражение для плоской трещины; для планарной – вывод такой же.

Я буду давать относительно простые примеры и относительно простые геометрии, но все рассматриваемые задачи решены и для сложных геометрий, и для полностью трёхмерных геометрий.

Вы можете найти все эти коэффициенты взаимодействия между элементами (интегральные ядра) для полностью трёхмерной задачи.

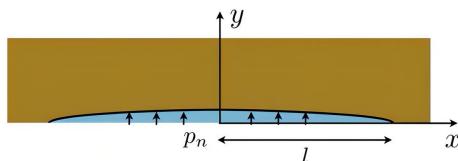
Всё, что я Вам покажу, верно для однородного по упругим свойствам материала. Но в реальности могут быть геологические слои и модули упругости Юнга и коэффициенты Пуассона могут меняться от слоя к слою.

Если Вам не страшна жёсткая математика и Вы хотите посчитать коэффициенты взаимодействия между элементами в слоистой среде, то можете посмотреть статью Pierce и Siebrits.

Но нам в рамках курса важна общая концепция: откуда берутся выражения и что описывают с точки зрения физики/механики.

Давайте выведем уравнение упругости. Что такое уравнение упругости? Это условие того, что порода вблизи трещины находится в равновесии. Мы рассматриваем плоскую трещину и вследствие симметрии рассматриваем половину задачи (только верхнюю часть трещины, например).

Derivation of elasticity equation (plane strain)



$$\mathbf{Y}' = \mathbf{A} \mathbf{Y}$$

Eigenvalues of A : $k, k, -k, -k$.

Solution (resonance)

$$\mathbf{Y} = c_1 \mathbf{v}_1 e^{-|k|y} + c_2 (\mathbf{v}_1 y + \mathbf{v}_2) e^{-|k|y}$$

Boundary conditions

$$\hat{\sigma}_{xy}|_{y=0} = 0, \\ \hat{u}_y|_{y=0} = \hat{w}(k)/2,$$

$$p = \sigma_0 - \frac{E'}{4\pi} \int_{-l}^l \frac{w(s) ds}{(x-s)^2}$$

Solution in frequency domain

$$\hat{p}_n = \frac{\hat{w}|k|}{4} E' = \frac{i k \hat{w} E'}{4} \frac{|k|}{ik} = -\frac{i E'}{4} \operatorname{sgn}(k) \widehat{\frac{dw}{dx}},$$

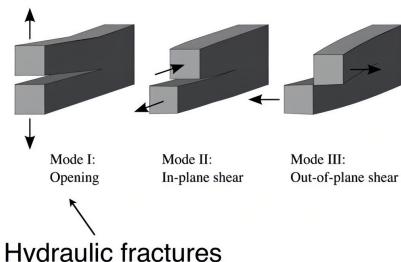
I

$$\widehat{\frac{dw}{dx}} = ik \hat{w}$$

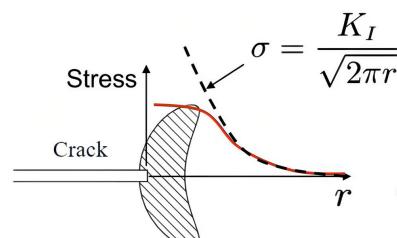
$$\leftarrow p_n(x) = -\frac{1}{2\pi} \frac{i E'}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sgn}(k) \frac{dw}{ds} e^{ik(x-s)} ds dk.$$

2.1.2 Условие распространения трещины ГРП

Propagation condition



Hydraulic fractures



K_I - Stress Intensity Factor (SIF)

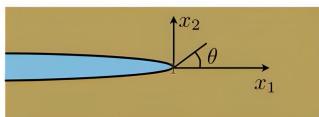
Propagation condition: $K_I = K_{Ic}$

K_{Ic} - fracture toughness



https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics

Mode I solution near the tip



Solution methodology:

- Write elasticity equations via Airy stress function
- Solve the equations assuming stress-free crack and finite displacement at the tip
- See lecture notes on fracture mechanics for more info: <http://www.mate.tue.nl/~piet/edu/frm/pdf/frmsyl1213.pdf>

$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} [\cos(\frac{1}{2}\theta) \{1 - \sin(\frac{1}{2}\theta) \sin(\frac{3}{2}\theta)\}]$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} [\cos(\frac{1}{2}\theta) \{1 + \sin(\frac{1}{2}\theta) \sin(\frac{3}{2}\theta)\}]$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} [\cos(\frac{1}{2}\theta) \sin(\frac{1}{2}\theta) \cos(\frac{3}{2}\theta)]$$

$$u_1 = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [\cos(\frac{1}{2}\theta) \{\kappa - 1 + 2\sin^2(\frac{1}{2}\theta)\}]$$

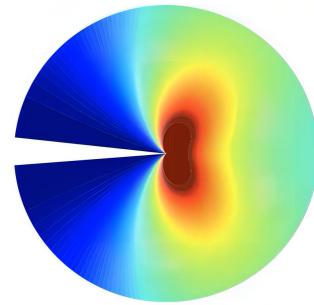
$$u_2 = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [\sin(\frac{1}{2}\theta) \{\kappa + 1 - 2\cos^2(\frac{1}{2}\theta)\}]$$

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Fracture width around the crack tip:

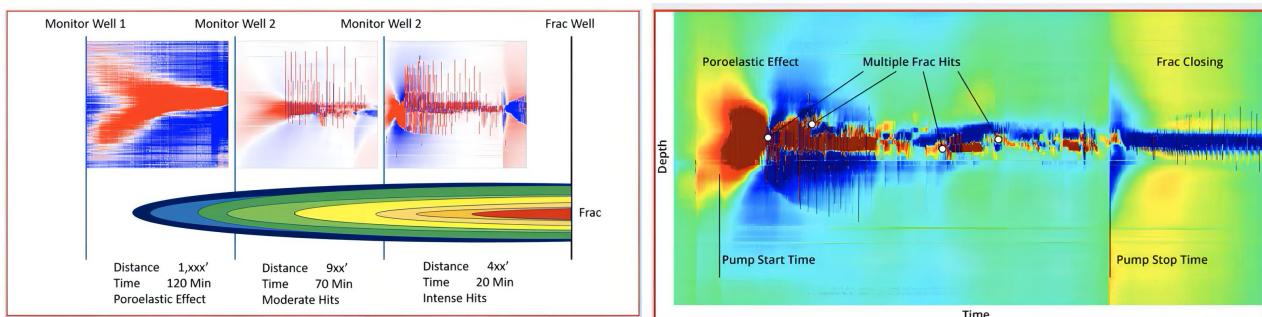
$$w = \sqrt{\frac{32}{\pi}} \frac{K_I(1-\nu^2)}{E} \sqrt{r}$$

Stress field around the crack tip:



Observation of the crack tip stress in the field

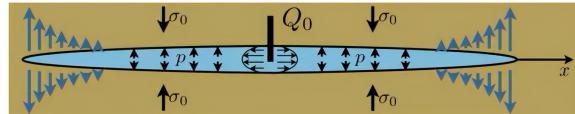
- Fiber optic cables are used to measure stretch versus time along the cable length
- A cable is often placed in a neighboring horizontal well, while the primary well is being fractured
- The characteristic lobes of the approaching crack are clearly visible



Silixa.com Richter et al. 2020

2.2 Модель плоской трещины ГРП (= модель Христиановича-Желтова-Гиртсма-де Клерка = KGD модель)

Volume balance for a plane strain HF



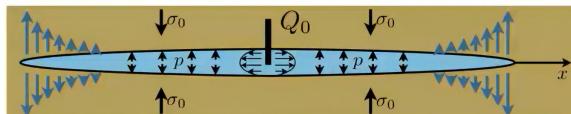
Volume balance diagram:

 q(x) q(x+dx)	New volume	Flux in	Leak-off
	$w(t+dt)dx = w(t)dx + q(x) - q(x+dx) - g_1 dt dx + Q_0 dt \int \delta(x) dx$		
	Previous volume	Flux out	Source

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = Q_0 \delta(x)$$

Fracture width I
 Leak-off Source

Mathematical model for a plane strain HF



Scaled quantities

$$C' = 2C_L \quad \mu' = 12\mu \quad E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad K' = \frac{8K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}}$$

Volume balance of fluid

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = Q_0 \delta(x)$$

Fracture width I
 Leak-off Source

Elasticity

$$p = \sigma_0 - \frac{E'}{4\pi} \int_{-l}^l \frac{w(s) ds}{(x-s)^2}$$

Fracture length
 Fluid pressure

Laminar fluid flow flux

$$q = -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial x}$$

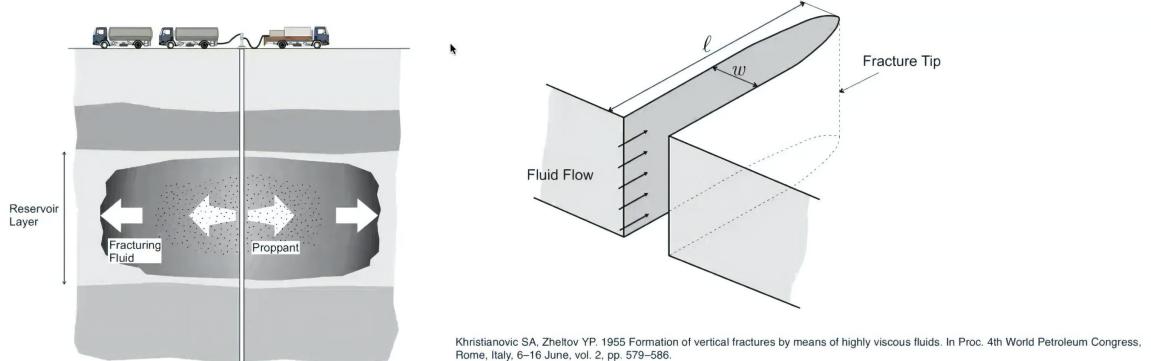
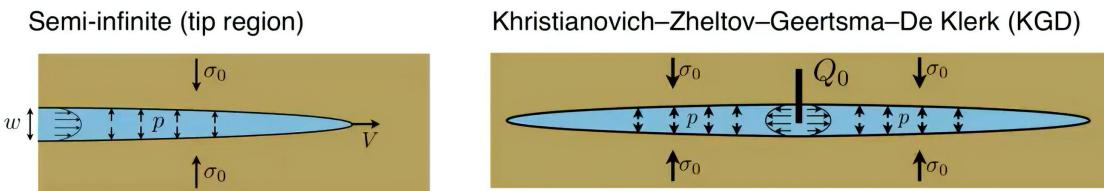
Propagation condition (LEFM)

$$w \rightarrow \frac{K'}{E'} \sqrt{l-x} \quad (K_I = K_{Ic})$$

2.3 Возможные геометрии (модели) трещины ГРП. Краткий обзор

2.3.1 Полубесконечная трещина (semi-infinite модель) и плоская трещина (KGD модель)

HF geometries - the simplest

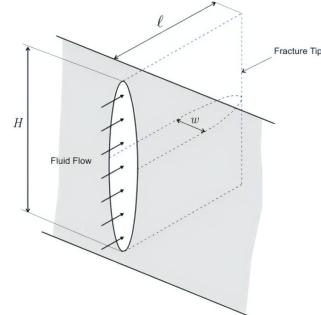
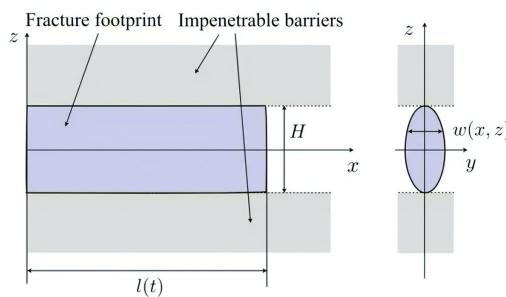


2.3.2 Модель Перкинса-Керна-Нордгрена (PKN модель)

HF geometries

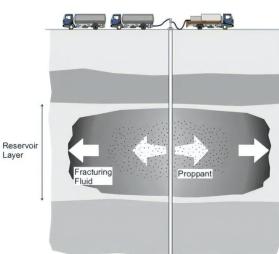
Perkins-Kern-Nordgren (PKN)

T.K. Perkins, L.R. Kern, Widths of hydraulic fractures, J. Pet. Tech. Trans. AIME (1961) 937-949.
R.P. Nordgren, Propagation of vertical hydraulic fractures, Soc. Petrol. Eng. J. (1972) 306-314.



In conventional field applications, solution evolves from KGD geometry at early times to PKN geometry for late times

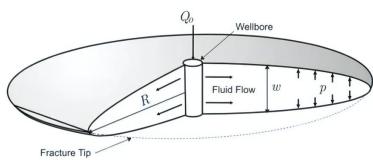
KGD (early time) \rightarrow PKN (developed fracture)



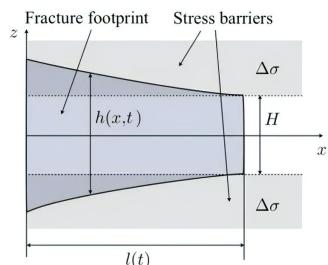
2.3.3 Модель радиальной трещины ГРП, псевдо-3D модель и модель планар-3D

HF geometries

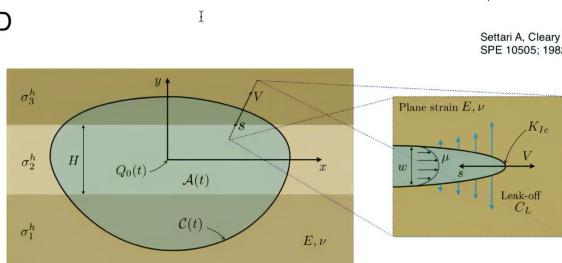
Radial



Pseudo-3D



Planar-3D

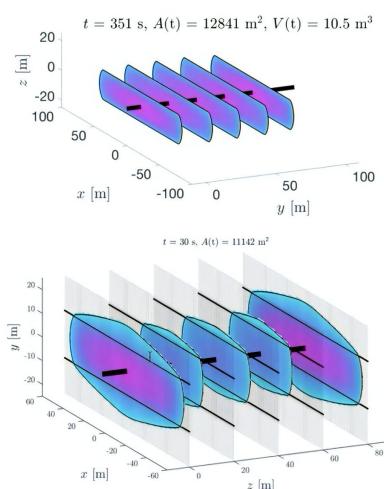


Settari A, Cleary M. Development and testing of a pseudo-three-dimensional model of hydraulic fracture geometry (P3DH). SPE 10505, 1982. p. 185–214.

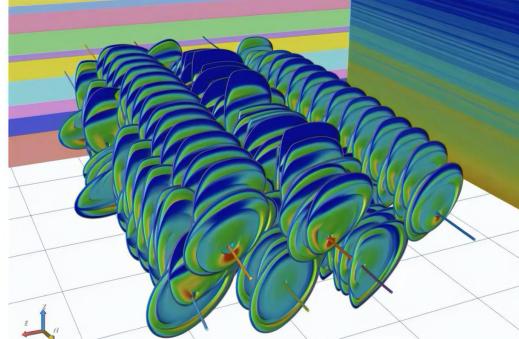
2.3.4 Multi-fracture и multi-well модели

HF geometries

Multi-fracture



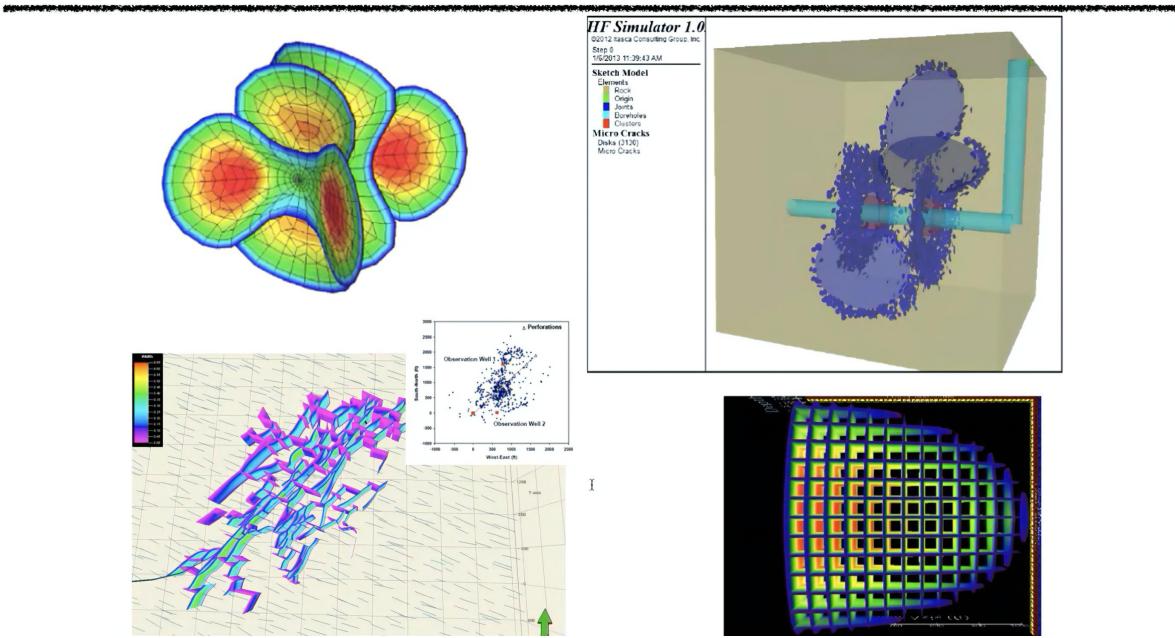
Multi-well



Natural fractures, curved fractures, etc.

2.3.5 Более сложные модели

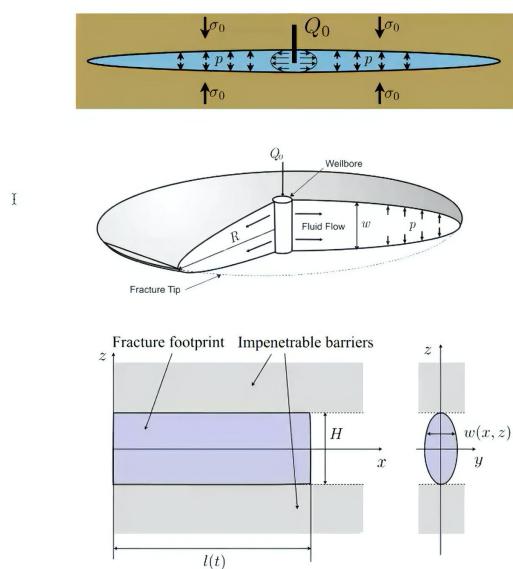
HF geometries - other complex



2.4 Промежуточная систематизация материала лекций

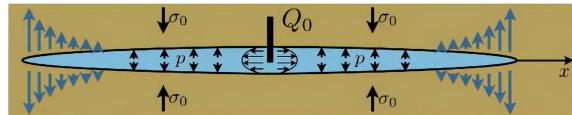
Recall from lecture 1

- **Essential pieces of HF model**
 - Volume balance and leak-off
 - Fluid flow
 - Elasticity
 - Propagation condition
 - Proppant transport
- **Various fracture geometries**
 - Semi-infinite
 - KGD (plane strain)
 - PKN
 - Radial
 - Pseudo-3D
 - Planar 3D
 - Complex
- **Governing equations**
 - KGD (plane strain)
- **Derivation of elasticity equation**



2.5 Математическая модель плоской трещины ГРП

Mathematical model for plane strain HF



Scaled quantities

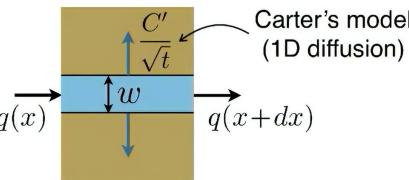
$$C' = 2C_L \quad \mu' = 12\mu$$

Volume balance of fluid

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x)}} = Q_0 \delta(x)$$

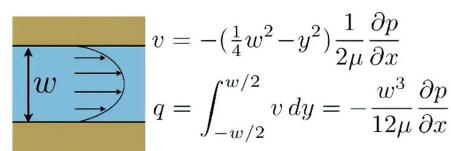
I

Fracture width
Leak-off
Source

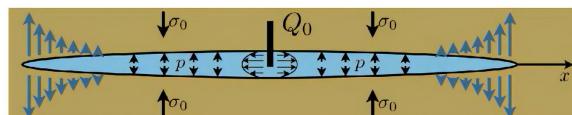


Laminar fluid flow flux

$$q = -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial x}$$



Mathematical model for plane strain HF



Scaled quantities

$$C' = 2C_L \quad \mu' = 12\mu$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad K' = \frac{8K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}}$$

Volume balance of fluid

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x)}} = Q_0 \delta(x)$$

Fracture width
Leak-off
Source

Elasticity

$$p = \sigma_0 - \frac{E'}{4\pi} \int_{-l}^l \frac{w(s) ds}{(x-s)^2}$$

Fluid pressure
Fracture length

Laminar fluid flow flux

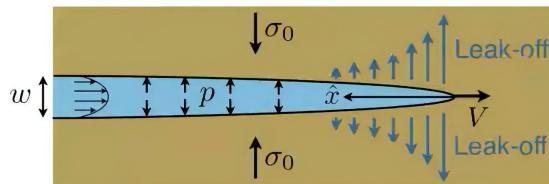
$$q = -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Propagation condition (LEFM)

$$w \rightarrow \frac{K'}{E'} \sqrt{l-x} \quad (K_I = K_{Ic})$$

2.6 Математическая модель полубесконечной трещины ГРП

Tip asymptotics: semi-infinite hydraulic fracture



Material parameters

$$C' = 2C_L \quad \mu' = 12\mu$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad K' = \frac{8K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}}$$

Fluid volume balance

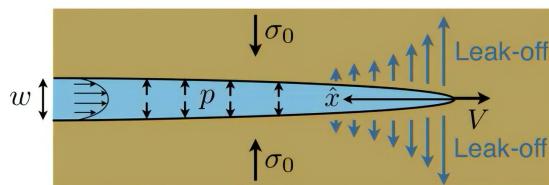
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = 0 \quad \xrightarrow{\text{Traveling wave}} \quad \frac{w(Vt-x)}{w} = V + 2C'V^{1/2}\frac{\hat{x}^{1/2}}{w}$$

Elasticity

$$p = \sigma(\hat{x}) + \frac{E'}{4\pi} \int_0^\infty \frac{dw(\hat{s})}{d\hat{s}} \frac{d\hat{s}}{\hat{x}-\hat{s}}$$

I

Tip asymptotics: semi-infinite hydraulic fracture



Material parameters

$$C' = 2C_L \quad \mu' = 12\mu$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad K' = \frac{8K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}}$$

Fluid volume balance

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = 0 \quad \xrightarrow{\text{Traveling wave}} \quad \frac{q}{w} = V + 2C'V^{1/2}\frac{\hat{x}^{1/2}}{w}$$

Elasticity

$$w = \frac{K'}{E'}\hat{x}^{1/2} + \frac{4}{\pi E'} \int_0^\infty K(\hat{x}, \hat{s})(p(\hat{s}) - \sigma(\hat{s})) d\hat{s} \quad K(\hat{x}, \hat{s}) = \ln \left| \frac{\hat{x}^{1/2} + \hat{s}^{1/2}}{\hat{x}^{1/2} - \hat{s}^{1/2}} \right| - 2\frac{\hat{x}^{1/2}}{\hat{s}^{1/2}}$$

Fluid flow

$$q = -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \longrightarrow \quad q = \frac{w^3}{\mu'} \frac{dp}{d\hat{x}}$$

LEFM propagation condition

$$w = \frac{K'}{E'}\hat{x}^{1/2}, \quad \hat{x} \rightarrow 0$$

Non-singular formulation

1. Integrate elasticity equation by parts

$$w = \frac{K'}{E'} x^{1/2} - \frac{4}{\pi E'} \int_0^\infty F(x, s) \frac{dp}{ds} ds \quad F(x, s) = (s - x) \ln \left| \frac{x^{1/2} + s^{1/2}}{x^{1/2} - s^{1/2}} \right| - 2x^{1/2}s^{1/2}$$

2. Substitute pressure gradient into the result

$$w(x) = \frac{K'}{E'} x^{1/2} - \frac{4}{\pi E'} \int_0^\infty F(x, s) \frac{\mu'}{w(s)^2} \left[V + 2C'V^{1/2} \frac{s^{1/2}}{w(s)} \right] ds$$

3. Apply scaling

$$\tilde{w} = \frac{E' w}{K' x^{1/2}}, \quad \chi = \frac{2C' E'}{V^{1/2} K'}, \quad \tilde{x} = (x/l)^{1/2}, \quad \tilde{s} = (s/l)^{1/2}, \quad l = \left(\frac{K'^3}{\mu' E'^2 V} \right)^2$$

4. Final result

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = 1 + \frac{8}{\pi} \int_0^\infty G(\tilde{s}/\tilde{x}) \left[\frac{1}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} + \frac{\chi}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} \right] d\tilde{s} \quad G(t) = \frac{1-t^2}{t} \ln \left| \frac{1+t}{1-t} \right| + 2$$

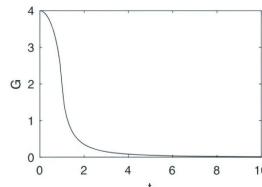
Non-singular

w = “toughness” + “viscosity” + “leak-off”

Limiting vertex solutions

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = 1 + \frac{8}{\pi} \int_0^\infty G(\tilde{s}/\tilde{x}) \left[\frac{1}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} + \frac{\chi}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} \right] d\tilde{s}$$

w = “toughness” + “viscosity” + “leak-off”



Toughness dominates

$$\tilde{w}_k = 1, \quad \longrightarrow \quad w_k = \frac{K'}{E'} x^{1/2}$$

Viscosity dominates

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = \frac{8}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\tilde{s}/\tilde{x})}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} d\tilde{s} \quad \longrightarrow \quad \tilde{w}_m = \beta_m \tilde{x}^{1/3} \quad \longrightarrow \quad w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' V}{E'} \right)^{1/3} x^{2/3}$$

Desroches et al 1994

I

Leak-off dominates

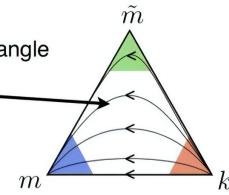
$$\tilde{w}(\tilde{x}) = \frac{8\chi}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\tilde{s}/\tilde{x})}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} d\tilde{s} \quad \longrightarrow \quad \tilde{w}_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \chi^{1/4} \tilde{x}^{1/4} \quad \longrightarrow \quad w_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \left(\frac{4\mu'^2 V C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} x^{5/8}$$

Lenoah 1995

Order of limiting solutions

$$w \propto x^{1/2} \quad w \propto x^{5/8} \quad w \propto x^{2/3}$$

Parametric triangle



Toughness

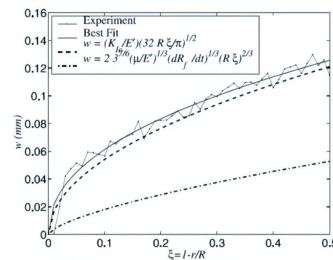
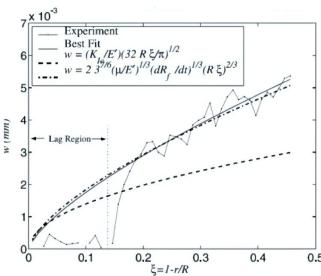
$$w_k = \frac{K'}{E'} x^{1/2},$$

Leak-off

$$w_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \left(\frac{4\mu'^2 V C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} x^{5/8},$$

Viscosity

$$w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' V}{E'} \right)^{1/3} x^{2/3}$$

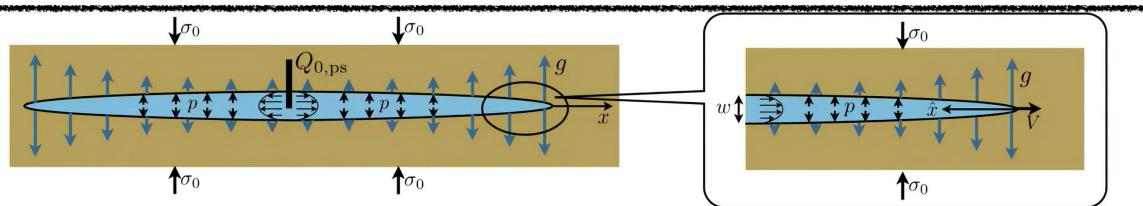


Bunger&Jeffrey

3 Лекция 09.03.2021 (Донцов Е.В.)

3.1 Математическая модель полубесконечной трещины ГРП. Продолжение

Governing equations for a semi-infinite hydraulic fracture



Volume balance and flow

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = Q_{0,ps}(t)\delta(x),$$

$$q = -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial x},$$

Use moving coordinate
 $\hat{x} = Vt - x$

$$V \frac{dw}{d\hat{x}} - \frac{dq}{d\hat{x}} + \frac{C'}{\sqrt{\hat{x}/V}} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{w^2}{\mu'} \frac{dp}{d\hat{x}} = V + 2C' \frac{\sqrt{V\hat{x}}}{w}$$

Substitute flux and integrate

Elasticity and propagation

$$p(x, t) = \sigma_0 - \frac{E'}{4\pi} \int_{-l_1}^{l_2} \frac{w(s)ds}{(x-s)^2},$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} = \begin{cases} \frac{K'}{E'}, & \text{if } V > 0, \\ \frac{K'_I}{E'}, & \text{if } V = 0. \end{cases}$$

$$w(\hat{x}) = \frac{K'}{E'} \hat{x}^{1/2} - \frac{4}{\pi E'} \int_0^\infty F(\hat{x}, \hat{s}) \frac{d(p - \sigma_0)}{d\hat{s}} d\hat{s},$$

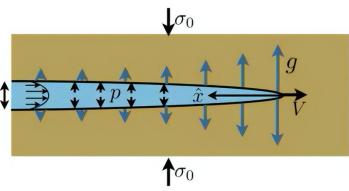
$$F(\hat{x}, \hat{s}) = (\hat{s} - \hat{x}) \ln \left| \frac{\hat{x}^{1/2} + \hat{s}^{1/2}}{\hat{x}^{1/2} - \hat{s}^{1/2}} \right| - 2\hat{x}^{1/2}\hat{s}^{1/2}.$$

Non-singular formulation

Substitute pressure gradient

$$w(\hat{x}) = \frac{K'}{E'} \hat{x}^{1/2} - \frac{4}{\pi E'} \int_0^\infty F(\hat{x}, \hat{s}) \frac{d(p - \sigma_0)}{d\hat{s}} d\hat{s},$$

$$\frac{w^2}{\mu'} \frac{dp}{d\hat{x}} = V + 2C' \frac{\sqrt{V\hat{x}}}{w}$$



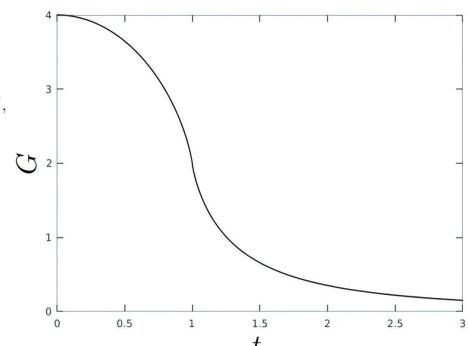
Scaling

$$\tilde{w} = \frac{E'w}{K'\hat{x}^{1/2}}, \quad \chi = \frac{2C'E'}{V^{1/2}K'}, \quad \tilde{x} = (\hat{x}/l)^{1/2},$$

$$\tilde{s} = (\hat{s}/l)^{1/2}, \quad l = \left(\frac{K'^3}{\mu'E'^2V} \right)^2,$$

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = 1 + \frac{8}{\pi} \int_0^\infty G(\tilde{s}/\tilde{x}) \left[\frac{1}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} + \frac{\chi}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} \right] d\tilde{s}, \quad \text{Non-singular formulation}$$

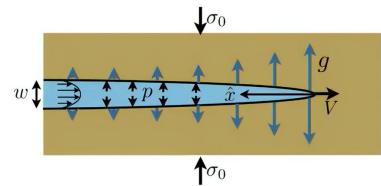
$$G(t) = \frac{1-t^2}{t} \ln \left| \frac{1+t}{1-t} \right| + 2, \quad \text{Non-singular kernel}$$



Non-singular formulation

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = 1 + \frac{8}{\pi} \int_0^\infty G(\tilde{s}/\tilde{x}) \left[\frac{1}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} + \frac{\chi}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} \right] d\tilde{s},$$

w = "toughness" + "viscosity" + "leak-off"



Toughness dominates

$$\tilde{w}_k = 1, \quad \Rightarrow \quad w_k = \frac{K'}{E'} \tilde{x}^{1/2},$$

Viscosity dominates

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = \frac{8}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\tilde{s}/\tilde{x})}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} d\tilde{s} \quad \Rightarrow \quad \tilde{w}_m = \beta_m \tilde{x}^{1/3}$$

$$\beta_m = 2^{1/3} 3^{5/6} \quad \Rightarrow \quad w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' V}{E'} \right)^{1/3} \tilde{x}^{2/3}$$

Desroches et al 1994

Leak-off dominates

$$\tilde{w}(\tilde{x}) = \frac{8\chi}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\tilde{s}/\tilde{x})}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} d\tilde{s} \quad \Rightarrow \quad \tilde{w}_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \chi^{1/4} \tilde{x}^{1/4}$$

$$\beta_{\tilde{m}} = \frac{4}{15^{1/4} (\sqrt{2}-1)^{1/4}} \quad \Rightarrow \quad \tilde{w}_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \left(\frac{4\mu'^2 V C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} \tilde{x}^{5/8},$$

Lenoah 1995

Derivation of the viscosity solution

Governing integral equation

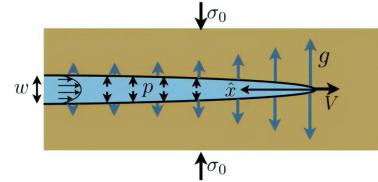
$$\tilde{w}(\tilde{x}) = \frac{8}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\tilde{s}/\tilde{x})}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} d\tilde{s}$$

↓

$$\beta_m \tilde{x}^{\alpha_m} = \frac{8\tilde{x}^{2\alpha_m-1}}{\pi\beta_m^2} \int_0^\infty \frac{G(t)}{t^{2\alpha_m}} dt$$

Form of the solution

$$\tilde{w} = \beta_m \tilde{x}^{\alpha_m}$$



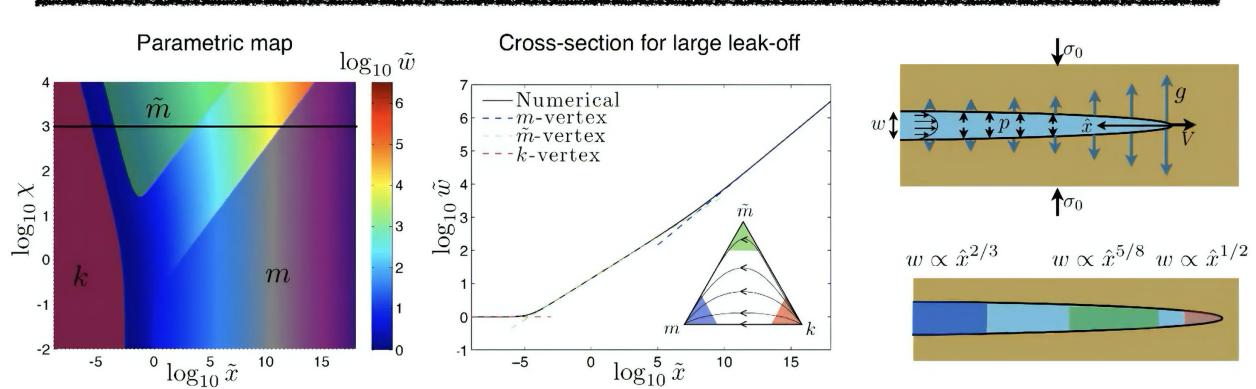
$$\alpha_m = 1/3 \quad \beta_m = 2^{1/3} 3^{5/6},$$



$$\tilde{w}_m = \beta_m \tilde{x}^{1/3}$$

Leak-off dominated solution can be derived in a similar way.

Structure of the solution



Vertex solutions:

$$\tilde{w}_k = 1, \quad \tilde{w}_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \chi^{1/4} \tilde{x}^{1/4}, \quad \tilde{w}_m = \beta_m \tilde{x}^{1/3},$$

I

Solution transitions gradually from one limiting solution to another starting from toughness, then passing through leak-off (for large leak-off), and then reaching viscosity vertex.

Approximate solution

$$\bar{w}(\tilde{x}) = 1 + \frac{8}{\pi} \int_0^\infty G(\tilde{s}/\tilde{x}) \left[\frac{1}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} + \frac{\chi}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} \right] d\tilde{s}$$

Numerical solution of this equation is time consuming and can be a limiting factor for some applications, such as using it as a propagation condition for a planar fracture. So, need to construct an efficient approximation.

↓
Differentiate

$$\frac{d\bar{w}(\tilde{x})}{d\tilde{x}} = -\frac{8}{\pi} \int_0^\infty G'(\tilde{s}/\tilde{x}) \frac{\tilde{s}}{\tilde{x}^2} \left[\frac{1}{\tilde{w}(\tilde{s})^2} + \frac{\chi}{\tilde{w}(\tilde{s})^3} \right] d\tilde{s}, \quad \bar{w}(0) = 1.$$

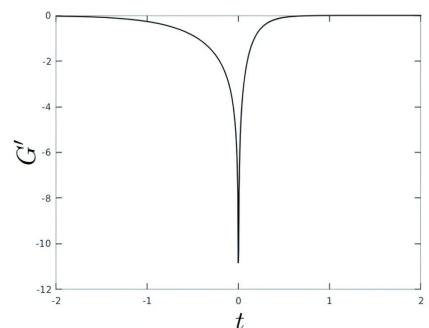
↓
Assume that $\tilde{w} \propto \tilde{x}^\delta$

$$\frac{d\bar{w}(\tilde{x})}{d\tilde{x}} = -\frac{8}{\pi} \int_0^\infty G'(\tilde{s}/\tilde{x}) \frac{\tilde{x}^{2\delta-1}}{\tilde{s}^{2\delta-1}} \frac{d\tilde{s}}{\tilde{x}} \left[\frac{\tilde{s}^{2\delta}}{\tilde{w}(\tilde{s})^2 \tilde{x}^{2\delta}} \right] - \frac{8}{\pi} \int_0^\infty G'(\tilde{s}/\tilde{x}) \frac{\tilde{x}^{3\delta-1}}{\tilde{s}^{3\delta-1}} \frac{d\tilde{s}}{\tilde{x}} \left[\frac{\chi \tilde{s}^{3\delta}}{\tilde{w}(\tilde{s})^3 \tilde{x}^{3\delta}} \right].$$

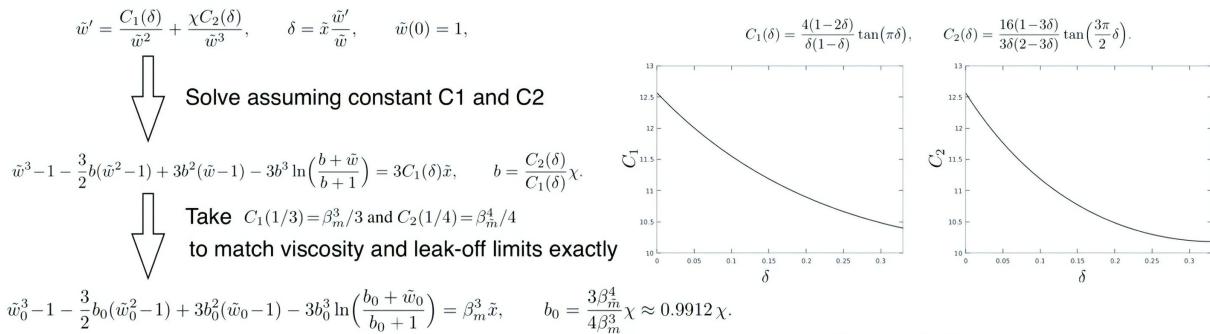
↓
Replace G' with Delta function

$$\tilde{w}' = \frac{C_1(\delta)}{\tilde{w}^2} + \frac{\chi C_2(\delta)}{\tilde{w}^3}, \quad \delta = \tilde{x} \frac{\tilde{w}'}{\tilde{w}}, \quad \tilde{w}(0) = 1,$$

$$C_1(\delta) = \frac{4(1-2\delta)}{\delta(1-\delta)} \tan(\pi\delta), \quad C_2(\delta) = \frac{16(1-3\delta)}{3\delta(2-3\delta)} \tan\left(\frac{3\pi}{2}\delta\right).$$



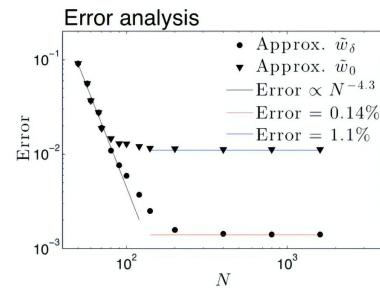
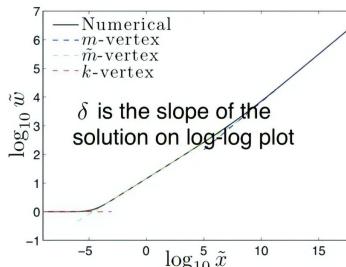
Approximate solution



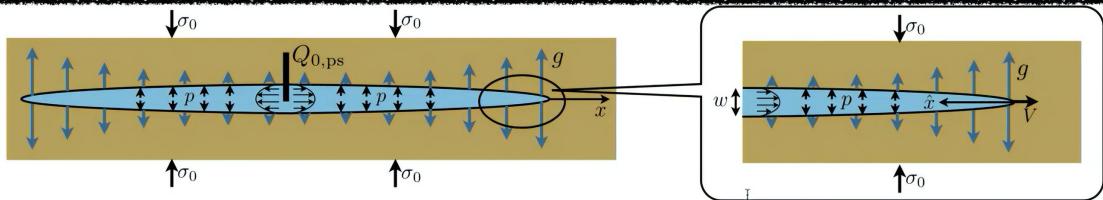
The above is an implicit zeroth order solution for the problem, to get a better approximation, compute

$$\delta = \frac{\beta_m^3 \tilde{x}(\tilde{w}_0)}{3\tilde{w}_0^3} \left(1 + \frac{b_0}{\tilde{w}_0}\right),$$

and re-evaluate the solution.

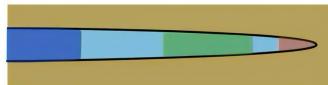


Things to remember for the semi-infinite hydraulic fracture

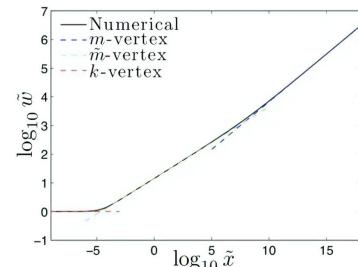


- Semi-infinite geometry describes tip region of a finite hydraulic fracture
- There are three limiting analytic solutions: toughness, viscosity, and leak-off
- The global solution gradually transitions from one limiting case to another
- There is computationally efficient approximate solution for the problem that can be used as a propagation condition for finite fractures

$$w \propto \hat{x}^{2/3} \quad w \propto \hat{x}^{5/8} \quad w \propto \hat{x}^{1/2}$$

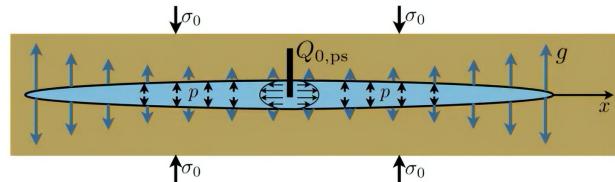


$$w_k = \frac{K'}{E'} \hat{x}^{1/2}, \quad w_{\bar{m}} = \beta_{\bar{m}} \left(\frac{4\mu'^2 V C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} \hat{x}^{5/8}, \quad w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' V}{E'} \right)^{1/3} \hat{x}^{2/3}.$$



3.2 Математическая модель плоской трещины ГРП. Продолжение

Plane strain hydraulic fracture



Governing equations

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} &= Q_{0,ps}(t)\delta(x), \\ q &= -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p_n}{\partial x}, \\ p_n(x) &= -\frac{E'}{4\pi} \int_{-l}^l \frac{w(s)ds}{(x-s)^2}, \\ w &\rightarrow \frac{K'}{E'} \sqrt{l-x}, \quad x \rightarrow l. \end{aligned}$$

Scales

$$\begin{aligned} \frac{w_*}{t} &= \frac{q_*}{l_*} = \frac{C'}{t^{1/2}} = \frac{Q_{0,ps}}{l_*}, \\ q_* &= \frac{w_*^3 p_*}{\mu' l_*}, \\ p_* &= \frac{E' w_*}{l_*}, \\ w_* &= \frac{K'}{E'} l_*^{1/2}. \end{aligned}$$

6 equations, 4 unknowns

Scaling for viscosity-storage solution

Viscosity-storage => no toughness, no leak-off

$$\begin{aligned} \frac{w_*}{t} &= \frac{q_*}{l_*} = \cancel{\frac{C'}{t^{1/2}}} = \frac{Q_{0,ps}}{l_*}, \\ q_* &= \frac{w_*^3 p_*}{\mu' l_*}, \\ p_* &= \frac{E' w_*}{l_*}, \\ w_* &\cancel{=} \frac{K'}{E'} l_*^{1/2}. \end{aligned}$$

Scaling solution

$$\longrightarrow \quad l_* = \left(\frac{Q_{0,ps}^3 E' t^4}{\mu'} \right)^{1/6}, \quad w_* = \left(\frac{\mu' Q_{0,ps}^3 t^2}{E'} \right)^{1/6}, \quad p_* = \left(\frac{\mu' E'^2}{t} \right)^{1/3}$$

M-vertex solution

$$\begin{aligned} w_m(\xi, t) &= 1.1265 \left(\frac{\mu' Q_0^3 t^2}{E'} \right)^{1/6} (1+\xi)^{0.588} (1-\xi)^{2/3}, \\ p_m(\xi, t) &= 2.7495 \left(\frac{\mu' E'^2}{t} \right)^{1/3} \mathcal{F}\left(\xi, 0.588, \frac{2}{3}\right), \\ l_m(t) &= 0.6159 \left(\frac{Q_0^3 E' t^4}{\mu'} \right)^{1/6}, \end{aligned}$$

Scaling for toughness-storage solution

Toughness-storage => no viscosity, no leak-off

$$\begin{aligned} \frac{w_*}{t} &= \frac{q_*}{l_*} = \cancel{\frac{C'}{t^{1/2}}} = \frac{Q_{0,ps}}{l_*}, \\ q_* &\cancel{=} \frac{w_*^3 p_*}{\mu' l_*}, \\ p_* &= \frac{E' w_*}{l_*}, \\ w_* &= \frac{K'}{E'} l_*^{1/2}. \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \text{Scaling solution}$$

$$l_* = \left(\frac{E' Q_{0,ps} t}{K'} \right)^{2/3}, \quad w_* = \left(\frac{K'^2 Q_{0,ps} t}{E'^2} \right)^{1/3}, \quad p_* = \left(\frac{K'^4}{E'^2 Q_{0,ps} t} \right)^{1/3}$$

I

K-vertex solution

$$\begin{aligned} w_k(\xi, t) &= 0.6828 \left(\frac{K'^2 Q_{0,t}}{E'^2} \right)^{1/3} (1 - \xi^2)^{1/2}, \\ p_k(\xi, t) &= 0.1831 \left(\frac{K'^4}{E' Q_{0,t}} \right)^{1/3}, \\ l_k(t) &= 0.9324 \left(\frac{E' Q_{0,t}}{K'} \right)^{2/3}. \end{aligned}$$

Toughness-viscosity transition

Use either

$$l_m \sim l_k$$

$$w_m \sim w_k$$

$$p_m \sim p_k$$

Dimensionless toughness

$$\Rightarrow K_m = \left(\frac{K'^4}{\mu' E'^3 Q_{0,ps}} \right)^{1/4}$$

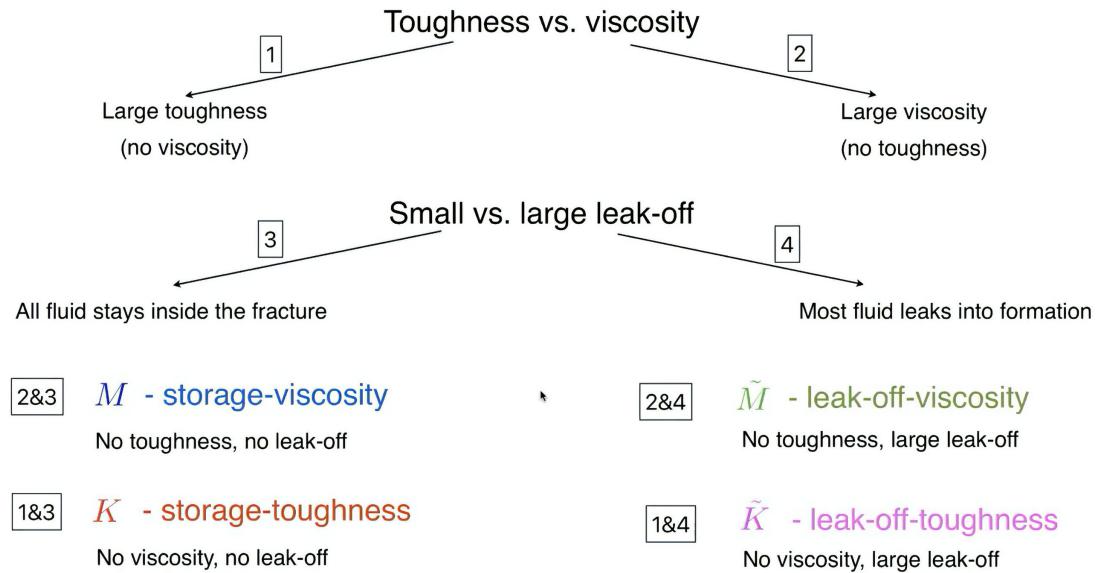
$K_m \ll 1$ M vertex (viscosity dominated)

$K_m \gg 1$ K vertex (toughness dominated)

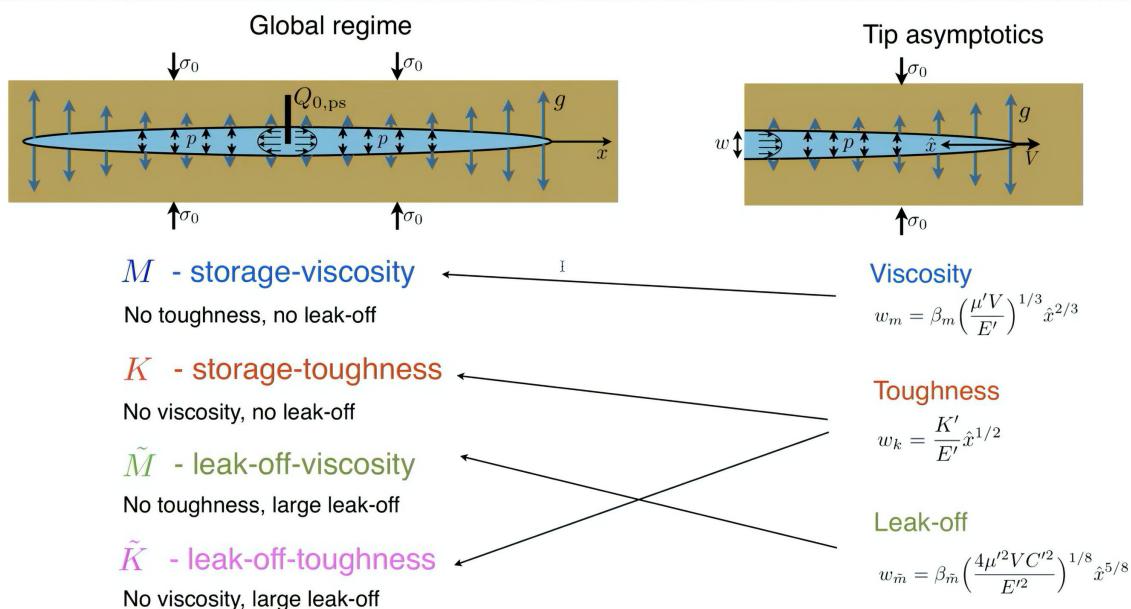
$K_m \sim 1$ M-K transition

This is only part of the story, how about leak-off?

Hydraulic fracture regimes of propagation



Tip asymptotics vs. regime



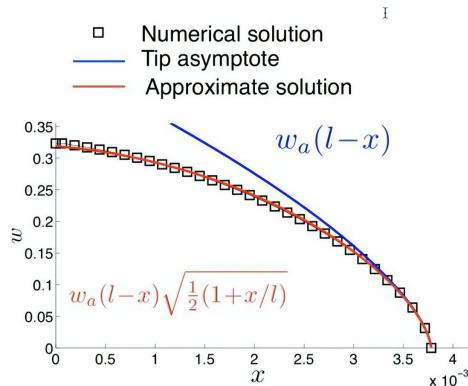
Solution for the problem

- Numerical solution**

- Discretize governing equations using finite differences, see Dontsov, 2017

- Approximate solution**

- Global volume balance
- Approximate solution for width based on the tip asymptote



Global volume balance

$$\int_0^l (w(x, t) + 2C' \sqrt{t - t_0(x)}) dx = \frac{Q_{0,ps} t}{2},$$

$$l(t) \propto t^\alpha \implies x/l = (t_0/t)^\alpha$$

Approximate solution for width

$$w(x, t) = \left(\frac{l+x}{2l} \right)^\lambda w_a(l-x),$$

λ - fitting parameter

Regimes of propagation for a plane strain hydraulic fracture

M - storage-viscosity

No toughness, no leak-off

K - storage-toughness

No viscosity, no leak-off

\tilde{M} - leak-off-viscosity

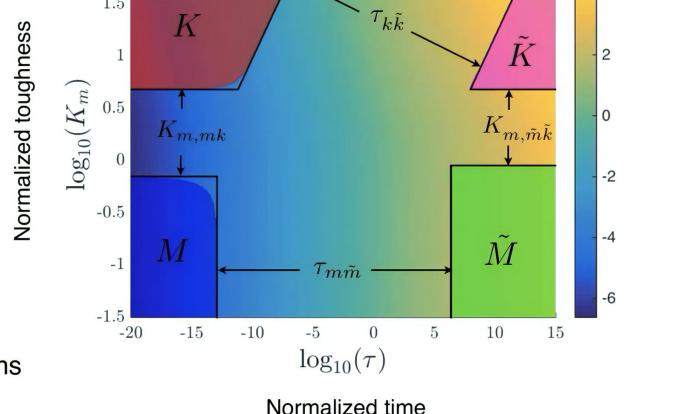
No toughness, large leak-off

\tilde{K} - leak-off-toughness

No viscosity, large leak-off

Zones of applicability of limiting solutions
are defined to within 1% of error

Bounds for these zones (solid black
lines) are known



$$K_m = \left(\frac{K'^4}{\mu'E'^3 Q_{0,ps}} \right)^{1/4} \quad \tau = \frac{t}{t_{m\bar{m}}} \quad t_{m\bar{m}} = \frac{\mu' Q_{0,ps}^3}{E'C'^6}$$

Limiting solutions for a plane strain hydraulic fracture

 M - storage-viscosity

$$\begin{aligned} w_m(\xi, t) &= 1.1265 \left(\frac{\mu' Q_{0,ps}^3 t^2}{E'} \right)^{1/6} (1+\xi)^{0.588} (1-\xi)^{2/3}, \\ p_m(\xi, t) &= 2.7495 \left(\frac{\mu' E'^2}{t} \right)^{1/3} \mathcal{F}(\xi, 0.588, \frac{2}{3}), \\ l_m(t) &= 0.6159 \left(\frac{Q_{0,ps}^3 E' t^4}{\mu'} \right)^{1/6}, \end{aligned}$$

 \tilde{M} - leak-off-viscosity

$$\begin{aligned} w_{\tilde{m}}(\xi, t) &= 0.8165 \left(\frac{\mu' Q_{0,ps}^3 t}{E' C'^2} \right)^{1/4} (1+\xi)^{0.520} (1-\xi)^{5/8}, \\ p_{\tilde{m}}(\xi, t) &= 3.6783 \left(\frac{C'^2 \mu' E'^3}{Q_{0,ps} t} \right)^{1/4} \mathcal{F}(\xi, 0.520, \frac{5}{8}), \\ l_{\tilde{m}}(t) &= 0.3183 \frac{Q_{0,ps} t^{1/2}}{C'}, \end{aligned}$$

 K - storage-toughness

$$\begin{aligned} w_k(\xi, t) &= 0.6828 \left(\frac{K'^2 Q_{0,ps} t}{E'^2} \right)^{1/3} (1-\xi^2)^{1/2}, \\ p_k(\xi, t) &= 0.1831 \left(\frac{K'^4}{E' Q_{0,ps} t} \right)^{1/3}, \\ l_k(t) &= 0.9324 \left(\frac{E' Q_{0,ps} t}{K'} \right)^{2/3}. \end{aligned}$$

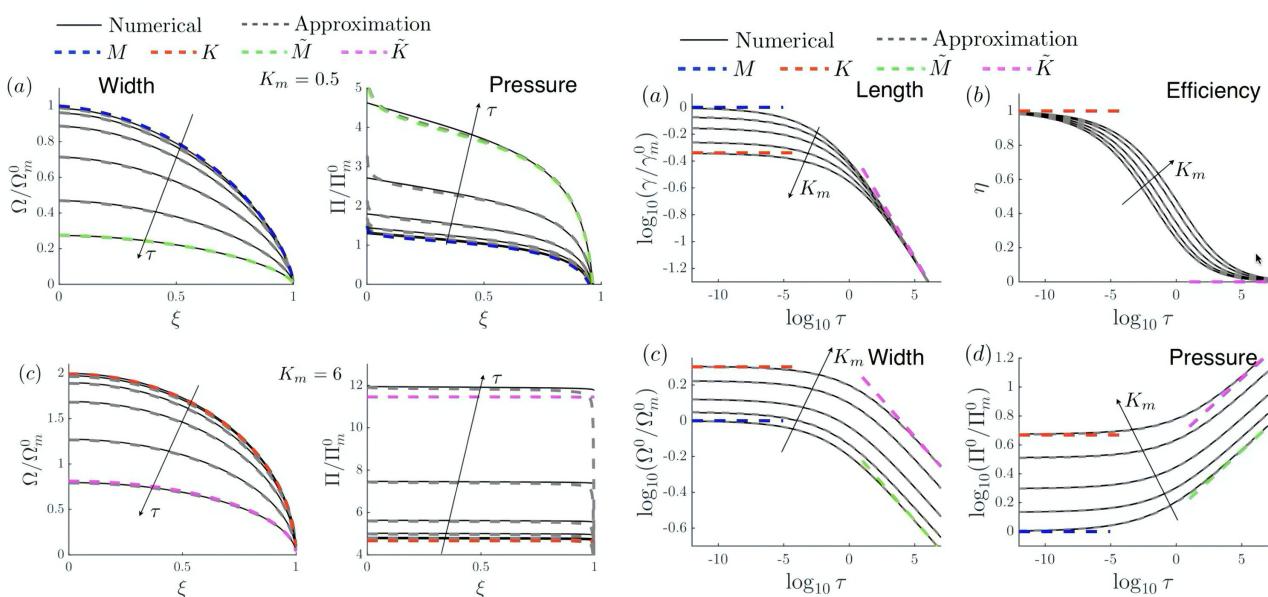
 \tilde{K} - leak-off-toughness

$$\begin{aligned} w_{\tilde{k}}(\xi, t) &= 0.3989 \left(\frac{K'^4 Q_{0,ps}^2 t}{E'^4 C'^2} \right)^{1/4} (1-\xi^2)^{1/2}, \\ p_{\tilde{k}}(\xi, t) &= 0.3133 \left(\frac{K'^4 C'^2}{Q_{0,ps}^2 t} \right)^{1/4}, \\ l_{\tilde{k}}(t) &= 0.3183 \frac{Q_{0,ps} t^{1/2}}{C'}, \end{aligned}$$

Elasticity function:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\xi, \lambda, \delta) &= \frac{1}{2^{1+\lambda} \pi} \int_0^1 \frac{\partial M(\xi, s)}{\partial s} (1+s)^\lambda (1-s)^\delta ds, \\ M(\xi, s) &= \frac{\xi}{\xi^2 - s^2}, \end{aligned}$$

Numerical vs. approximate solutions



Things to remember for the plane strain hydraulic fracture

- Estimation of the solution based on scaling
- Definition of fracture regimes
- The relationship between the regimes for a finite fracture and tip asymptote
- The existence of approximate solution constructed using global volume balance and tip asymptote
- The existence of explicit expressions for limiting or vertex cases
- Parametric space for the problem, two dimensionless parameters, dimensionless toughness and dimensionless time

M - storage-viscosity

No toughness, no leak-off

Viscosity

$$w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' V}{E'} \right)^{1/3} \dot{x}^{2/3}$$

K - storage-toughness

No viscosity, no leak-off

Toughness

$$w_k = \frac{K'}{E'} \dot{x}^{1/2}$$

\tilde{M} - leak-off-viscosity

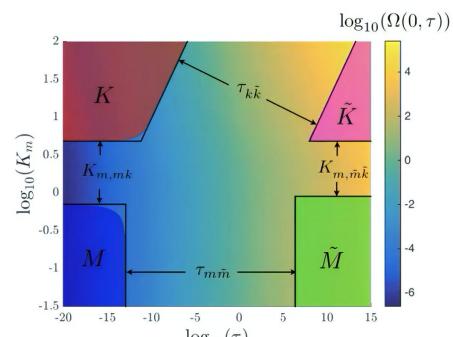
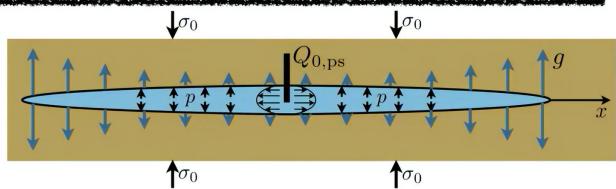
No toughness, large leak-off

Leak-off

$$w_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \left(\frac{4\mu'^2 V C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} \dot{x}^{5/8}$$

\tilde{K} - leak-off-toughness

No viscosity, large leak-off

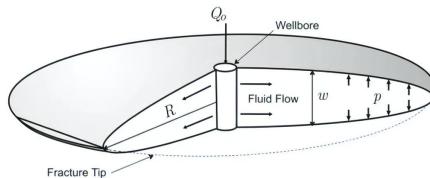


E.V. Dontsov. An approximate solution for a plane strain hydraulic fracture that accounts for fracture toughness, fluid viscosity, and leak-off. *Int. J. Fract.*, 205:221–237, 2017.

4 Лекция 16.03.2021 (Донцов Е.В.)

4.1 Математическая модель радиальной трещины ГРП

Radial hydraulic fracture



Governing equations

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rq) + \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(r)}} &= Q_0 \delta(r), \\ q &= -\frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p_n}{\partial r}, \\ p_n(r, t) &= -\frac{E'}{2\pi R} \int_0^R M\left(\frac{r}{R}, \frac{r'}{R}\right) \frac{\partial w(r', t)}{\partial r'} dr', \\ w \rightarrow \frac{K'}{E'}(R-r)^{1/2}, \quad r \rightarrow R. \end{aligned}$$

Scales

$$\begin{aligned} \frac{w_*}{t} &= \frac{q}{R_*} = \frac{C'}{t^{1/2}} = \frac{Q_0}{R_*^2}, \\ q &= \frac{w_*^3 p_*}{\mu' R_*}, \\ p_* &= \frac{E' w_*}{R_*}, \\ w &= \frac{K' R_*^{1/2}}{E'}. \end{aligned}$$

6 equations, 4 unknowns

Scaling for viscosity-storage solution

Viscosity-storage => no toughness, no leak-off

$$\begin{aligned} \frac{w_*}{t} &= \frac{q}{R_*} = \cancel{\frac{C'}{t^{1/2}}} = \frac{Q_0}{R_*^2}, \\ q &= \frac{w_*^3 p_*}{\mu' R_*}, \\ p_* &= \frac{E' w_*}{R_*}, \\ w &\cancel{=} \frac{K' R_*^{1/2}}{E'}. \end{aligned}$$

Scaling solution

$$R_* = \left(\frac{Q_0^3 E' t^4}{\mu'} \right)^{1/9}, \quad w_* = \left(\frac{\mu'^2 Q_0^3 t}{E'^2} \right)^{1/9}, \quad p_* = \left(\frac{\mu' E'^2}{t} \right)^{1/3}$$

M-vertex solution

$$\begin{aligned} w_m(\rho, t) &= 1.1901 \left(\frac{\mu'^2 Q_0^3 t}{E'^2} \right)^{1/9} (1+\rho)^{0.487} (1-\rho)^{2/3}, \\ p_m(\rho, t) &= 2.4019 \left(\frac{\mu' E'^2}{t} \right)^{1/3} \mathcal{F}(\rho, 0.487, \frac{2}{3}), \\ R_m(t) &= 0.6944 \left(\frac{Q_0^3 E' t^4}{\mu'} \right)^{1/9}, \end{aligned}$$

Regimes of propagation for a radial hydraulic fracture

M - storage-viscosity

No toughness, no leak-off

K - storage-toughness

No viscosity, no leak-off

M̃ - leak-off-viscosity

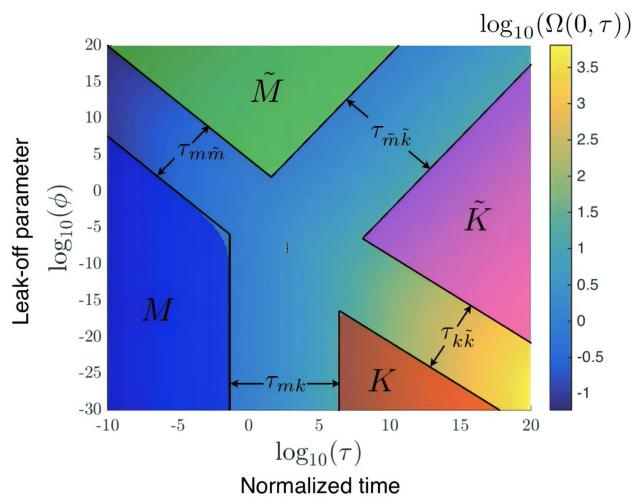
No toughness, large leak-off

K̃ - leak-off-toughness

No viscosity, large leak-off

Zones of applicability of limiting solutions
are defined to within 1% of error

Bounds for these zones (solid black
lines) are known



$$\phi = \frac{\mu'^3 E'^{11} C'^4 Q_0}{K'^{14}} \quad \tau = \frac{t}{t_{mk}} \quad t_{mk} = \left(\frac{\mu'^5 E'^{13} Q_0^3}{K'^{18}} \right)^{1/2}$$

Regimes of propagation for radial HF

M - storage-viscosity

$$\begin{aligned} w_m(\rho, t) &= 1.1901 \left(\frac{\mu'^2 Q_0^3 t}{E'^2} \right)^{1/9} (1+\rho)^{0.487} (1-\rho)^{2/3}, \\ p_m(\rho, t) &= 2.4019 \left(\frac{\mu' E'^2}{t} \right)^{1/3} \mathcal{F}(\rho, 0.487, \frac{2}{3}), \\ R_m(t) &= 0.6944 \left(\frac{Q_0^3 E' t^4}{\mu'} \right)^{1/9}, \end{aligned}$$

K - storage-toughness

$$\begin{aligned} w_k(\rho, t) &= 0.6537 \left(\frac{K'^4 Q_0 t}{E'^4} \right)^{1/5} (1-\rho^2)^{1/2}, \\ p_k(\rho, t) &= 0.3004 \left(\frac{K'^6}{E' Q_0 t} \right)^{1/5}, \\ R_k(t) &= 0.8546 \left(\frac{E' Q_0 t}{K'} \right)^{2/5}. \end{aligned}$$

M̃ - leak-off-viscosity

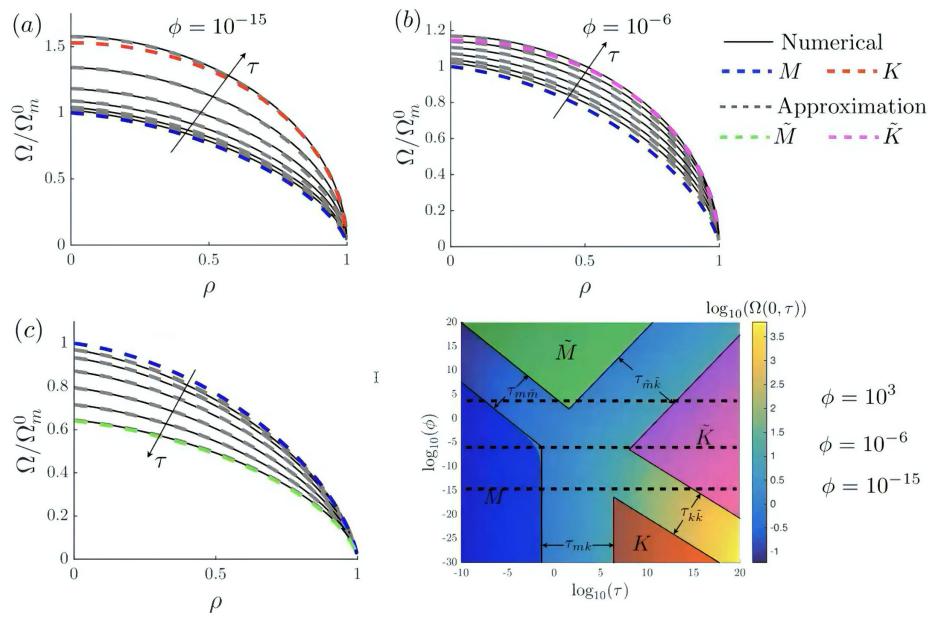
$$\begin{aligned} w_{\tilde{m}}(\rho, t) &= 1.0574 \left(\frac{\mu'^4 Q_0^6 t}{E'^4 C'^2} \right)^{1/16} (1+\rho)^{0.397} (1-\rho)^{5/8}, \\ p_{\tilde{m}}(\rho, t) &= 3.0931 \left(\frac{\mu'^4 E'^{12} C'^6}{Q_0^2 t^3} \right)^{1/16} \mathcal{F}(\rho, 0.397, \frac{5}{8}), \\ R_{\tilde{m}}(t) &= 0.4502 \left(\frac{Q_0^2 t}{C'^2} \right)^{1/4}, \end{aligned}$$

K̃ - leak-off-toughness

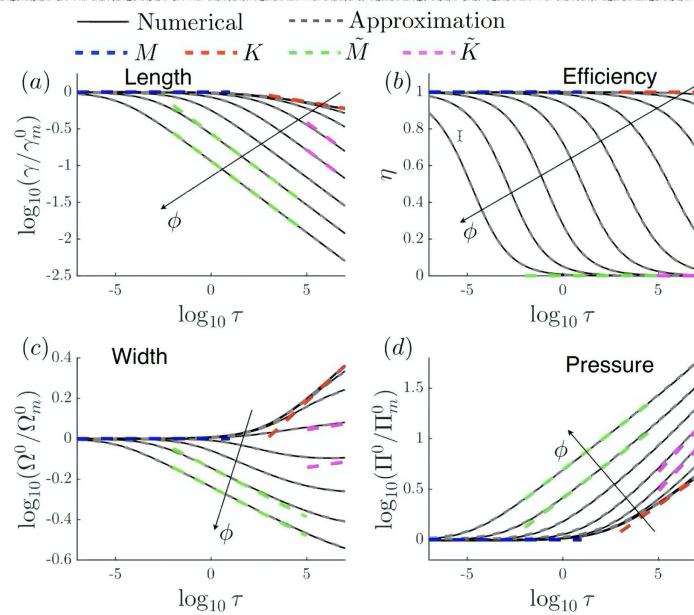
$$\begin{aligned} w_{\tilde{k}}(\rho, t) &= 0.4744 \left(\frac{K'^8 Q_0^2 t}{E'^8 C'^2} \right)^{1/8} (1-\rho^2)^{1/2}, \\ p_{\tilde{k}}(\rho, t) &= 0.4139 \left(\frac{K'^8 C'^2}{Q_0^2 t} \right)^{1/8}, \\ R_{\tilde{k}}(t) &= 0.4502 \left(\frac{Q_0^2 t}{C'^2} \right)^{1/4}. \end{aligned}$$

Elasticity function: $\mathcal{F}(\rho, \lambda, \bar{\delta}) = \frac{1}{2^{1+\lambda}\pi} \int_0^1 \frac{\partial M(\rho, s)}{\partial s} (1+s)^\lambda (1-s)^{\bar{\delta}} ds,$

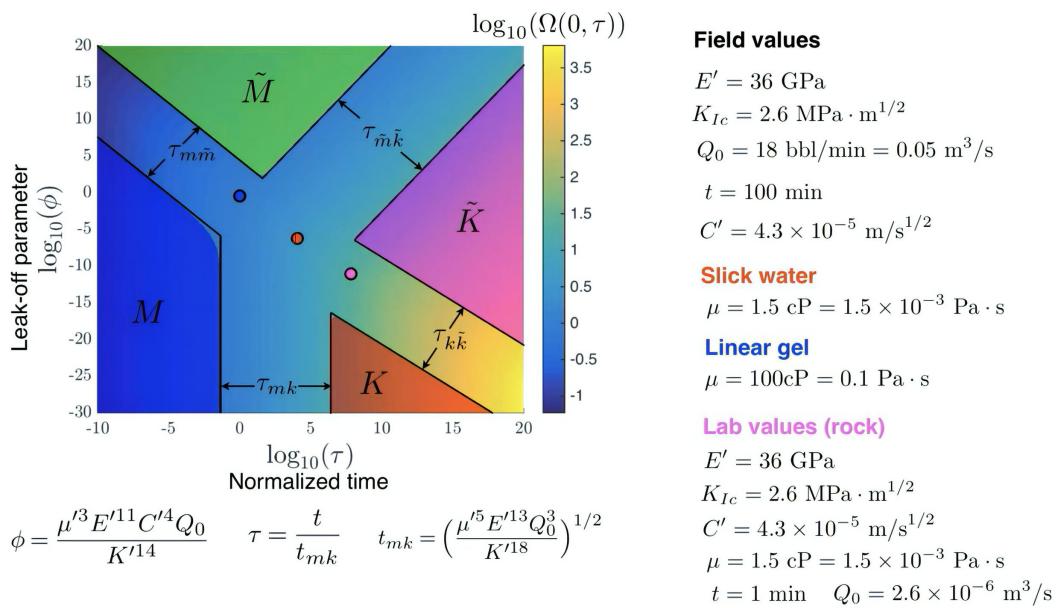
Comparison with numerical solution



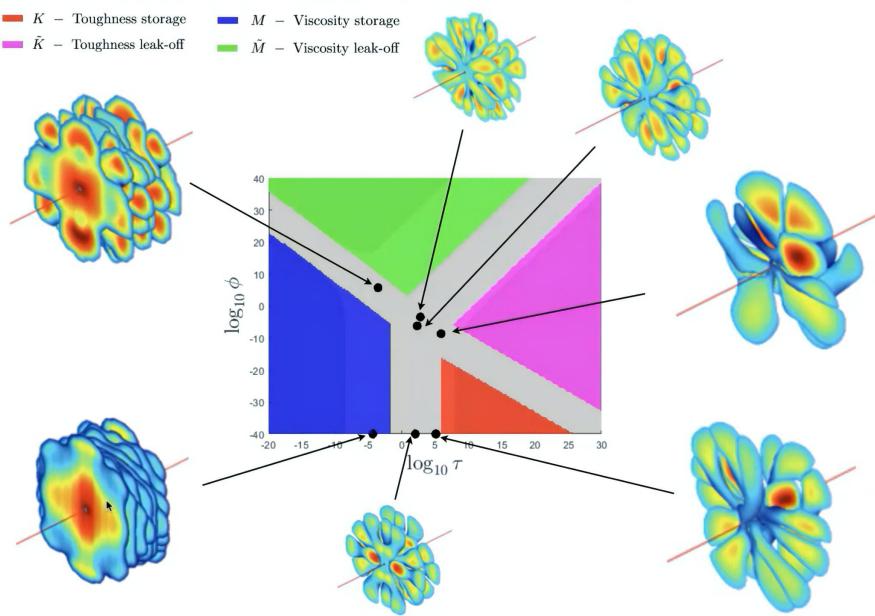
Comparison with numerical solution



Radial hydraulic fracture: examples

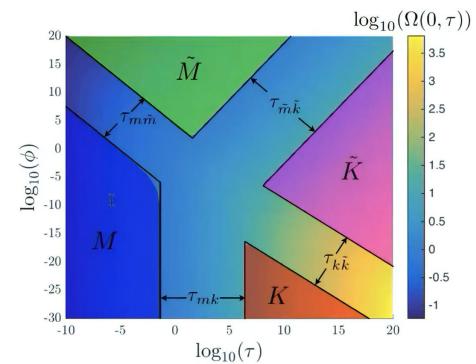
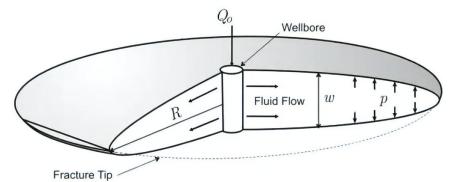
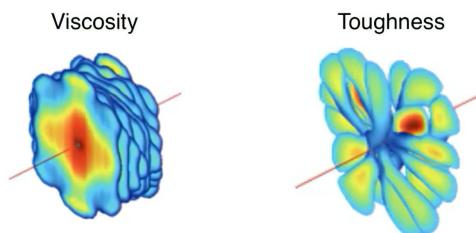


Application to multiple fractures



Things to remember for radial hydraulic fracture

- Estimation of the solution based on scaling
- Definition of fracture regimes
- The relationship between the regimes for a finite fracture and tip asymptote (the same as for plane strain)
- The existence of approximate solution constructed using global volume balance and tip asymptote (similar to plane strain)
- The existence of explicit expressions for limiting or vertex cases
- Parametric space for the problem, two dimensionless parameters, dimensionless leak-off and dimensionless time
- Fracture regimes affect morphology of multiple hydraulic fractures

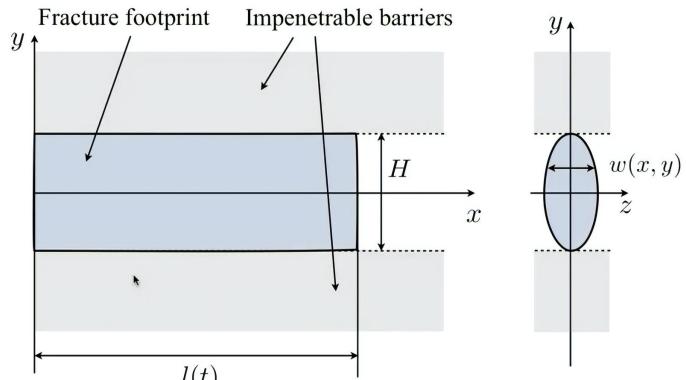


E.V. Donstov. An approximate solution for a penny-shaped hydraulic fracture that accounts for fracture toughness, fluid viscosity, and leak-off. *R. Soc. open sci.*, 3:160737, 2016.

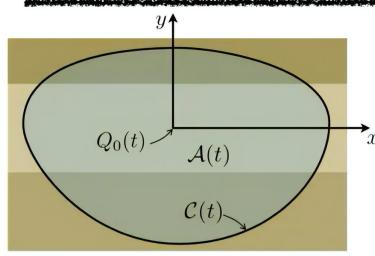
4.2 Математическая модель Перкинса-Керна-Нордгрена (модель PKN)

PKN or constant height hydraulic fracture

- Fracture height is assumed to be constant
- Length \gg height (long time solution)
- Flux is predominantly horizontal
- Pressure is assumed to be constant in the vertical cross-section
- Far away from the tip, local elasticity applies. That is the pressure is determined by the width at the particular point (as opposed to non-local relation for which the pressure depends on the integral of the width with some kernel)
- Fracture width is elliptical in each cross-section
- These assumptions allow to reformulate the two-dimensional fracture problem as one-dimensional, effectively solving the solution in the vertical direction analytically



Governing equations for PKN geometry



Scaling $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$, $\mu' = 12\mu$, $K' = \sqrt{\frac{32}{\pi}} K_{Ic}$, $C' = 2C_l$,

Apply vertical averaging

$$w(x, y) = \frac{4}{\pi} \bar{w}(x) \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{H}\right)^2}, \quad \bar{w}(x) = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} w(x, y) dy,$$

Volume balance $\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x, y)}} = Q_0(t)\delta(x, y)$,

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = \frac{Q_0}{H} \delta(x),$$

Fluid flow $\mathbf{q} = -\frac{w^3}{\mu'} \nabla p$,

Elasticity $p(x, y, t) = \sigma_0(y) - \frac{E'}{8\pi} \int_{A(t)} \frac{w(x', y', t) dx' dy'}{[(x' - x)^2 + (y' - y)^2]^{3/2}}$, \rightarrow

Propagation $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} = \begin{cases} \frac{K'}{E'}, & \text{if } V > 0, \\ \frac{K'_I}{E'}, & \text{if } V = 0. \end{cases}$

$$\begin{aligned} \bar{q}_x &= -\frac{1}{H\mu'} \frac{\partial p}{\partial x} \int_{-H/2}^{H/2} w^3 dy = -\frac{\bar{w}^3}{\pi^2 \mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ p(x) &= -\frac{2E'}{\pi^2 H} \int_{-l(t)}^{l(t)} \bar{w}(x') \frac{dG(2(x'-x)/H)}{dx'} dx' \\ \lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} &= \frac{K'}{E'} \end{aligned}$$

Elasticity equation for PKN fracture

$$p(x) = -\frac{2E'}{\pi^2 H} \int_{-l(t)}^{l(t)} \bar{w}(x') \frac{dG(2(x'-x)/H)}{dx'} dx'$$

$$G(s) = \frac{\sqrt{1+s^2}}{s} E\left(\frac{1}{1+s^2}\right), \quad G(s) \approx \frac{\pi}{2} \text{sign}(s), \quad |s| \gg 1, \quad G(s) \approx \frac{1}{s}, \quad s \ll 1,$$

Far away from
the tip ($x \gg H$)

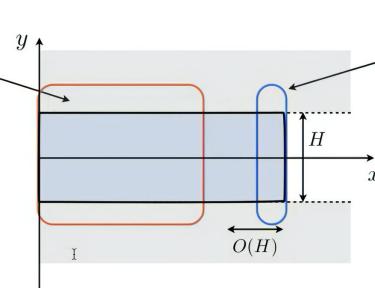
$$p(x) = \frac{2E' \bar{w}(x)}{\pi H},$$

Local elasticity equation

Near the tip
($x \sim H$)

$$p(x, t) = \sigma_0 - \frac{E'}{4\pi} \int_{-l_1}^{l_2} \frac{w(s) ds}{(x-s)^2},$$

Plane strain elasticity equation



Two options for the solution

Local elasticity + special toughness boundary condition

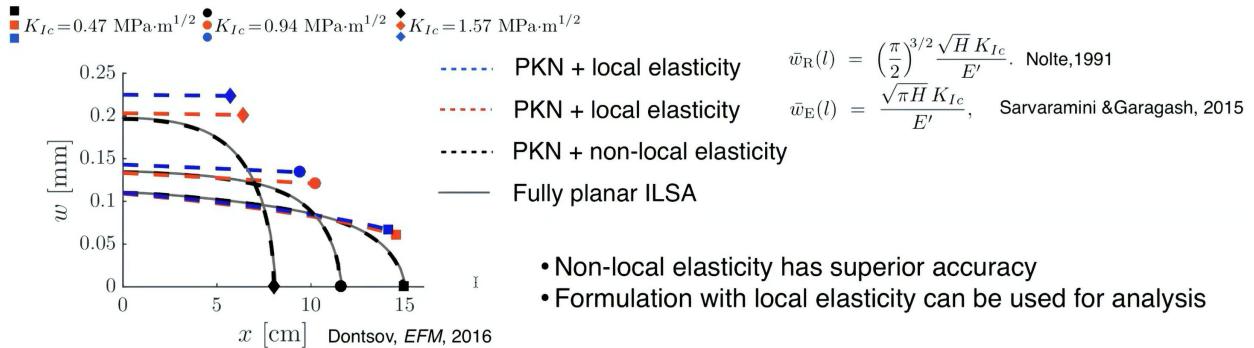
$$p(x) = \frac{2E'\bar{w}(x)}{\pi H},$$

$$\bar{w}(l) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'}.$$

Non-elasticity + standard toughness boundary condition

$$p(x) = -\frac{2E'}{\pi^2 H} \int_{-l(t)}^{l(t)} \bar{w}(x') \frac{dG(2(x'-x)/H)}{dx'} dx'$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} = \frac{K'}{E'}$$



Tip region of PKN fracture

Equations for finite fracture

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = \frac{Q_0}{H} \delta(x),$$

$$\bar{q}_x = -\frac{1}{H\mu'} \frac{\partial p}{\partial x} \int_{-H/2}^{H/2} w^3 dy = -\frac{\bar{w}^3}{\pi^2 \mu} \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$p(x) = \frac{2E'\bar{w}(x)}{\pi H},$$

$$\bar{w}(l) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'}.$$

Use moving coordinate

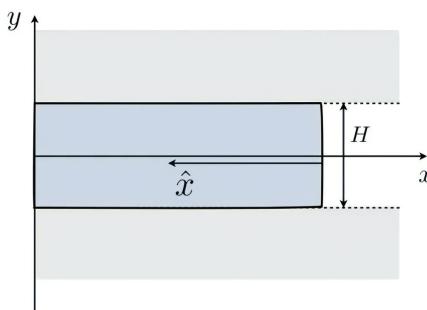
$$\hat{x} = Vt - x$$



Semi-infinite PKN fracture

$$\frac{E'}{2\pi^3 \mu H} \frac{d\bar{w}^4}{d\hat{x}} = V\bar{w} + 2C' \sqrt{V\hat{x}},$$

$$\bar{w}(0) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'}.$$



Known solutions for the tip region

$$\frac{E'}{2\pi^3 \mu H} \frac{d\bar{w}^4}{d\hat{x}} = V\bar{w} + 2C'\sqrt{V\hat{x}}, \quad \rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Limiting solutions} \\ \bar{w}_k = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'}, \quad \bar{w}_m = \left(\frac{3\pi^3 \mu H V}{2E'}\right)^{1/3} \hat{x}^{1/3}, \quad \bar{w}_{\tilde{m}} = \left(\frac{8\pi^3 \mu H C' V^{1/2}}{3E'}\right)^{1/4} \hat{x}^{3/8}, \\ \text{Toughness} \qquad \qquad \qquad \text{Viscosity} \qquad \qquad \qquad \text{Leak-off} \end{array}$$

Exact edge solutions

$$\bar{w}_{km} = (\bar{w}_k^3 + \bar{w}_m^3)^{1/3}, \quad \bar{w}_{k\tilde{m}} = (\bar{w}_k^4 + \bar{w}_{\tilde{m}}^4)^{1/4}.$$

I

Less accurate, but simple approximation

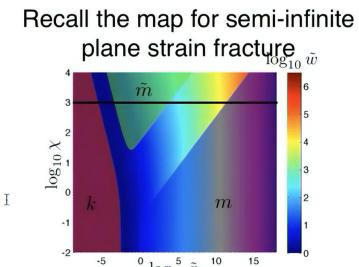
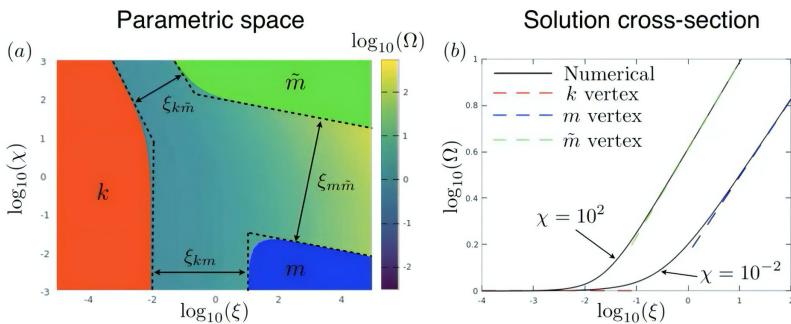
$$\bar{w}_{m\tilde{m}k} = (\bar{w}_k^p + \bar{w}_m^p + \bar{w}_{\tilde{m}}^p)^{1/p}, \quad p = 3.4,$$

More accurate approximation

$$\bar{w}_{m\tilde{m}k} = [w_{km}(\bar{w}_{km}^4 + \bar{w}_{\tilde{m}}^4)^{1/4} + w_{k\tilde{m}}(\bar{w}_{k\tilde{m}}^3 + \bar{w}_m^3)^{1/3}] [w_{km} + w_{k\tilde{m}}]^{-1},$$

Parametric space

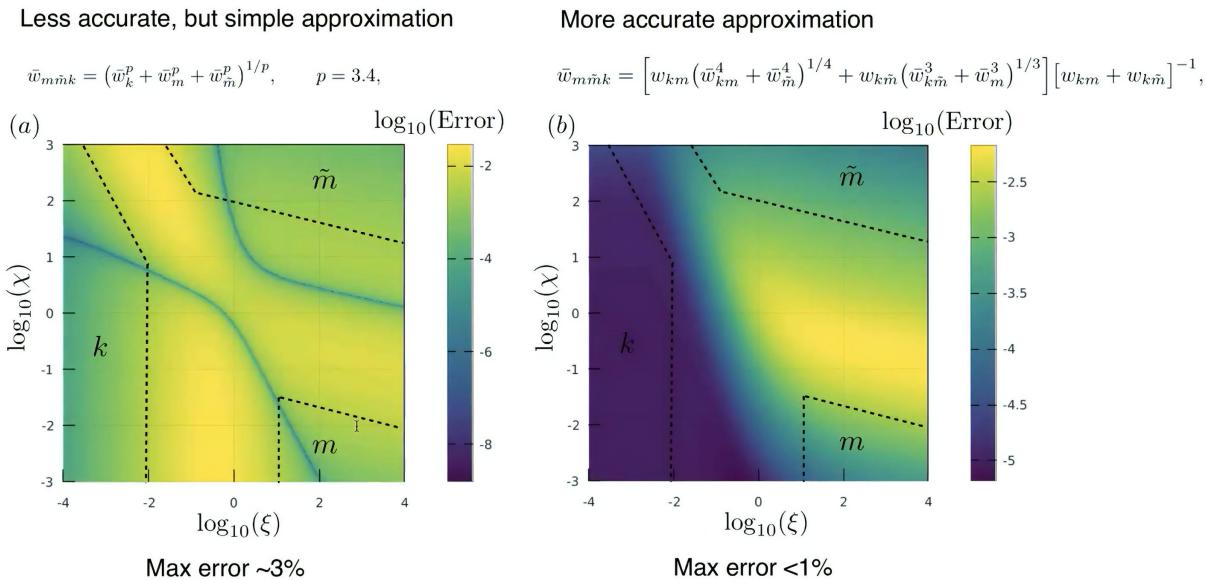
Original equation $\frac{E'}{2\pi^3 \mu H} \frac{d\bar{w}^4}{d\hat{x}} = V\bar{w} + 2C'\sqrt{V\hat{x}},$ $\bar{w}(0) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'},$ $\Omega = \frac{\bar{w}}{\bar{w}_k} = \frac{E'\bar{w}}{(\pi H)^{1/2} K_{Ic}}, \quad \xi = \frac{\pi^{3/2} \mu V E'^2 \hat{x}}{2K_{Ic}^3 H^{1/2}}, \quad \chi = \left(\frac{8C'^2 K_{Ic}}{\pi^{5/2} \mu H^{1/2} V^2}\right)^{1/2}.$	Scaling \rightarrow $\frac{d\Omega}{d\xi} = \frac{1}{\Omega^2} + \frac{\chi \xi^{1/2}}{\Omega^3}, \quad \Omega(0) = 1. \rightarrow \Omega_k = 1, \quad \Omega_m = (3\xi)^{1/3}, \quad \Omega_{\tilde{m}} = \left(\frac{8\chi}{3}\right)^{1/4} \xi^{3/8},$	Vertex solutions Recall the map for semi-infinite plane strain fracture
--	---	---



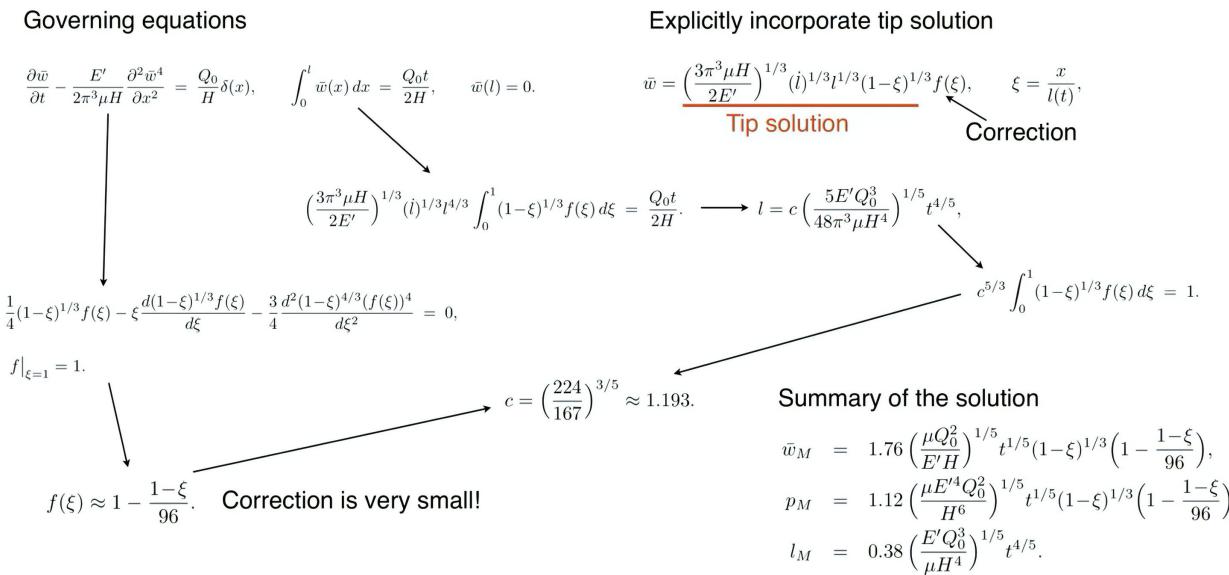
Transition zones

$$\begin{aligned} \xi_{km} &= \xi, & \xi_{km,1} &\approx 0.010, & \xi_{km,2} &\approx 11, \\ \xi_{k\tilde{m}} &= \xi \chi^{2/3}, & \xi_{k\tilde{m},1} &\approx 0.062, & \xi_{k\tilde{m},2} &\approx 4.4, \\ \xi_{m\tilde{m}} &= \xi \chi^6, & \xi_{m\tilde{m},1} &\approx 1.85 \times 10^{-8}, & \xi_{m\tilde{m},2} &\approx 2.1 \times 10^{12}. \end{aligned}$$

Accuracy of the approximations



Vertex solutions for the finite fracture: storage viscosity



Vertex solutions for the finite fracture: leak-off viscosity

Governing equations

$$-\frac{E'}{2\pi^3\mu H} \frac{\partial^2 \bar{w}^4}{\partial x^2} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = \frac{Q_0}{H} \delta(x), \quad 2C' \int_0^l \sqrt{t-t_0(x)} dx = \frac{Q_0 t}{2H}, \quad \bar{w}(l) = 0.$$

\downarrow

$$l \propto t^\alpha \quad t_0(x) = t(x/l)^{1/\alpha}$$

$$2C't^{1/2}l \int_0^1 \sqrt{1-\xi^{1/\alpha}} d\xi = \frac{Q_0 t}{2H} \xrightarrow{\alpha=1/2} l = \frac{Q_0 t^{1/2}}{\pi C' H}.$$

$$-\frac{E'}{2\pi^3\mu H} \frac{\partial^2 \bar{w}^4}{\partial x^2} + \frac{C'}{\sqrt{t}\sqrt{1-(x/l)^2}} = \frac{Q_0}{H} \delta(x), \quad \bar{w}(l) = 0,$$

\downarrow

$$\bar{w} = \left(\frac{2\pi\mu Q_0^2}{E'C'H} \right)^{1/4} t^{1/8} g(\xi), \quad g(\xi) = \left[\xi \left(\sin^{-1}(\xi) - \frac{\pi}{2} \right) + \sqrt{1-\xi^2} \right]^{1/4}, \quad \xi = \frac{x}{l}.$$

\downarrow

$$g(\xi) \approx \left(\frac{8}{9} \right)^{1/8} \frac{(1-\xi)^{3/8}}{C'} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{9}{8} \right)^{1/8} \right) (1-\xi) \right].$$

Tip solution

Correction

Correction is very small!

I Summary of the solution

$$\bar{w}_M = \left(\frac{2\pi\mu Q_0^2}{E'C'H} \right)^{1/4} t^{1/8} g(\xi),$$

$$p_M = \left(\frac{32\mu E'^3 Q_0^2}{\pi^3 C' H^5} \right)^{1/4} t^{1/8} g(\xi),$$

$$l_M = \frac{Q_0 t^{1/2}}{\pi C' H}.$$

Vertex solutions for the finite fracture: storage and leak-off toughness

No viscosity implies no pressure gradient \Rightarrow

Width is spatially constant and is determined by the boundary condition at the tip

Storage toughness

$$\int_0^l \bar{w}(x) dx = \frac{Q_0 t}{2H}, \quad \bar{w}(l) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'}.$$

Leak-off toughness

$$\int_0^l 2C' \sqrt{t-t_0(x)} dx = \frac{Q_0 t}{2H}, \quad \bar{w}(l) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{Ic}}{E'}.$$

\downarrow

$$l \propto t^\alpha \quad t_0(x) = t(x/l)^{1/\alpha}$$

$$2C't^{1/2}l \int_0^1 \sqrt{1-\xi^{1/\alpha}} d\xi = \frac{Q_0 t}{2H} \xrightarrow{\alpha=1/2} l = \frac{Q_0 t^{1/2}}{\pi C' H}.$$

Summary of the solution

$$\bar{w}_K = \frac{K_{Ic} \sqrt{\pi H}}{E'},$$

$$p_K = \frac{2K_{Ic}}{\sqrt{\pi H}},$$

$$l_K = \frac{E' Q_0 t}{\sqrt{4\pi} K_{Ic} H^{3/2}}.$$

I Summary of the solution

$$\bar{w}_{\tilde{K}} = \frac{K_{Ic} \sqrt{\pi H}}{E'},$$

$$p_{\tilde{K}} = \frac{2K_{Ic}}{\sqrt{\pi H}},$$

$$l_{\tilde{K}} = \frac{Q_0 t^{1/2}}{\pi C' H}.$$

Fast approximate solution for a finite PKN fracture

We saw earlier that all the vertex solutions are approximated accurately by the tip solution. Therefore, the solution is sought in the following form:

$$\bar{w} = \bar{w}_a(1-\xi)^\delta, \quad \bar{w}_a = \bar{w}_{m\tilde{m}k}(x=l, V=\dot{l}) \quad \delta = \frac{d \log(\bar{w}_{m\tilde{m}k})}{d \log(\hat{x})}, \quad \xi = \frac{x}{l},$$

Full solution Spatial behavior from asymptote
Tip asymptote

I Global volume balance

$$\int_0^l [\bar{w}(x) + 2C' \sqrt{t-t_0(x)}] dx = \frac{Q_0 t}{2H}.$$

$$\downarrow \quad l \propto t^\alpha \quad t_0(x) = t(x/l)^{1/\alpha}$$

$$\frac{\bar{w}_a(l, \alpha l/t)l}{1+\delta} + \sqrt{\pi} C' t^{1/2} l \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(\alpha + \frac{3}{2})} = \frac{Q_0 t}{2H},$$

$$\delta = \frac{d \log(\bar{w}_{m\tilde{m}k})}{d \log(\hat{x})}, \quad \alpha = \frac{d \log(l)}{d \log(t)},$$

This system of equations can be solved quickly

Scaling

Original system of equations

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} - \frac{E'}{2\pi^3 \mu H} \frac{\partial^2 \bar{w}^4}{\partial x^2} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = \frac{Q_0}{H} \delta(x),$$

$$\bar{w}(l) = \frac{\sqrt{\pi H} K_{lc}}{E'},$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\bar{q}_x(l)}{\bar{w}(l)} = -\frac{2E'}{3\pi^3 \mu H} \frac{\partial \bar{w}^3}{\partial x} \Big|_{x=l},$$

Dimensionless system of equations

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} - \frac{\xi \lambda}{\lambda} \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} - \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \Omega^4}{\partial \xi^2} + \frac{\phi}{\sqrt{\tau-\tau_0(\xi)}} = \delta(\xi),$$

$$\Omega(1) = 1, \quad \text{I}$$

$$\frac{d\lambda}{d\tau} = -\frac{4}{3\lambda} \frac{\partial \Omega^3}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1}.$$

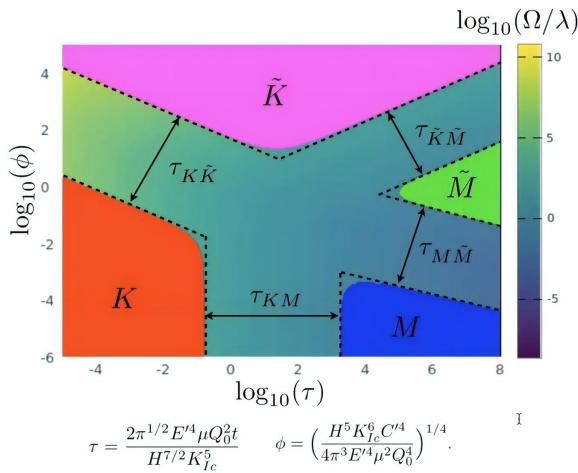
Scaling

$\Omega = \frac{\bar{w}}{w_*}, \quad \lambda = \frac{l}{l_*}, \quad \tau = \frac{t}{t_*}, \quad \xi = x/l(t) \quad \phi = \left(\frac{H^5 K_{lc}^6 C'^4}{4\pi^3 E'^4 \mu^2 Q_0^4} \right)^{1/4}.$
$w_* = \frac{(\pi H)^{1/2} K_{lc}}{E'}, \quad l_* = \frac{H^2 K_{lc}^4}{2\pi E'^3 \mu Q_0}, \quad t_* = \frac{H^{7/2} K_{lc}^5}{2\pi^{1/2} E'^4 \mu Q_0^2}.$

The dimensionless system of equations can be solved numerically using standard finite difference technique.

Parametric space

- Parametric space is computed using the fast solution
- Zones of applicability of the vertex solutions are indicated
- The zone boundaries are quantified



M - storage-viscosity

No toughness, no leak-off

K - storage-toughness

No viscosity, no leak-off

M-tilde - leak-off-viscosity

No toughness, large leak-off

K-tilde - leak-off-toughness

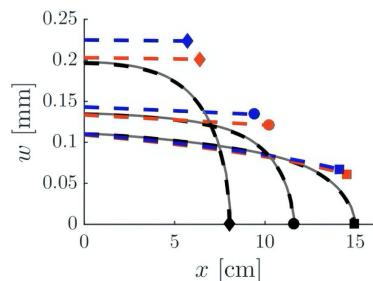
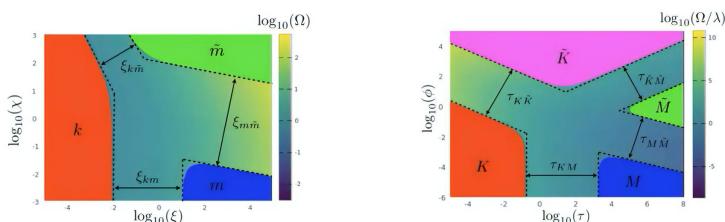
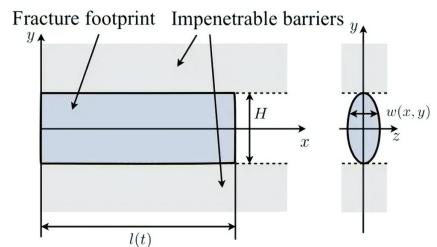
No viscosity, large leak-off

Transitions

$$\begin{aligned} \tau_{MK} &= \tau, & \tau_{MK,1} &= 0.16, & \tau_{MK,2} &= 1.6 \times 10^3, \\ \tau_{K\bar{K}} &= \tau\phi^2, & \tau_{K\bar{K},1} &= 5.6 \times 10^{-5}, & \tau_{K\bar{K},2} &= 2.8 \times 10^3, \\ \tau_{\bar{K}\tilde{M}} &= \tau\phi^{-2}, & \tau_{\bar{K}\tilde{M},1} &= 0.18, & \tau_{\bar{K}\tilde{M},2} &= 6.6 \times 10^4, \\ \tau_{M\tilde{M}} &= \tau\phi^{10/3}, & \tau_{M\tilde{M},1} &= 2.3 \times 10^{-7}, & \tau_{M\tilde{M},2} &= 2.8 \times 10^3. \end{aligned}$$

Things to remember

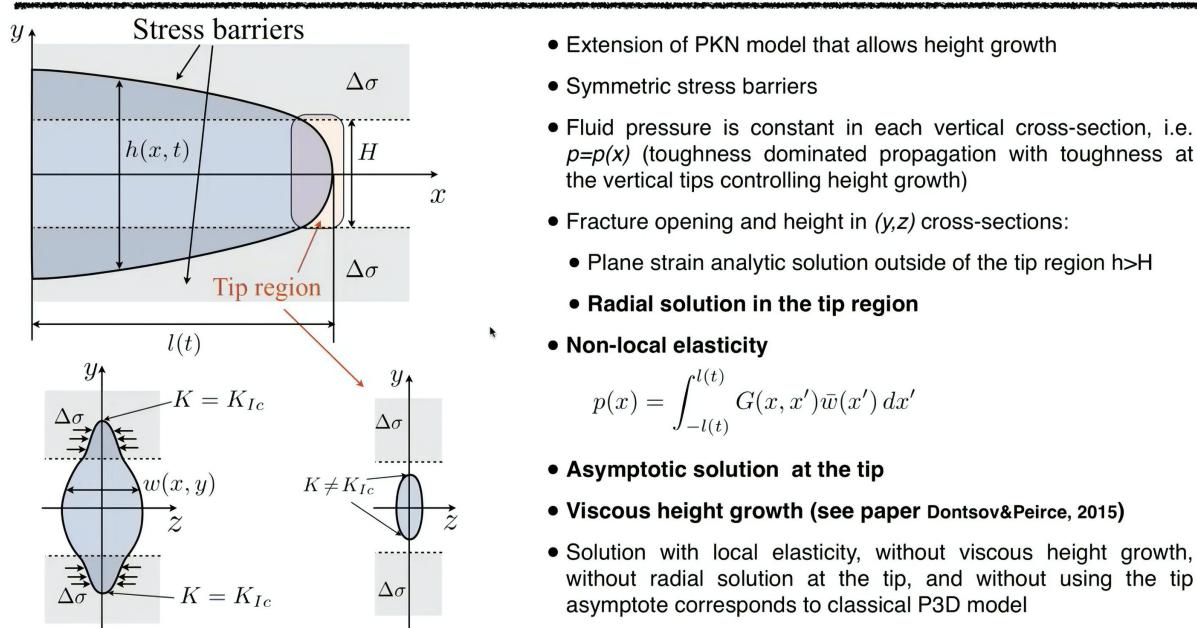
- Assumptions of PKN model, including constant height, length \gg height, horizontal flux, constant pressure in each vertical cross-section, elliptical width in each vertical cross-section
- There are two approaches to solve the problem:
 - Use non-local elasticity, which is good for numerical scheme and leads to superior accuracy
 - Use local elasticity with a specific boundary condition at the tip, which is less accurate, but easier for analysis
- PKN fracture has its own formulation for the tip region, which is different from that for a semi-infinite plane strain fracture, approximate solution exists
- Parametric space for the finite fracture is evaluated
- Limiting vertex solutions exist, as well as the global approximate solution



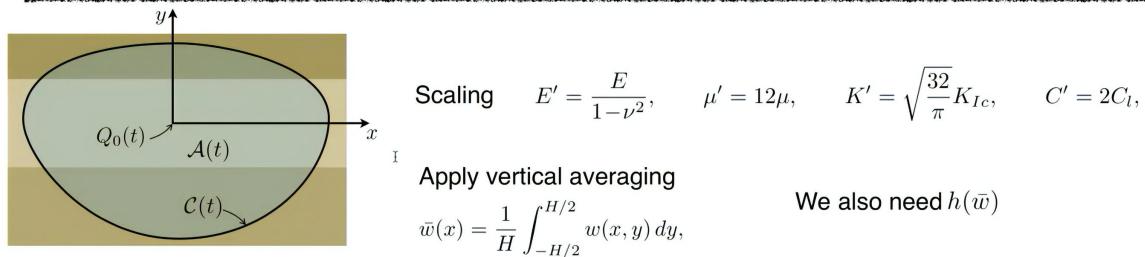
5 Лекция 23.03.2021 (Донцов Е.В.)

5.1 Математическая модель EP3D (Enhanced pseudo-3D model)

Enhanced pseudo-3D (EP3D) model

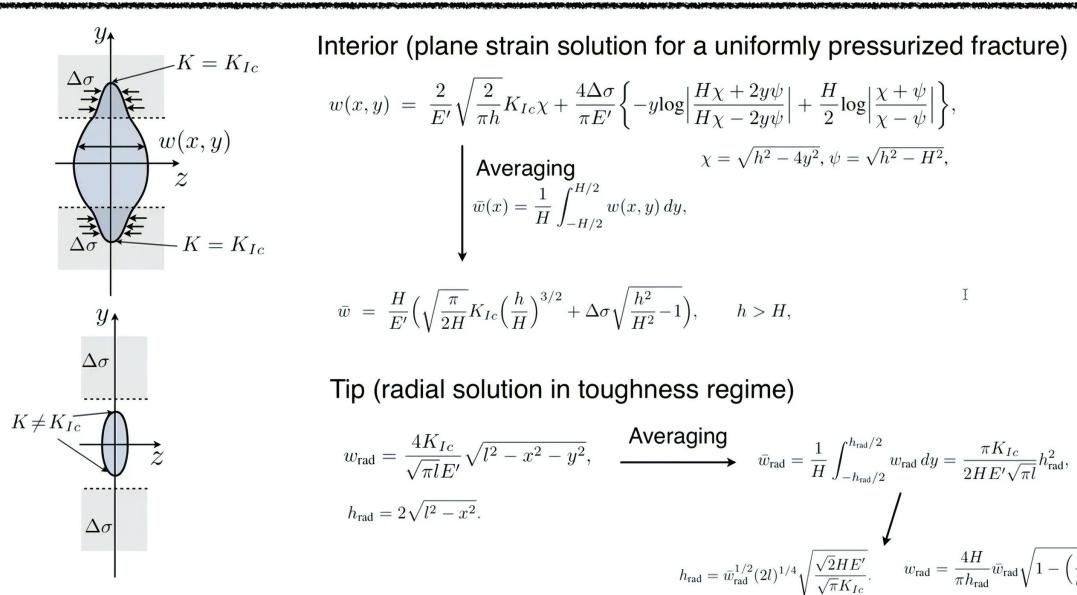


Governing equations

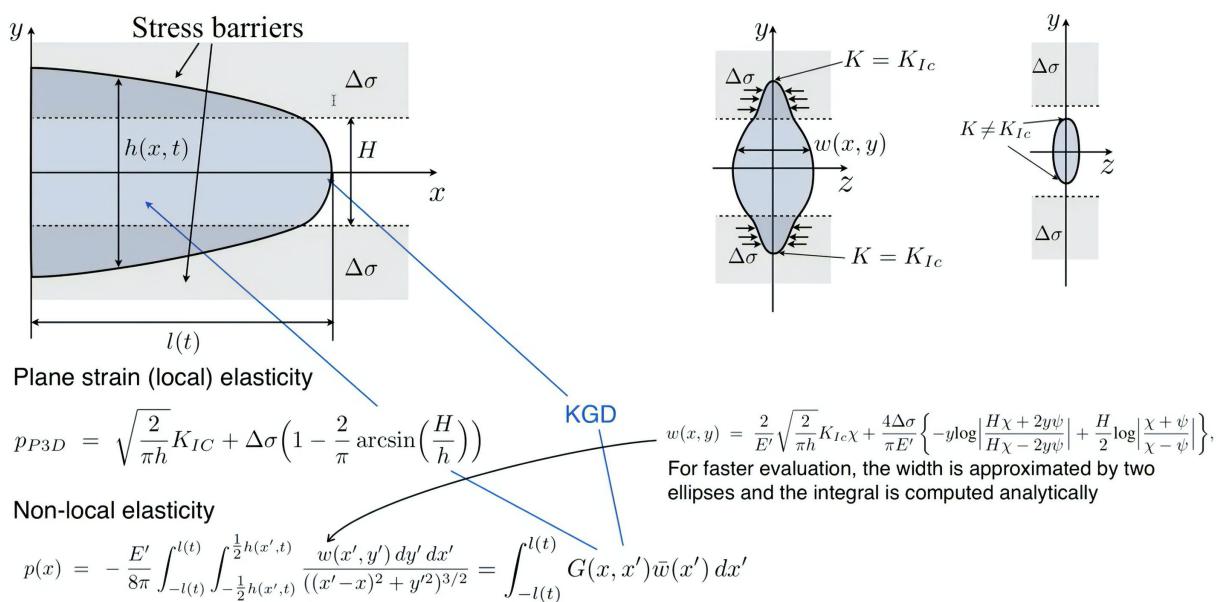


Volume balance $\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x, y)}} = Q_0(t)\delta(x, y),$	$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} + \frac{C'}{\sqrt{t-t_0(x)}} = \frac{Q_0}{H}\delta(x),$
Fluid flow $\mathbf{q} = -\frac{w^3}{\mu'} \nabla p,$	$\bar{q}_x = -\frac{1}{H\mu'} \frac{\partial p}{\partial x} \int_{-h/2}^{h/2} w^3 dy,$
Elasticity $p(x, y, t) = \sigma_0(y) - \frac{E'}{8\pi} \int_{A(t)} \frac{w(x', y', t) dx' dy'}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2]^{3/2}},$	$p(x) = \int_{-l(t)}^{l(t)} G(x, x') \bar{w}(x') dx'$
Propagation $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} = \begin{cases} \frac{K'}{E'}, & \text{if } V > 0, \\ \frac{K'_l}{E'}, & \text{if } V = 0. \end{cases}$	$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} = \frac{K'}{E'}$

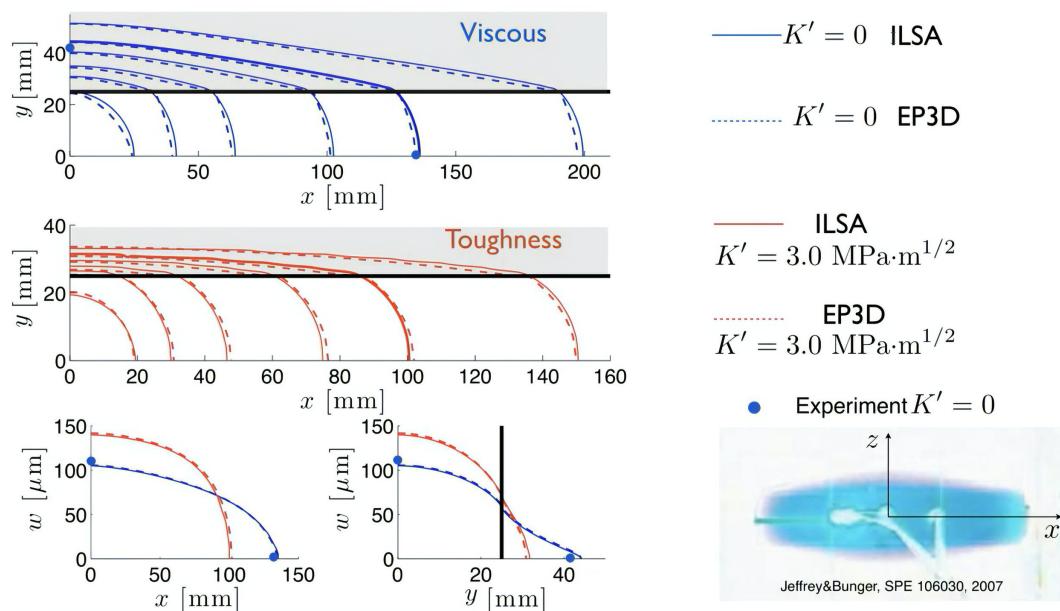
Width solution



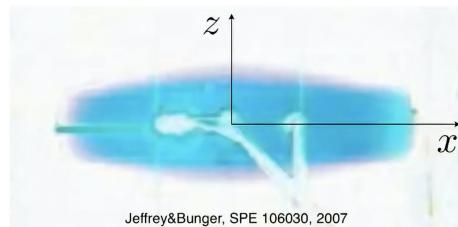
Non-local elasticity



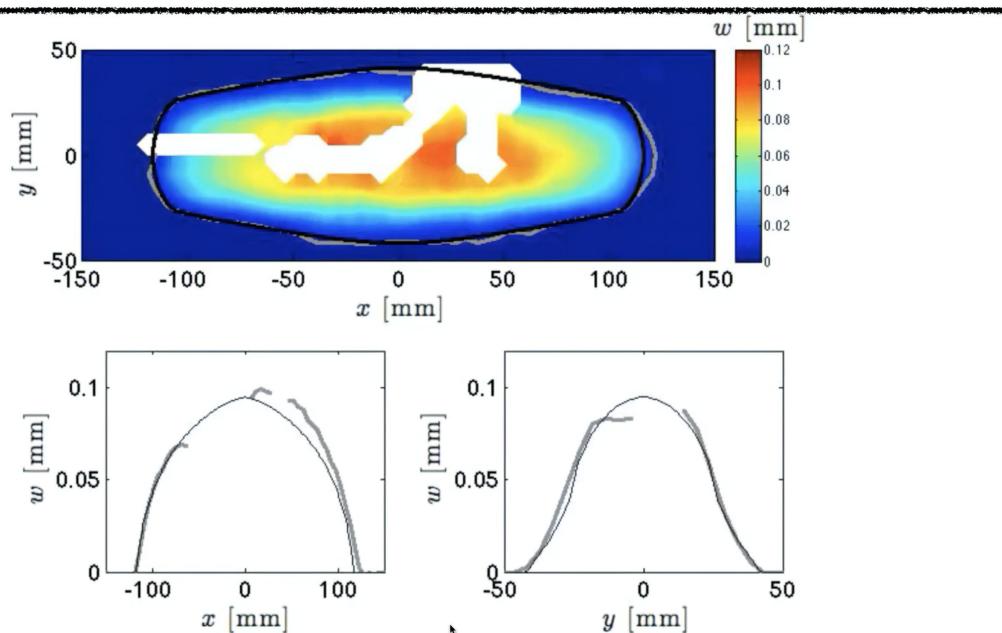
Enhanced P3D (EP3D) vs. ILSA



Comparison with experiment

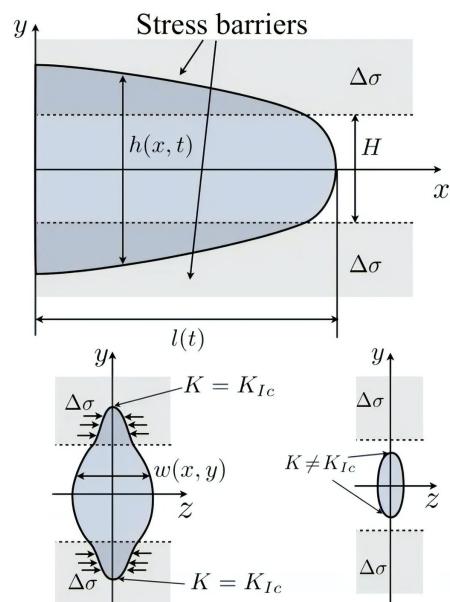
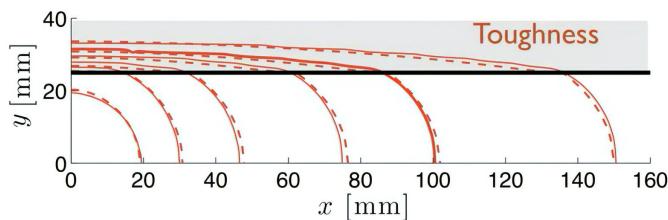


Comparison with experiment



Things to remember

- Assumptions of P3D model, including equilibrium height growth model, length \gg height, horizontal flux, constant pressure in each vertical cross-section, plane strain solution for width in each vertical cross-section
- Non-local elasticity and other corrections allow to significantly improve accuracy of the model
- There are extensions for asymmetric stress layers as well as multiple layers
- This model is suited more for numerical calculations, rather than analysis. However, analysis of the classical P3D model can be found in Adachi et. al, 2010.



5.2 Краткое повторение рассмотренных моделей

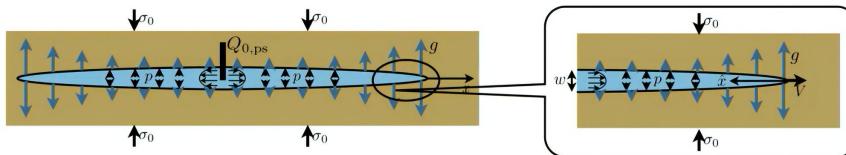
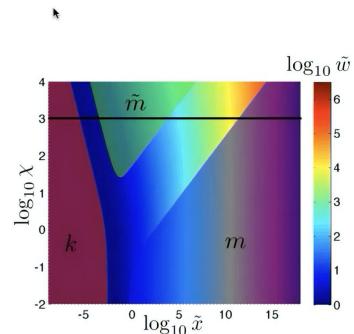
Recall main learnings: fundamentals and semi-infinite fracture

- Work towards a balanced life and invest in your knowledge!

An investment in knowledge pays the best interest.

-Benjamin Franklin

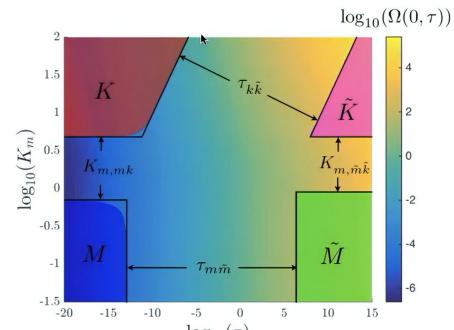
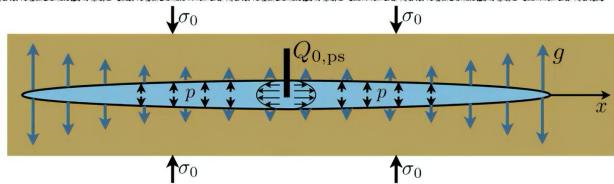
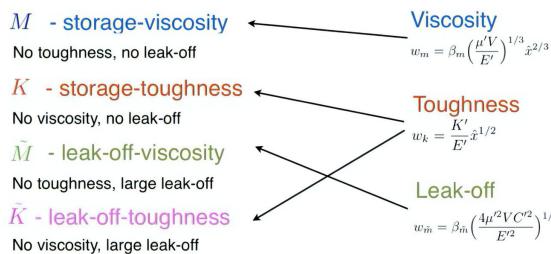
- Essential pieces of a hydraulic fracture model: volume balance, fluid flow, elasticity, propagation, proppant transport
- Derivation of the governing equations for planar and plane strain fracture geometries
- Semi-infinite hydraulic fracture as a model for the tip region
 - There are three limiting analytic solutions: toughness, viscosity, and leak-off
 - The global solution gradually transitions from one limiting case to another
 - There is computationally efficient approximate solution for the problem that can be used as a propagation condition for finite fractures



$$w \propto \hat{x}^{2/3} \quad w \propto \hat{x}^{5/8} \quad w \propto \hat{x}^{1/2}$$

Recall main learnings: plane strain fracture

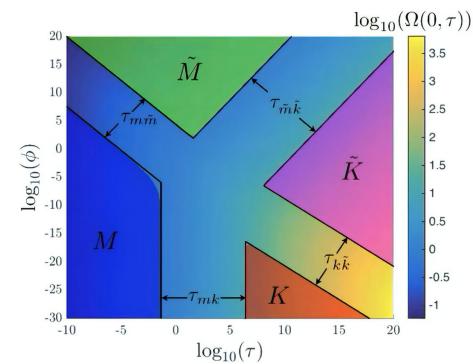
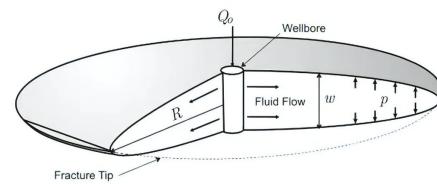
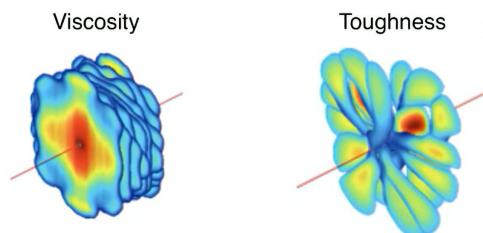
- Estimation of the solution based on scaling
- Definition of fracture regimes
- The relationship between the regimes for a finite fracture and tip asymptote
- The existence of approximate solution constructed using global volume balance and tip asymptote
- The existence of explicit expressions for limiting or vertex cases
- Parametric space for the problem, two dimensionless parameters, dimensionless toughness and dimensionless time



E.V. Dontsov. An approximate solution for a plane strain hydraulic fracture that accounts for fracture toughness, fluid viscosity, and leak-off. *Int. J. Fract.*, 205:221–237, 2017.

Recall main learnings: radial fracture

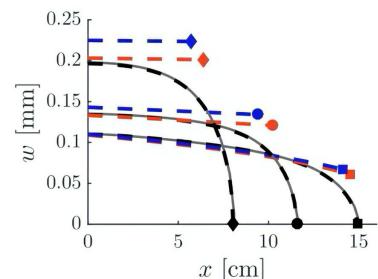
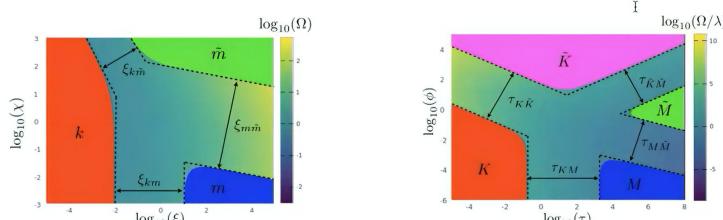
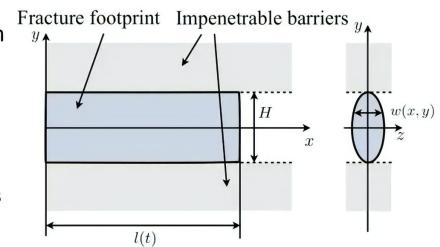
- Estimation of the solution based on scaling
- Definition of fracture regimes
- The relationship between the regimes for a finite fracture and tip asymptote (the same as for plane strain)
- The existence of approximate solution constructed using global volume balance and tip asymptote (similar to plane strain)
- The existence of explicit expressions for limiting or vertex cases
- Parametric space for the problem, two dimensionless parameters, dimensionless leak-off and dimensionless time
- Fracture regimes affect morphology of multiple hydraulic fractures



E.V. Dontsov. An approximate solution for a penny-shaped hydraulic fracture that accounts for fracture toughness, fluid viscosity, and leak-off. *R. Soc. open sci.*, 3:160737, 2016.

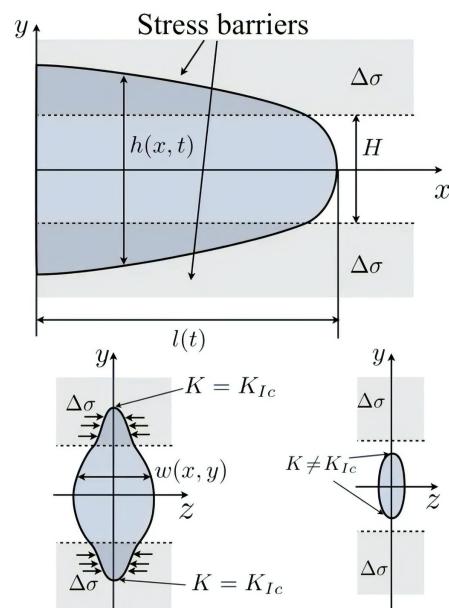
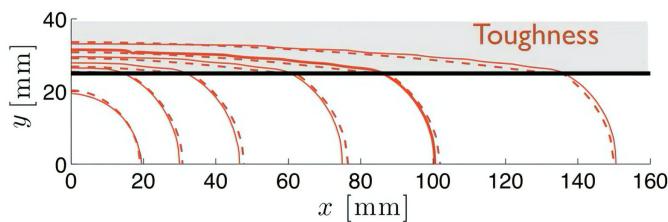
Recall main learnings: PKN fracture

- Assumptions of PKN model, including constant height, length \gg height, horizontal flux, constant pressure in each vertical cross-section, elliptical width in each vertical cross-section
- There are two approaches to solve the problem:
 - Use non-local elasticity, which is good for numerical scheme and leads to superior accuracy
 - Use local elasticity with a specific boundary condition at the tip, which is less accurate, but easier for analysis
- PKN fracture has its own formulation for the tip region, which is different from that for a semi-infinite plane strain fracture, approximate solution exists
- Parametric space for the finite fracture is evaluated
- Limiting vertex solutions exist, as well as the global approximate solution



Recall main learnings: pseudo-3D fracture

- Assumptions of P3D model, including equilibrium height growth model, length \gg height, horizontal flux, constant pressure in each vertical cross-section, plane strain solution for width in each vertical cross-section
- Non-local elasticity and other corrections allow to significantly improve accuracy of the model
- There are extensions for asymmetric stress layers as well as multiple layers
- This model is suited more for numerical calculations, rather than analysis. However, analysis of the classical P3D model can be found in Adachi et. al, 2010.



6 Лекция 02.04.2021 (Валов А.В.)

6.1 Модель Planar3D ILSA

6.1.1 Предположения модели

Предположения модели:

- 1) одна трещина (плоская);
- 2) среда однородна по E и ν ;
- 3) работаем в рамках линейно-упругой механики разрушения (ЛМР);
- 4) жидкость ньютоновская с вязкостью μ ;
- 5) утечки по Картеру, C_L ;
- 6) среда однородна по K_{Ic} и C_L ;
- 7) пренебрегаем силой тяжести;
- 8) отсутствует fluid lag.

6.1.2 Вспомогательные обозначения

Перед тем, как переходить к уравнениям, давайте введём вспомогательные обозначения:

$$\mu' = 12\mu, \quad E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad K' = 4 \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} K_{Ic}, \quad C' = 2C_L \quad (6.1)$$

(мы просто на основе входных параметров модели ввели некоторые обозначения, которые позволят нам записать уравнения чуть-чуть короче).

6.1.3 Основные уравнения

Теперь давайте переходить к уравнениям. У нас есть две составляющие: упругая среда, которая описывается неким уравнением упругости, и течение жидкости по трещине.

Упругость.

Упругость связывает давление жидкости в трещине и раскрытие этой трещины:

$$p(x, y, t) = \sigma_h(y) - \frac{E'}{8\pi} \int_{A(t)} \frac{w(x', y', t) dx' dy'}{[(x' - x)^2 + (y' - y)^2]^{3/2}} \quad (6.2)$$

Гидродинамика.

Уравнение для течения жидкости в трещине.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{q} = Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}}, \quad (6.3)$$

где \vec{q} – это поток жидкости по трещине; $Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0)$ – точечный источник потока; $t_0(x, y)$ – это время, при котором фронт трещины находился в точке (x, y) ; величина $(t - t_0)$ – это время экспозиции (смысл времени экспозиции в том, что жидкость начинает утекать из некоторой точки только тогда, когда фронт трещины до неё доедет).

Для потока \vec{q} выполняется закон Пуазейля:

$$\vec{q} = -\frac{w^3}{\mu'} \nabla p \quad (6.4)$$

(т.е. поток жидкости по трещине берём из аналитического решения уравнения Навье-Стокса для канала с фиксированной шириной w)

Подставляя (6.4) в (6.3), получаем уравнение Рейнольдса, которое описывает течение жидкости по трещине:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\frac{w^3}{\mu'} \nabla p\right) = Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}}, \quad (6.5)$$

Planar3D ILSA Model (Peirce, Dontsov, 2017)

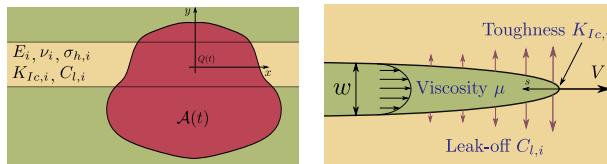


Figure 1 : Scheme of planar hydraulic fracture in layered medium.

Elasticity equation $p(x, y, t) = \sigma_h(y) - \int_{A(t)} w(x', y', t) G(x, y, x', y') dx' dy',$
 $G_{\text{homogeneous}}(x, y, x', y') = \frac{E'}{8\pi [(x' - x)^2 + (y' - y)^2]^{3/2}},$

Lubrication equation $\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{\mu'} \nabla \cdot (w^3 \nabla p) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}} + Q(t) \delta(x, y),$

Boundary conditions $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w}{s^{1/2}} = \frac{K'}{E'}, \quad \lim_{s \rightarrow 0} w^3 \frac{\partial p}{\partial s} = 0.$

6.1.4 Границные условия

Первое граничное условие следует из предположения, что мы работаем в рамках линейно-упругой механики разрушения:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{w(s)}{s^{1/2}} = \frac{K'}{E'} \quad (6.6)$$

(равносильно условию $K_I = K_{Ic}$)

Второе граничное условие – это условие нулевого потока на кончике трещины:

$$\vec{q} \cdot \vec{n} \rightarrow 0 \text{ при } s \rightarrow 0 \Leftrightarrow \lim_{s \rightarrow 0} \frac{w^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial s} = 0 \quad (6.7)$$

(условие отсутствия fluid lag)

Универсальное асимптотическое решение в окрестности фронта трещины

Сделаем небольшое лирическое отступление про линейные асимптотики. Зачем нам линейные асимптотики? У нас есть плоская трещина. Локально если рассмотреть некоторую окрестность фронта, то задача очень похожа на распространение одномерной полубесконечной трещины

с постоянной скоростью v . У этой задачи есть три предельных режима. Здесь наверное стоит начать с того, что в кончике трещины на самом деле есть 3 конкурирующих процесса.

Первый процесс (toughness) – это затрачивание энергии на образование новой поверхности трещины (т.е. чтобы образовать новую поверхность трещины, требуется выполнение критерия разрушения).

Второй процесс (leak-off) – это утекание жидкости из трещины.

Третий процесс (viscosity) – это вязкая диссипация жидкости по трещине (жидкость течёт с параболическим фронтом, есть трение, энергия затрачивается на то, чтобы протолкнуть эту жидкость по трещине).

Tip asymptotic solution

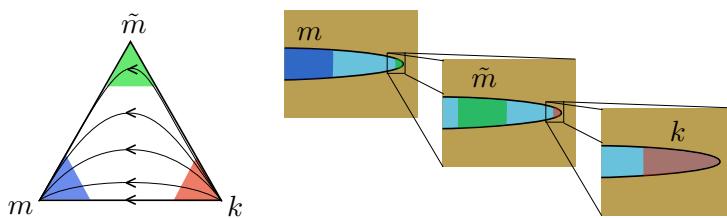


Figure 2 : Parametric triangle corresponding to the all asymptotic regimes: k is toughness dominated, \tilde{m} is leak-off dominated, m is viscosity dominated.

$$w_k = \frac{K'}{E'} s^{1/2}, \quad w_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \left(\frac{4\mu'^2 V C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} s^{5/8}, \quad w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' V}{E'} \right)^{1/3} s^{2/3}.$$

Если брать только один из этих эффектов, а двумя другими пренебрегать, то мы можем получить 3 предельных режима:

- доминирование разрушения породы

$$w_k = \frac{K'}{E'} s^{1/2} \tag{6.8}$$

- доминирование утечек

$$w_{\tilde{m}} = \beta_{\tilde{m}} \left(\frac{4\mu'^2 v C'^2}{E'^2} \right)^{1/8} s^{5/8} \tag{6.9}$$

- доминирование вязкости

$$w_m = \beta_m \left(\frac{\mu' v}{E'} \right)^{1/3} s^{2/3} \tag{6.10}$$

Для более точного моделирования было бы полезно учитывать не один из трёх режимов, а все 3 режима сразу (и переходные режимы между ними).

Всю задачу о полубесконечной трещине с учётом всех трёх эффектов можно приблизённо решить и получить универсальное асимптотическое решение:

$$\frac{s^2 v \mu'}{E' w^3} = g_\delta \left(\frac{K' s^{1/2}}{E' w}, \frac{2 s^{1/2} C'}{w v^{1/2}} \right) \tag{6.11}$$

(это приближённое решение, но оно в пределах одного процента или даже лучше совпадает с точным решением; исходная задача полубесконечной трещины представляет собой нелинейное интегральное уравнение на полубесконечной прямой, которое неизвестно, как решить несложными способами; однако получили, что приближённо решение задачи полубесконечной трещины можно свести к функциональной зависимости между w и s).

Введя следующие обозначения

$$\hat{S}(w, s) = \frac{s^2 v \mu'}{E' w^3} \quad \hat{K}(w, s) = \frac{K' s^{1/2}}{E' w} \quad \hat{C}(w, s) = \frac{2s^{1/2} C'}{w v^{1/2}} \quad (6.12)$$

перепишем универсальную асимптотику

$$\hat{S}(w, s) = g_\delta(\hat{K}(w, s), \hat{C}(w, s)) \quad (6.13)$$

Функция g_δ – это функция, у которой есть вполне определённый аналитический вид. Т.е. теперь нет необходимости решать дифференциальное или интегральное уравнение. Если мы знаем s , то можем его подставить и, решив нелинейное алгебраическое уравнение, найти w . Т.е. зная расстояние до фронта трещины, мы можем найти раскрытие. Или, зная раскрытие, можем найти расстояние до фронта трещины. Другими словами, в полученной асимптотике всегда предполагается, что нам известна одна из величин: или расстояние до фронта, или раскрытие трещины. И по одному из этих параметров находится другой параметр, например, с помощью метода Ньютона.

Полученная универсальная асимптотика верна только в случае $v > 0$ (трещина куда-то постоянно едет, т.е. выполняется критерий разрушения $K_I = K_{Ic}$). Если же трещина остановилась, то критерий разрушения не выполняется (т.е. $K_I < K_{Ic}$) и вместо универсальной асимптотики рассматривают toughness асимптотику:

$$w = \frac{K'_I}{\mu'} s^{1/2} \quad (6.14)$$

(методы расчёта коэффициента K'_I – это отдельная кухня).

Таким образом, важно понимать, что универсальная асимптотика верна только для случая, когда выполнен критерий разрушения.

Зачем вспомнили при универсальную асимптотику? Если мы локально рассмотрим кусочек трещины вблизи фронта, то там трещина движется одномерно с постоянной скоростью, а для этого случая у нас есть приближённое решение, которое близко к точному.

Вблизи кончика трещины самые большие градиенты, т.е. если мы разрабатываем численный метод для решения задачи, то особое внимание необходимо уделить кончику трещины, потому что там самые большие градиенты, а значит самые большие ошибки.

Идея заключается в следующем: хотим в окрестности кончика трещины найти аналитическое решение (оно у нас есть) и сказать, что в окрестности фронта трещины раскрытие должно равняться некоторому аналитическому раскрытию.

Т.е. условно мы в кончике трещины задачу решаем практически точно, а когда мы отдаляемся от кончика трещины, то там градиенты искомых функций меньше и ошибка численного алгоритма

будет меньше.

Мы пытаемся с помощью универсальной асимптотики практически точно решить задачу в окрестности фронта, тем самым уменьшив численную ошибку будущего алгоритма.

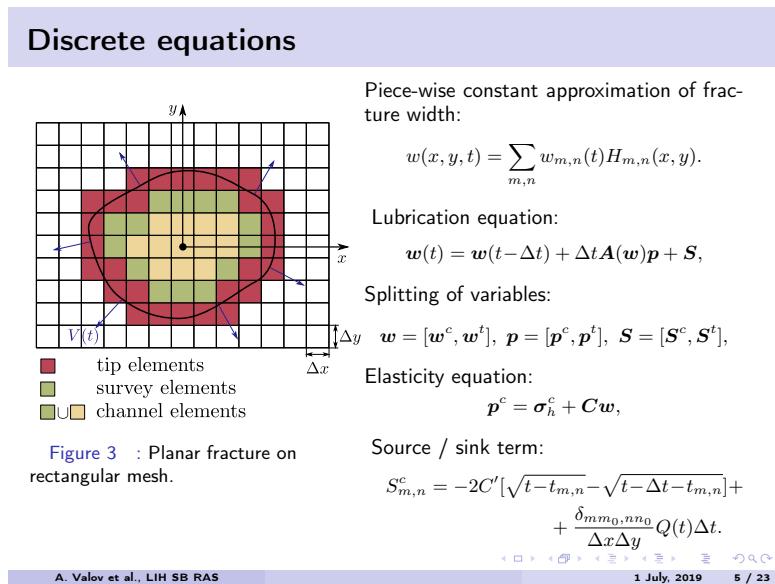
При этом эта универсальная асимптотика покрывает условие $K_I = K_{Ic}$, которое было изначально (т.е. мы не теряем это условие).

Итак, мы выписали уравнения, граничные условия, вспомнили асимптотики и решили использовать универсальную асимптотику в окрестности фронта в качестве точного решения, т.е. первое граничное условие перепишем в виде:

$$w(s) \sim w_a(s) \text{ при } s \rightarrow 0 \quad (6.15)$$

6.1.5 Дискретизация области моделирования. Классификация элементов

В принципе мы всё обсудили для того, чтобы начать разрабатывать численный алгоритм. Давайте к нему и перейдём. Для того, чтобы записать численный алгоритм, сначала нужно разобраться с областью моделирования.



Есть плоскость, которую мы покрываем прямоугольными элементами (с шириной dx и с высотой dy). Есть фронт трещины, который распространяется со скоростью v , и эта скорость локально в каждом участке фронта различная (каждый участок фронта едет со своей скоростью). Рассматриваемая трещина покрывает собой некоторый набор прямоугольных элементов. Эти элементы удобно будет разделить на 3 категории:

- 1) концевые элементы (пересекаются контуром трещины и частично заполнены жидкостью);
- 2) внутренние элементы (находятся внутри трещины и полностью заполнены жидкостью);
- 3) опорные элементы (тоже являются внутренними элементами, но дополнительно граничат с концевыми элементами).

6.1.6 Дискретизация уравнений

Итак, есть плоскость с сеткой, теперь необходимо заняться дискретизацией искомых функций. У нас две искомые функции:

1) раскрытие трещины $w(x, y, t)$, которое мы будем аппроксимировать кусочно-постоянно, т.е.

$$w(x, y, t) = \sum_{m,n} w_{m,n}(t) H_{m,n}(x, y), \quad (6.16)$$

где

$$H_{i,j}(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in A_{i,j} \\ 0, & (x, y) \notin A_{i,j} \end{cases} \quad (6.17)$$

2) давление $p(x, y, t)$, которое аналогично будем аппроксимировать кусочно-постоянно.

Дискретизация уравнения упругости

Подставляя кусочно-постоянную аппроксимацию раскрытия w в уравнение упругости, получаем:

$$p_{i,j}(t) = \sigma_{h_{i,j}} + \sum_{k,l} C_{i,j,k,l} w_{k,l}(t), \quad (6.18)$$

где

$$C_{i,j,k,l} = -\frac{E'}{8\pi} \left[\frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2}}{(x_i - x)(y_j - y)} \right]_{x=x_k - \frac{\Delta x}{2}, y=y_l - \frac{\Delta y}{2}}^{x=x_k + \frac{\Delta x}{2}, y=y_l + \frac{\Delta y}{2}} \quad (6.19)$$

Здесь использовали обозначение квадратных скобок с индексами:

$$[f]_{x=x_1, y=y_1}^{x=x_2, y=y_2} = f(x_1, y_1) + f(x_2, y_2) - f(x_1, y_2) - f(x_2, y_1) \quad (6.20)$$

$C_{i,j,k,l}$ – это матрица упругости (характеризует упругое влияние элемента с индексами (k, l) на элемент с индексами (i, j)).

Заметим, что матрица упругости зависит только от входных параметров (от свойств пластина) и выбранной сетки, т.е. эту матрицу требуется посчитать только один раз (нет необходимости пересчитывать её в процессе расчёта).

Дискретизация уравнения Рейнольдса

Далее обсудим более сложную часть, а именно дискретизацию уравнений Рейнольдса. Поскольку уравнение Рейнольдса изначально появилось из закона сохранения массы, то нам нужно его аппроксимировать таким образом, чтобы масса сохранялась (т.е. нам нужна консервативная численная схема интегрирования).

Постепенно будем выводить консервативную схему.

Уравнение Рейнольдса:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\frac{w^3}{\mu'} \nabla p\right) = Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}}, \quad (6.21)$$

Проинтегрируем уравнение Рейнольдса от $t - \Delta t$ до t (т.е. возьмём 1 шаг по времени и по этому шагу по времени просто проинтегрируем уравнение):

$$\underbrace{\int_{t-\Delta t}^t \frac{\partial w}{\partial \tau} d\tau}_{\text{интегрируем точно}} - \underbrace{\int_{t-\Delta t}^t \operatorname{div}\left(\frac{w^3}{\mu'} \nabla p\right) d\tau}_{\substack{\text{интегрируем приближённо} \\ \text{по формуле правых} \\ \text{прямоугольников}}} = \underbrace{\int_{t-\Delta t}^t \varphi(\tau) d\tau}_{\text{не трогаем}}, \quad (6.22)$$

где

$$\varphi(t) = Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}} \quad (6.23)$$

Для интегрирования дивергенции используем именно формулу правых прямоугольников (а, например, не формулу Симпсона), чтобы итоговая численная схема была проще. При использовании формулы Симпсона не факт, что схема будет устойчива.

Воспользовавшись формулой Ньютона-Лейбница и формулой правых прямоугольников, получаем:

$$w(t) - w(t - \Delta t) - \Delta t \left[\operatorname{div}\left(\frac{w^3}{\mu'} \nabla p\right) \right]_t = \int_{t-\Delta t}^t \varphi(\tau) d\tau \quad (6.24)$$

7 Лекция 08.04.2021 (Валов А.В.)

7.1 Модель Planar3D ILSA: дискретизация, поиск фронта, алгоритм

Продолжаем разрабатывать численный алгоритм для модели Planar3D ILSA.

7.1.1 Дискретизация уравнений. Продолжение

В прошлый раз остановились на дискретизации уравнения Рейнольдса. А именно проинтегрировали его по одному шагу по времени и, воспользовавшись формулой Ньютона-Лейбница и формулой правых прямоугольников, получили:

$$w(t) - w(t - \Delta t) - \Delta t \left[\operatorname{div} \left(\frac{w^3}{\mu'} \nabla p \right) \right]_t = \int_{t-\Delta t}^t \varphi(\tau) d\tau \quad (7.1)$$

Дискретизация уравнения Рейнольдса. Продолжение

Далее проинтегрируем полученное уравнение по элементам. Запишем:

$$\int_{A_{i,j}} (w(t) - w(t - \Delta t)) dA - \Delta t \left[\int_{A_{i,j}} \operatorname{div} \left(\frac{w^3}{\mu'} \nabla p \right) dA \right]_t = \int_{t-\Delta t}^t \psi(\tau) d\tau, \quad (7.2)$$

где

$$\psi(t) = \int_{A_{i,j}} \left(Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}} \right) dA \quad (7.3)$$

Вспомним теорему Гаусса-Остроградского

$$\int_V \operatorname{div} \vec{f} dV = \int_{\partial V} \vec{f} \cdot \vec{n} ds$$

и перепишем уравнение (7.2) в следующем виде:

$$\int_{A_{i,j}} (w(t) - w(t - \Delta t)) dA - \Delta t \left[\int_{C_{i,j}} \frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} dC \right]_t = \int_{t-\Delta t}^t \psi(\tau) d\tau \quad (7.4)$$

Здесь дополнительно воспользовались равенством: $\nabla p \cdot \vec{n} = \frac{\partial p}{\partial \vec{n}}$.

С полученным уравнением (7.4) уже можно работать.

Напомню, что раскрытие трещины $w(x, y, t)$ аппроксимируем кусочно-постоянно:

$$w(x, y, t) = \sum_{m,n} w_{m,n}(t) H_{m,n}(x, y), \quad (7.5)$$

где

$$H_{i,j}(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in A_{i,j} \\ 0, & (x, y) \notin A_{i,j} \end{cases} \quad (7.6)$$

После подстановки кусочно-постоянного раскрытия w слагаемые в уравнении (7.4) перепишутся в следующем виде:

$$\int_{A_{i,j}} (w(t) - w(t - \Delta t)) dA = (w_{i,j}(t) - w_{i,j}(t - \Delta t)) \Delta x \Delta y \quad (7.7)$$

(т.к. раскрытие кусочно-постоянно);

$$\begin{aligned} \int_{t-\Delta t}^t \psi(\tau) d\tau &= \int_{A_{i,j}} \int_{t-\Delta t}^t \left(Q_0(t) \delta(x - x_0, y - y_0) - \frac{C'}{\sqrt{t - t_0(x, y)}} \right) d\tau dA \approx \\ &\approx \Delta x \Delta y \Delta t [Q_{i,j}]_t - 2C' \Delta x \Delta y \left(\sqrt{t - t_{0,i,j}} - \sqrt{t - \Delta t - t_{0,i,j}} \right) \end{aligned} \quad (7.8)$$

(здесь воспользовались формулой средних прямоугольников при интегрировании по ячейке и формулой правых прямоугольников при интегрировании по временному шагу; полученная формула верна только для внутренних элементов, так как при использовании формулы средних прямоугольников берём значение функции только в центре элемента; для концевых элементов выведем формулу позже);

$$\begin{aligned} \int_{C_{i,j}} \frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} dC &= \int_{C_{i,j}^{\text{right}}} \frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} dC + \int_{C_{i,j}^{\text{left}}} \frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} dC + \int_{C_{i,j}^{\text{top}}} \frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} dC + \int_{C_{i,j}^{\text{bot}}} \frac{w^3}{\mu'} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} dC \approx \\ &\approx \underbrace{\frac{w_{i+1,j}^3 + w_{i,j}^3}{2\mu'}}_{\text{обозначим за } M_{i+\frac{1}{2},j}} \frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} \Delta y - \underbrace{\frac{w_{i,j}^3 + w_{i-1,j}^3}{2\mu'}}_{\text{обозначим за } M_{i-\frac{1}{2},j}} \frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\Delta x} \Delta y + \\ &+ \underbrace{\frac{w_{i,j+1}^3 + w_{i,j}^3}{2\mu'}}_{\text{обозначим за } M_{i,j+\frac{1}{2}}} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta y} - \underbrace{\frac{w_{i,j}^3 + w_{i,j-1}^3}{2\mu'}}_{\text{обозначим за } M_{i,j-\frac{1}{2}}} \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta y} \Delta x = \\ &= \left(M_{i+\frac{1}{2},j} \frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} - M_{i-\frac{1}{2},j} \frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\Delta x} \right) \Delta y + \\ &+ \left(M_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta y} - M_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta y} \right) \Delta x \end{aligned} \quad (7.9)$$

(идея здесь такая: разбиваем интеграл по границе на сумму интегралов по кусочкам границы; аппроксимируем подынтегральную функцию на каждом кусочке и считаем интеграл). Таким образом, уравнение (7.4) перепишется в следующем виде:

$$(w_{i,j}(t) - w_{i,j}(t - \Delta t)) \Delta x \Delta y = \Delta x \Delta y \Delta t [Ap]_{i,j} + \Delta x \Delta y \Delta t Q_{i,j} - \Delta x \Delta y \Delta L_{i,j}, \quad (7.10)$$

где

$$\begin{aligned} [Ap]_{i,j} = & \frac{1}{\Delta x} \left[M_{i+\frac{1}{2},j} \frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} - M_{i-\frac{1}{2},j} \frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\Delta x} \right] + \\ & + \frac{1}{\Delta y} \left[M_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta y} - M_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta y} \right] \end{aligned} \quad (7.11)$$

Вспомним, что у нас есть дополнительное граничное условие нулевого потока на границе трещины:

$$\vec{q} \cdot \vec{n} \underset{s \rightarrow 0}{=} 0 \quad (7.12)$$

Чтобы удовлетворить этому условию нулевого потока на границе, необходимо занулить потоки через внешние границы концевых элементов.

Лирическое отступление. В интернете есть [оригинальная лекция](#) Энтони Пирса (Anthony Peirce). Можете ради интереса посмотреть её. Там есть некоторые нюансы, которые мы сегодня опустили: например, метод микроскопа. Изначально модель была придумана не с универсальной асимптотикой. Если проследить эволюцию статей, то можно посмотреть, как развивалась мысль.

Итак, на текущий момент мы разобрались с уравнением упругости (его мы просто взяли и проинтегрировали), разобрались с уравнением Рейнольдса (выписали схему конечных объёмов). Теперь необходимо разобраться, зачем мы делили элементы на внутренние, опорные и концевые.

7.1.2 Зачем вводили классификацию элементов?

У нас есть граничное условие: $w \underset{s \rightarrow 0}{\sim} w_a(s)$. Мы будем его использовать, чтобы определять положение фронта и раскрытие в концевых элементах.

Locating the fracture front using the level set algorithm

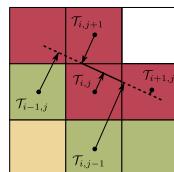


Figure 4 : Defining location of the moving piecewise linear fracture front.

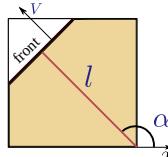


Figure 5 : Governing parameters of tip element.

Determining the distance to the front from centers of survey elements using the universal asymptotic solution:

$$\frac{s_i^2 V_i \mu'}{E'(w_i^s)^3} = g_\delta \left(\frac{K' s_i^{1/2}}{E' w_i^s}, \frac{2 s_i^{1/2} C'}{w_i^s V_i^{1/2}} \right), \quad V_i = \frac{s_i - s_{i,0}}{\Delta t}$$

Boundary conditions:

$$\mathcal{T}(x_i, y_i) = -s_i$$

Eikonal equation:

$$|\nabla \mathcal{T}| = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial y}\right)^2} = 1$$

Upwind scheme for Eikonal equation:

$$\max \left(\frac{\mathcal{T}_{i,j} - \mathcal{T}_{i-1,j}}{\Delta x}, \frac{\mathcal{T}_{i,j} - \mathcal{T}_{i+1,j}}{\Delta x}, 0 \right)^2 + \max \left(\frac{\mathcal{T}_{i,j} - \mathcal{T}_{i,j-1}}{\Delta y}, \frac{\mathcal{T}_{i,j} - \mathcal{T}_{i,j+1}}{\Delta y}, 0 \right)^2 = 1$$

A. Valov et al., LIH SB RAS

1 July, 2019

6 / 23

Tip volume calculation

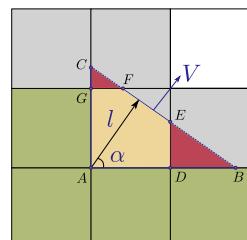


Figure 6 : Schematics of the procedure for tip volume calculation.

The fluid volume in ADEFG:

$$\mathcal{V}_{ADEFG} = \mathcal{V}_{ABC} - \mathcal{H}(\ell - \Delta y \sin \alpha) \mathcal{V}_{GFC} - \mathcal{H}(\ell - \Delta x \cos \alpha) \mathcal{V}_{DBE}$$

Fluid volume in a single triangle:

$$\mathcal{V}_\Delta(\ell) \equiv \int_0^\ell \frac{sw_a(\ell-s)}{\sin \alpha \cos \alpha} ds = \frac{\ell M_0(\ell) - M_1(\ell)}{\sin \alpha \cos \alpha}$$

Moments M_0 and M_1 :

$$M_0(\ell) = \int_0^\ell w_a(s) ds = \frac{2w_a(\ell)\ell}{3+\delta},$$

$$M_1(\ell) = \int_0^\ell w_a(s)s ds = \frac{2w_a(\ell)\ell^2}{5+\delta}$$

The average fracture width:

$$w^t = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \begin{cases} \mathcal{V}_\Delta(\ell) - \mathcal{H}(\ell - \Delta y \sin \alpha) \mathcal{V}_\Delta(\ell - \Delta y \sin \alpha) \\ \quad - \mathcal{H}(\ell - \Delta x \cos \alpha) \mathcal{V}_\Delta(\ell - \Delta x \cos \alpha), & \alpha \neq 0, \pi/2, \\ \Delta y M_0(\ell), & \alpha = 0, \\ \Delta x M_0(\ell), & \alpha = \pi/2. \end{cases}$$

A. Valov et al., LIH SB RAS

1 July, 2019

7 / 23

8 Лекция 13.04.2021 (Байкин А.Н.)

8.1 Модель Planar3D Biot: постановка задачи, перенос граничных условий

Как может проявляться так называемый пороупругий эффект? ...

9 Лекция 20.04.2021 (Байкин А.Н.)

9.1 Модель Planar3D Biot: слабая постановка, штраф, пороупругие эффекты

10 Лекция 27.04.2021 (Байкин А.Н.)

10.1 Перенос проппанта: постановка задачи, обезразмеривание, оседание

11 Лекция 30.04.2021 (Байкин А.Н.)

11.1 Перенос проппанта: осреднение, численный алгоритм, бриджинг

12 Лекция 11.05.2021 (Байкин А.Н.)

12.1 Моделирование течения жидкости в скважине

Мы с вами движемся дальше. Сегодня у нас будет тема про моделирование скважин. Т.е. до этого мы рассматривали преимущественно именно процессы в самой трещине, процессы в окружающем пласте (такие как утечки или деформация породы), а закачка всегда предполагалась на забое скважины (расход задавался на входе в саму трещину). Но вообще говоря у нас с вами есть скважины и то давление на входе в трещину, которое мы получаем в расчётах, не совпадает с давлением, которое мы получаем при измерении какими-то приборами (как на поверхности, так и когда мы опускаем датчик давления вниз к забою).

12.1.1 Зачем моделировать скважину?



Зачем нам необходимо моделировать скважину?

Во-первых, чтобы знать, какое давление на забое скважины и как оно соотносится с давлением на устье скважины. Почему это важно? С одной стороны, можно было бы сказать: давайте поставим датчик давления на забое и всё будет классно, но этот датчик давления будет стоять не на самой трещине (т.е. между датчиком и трещиной будет либо участок трубы, либо как минимум участки перфорации, вдоль которых возникает падение давления из-за трения; в итоге, измеряемое давление ВНР будет немного выше, чем давление на входе в трещину). Датчик забойного давления ВНР (забойный манометр) практически никогда не ставят, потому что это дорого; обычно мы знаем только давление на устье ВНР.

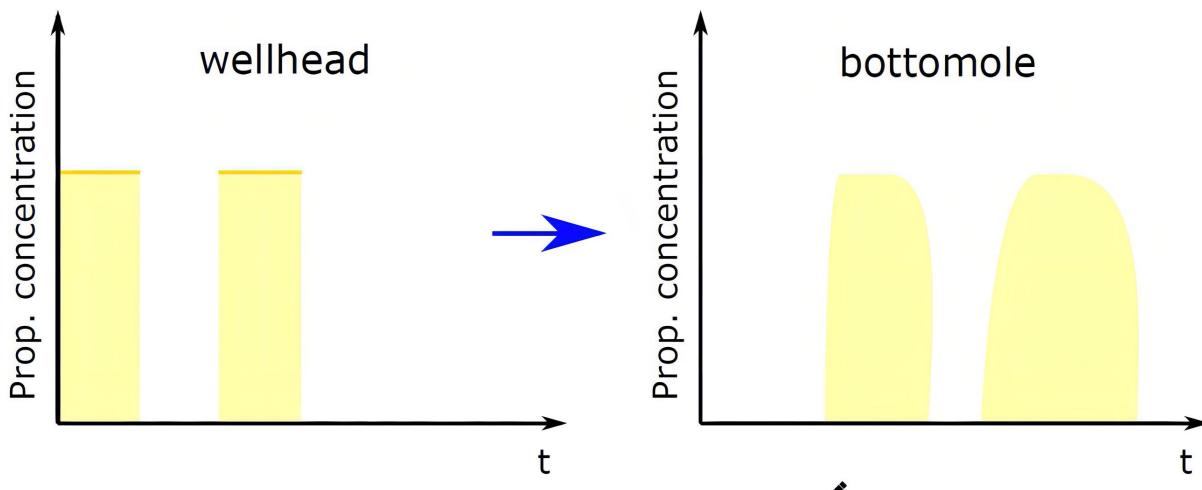
Чтобы осуществить пересчёт ВНР через известное ВНР нам необходимо учсть падение давления за счёт трения жидкости при движении по трубе и гидростатическое давление. Т.е. получа-

ем, что за счёт трения давление на забое снижается (относительно WHP), а за счёт гидростатики давление на забое увеличивается (относительно WHP).

Кроме того, скважину интересно моделировать, чтобы объяснить наблюдаемый hammer effect: при резком закрытии скважины наблюдаются колебательные движения жидкости между скважиной и трещиной, которые имеют форму затухающих колебаний. И по этим затухающим колебаниям пытаются проводить диагностику. Как минимум говорят, что если есть hammer effect, то связь между скважиной и трещиной достаточно хорошая (т.е. перфорацию сделали достаточно качественно). Дальше по hammer эффекту пытаются оценить размеры трещины (ширину, длину).

Ещё дальше пытаются понять, какой порт заработал (если есть несколько портов) – правда это уже немного другая технология, которая называется tube waves от компании Schlumberger.

Зачем моделировать скважину?



Для чего ещё моделировать скважину?

Если мы запустили пульсы проппанта (с определённой концентрацией) наверху (на устье), то никто не говорит, что они в таком же первозданном виде дойдут до забоя. Вообще говоря, они могут размазаться.

Сегодня мы размазывание не будем рассматривать, потому что для этого нужна двухскоростная модель, а сегодня мы рассмотрим только односкоростную модель. Но вообще говоря из-за того, что у нас есть профиль скорости, частички проппанта будут собираться (проваливаться) к центру.

Также может происходить оседание проппанта. В принципе всё, что происходило с проппантом в трещине (например, оседание), верно и для скважины.

Размазывание концентрации проппанта важно моделировать, чтобы понимать, какое значение концентрации будет на входе в трещину.

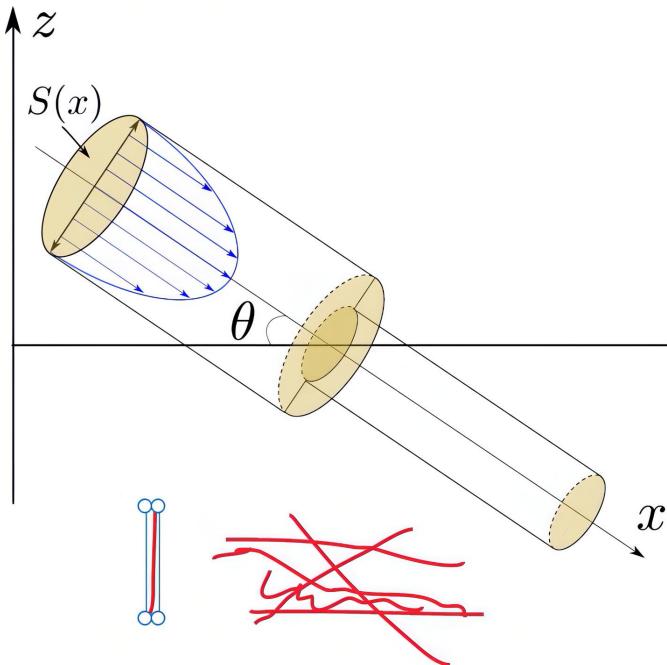
Замечание аудитории. Слышали, что при движении по круглой трубе частички проппанта будут

собираясь в кольцо на расстоянии 0.6 радиуса от центра. Говорят, что это связано с тем, что сами частички проппанта могут крутиться вокруг своей оси.

Сегодня рассмотрим модель попроще, чтобы вы поняли общую схему, а дальше уже можно придумывать более сложные модели (главное понять, какой эффект хочется описать).

12.1.2 Предположения модели

Предположения



- ▶ Наклонная скважина, переменного радиуса R
- ▶ Односкоростная модель $\vec{u}_p = \vec{u}_f = \vec{u}_m$
- ▶ Жидкость степенная
- ▶ Течение не расслаивается
- ▶ Ламинарный, переходный, турбулентный режимы
- ▶ Сжимаемостью пренебрегаем

Теперь давайте приступим к самой модели.

Основные предположения модели:

- 1) наклонная скважина переменного радиуса R (на рисунке я специально нарисовал 2 цилиндра, т.к. скважина, вообще говоря, может иметь переменное сечение, но в реальности оно обычно кусочно постоянное: берут кусок трубы одного диаметра засовывают, дальше другого диаметра, дальше обсадная колонна и так далее);
- 2) односкоростная модель $\vec{u}_p = \vec{u}_f = \vec{u}_m$ (жидкость и проппант движутся с одинаковой скоростью и эта скорость равна усреднённой скорости, формула для которой была в прошлый раз) – это оправдано, когда жидкость достаточно вязкая и частицы проппанта как-бы заморожены в жидкость;
- 3) жидкость неньютоновская (т.е. жидкость со степенной реологией);
- 4) течение не расслаивается (не может быть такого, что где-то на горизонтальном участке проппант внизу пошёл (полностью осел) и течение расслоилось);
- 5) ламинарный, переходный, турбулентный режимы;
- 6) сжимаемостью жидкости пренебрегаем.

12.1.3 Определяющие уравнения

Определяющие уравнения

Законы сохранения объема жидкости и проппанта:

$$\frac{\partial(cS(x))}{\partial t} + \frac{\partial(cS(x)u_p)}{\partial x} = 0, \quad c_p \equiv c \quad (1)$$

$$\frac{\partial((1-c)S(x))}{\partial t} + \frac{\partial((1-c)S(x)u_f)}{\partial x} = 0, \quad c_f \equiv 1 - c \quad (2)$$

Односкоростная модель $u_p = u_f = u_m$, где u_m — среднеобъемная усредненная скорость смеси по сечению $S(x)$

$$\frac{\partial(S(x)u_m)}{\partial x} = \frac{\partial(Q(t, x))}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$Q(t, x) = Su_m = \underline{const}(t) = Q_{inlet}(t), \quad S = \pi R^2 \quad (4)$$

Границное условие на устье



$$c|_{x=0} = c_{inlet}(t). \quad (5)$$

Что нам нужно, чтобы описать течение рассматриваемой жидкости?

1) Закон сохранения объема проппанта:

$$\frac{\partial(cS(x))}{\partial t} + \frac{\partial(cS(x)u_p)}{\partial x} = 0, \quad c_p \equiv c \quad (12.1)$$

2) Закон сохранения объема жидкости:

$$\frac{\partial((1-c)S(x))}{\partial t} + \frac{\partial((1-c)S(x)u_f)}{\partial x} = 0, \quad c_f \equiv 1 - c \quad (12.2)$$

Уравнения (12.1) и (12.2) уже усредненные по сечению скважины, но они выводятся точно также, как и для течения проппанта в трещине (только сейчас вместо раскрытия трещины $w(x)$ используем площадь сечения $S(x)$ и сейчас нет утечек).

Далее используя предположение односкоростной модели $u_p = u_f = u_m$, где u_m — среднеобъемная усредненная скорость смеси по сечению $S(x)$, складываем уравнения (12.1) и (12.2) (дополнительно учтём, что производная площади сечения по времени равна нулю):

$$\frac{\partial(S(x)u_m)}{\partial x} = \frac{\partial(Q(t, x))}{\partial x} = 0, \quad (12.3)$$

где $Q(t, x) = Su_m = \underline{const}(t) = Q_{inlet}(t)$, $S = \pi R^2$.

Полученное уравнение говорит нам о том, что расход через любое поперечное сечение скважины одинаков (нет зависимости расхода от координаты x) и зависит от расхода, закачиваемого в скважину сверху. Если изменяется сечение скважины, то соответственно изменяется скорость течения так, чтобы расход оставался прежним.

3) Граничное условие (на концентрацию проппанта) на устье скважины:

$$c|_{x=0} = c_{inlet}(t) \quad (12.4)$$

Если проводить аналогию с течением проппанта в трещине, то уравнение (12.3) аналогично эллиптическому уравнению, в котором необходимо было искать давление.

В итоге: мы знаем расход $Q_{inlet}(t)$; знаем площадь $S(x)$; можем найти скорость $u_m(x, t)$; как только знаем скорость, мы можем подставить её в уравнение (12.1), решить это уравнение и с учётом граничного условия (12.4) найти концентрацию проппанта.

При решении данной задачи можно использовать тот же алгоритм, что и для переноса проппанта в трещине, т.е. взять одномерную разностную схему (например, Лакса-Вендроффа с лимитерами), но я хотел бы ещё показать другой численный алгоритм. В данном случае, когда рассматриваем односкоростную модель, этот алгоритм проще, намного быстрее и точнее.

12.1.4 Численный алгоритм

Численный алгоритма

Упр. Доказать, что уравнение переноса для проппанта можно переписать в виде

$$\boxed{\frac{\partial c}{\partial t} + u_m \frac{\partial c}{\partial x} = 0.} \quad (6)$$

Разобьем суммарное время закачки на $k - 1$ временных интервалов

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}, \quad t_0 = 0. \quad (7)$$

F_k значение величины F в момент времени t_k .

В лагранжевых координатах (t, X) на интервале $[t_k, t_{k+1}]$ имеем решение вида



$$c(t, X(t)) = c(t, X|_{t=t_k}), \quad \underline{X(t) = X|_{t=t_k} + \int_{t_k}^t u_m(X(s))ds}. \quad (8)$$

Можно показать, что в случае односкоростной модели уравнение (12.1) для переноса проппанта можно переписать в более простом виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_m \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (12.5)$$

(уравнение (12.1) – это закон сохранения в дивергентной форме; а уравнение (12.5) – это классическое уравнение переноса, которое всем известно с урматов).

Физический смысл уравнения (12.5): концентрация c неизменно переносится векторным полем

\vec{u} (в данном случае со скоростью u_m вдоль скважины).

Опять же мы здесь должны сделать (ввести) дискретизацию по времени. Разобьём суммарное время закачки на $k - 1$ временных интервалов:

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}, \quad t_0 = 0 \quad (12.6)$$

Введём вспомогательное обозначение: F_k – это значение величины F в момент времени t_k .

В Лагранжевых координатах (t, X) на интервале $[t_k, t_{k+1}]$ имеем решение вида:

$$c(t, X(t)) = c(t, X|_{t=t_k}), \quad X(t) = X|_{t=t_k} + \int_{t_k}^t u_m(X(s))ds \quad (12.7)$$

Грубо говоря, мы в начале трубы выпускаем некоторую лагранжеву частицу со скоростью u_m , и формула (12.7) говорит нам, что эта частица через время t дойдёт до положения с координатой X . И соответственно, если c на входе будет постоянным, то концентрация за рассматриваемое время тоже не изменится.

Численный алгоритма

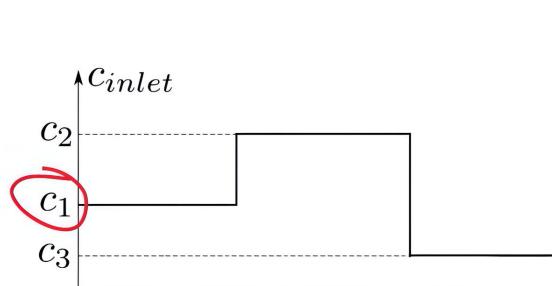


Figure: Кусочно-постоянное по времени граничное условие на концентрацию пропанта

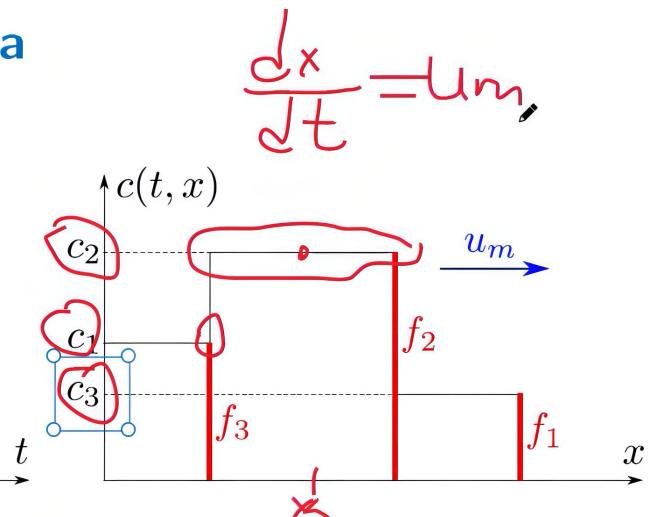


Figure: Фронты концентрации пропанта, распространяющиеся в скважине

Соответственно мы можем рассматривать весь этот процесс в виде набора фронтов концентрации. За каждый новый шаг по времени мы выпускаем новый фронт, далее он движется по трубе и мы фиксируем кусочно постоянный уровень концентрации пропанта на каком-то участке скважины.

Чтобы перейти в Эйлерову сетку в точке x , мы просто смотрим между какими фронтами эта точка x лежит и говорим, что концентрация равна этому значению.

Здесь (для односкоростной модели) всё достаточно просто и можно обойтись решением обычных дифференциальных уравнений для концентрации пропанта.

Численный алгоритма

$$\varepsilon = \frac{2R}{L}$$

Аналогично выводу транспорта проппанта для трещины из ур-ий НС.
Вдоль оси Ox :

$$0 = -\frac{dp(x)}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau_{rx}) + \rho g \sin \theta.$$

$$\tau_{ij} = 2\mu_s D_{ij}, \quad D = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T), \quad \tau_{rx} = \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r}$$

Формула Нолти:

$$\mu_s(c) = \mu_f \left(1 - \frac{c}{c_{max}}\right)^{-2.5n_{clean}},$$

$c_{max} = 0.65$ — максимальная концентрация упаковки.

Нам нужна не только концентрация, а прежде всего нам нужно знать давление. Если на забое будет слишком большое давление, то жидкость может просто порвать трубу. Как будем считать давление? Для этого берём уравнение Навье-Стокса. Выводим аналогично выводу транспорта проппанта для трещины. Но здесь в роли малого параметра будет

$$\varepsilon = \frac{2R}{L},$$

где $2R$ — диаметр скважины; L — длина скважины (диаметр скважины порядка 10 см, а длина скважины порядка 1 км — ясно, что параметр ε будет достаточно малым и можно использовать приближение тонкого слоя, но уже в цилиндрической геометрии).

Вдоль оси Ox (ось направлена вдоль скважины; θ — угол между осью скважины и поверхностью Земли; τ — тензор вязких напряжений):

$$0 = -\frac{dp(x)}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau_{rx}) + \rho g \sin \theta \quad (12.8)$$

В случае ньютоновской жидкости:

$$\tau_{ij} = 2\mu_s D_{ij}, \quad D = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T), \quad \tau_{rx} = \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r}. \quad (12.9)$$

(в приближении тонкого слоя можно показать, что будет всего одна компонента τ_{rx})

Кроме того, есть зависимость вязкости смеси от концентрации проппанта. Формула Нолти:

$$\mu_s(c) = \mu_f \left(1 - \frac{c}{c_{max}}\right)^{-2.5n_{clean}}, \quad (12.10)$$

где $c_{max} = 0.65$ — максимальная концентрация упаковки проппанта, μ_f — вязкость чистой жид-

кости (гель без проппанта), n_{clean} – индекс течения (один из реологических параметров) чистой жидкости (без проппанта).

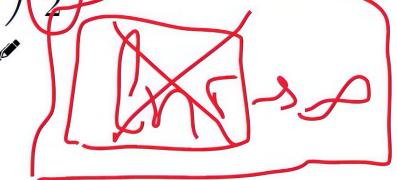
В случае неньютоновской жидкости по формуле Нолти будет изменяться не вязкость, а реологический параметр K .

$$0 = -\frac{dp(x)}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \rho g \sin \theta \quad (9)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) = \left(\frac{dp(x)}{dx} - \rho g \sin \theta \right) r \quad (10)$$

С учетом $\tau_{rx}|_{r=0} = 0$: 

$$\mu_s \frac{r \partial u_x}{\partial r} = \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) \frac{r^2}{2} \quad (11)$$

Гран. условие $u_x|_{r=R} = 0$: 

$$u_x(r) = \underbrace{\frac{1}{4\mu_s} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) r^2}_{{u}_{max}} + C = \underbrace{-\frac{R^2}{4\mu_s} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) \left(1 - \left(\frac{r^2}{R^2} \right) \right)}_{{u}_{max}} = u_{max} \left(1 - \left(\frac{r^2}{R^2} \right) \right) \quad (12)$$

Первоначальная наша задача: вывести вид профиля скорости. По сути сейчас докажем формулу для течения Пуазейля с учётом силы тяжести.

Подставим (12.9) для τ_{rx} в (12.8):

$$0 = -\frac{dp(x)}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \rho g \sin \theta \quad (12.11)$$

Домножим на r :

$$\frac{d}{dr} \left(r \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) = \left(\frac{dp(x)}{dx} - \rho g \sin \theta \right) r \quad (12.12)$$

Интегрируем с учётом $\tau_{rx}|_{r=0} = 0$ (условие регулярности):

$$\mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} = \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) \frac{r}{2} \quad (12.13)$$

Интегрируем ещё раз:

$$u_x(r) = \frac{1}{4\mu_s} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) r^2 + C \quad (12.14)$$

Используя граничное условие $u_x|_{r=R} = 0$ (условие прилипания на границе), находим константу C . Получаем:

$$u_x(r) = \underbrace{-\frac{R^2}{4\mu_s} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)}_{{u}_{max}} = u_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (12.15)$$

Максимальная скорость u_{max} достигается при $r = 0$.

12.1.5 Вычисление средней скорости

Вычисление средней скорости

$$\begin{aligned}
 u_m &= \frac{1}{|S|} \int_S u_x dS = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R u_{max} r \left(1 - \left(\frac{r^2}{R^2}\right)\right) dr d\varphi = \\
 &= u_{max} \frac{2\pi \cancel{r^2}}{\pi R^2} \int_0^{R/R} \cancel{r} \left(1 - \left(\frac{r^2}{R^2}\right)\right) d\left(\frac{r}{R}\right) = \frac{u_{max}}{2} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\boxed{u_m = -\frac{R^2}{8\mu_s} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right)} \quad (14)$$

В целом отсюда можно найти давление для ламинарного течения!

Нашли максимальную скорость u_{max} , а уравнение переноса записано в терминах средней скорости, поэтому необходимо найти соотношение между средней скоростью и максимальной скоростью.

Возьмём и усредним найденный профиль скорости по сечению (сделаем в полярных координатах, т.е. якобиан r):

$$\begin{aligned}
 u_m &= \frac{1}{|S|} \int_S u_x dS = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R u_{max} r \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) dr d\varphi = \\
 &= u_{max} \frac{2\pi}{\pi} \int_0^1 \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) d\left(\frac{r}{R}\right) = \frac{u_{max}}{2} \quad (12.16)
 \end{aligned}$$

Таким образом, получаем среднюю скорость ламинарного течения:

$$u_m = -\frac{R^2}{8\mu_s} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \sin \theta \right) \quad (12.17)$$

В целом отсюда можно найти давление для ламинарного течения! Интегрируем по x (по оси скважины). θ может меняться, ρ может меняться, R может меняться, вязкость μ_s зависит от концентрации, u_m тоже меняется в зависимости от сечения. Соответственно берём интегрируем и отсюда находим давление $p(x)$. Но мы поступим немного по-другому.

12.1.6 Средняя скорость для степенной жидкости

Средняя скорость для степенной жидкости

Упр. Найти профиль и среднюю скорость для степенной жидкости

$$\tau_{ij} = K_s \dot{\gamma}^{n-1} D_{ij}, \quad \dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 D_{ij}^2}$$

Ответ:

$$u_x = u_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right)$$

Выражение для u_{max} и u_m найдите сами.



В тех же самых предположениях можем вывести профиль скорости для степенной жидкости:

$$\tau_{ij} = K_s \dot{\gamma}^{n-1} D_{ij}, \quad \dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 D_{ij}^2} \quad (12.18)$$

Профиль скорости:

$$u_x = u_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right) \quad (12.19)$$

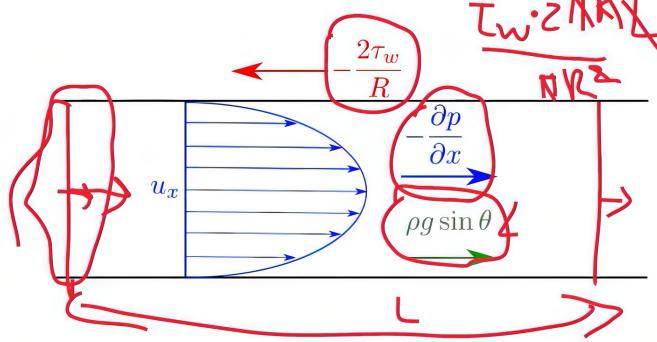
12.1.7 Коэффициент трения Фаннинга для ламинарного и турбулентного течений

$$0 = -\frac{dp(x)}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau_{rx}) + \rho g \sin \theta \quad \left| \frac{1}{\pi R^2} \int_S (\cdot) dS \right. \quad (15)$$

$$\frac{d\bar{p}}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R} + \bar{\rho}g \sin \theta, \quad (16)$$

где $\tau_w = -\tau_{rx}|_{r=R}$ — напряжение сдвига (трения) на стенке трубы.

Его можно измерить!



Коэффициент трения Фаннинга

$$f_s = \frac{\tau_w}{\rho u_m^2 / 2}$$

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\rho u_m^2}{R} f_s + \rho g \sin \theta$$

Сейчас выведем формулу для давления немного по-другому. Опять стартуем с уравнения Навье-Стокса и сразу усредняем (по площади):

$$0 = -\frac{dp(x)}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau_{rx}) + \rho g \sin \theta \quad \left| \frac{1}{\pi R^2} \int_S (\cdot) dS \right. \quad (12.20)$$

Получаем следующее уравнение (\bar{p} на самом деле можно заменить на просто p , так как мы знаем, что давление выравнивается вдоль сечения — это можно доказать в предположениях течения тонкого слоя):

$$\frac{d\bar{p}}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R} + \bar{\rho}g \sin \theta, \quad (12.21)$$

где $\tau_w = -\tau_{rx}|_{r=R}$ — напряжение сдвига (трения) на стенке трубы. Его можно измерить при ламинарном течении, а также и в случае турбулентного течения (например, для известного перепада давления найти τ_w из (12.21) — т.е. решить обратную задачу), поэтому этот вывод формулы для давления более общий (в предыдущем выводе не понятно, что такое профиль скорости в случае турбулентного течения).

Видим, что для определения давления профиль скорости нам и не нужен. Можем найти давление, если известен τ_w (находим давление просто проинтегрировав уравнение (12.21)).

Обычно экспериментаторы работают с безразмерными величинами для того, чтобы можно было масштабировать результаты (измерить на одной трубе, а распространить результаты на трубы произвольного диаметра), поэтому вводят коэффициент трения Фаннинга:

$$f_s = \frac{\tau_w}{\rho u_m^2 / 2} \quad (12.22)$$

Тогда уравнение (12.21) примет вид:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\rho u_m^2}{R} f_s + \rho g \sin \theta \quad (12.23)$$

Какой физический смысл у полученного уравнения? Это баланс сил: есть сила давления, кроме того проталкивать жидкость нам помогает сила тяжести, а препятствует трение жидкости о стенки трубы. Поэтому можно вывести уравнение (12.21) другим способом, а именно просто расписать баланс сил:

силы трения $\tau_w \cdot 2\pi R \cdot L$;

силы прикладываемого давления $(p_1 - p_2) S$

силы тяжести $\rho g \sin \theta \cdot S \cdot L$

Получим:

$$(p_2 - p_1) S + \rho g \sin \theta \cdot S \cdot L - \tau_w \cdot 2\pi R \cdot L = 0 \quad (12.24)$$

разделим обе части на $S \cdot L$:

$$\frac{p_1 - p_2}{L} + \rho g \sin \theta - \tau_w \cdot \frac{2\pi R}{\pi R^2} = 0 \quad (12.25)$$

равносильно

$$\frac{p_2 - p_1}{L} = \rho g \sin \theta - \frac{2\tau_w}{R}, \quad (12.26)$$

что и требовалось показать.

$$\begin{aligned} u_x &= 2u_m \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \\ \tau_w &= \cancel{0} \mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{4\mu_s u_m}{R} \\ f_s &= \frac{\tau_w}{\rho u_m^2 / 2} = \frac{4\mu_s u_m}{\cancel{R} \cancel{\rho u_m^2 / 2}} = \frac{8 \cdot 2}{\rho u_m (2R) \mu_s} = \boxed{\frac{16}{Re}} \\ Re &= \frac{\rho u_m (2R)}{\mu_s} \end{aligned} \quad (17)$$

Упр. Показать, что для степенной жидкости

$$f_s = \frac{16}{Re'}, \quad Re' = \frac{\rho u_m^{2-n} (2R)^n}{K_s \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n 8^{n-1}} \text{ — обобщ. число Рейнольдса}$$

Metzner, A. B. & Reed, J. C. **Flow of Non-Newtonian Fluids - Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent-Flow Regions** // Aiche Journal, 1, 434–440, 1955

Давайте найдём коэффициент Фаннинга для ламинарного течения.

Профиль скорости:

$$u_x = 2u_m \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (12.27)$$

Подставляем профиль скорости в выражение для τ_w :

$$\tau_w = -\mu_s \frac{\partial u_x}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{4\mu_s u_m}{R} \quad (12.28)$$

Подставляем τ_w в выражение для коэффициента Фаннинга:

$$f_s = \frac{\tau_w}{\rho u_m^2 / 2} = \frac{4\mu_s u_m}{R \rho u_m^2 / 2} = \frac{8 \cdot 2}{\rho u_m (2R) / \mu_s} = \frac{16}{Re}, \quad (12.29)$$

где

$$Re = \frac{\rho u_m (2R)}{\mu_s} \text{ — число Рейнольдса}$$

Для степенной жидкости можно показать, что

$$f_s = \frac{16}{Re'}, \quad (12.30)$$

где

$$Re' = \frac{\rho u_m^{2-n} (2R)^n}{K_s \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n 8^{n-1}} \text{ — обобщённое число Рейнольдса}$$

Турбулентное течение

Экспериментальная корреляция

$$1/\sqrt{f_{s, turb}} = \frac{4.0}{n^{0.75}} \log_{10}(Re' f_{s, turb}^{1-n/2}) - \frac{0.4}{n^{1.2}}. \quad (18)$$

Dodge, D. W. & Metzner, A. B. Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems // AIChE Journal, 5, 189–204, 1959

Ограничение $Pr(Re')^2 f_{s, turb} > 5 \times 10^5$

Хорошая аппроксимация

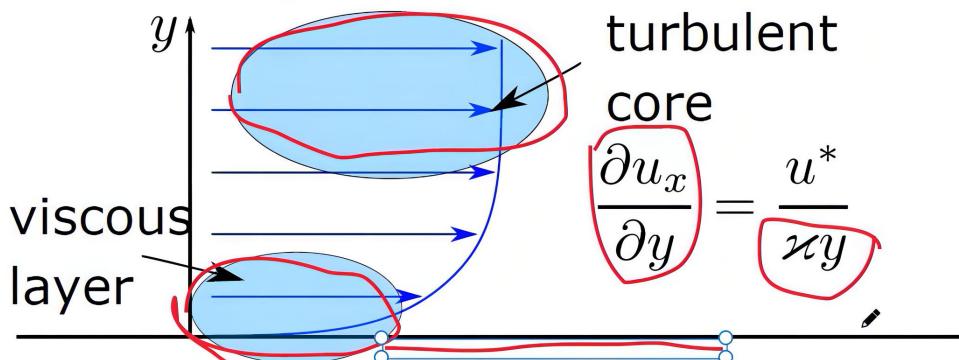
$$f_{s, turb} = 0.079 n^{0.675} (Re')^{-0.25} \quad (19)$$

Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Cho, Y.I. **Handbook of Heat Transfer** (Third Edition) // The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, NY (USA), 1998

Для турбулентного течения явной формулы для коэффициента Фаннинга нет, но есть экспериментальные корреляции. Эти экспериментальные корреляции записаны в неявном виде. Есть разные корреляции как для ньютоновской, так и для неニュ顿овской жидкостей. Коэффициенты в корреляциях могут зависеть от шероховатости трубы. Обычно в корреляциях дополнительно присутствуют число Рейнольдса и реологический параметр жидкости n .

Из неявных корреляций можно приблизенно выразить коэффициент трения Фаннинга f_s .

Two layered mixing model



Турбулентная диффузия пропорциональна y (фон Карман)

$$u_x \sim A \log_{10} y + B \quad (20)$$

Почему у корреляции с предыдущего слайды именно такой вид? Откуда взялся логарифм? Есть так называемая двухслойная модель турбулентности. О чём она нам говорит? Вблизи стенки трубы скорости маленькие, соответственно число Рейнольдса небольшое и будет слой, в котором преимущественно ламинарное течение. А в центре, где влияние вязкости небольшое (а скорость большая) имеется турбулентное ядро.

По так называемой модели фон Кармана сдвиг скорости обратно пропорционален расстоянию от стенки:

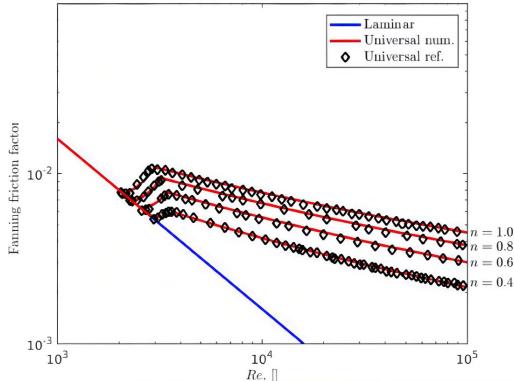
$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{u^*}{\kappa y} \quad (12.31)$$

Иначе говоря, если вводить турбулентную вязкость (или турбулентную диффузию), то она будет пропорциональна y .

Соответственно при интегрировании этого уравнения и получается логарифм с неопределенными коэффициентами, значения которых определяются с помощью подгонки к экспериментальным данным.

Здесь не буду сильно останавливаться. Просто, чтобы вы на пальцах понимали, откуда здесь внезапно появился логарифм.

$$f_s = \begin{cases} f_{s, lam}, & Re' \leq Re'_{lam}, \\ \log_{10} f_{s, lam} + \log_{10} \left(\frac{f_{s, turb}}{f_{s, lam}} \right) \frac{\log_{10} (Re'/Re'_{lam})}{\log_{10} (Re'_{turb}/Re'_{lam})}, & Re'_{lam} \leq Re' \leq Re'_{turb} \\ f_{s, turb}, & Re' \geq Re'_{turb}, \end{cases}$$



$Re'_{lam} = 3250 - 1150n$,
 $Re'_{turb} = 4150 - 1150n$ —
 критические значения числа
 Рейнольдса при переходе в
 разные режимы

Итак, у нас есть ламинарный коэффициент трения Фаннинга и есть турбулентный коэффициент трения Фаннинга. А что в промежутке?

В промежутке задана линейная интерполяция в логарифмических координатах.

Откуда эта линейная интерполяция была получена? Из экспериментов были получены критические значения числа Рейнольдса при переходе в разные режимы. На графике видим хорошее совпадение с экспериментальными данными.

12.1.8 Расчёт давления

$$\frac{d\bar{p}}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R} + \bar{\rho}g \sin \theta, \quad (21)$$

$$p_{bh}(t, x) = p_{wh}(t) + \Delta p_h(t, x) - \Delta p_{fric}(t, x), \quad (22)$$

Гидростатика:

$$\Delta p_h(t, x) = \int_0^x \rho_s(c(t, s)) g \sin(\theta(s)) ds \quad (23)$$

$$\rho_s(c) = \rho_p c + \rho_f (1 - c) \quad (24)$$

Трение:

$$\Delta p_{fric}(t, x) = \int_0^x \frac{2\tau_w(t, s)}{R(s)} ds — давление трения, \quad (25)$$

Теперь давайте перейдём к самому расчёту давления. У нас есть градиент давления, который равен гидростатике минус трение (грубо говоря):

$$\frac{d\bar{p}}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R} + \bar{\rho}g \sin \theta \quad (12.32)$$

Если проинтегрировать по всей скважине, то мы получим, что давление на забое есть давление на устье плюс гидростатика минус падение давления за счёт трения о стенку трубы.

$$p_{bh}(t, x) = p_{wh}(t) + \Delta p_h(t, x) - \Delta p_{fric}(t, x) \quad (12.33)$$

Гидростатика:

$$\Delta p_h(t, x) = \int_0^x \rho_s(c(t, s)) g \sin \theta(s) ds \quad (12.34)$$

$$\rho_s(c) = \rho_p c + \rho_f (1 - c) \quad (12.35)$$

Трение:

$$\Delta p_{fric}(t, x) = \int_0^x \frac{2\tau_w(t, s)}{R(s)} ds - \text{давление трения} \quad (12.36)$$

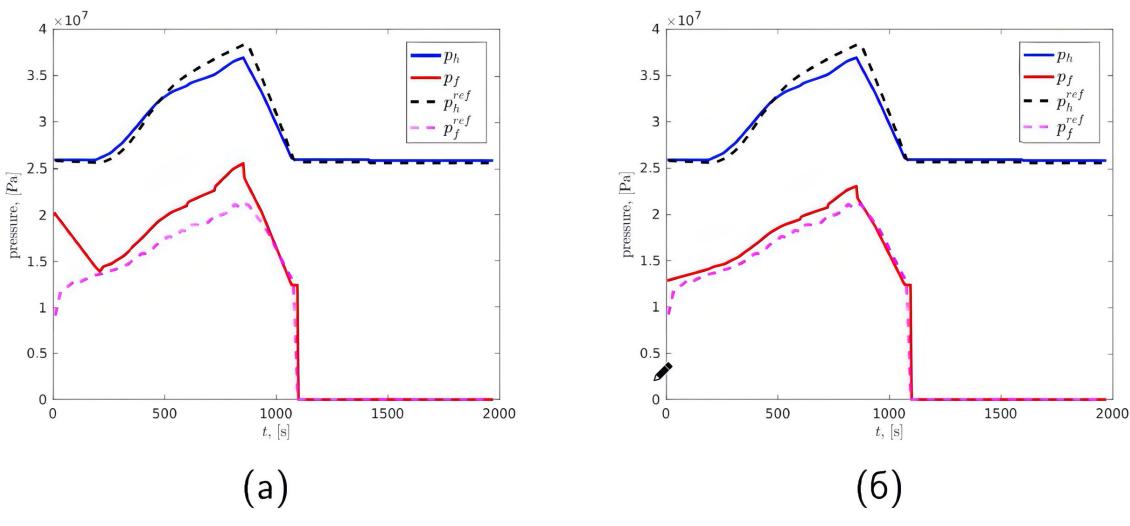


Figure: Гидростатическое давление и давление трения (модель VS MFRAC).
Для базового давления трения используются таблицы

- (a): формула Nolte, нач. жидкость №1
- (б): формула Keck, нач. жидкость №2

Хотел бы показать сравнение с полевыми данными. Мы построили односкоростную модель, которая включает в себя уравнение переноса и формулу для давления.

Здесь мы будем сравнивать давления: p_f^{ref} – давление трения экспериментальное, p_h^{ref} – давление гидростатическое экспериментальное. Видно, что гидростатическое давление хорошо подгоняется под экспериментальные данные, а с давлением трения есть некоторые проблемы. Почему эти проблемы могут возникать и как их можно исправить? На левом графике видно, что в

начале давление трения в модели падает, а по полевым данным растёт. А на следующем участке завышено давление трения в модели.

Здесь сразу опишу ситуацию: здесь закачивалось несколько жидкостей. Как мы исправили эту ситуацию? Мы меняли свойства жидкости. На правом графике поставили вторую жидкость и получилось лучшее совпадение с полевыми данными. Плюс немного играли с корреляциями: можно использовать формулу Nolte, а можно использовать формулу Keck и таким образом подбивать (калибровка корреляции может дать более адекватный результат).

Кстати, то что жидкость не та качается (реологические параметры K и n другие) – это нормальная ситуация, ведь то, что забрасывается в трубу не совпадает с тем, что указано в паспорте, потому что во-первых гель может не успеть сшиться (и тогда трения совсем другие будут, т.к. K и n разные у сшитого и несшитого геля), а во-вторых невозможно узнать все условия проведения полевого эксперимента (в лучшем случае нам дают графики давления и полевой отчёт, в котором представлено расписание закачки и т.д.)

На практике инженеры используют не корреляции для коэффициента трения Фаннинга, а у них уже есть таблицы с величиной градиента давления трения ($-2\tau_w/R$) для различных диаметров трубы и различных расходов жидкости.

Из step-down теста, постепенно снижая расход и смотря, как падает давление, можно посчитать коэффициент трения Фаннинга в трубе.

Обычно это заносится в базу данных. А дальше используется, если качаем с тем же расходом и трубы примерно такие же – то берём соответствующий коэффициент Фаннинга. И на удивление он неплохо даёт согласование результатов.

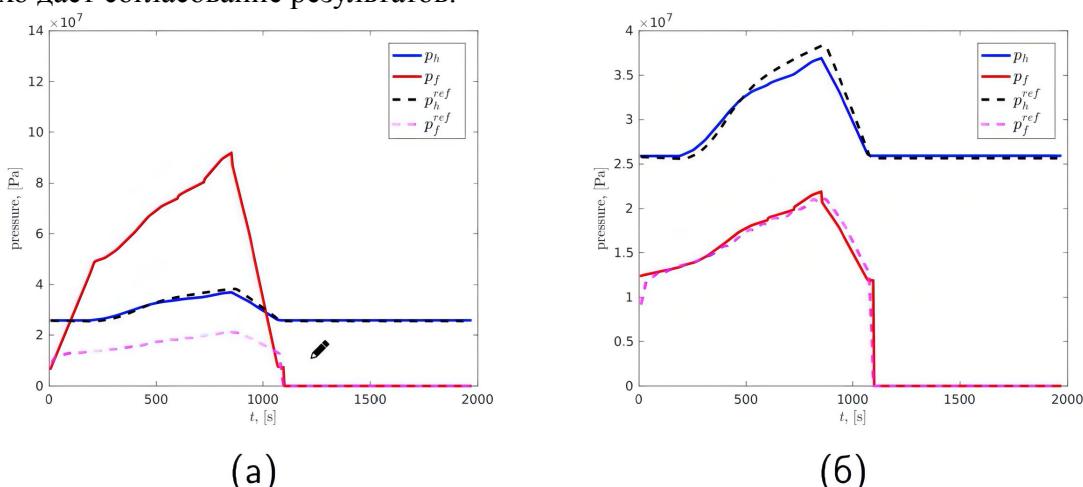


Figure: Гидростатическое давление и давление трения (модель VS MFRAC).
Давления трения рассчитываются по формуле Virk

(а): формула Nolte. нач. жидкость №1

(б): формула Keck, нач. жидкость №2, $n = 1.0, 0.88, 0.47$ и
 $K \equiv 10^{-3}, 40 \times 10^{-3}, 0.85 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$

В следующем кейсе сравнения с полевыми данными снова давление трения очень существенно завышено в модели (см. левый график).

Что сделали?

Взяли и поменяли коэффициенты K и n (по сути взяли реологические параметры не для щито-

го геля, а для линейного геля) и тогда результаты модель и промысловые данные очень хорошо совпали.

Восходящий тренд за счёт добавления проппанта (трение увеличивается). Далее падение, так как продавили чистой жидкостью (падает и трение и гидростат). Затем остановили закачку: гидростат остался на месте, а трение упало в нуль.

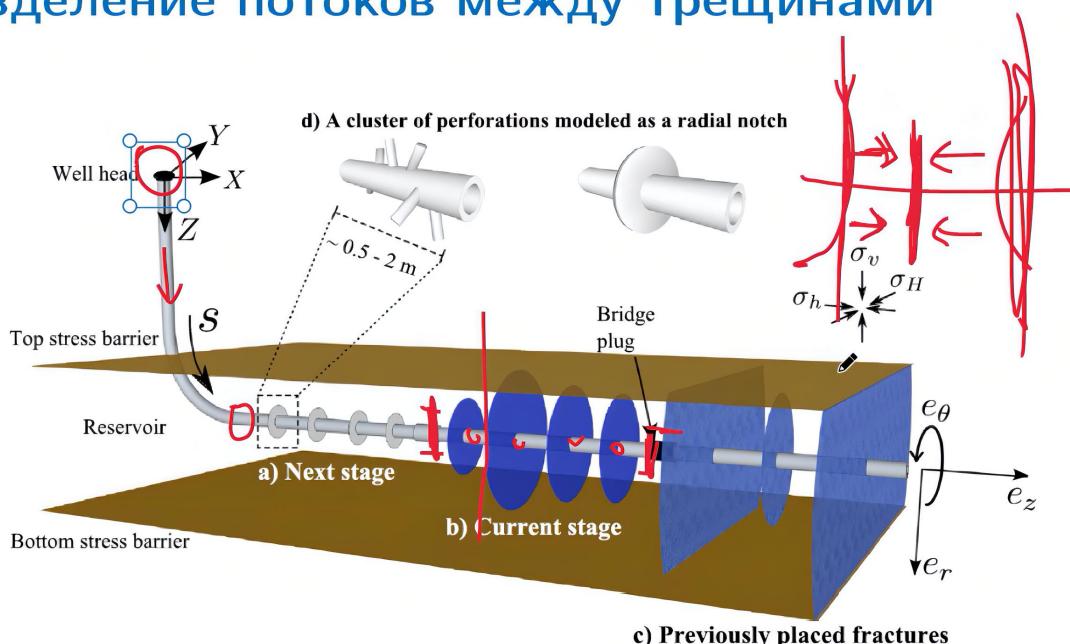
Этими кейсами я хочу вам показать: во-первых, как с помощью этих моделей можно достаточно адекватно описывать поведение давления; во-вторых, как проводить калибровку модели на полевые данные.

Переходим к следующей теме.

12.2 Разделение потоков между трещинами

В предыдущем разделе рассмотрели скважину от устья до забоя. Но у нас между трещиной и забоем могут быть участки скважины (во-первых, датчик забойного давления обычно выше трещины; во-вторых, у нас есть трение вдоль перфораций). Это ещё усугубляется задачей многостадийного ГРП, когда у нас есть несколько портов.

Разделение потоков между трещинами

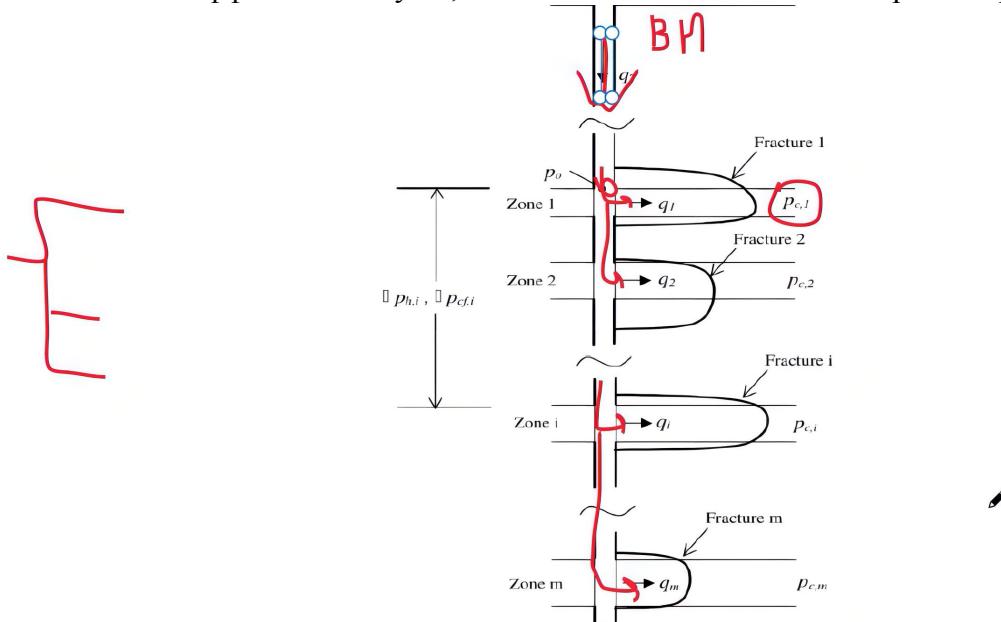


Я вам рассказывал про технологию *plug and purf*, когда опускают перфорационный пистолет, который сразу может сделать несколько отверстий (портов). В итоге при закачке растим несколько трещин и весь расход, который качаем в скважину, перераспределяется между трещинами. В зависимости от чего? Во-первых, в зависимости от трения по трубе и гидростатики. Во-вторых (что более существенно), от давления на перфорациях. Например, одна перфорация сделана хорошо и через неё будет хорошая проводимость. Другая перфорация сделана плохо и через неё будет плохая проводимость. Кроме того, есть эффект влияния соседних трещин друг на друга.

Если есть 3 трещины, то боковые трещины пойдут криво, но мы это не учитываем (пока рассматриваем плоские трещины).

Если успеем добраться, то потом расскажу, что делать с кривыми трещинами.

Но даже если у нас 3 плоские трещины, то боковые трещины за счёт упругого воздействия через породу зажимают центральную трещину. Соответственно в боковые трещины будет втекать больше жидкости и расход на них будет выше, чем в центральной части. Но сегодня этот эффект (называемый stress shadow) рассматривать не будем (посмотрим только гидравлику). Учитываться этот эффект далее будет, но явно этот механизм сегодня рассматривать не будем.



Необходимо расчитывать при одновременной закачке в несколько портов

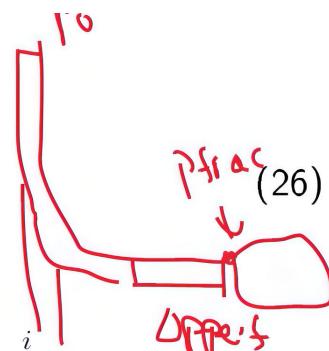
Так можно схематически представить разделение потоков между трещинами. Есть полный заекаиваемый расход, далее жидкость течёт в каждую из трещин с давлениями $p_{c,1}, p_{c,2}, \dots, p_{c,i}$ и так далее.

12.2.1 Два закона Кирхгофа

Two Kirchhoff's laws

1. Slurry is incompressible \Rightarrow volume conservation:

$$Q_0 = \sum_{i=1}^N Q_i$$



2. Pressure continuity:

$$p_0 = \sigma_{min,i} + p_{net,i} + \Delta p_{perf,i} - \sum_{j=1}^i \Delta p_{h,j} + \sum_{j=1}^i \Delta p_{fric,j}, \quad (27)$$

where p_{frac}

- ▶ $\sigma_{min,i}$ — closure pressure (min in-situ stress) in i^{th} port
- ▶ $p_{net,i} = p_{frac,i} - \sigma_{min,i}$ — net pressure in i^{th} port (from frac model)
- ▶ $\Delta p_{perf,i}$ — perforation pressure drop at i^{th} port
- ▶ $\Delta p_{h,i}$ — hydrostatic pressure drop between i^{th} and $(i-1)^{\text{th}}$ ports
- ▶ $\Delta p_{fric,i}$ — friction pressure drop between i^{th} and $(i-1)^{\text{th}}$ ports

Первый закон Кирхгофа:

$$Q_0 = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (12.37)$$

(весь расход, который закачиваем сверху перераспределяется между трещинами).

Второй закон Кирхгова (здесь в качестве потенциала выступает давление и вместо электрических сопротивлений будут гидродинамические сопротивления):

$$p_0 = \sigma_{min,i} + p_{net,i} + \Delta p_{perf,i} - \sum_{j=1}^i \Delta p_{h,j} + \sum_{j=1}^i \Delta p_{fric,j}, \quad (12.38)$$

где

$\sigma_{min,i}$ — давление закрытия (минимальное напряжение в пласте) на i -ой трещине;

$p_{net,i} = p_{frac,i} - \sigma_{min,i}$ — давление на i -ой трещине (из модели трещины);

$\Delta p_{perf,i}$ — падение давления вдоль перфорации i -ой трещины;

$\Delta p_{h,i}$ — падение гидростатического давления между i -ой и $(i-1)$ -ой трещинами;

$\Delta p_{fric,i}$ — падение давления трения между i -ой и $(i-1)$ -ой трещинами.

Другими словами, второй закон Кирхгофа говорит нам о том, что с точки зрения потенциалов можно независимо рассматривать каждый из путей (к каждой из трещин) и считать гидродинамические сопротивления независимо.

12.2.2 Давление на i -ой трещине

Analytical approach (PKN model)

- $p_{net,i}$ — net pressure

$$p_{net,i}(Q_i) = a_i Q_i^{\frac{n}{2n+3}} V_i^{\frac{1}{2n+3}}, \quad (28)$$

$$a_i = \left(\frac{(n+3)(2n+1)^n K (E'_i)^{2n+2}}{\pi 2^{2n} n^n \phi^n h_i^{3n+3}} \right)^{\frac{1}{2n+3}}, \quad (29)$$

where

- a_i — stiffness parameter
- Q_i, V_i — injection rate and fracture volume in i 'th layer
- K, n — power-law fluid rheology parameters
- E'_i — plane strain modulus
- ϕ — geometric parameter
- h_i — pay zone thickness

В довольно старой статье есть вывод формулы для $p_{net,i}$ (подход с использованием модели PKN).

Т.е. для PKN модели можно найти явную зависимость между $p_{net,i}$ и закачиваемым расходом Q_i .

Сразу скажу, что нам будут нужны следующие зависимости от расхода: $p_{net,i}(Q_i)$, $\Delta p_{perf,i}(Q_i)$ и $\Delta p_{fric,i}(Q_i)$. Зачем?

У нас неизвестными будут Q_i и неизвестным будет p_0 . Поэтому необходимо придумать дополнительные замыкающие соотношения. И нам нужны именно зависимости от расхода Q , т.к. в итоге мы получим нелинейное уравнение, которое необходимо будет решать методом Ньютона и при этом необходимо считать производные (т.е. нужны именно зависимости от расхода Q , а не просто значение в точке).

Если есть аналитическое выражение (подобное приведённому на слайде), то посчитать производную несложно. Но PKN моделью мир клином не сошёлся.

Fracture net pressure

Numerical approach

► $p_{net,i}$ — net pressure

$$p_{net,i} = p_{net,i}(Q_i) \quad (30)$$

Preparation for Newton method

$$p_{net,i}(Q_i + \Delta Q_i) \approx p_{net,i}(Q_i) + \frac{\partial p_{net,i}}{\partial Q_i}(Q_i) \Delta Q_i \quad (31)$$

Calculate derivatives

$$\frac{\partial p_{net,i}}{\partial Q_i}(Q_i) \approx \frac{p_{net,i}(Q_i + \delta Q_i) - p_{net,i}(Q_i)}{\delta Q_i}, \quad \delta Q_i = 10^{-3} \times Q_i \quad (32)$$

Если у нас модель Planar3D ILSA, то можно вообще говоря добавить всё в единую постановку, т.е. сопрячь ILSA и течение по скважине в одну постановку, тогда в каком-то смысле будет проще.

Будет большая система. Но есть неприятности: представляете, что у вас 10 трещин, тогда будет огромная заполненная матрица, которая в жизни никогда не посчитается (и распараллелить это тоже нормально не получится).

Поэтому хотелось бы, чтобы отдельно был алгоритм, отвечающий за разделение потоков, и отдельно был бы алгоритм, который считает рост трещины и выдаёт $p_{net,i}(Q_i)$.

Но есть проблема, что методу Ньютона нужна производная. Её нужно будет считать численно, т.е. мы будем брать и запускать Planar3D ILSA с расходом $(Q_i + \delta Q_i)$, где δQ_i — небольшое изменение расхода Q_i .

На слайде: ΔQ_i может быть намного больше, чем δQ_i .

δQ_i должно быть небольшим, чтобы наиболее точно посчитать производную, необходимую для реализации метода Ньютона.

Итак, запускаем Planar3D ILSA с расходом $(Q_i + \delta Q_i)$ и находим $p_{net,i}$, затем снова запускаем Planar3D ILSA с расходом Q_i и снова находим $p_{net,i}$. Считаем разность полученных значений $p_{net,i}$, делим на δQ_i и получаем значение производной.

После этого полученное значение производной заносим в матрицу, которая нам определит потоки.

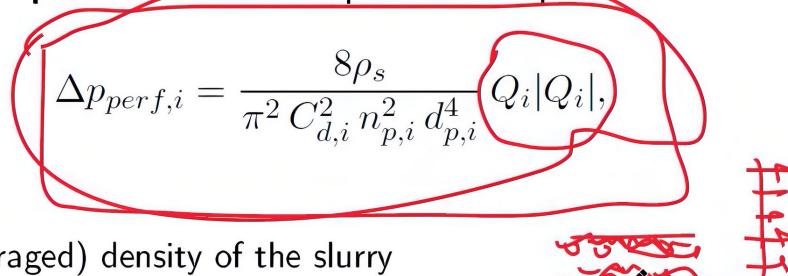
12.2.3 Падение давления на перфорациях

Perforation friction

- ▶ $\Delta p_{perf,i}(Q_i)$ — perforation friction pressure drop

$$\Delta p_{perf,i} = \frac{8\rho_s}{\pi^2 C_{d,i}^2 n_{p,i}^2 d_{p,i}^4} Q_i |Q_i|, \quad (33)$$

where



- ▶ ρ_s — (averaged) density of the slurry
- ▶ $n_{p,i}, d_{p,i}$ — number and diameter of perforations
- ▶ $C_{d,i} = \frac{\min(d_{jet})}{d_p}$ — dimensionless discharge coefficient:
 - ▶ $C_{d,i} \in [0.5, 0.6]$ without solids
 - ▶ $C_{d,i} \in [0.6, 0.95]$ with solids due to perforations erosion

Здесь на слайде представлена эмпирическая формула для падения давления на перфорациях. В отличие от падения давления на трение по трубе здесь поток Q_i в квадрате. Падение давления на перфорациях зависит от плотности смеси, числа перфораций, диаметра перфораций и коэффициента эрозии.

Коэффициент эрозии: когда через перфорацию пролетает проппант, то на ней возникает эрозия (появляются шероховатости, границы размываются и ухудшается проводимость перфорации).

Формула чисто экспериментальная. Аналитического вывода подобных формул я нигде не встречал. Только уже такие готовые зависимости, ничего лучше пока нет.

12.2.4 Падение гидростатического давления

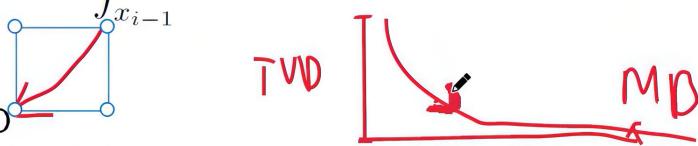
Hydrostatic pressure drop

- $\Delta p_{h,i}$ is hydrostatic pressure change in each casing interval according to the weight of the fluid column:

$$\Delta p_{h,i}(t, x) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \rho(c(t, s)) \cdot g \cdot \sin(\theta(s)) ds, \quad (34)$$

where

- x_i — i^{th} port MD
- $\rho(c(t, s))$ — density of the slurry, that depends on dynamic proppant concentration
- g — gravitational acceleration
- $\theta(s)$ — angle between wellbore and land surface in given point (cross-section)



Гидростатическое давление: интегрируем между двумя портами. x – это измеренная глубина (MD).

Как видите, здесь зависимости от Q_i нет, т.е. это выражение уйдёт в правую часть уравнения.

12.2.5 Падение давления на трение

Tube friction pressure drop

- $\Delta p_{fric,i}$ is friction pressure drop in each casing interval

$$\Delta p_{fric,i} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f \frac{\rho u_{m,i}^2}{R_i} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\rho(c(t, s)) f(Re) \left(Q_0 - \sum_{j=1}^{i-1} Q_j\right)^2}{R_i(s) S_i^2(s)} ds \quad (35)$$

where

- $f = \frac{\tau}{\rho u_{m,i}^2 / 2}$ — Fanning friction factor: ratio between the local shear stress and the local flow kinetic energy density
- $\rho(c(t, s))$ — density of the slurry
- $u_{m,i} = \frac{Q_0 - \sum_{j=1}^{i-1} Q_j}{S_i}$ — average flow velocity in the pipe (**important**: no Q_i term since we mean pressure drop along wellbore till given i^{th} port)
- S_i — cross-section pipe area for i^{th} port
- R_i — radius of given circular pipe
- Re — Reynold's number

Здесь вся та же самая формула для трения о стенки трубы. Здесь только нужно помнить, что часть расхода уже ушла в предыдущие трещины (порты), т.е. необходимо смотреть, сколько

жидкости протекает на конкретном участке трубы.

Здесь на слайде представлена формула, а идею этой формулы мы уже обсуждали.

12.2.6 Векторная форма



Equations (26)-(27) generate $(n+1) \times (n+1)$ system of nonlinear equations in $(n+1)$ unknowns, which can be expressed in vector form

$$\boxed{Q^T = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N, p_0]} \quad (36)$$

and residual vector

$$F^T = [F_1, F_2, \dots, F_N, F_{N+1}], \quad \text{---} \ominus \min \quad (37)$$

where

$$F_i = \begin{cases} \sigma_{min,i} + p_{net,i} + \Delta p_{perf,i} - \\ \sum_{j=1}^i \Delta p_{h,j} + \sum_{j=1}^i \Delta p_{fric,j} - p_0, & \text{for } i \leq N \\ Q_0 - \sum_{i=1}^N Q_i, & \text{for } i = N+1 \end{cases}$$

Получаем вектор неизвестных с расходами Q_i , которые идут в трещины, и давлением на забое p_0 .

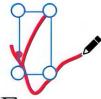
Наша задача: приравнять к нулю или хотя бы минимизировать вектор невязки.

Берём уравнения двух законов Кирхгофа, переносим всё в правую часть и получаем вектор невязки.

12.2.7 Итеративная процедура решения

Iterative procedure

then Jacobian matrix can be defined as

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial Q_N} & \frac{\partial F_1}{\partial p_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{N+1}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_{N+1}}{\partial Q_N} & \frac{\partial F_{N+1}}{\partial p_0} \end{bmatrix} \quad (38)$$


so the iterative procedure for estimating the vector \bar{Q} is that via

$$\bar{Q}^{k+1} = \bar{Q}^k - J^{-1} \bar{F}^k, \quad (39)$$

the convergence condition $|\bar{Q}^{k+1} - \bar{Q}^k|^2 \leq \tau \sim 10^{-4}$ can be checked. If no, the next iteration in (39) goes until this scheme converges.

Опять же говорю, что рассматриваемые уравнения нелинейные. Строится метод Ньютона. Всё более менее стандартно. В матрице J как раз и нужны те производные, которые считаем или аналитически (если есть явная зависимость от расхода), или численно (если есть возможность дополнительно провести расчёт с близким значением расхода).

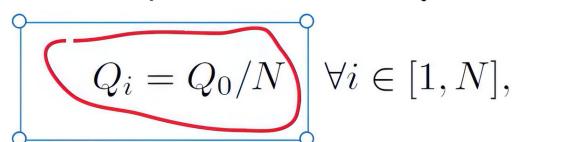
Далее дожидаемся сходимости.

12.2.8 Начальные приближения метода Ньютона

Initial guess

During the computation the initial guess for the iterative procedure will be the values from the previous timestep, however, there are no such values at the beginning.

The impact of the initial solution on the hydraulic fracturing problem decreases as volume of injected fluid increases above volume of the initial fracture, then for heuristic reasons all the injection rates considered to be uniform, while the bottomhole pressure equals to the pressure of closed fracture — closure pressure in the layer:



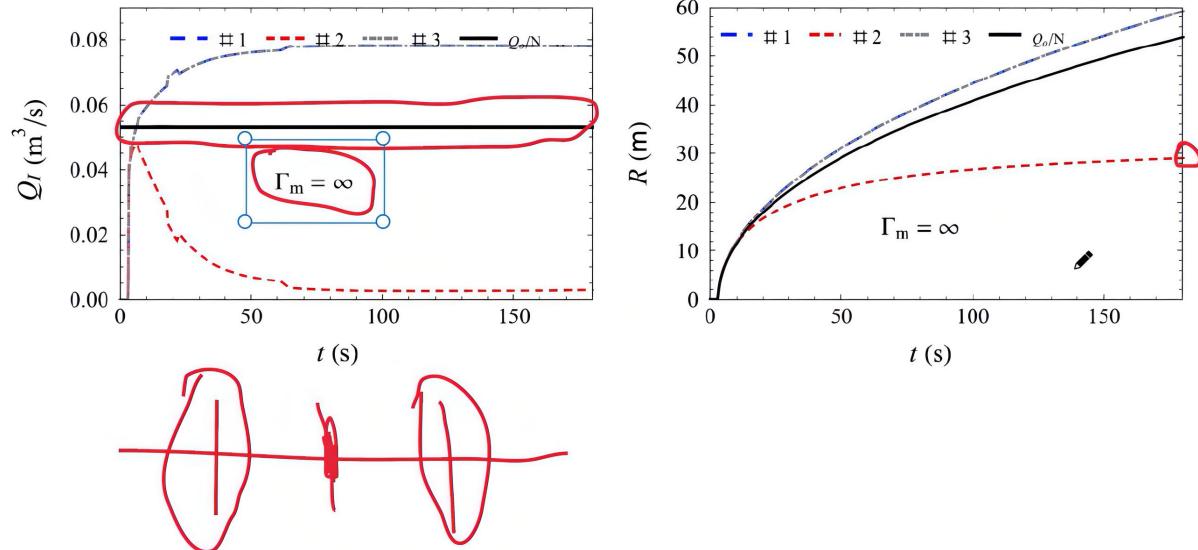
$$Q_i = Q_0/N \quad \forall i \in [1, N], \quad p_0 = \sigma_i \quad (40)$$

В качестве начального приближения используются равные расходы Q_i .

12.2.9 Эффекты, связанные с распределением потоков

Разделение потоков между трещинами

$$\Gamma_m = \frac{\text{stress shadow}}{\Delta p_{perf}}$$



Далее хотел бы вам показать эффекты, связанные с разделением потоков между трещинами.

В статье рассматривались 3 радиальные трещины.

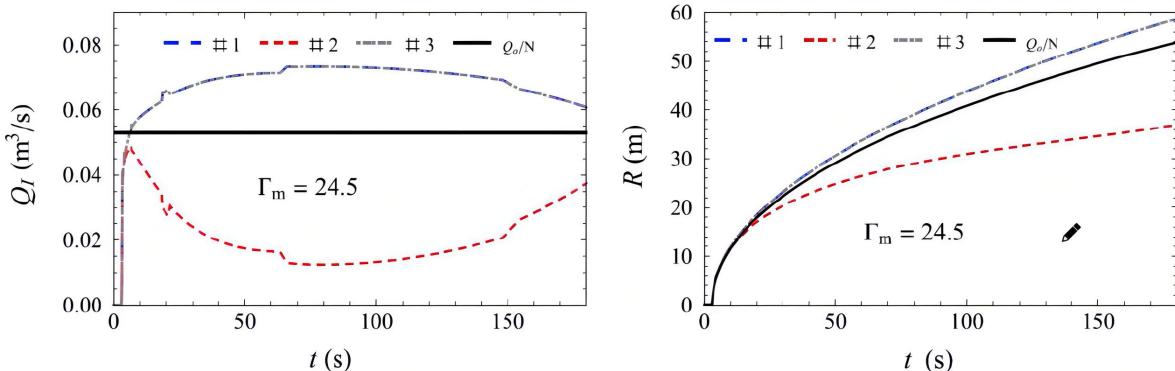
Здесь есть параметр:

$$\Gamma_m = \frac{\text{stress shadow}}{\Delta p_{perf}} \quad (12.39)$$

Из левого графика на слайде выше видим, что когда $\Gamma_m = \infty$, то серединная трещина (#2) вообще перестаёт расти и весь расход уходит на крайние трещины, которые между собой поровну его делят. Жирной чёрной линией на графике представлен средний расход, если бы он равномерно делился между трещинами.

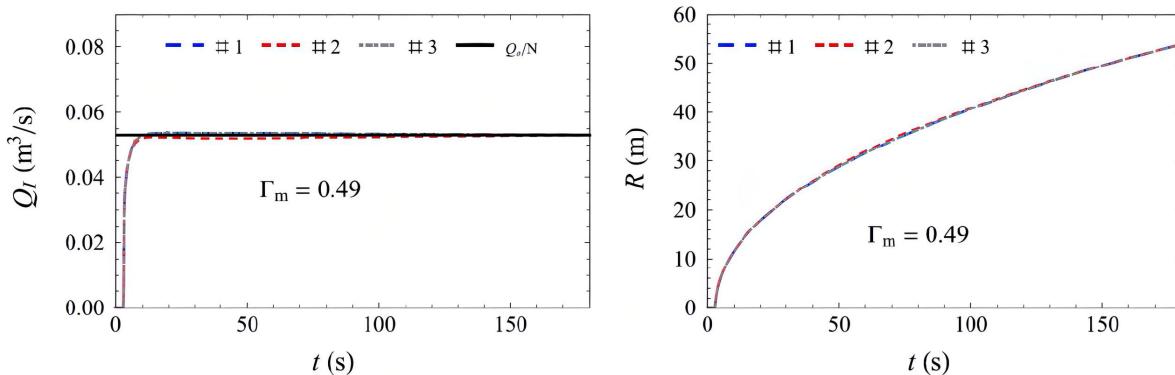
На правом графике на слайде выше представлены зависимости радиуса каждой из трещин от времени. Видим, что у средней трещины (#2) радиус практически перестаёт меняться в зависимости от времени.

Разделение потоков между трещинами



Если Γ_m уменьшать, то соответственно серединная трещина будет не так сильно обделена. И на больших временах на графике даже начинает лучше расти. Γ_m – это некоторый полуаналитический безразмерный комплекс, а в численном решении всё сложнее получается на дальней перспективе.

Разделение потоков между трещинами



Когда Γ_m мал, поток между трещинами распределяется практически равномерно и все трещины растут примерно одинаково.

Обычно этого удается добиться, когда ставим трещины далеко друг от друга, чтобы они друг на друга не влияли.

Если по этой части нет вопросов, переходим к следующей теме. Я немного расскажу про hammer

effect, т.е. про те самые затухающие колебания. А именно как они получаются.

12.3 Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине

Составители слайдов презентации: Ляпидевский В.Ю и Неверов В.В.

12.3.1 Введение

Введение

Во время гидравлического разрыва пласта (ГРП) необходимо знать информацию о давлении в нижней части скважины и параметрах созданной трещины.

Одним из способов быстрой оценки параметров трещины является анализ волнового пакета, возникающего при резкой остановке закачки.

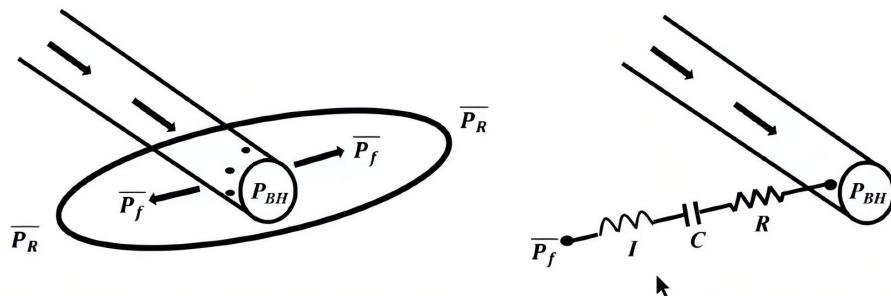
Работы по изучению гидроудара и влияния трещины на вид волнового пакета начались в 80-е годы прошлого века [1], [3] и ведутся до сих пор [2], [5], [6]

В работах [2], [6] была предложена модель расчета гидроудара в скважине и нахождения характеристик трещины.

Целью данной работы является определение оптимального набора параметров, необходимого для расчета волнового пакета.

Введение

Рассматривается течение слабосжимаемой жидкости в скважине, соединенной с трещиной через тонкие каналы.



Течение в скважине описывается уравнениями акустики, влияние трещины ГРП учитывается через условие на нижней границе.

Характеристики трещины находятся из параметров R , C , I [8]

Введение

Приведем модель, рассмотренную в работе Carey, Mondal, Sharma 2015 [2]:

- **уравнения акустики:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{c^2}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} = g \sin \theta - f \frac{u|u|}{R}, \quad (2)$$

где u — скорость, ρ — плотность, $p = c^2(\rho - \rho_0) + p_0$, $c^2 = \text{const}$, θ — угол наклона, f — коэффициент трения Фаннинга

- **граничные условия:**

• при $x = 0$: $Q = S_0 u = Q(t)$ — задан расход от времени

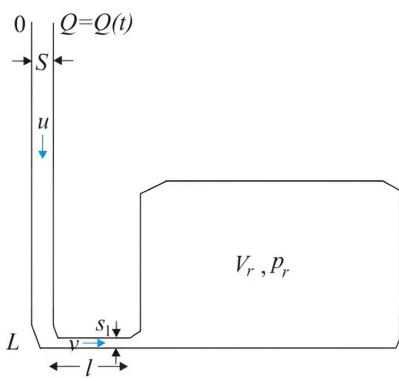
• при $x = L$:

$$p_L - p_r = RQ + \frac{1}{C} \int Q dt + I \frac{dQ}{dt}, \quad (3)$$

где p_L — давление на дне скважины, p_r — давление в резервуаре (трещине)

12.3.2 Математическая модель: законы сохранения

Математическая модель: законы сохранения



Рассматривается скважина переменного сечения $S(x)$, которая через перфорации площадью S_p и длиной l_p соединяется с резервуаром (трещиной). Обозначим u — скорость жидкости в скважине, v — скорость жидкости в перфорациях, p_r — равновесное давление в трещине.

Предположим, что объем трещины меняется несущественно
 $V_r \equiv \text{const}$ и давление внутри трещины распределено
равномерно $p_r = p_r(t)$

Течение в скважине описывается уравнениями акустики в
каналовом приближении

$$(\rho S)_t + (\rho S u)_x = 0 \quad (4)$$

$$u_t + \left(\frac{u^2}{2} + c_0^2 \ln \frac{\rho}{\rho_0} \right)_x = g \sin \theta - f \frac{u |u|}{R} \quad (5)$$

5/15

Есть скважина и трещина. Трещина представляет собой некоторый объем V_r с давлением p_r . Колебательный процесс довольно быстрый (примерно на масштабе 100 секунд он затухает). Поэтому считают, что в течение времени рассмотрения колебаний давления трещина не растёт, т.е. мы фиксируем её объем.

Что должны сделать, чтобы смоделировать колебания?

Берём уравнения акустики: закон сохранения массы для сжимаемой жидкости и закон сохранения импульса (но он теперь нестационарный; усредняем сжимаемого Навье-Стокса — появляется коэффициент трения и добавляются конвективные слагаемые).

Для замыкания использована связь между давлением и плотностью.

Подобно газовой динамике вводится скорость звука c_0 .

12.3.3 Математическая модель: граничные условия

Математическая модель: граничные условия

- **При $x = 0$:**

На верхней границе задается расход жидкости

$$Q = Q(t) = u(t) \cdot S(0)$$

- **При $x = L$:**

Закон сохранения массы для резервуара

$$\rho_t = Mv, \quad M = \frac{\rho_0 S_p}{V_r}, \quad (6)$$

Уравнение импульса для перфораций

$$v_t = \frac{K}{\rho_0} (p_L - p_r) - \varphi, \quad K = \frac{1}{l_p}, \quad (7)$$

для ламинарного случая $\varphi = \frac{8\pi\nu v}{S_p}$, для турбулентного течения $\varphi = f \frac{v|v|}{r_p}$,

$$S(L) \cdot u(L, t) = S_p \cdot v(t) \quad (8)$$

На верхней границе задан расход (здесь и задана зависимость расхода от времени, т.е., например, резкое закрытие скважины для инициации hammer эффекта), а при $x = L$ записывается некоторое уравнение для перфораций (закон сохранения импульса для перфораций – аналог того падения давления вдоль перфораций, только оно здесь записано в динамическом виде с некоторыми неопределенными коэффициентами) плюс закон сохранения массы именно для трещины (считаем, что изменение плотности пропорционально скорости закачки; подобно мячику: объем у мячика изменяется не сильно, но он становится плотнее).

На слайде выше представлен именно наш подход, который прорабатывается в институте гидродинамики.

Математическая модель

Выпишем условие Carey, Mondal на нижней границе в виде:

$$\Delta p = IQ_{tt} + RQ_t + \frac{Q}{C}, \quad (9)$$

В ламинарном случае из уравнений (6), (7) получаем условие

$$\Delta p = \frac{\rho_0}{K}v_{tt} + \frac{8\pi\mu}{S_p K}v_t + c^2 M v, \quad (10)$$

Таким образом, при выборе коэффициентов

$$I = \frac{\rho_0}{KS_p}, \quad R = \frac{8\pi\mu}{S_p^2 K}, \quad C = \frac{1}{c^2 S_p M}$$

границные условия в обоих моделях совпадают

Все эти уравнения собираются в одно. И смотрите: здесь интересно то, что можно провести аналогию с колебательным контуром. Есть индуктивность, активное сопротивление, ёмкость. Аналогию с колебательным контуром в основном проводят западные коллеги. Но в принципе плюс минус одинаково.

У нас в институте гидродинамики в итоговом выражении есть физически обоснованные константы, а у западных коллег просто колебательный контур.

Математическая модель

Условие (10) упрощается в случае, когда можно пренебречь v_t в левой части (7),

$$\rho_t = K_1 (p_L - p_r), \quad K_1 = \frac{K M S_p}{8 \rho_0 \pi \nu}, \quad M = \frac{\rho_0 S_p}{V_r}, \quad (11)$$

приходим к условию, в которое входит давление в резервуаре.

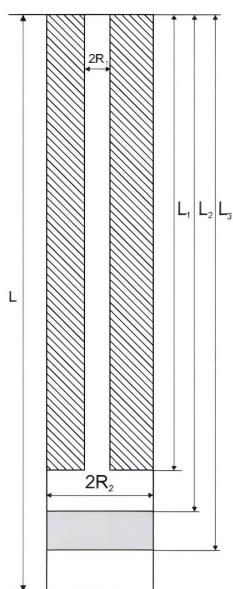
Расчет волнового пакета в скважинах Patzek & De, 2000 и Hwang, 2017 проводился по двум моделям:

- модель с условием (10) на нижней границе (пересчет коэффициентов R, C, I)
- упрощенная модель с условием (11) на нижней границе

Было показано, что обе модели дают хорошее совпадение с экспериментальными данными, поэтому для рассматриваемых скважин достаточно использовать более простую равновесную модель.

12.3.4 Примеры расчётов

Примеры расчетов: Wang



В работе Wang, 2008 приведено описание гидроудара в экспериментальной скважине, конструкция которой приведена на рисунке слева.

Было замечено, что для данной скважины давление в нижней части за время существования волнового пакета практически не менялось.

Это позволило расщепить полную задачу на задачи в верхней и нижней частях скважины, т.к. в точке $x = L_1$ условия (6), (7) заменяются на условие $p(L_1) = \text{const}$

Примеры расчетов

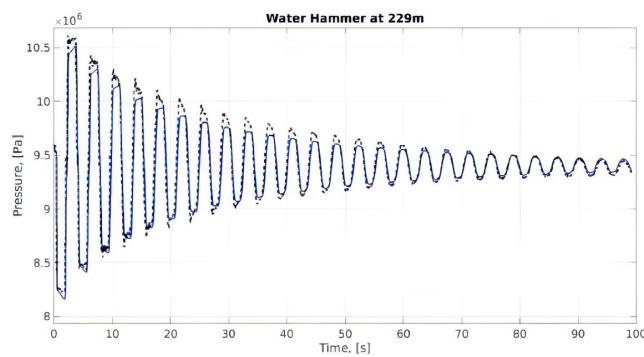
В процессе эксперимента (Wang) резко прекращалась подача воды в скважину и проводились замеры давления на глубинах 229, 762 и 1356 метров.

Параметры скважины и жидкости, использующиеся в расчетах, были выбраны в соответствии с экспериментальными данными

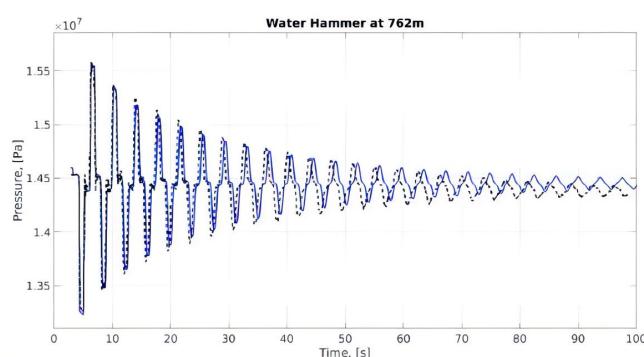
$$L = 1433 \text{ м}, L_1 = 1301 \text{ м}, L_2 = 1379 \text{ м}, L = 1402 \text{ м}, \quad (12)$$

$$R_1 = 0.03711 \text{ м}, R_2 = 0.0889 \text{ м}, c_0 = 1370 \text{ м/с}, p_a = 7.5 \cdot 10^6 \text{ Па}, \\ u_0 = 0.887 \text{ м/с}, \theta = 7.3^\circ, g = 9.8 \cdot \cos\varphi \text{ м/с}^2, K'_0 = K_0 c_0^2 = 200 \text{ 1/с.}$$

Примеры расчетов: течение в верхней части



На верхнем рисунке — реальное давление и результаты расчетов на глубине 229 м



На нижнем рисунке — на глубине 762 м.

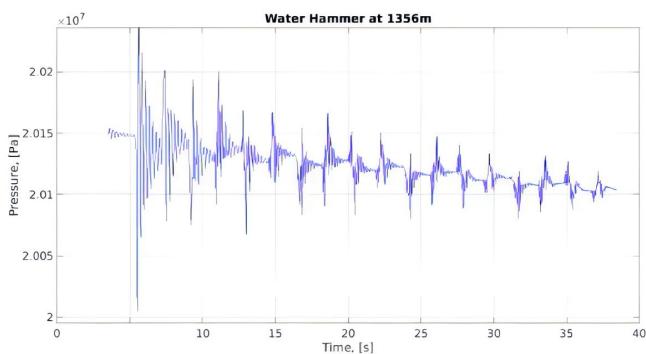
Данный результат был получен без привлечения дополнительной информации о течении в нижней части скважины.

Фишка в том, что есть сравнение нашей модели с экспериментальными данными (представлено на графиках на слайде выше). Видно, что с помощью модели достаточно хорошо удаётся описать происходящий колебательный процесс.

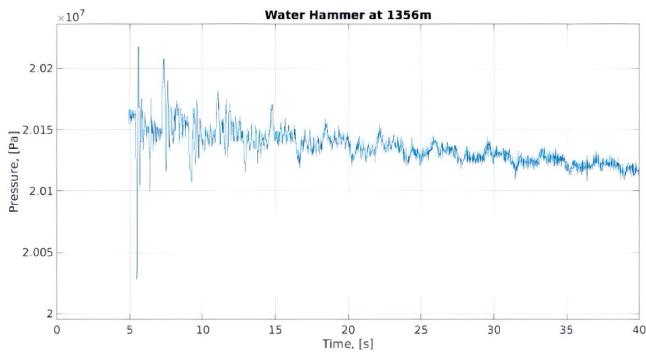
Но здесь оказалось, что на результат очень сильно влияет скорость звука. Если мы не знаем достаточно точно скорость звука, то очень сложно правильно смоделировать этот процесс.

Кроме того, оказалось, что вообще говоря hammer effect очень мало чувствителен к параметрам трещины (а западные коллеги усердно пытались определять параметры трещины с помощью hammer эффекта, но тоже не получилось разумных результатов).

Примеры расчетов: течение в нижней части



На верхнем рисунке показаны результаты расчетов давления на глубине 1356 м.

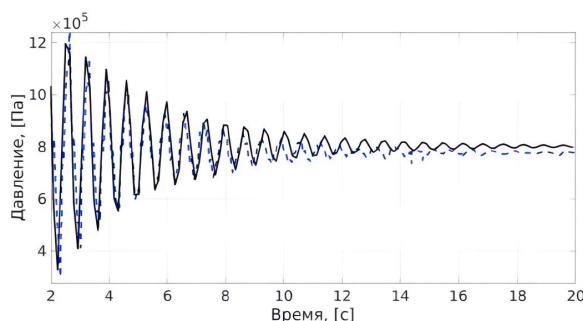
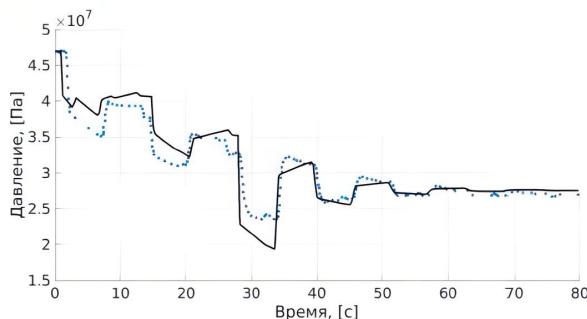


На нижнем рисунке — реальное значение давления на глубине 1356 м.



Примеры расчетов

Рассмотрим скважины с более сложной конструкцией, описанные в работах Patzek & De, 2000 и Hwang, 2017



На верхнем рисунке показано сравнение реального давления (син.) и расчета по равновесной модели. Экспериментальные данные из работы [6].

На нижнем рисунке — расчет одной из скважин [4].

12.3.5 Заключение

Заключение

- В работе была получена модель, описывающая развитие волнового пакета в скважине, соединенной с резервуаром. Данная модель при выборе коэффициентов может быть сведена к [2], [6].
- Показано, что в данную модель можно упростить и снизить количество неизвестных параметров.
- Проведены расчеты по полной и упрощенной моделям и показано, что обе модели обеспечивают хорошее совпадение с экспериментом
- Получен набор параметров, необходимых для расчета волнового пакета:
 - конструкция скважины
 - реология жидкости
 - скачок давления на устье при остановке закачки

12.3.6 Список источников

Список источников

- [1] C. Holzhaugen, R. Gooch, Impedance of hydraulic fracture: its measurement and use for estimating fracture closure and dimensions, Paper SPE 13892 presented at the SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium, 1985.
- [2] M. Carey, S. Mondal, M. Sharma, Analysis of water hammer signatures for fracture diagnostics, Paper SPE 174866-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2015.
- [3] C. Holzhaugen, H. Egan, Fracture diagnostics in East Texas and Western Colorado using hydraulic-impedance method, Paper SPE 15215 presented at the SPE Unconventional Gas technology Symposium, 1986.
- [4] T. Patzek, A. De, Lossy transmission line model of hydrofractured well dynamics, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, vol. 25, no. 12, P. 59-77.
- [5] X. Wang, K. Hovem, D. Moos, Y. Quan, Water hammer effects on water injection well performance and longevity, Paper SPE 112282 presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 2008.
- [6] J. Hwang, J. Szabian, M. Sharma, Hydraulic Fracture Diagnostics and Stress Interference Analysis by Water Hammer Signatures in Multi-Stage Pumping Data, URTeC 2687423.
- [7] S. Choi, W. Huang, Impact of water hammer in deep sea water injection wells, Paper SPE 146300 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2011.
- [8] J. Shlyapoberdsky, J.K. Wang, W.W. Walhaug, Overpressure calibrated design of hydraulic fracture stimulations, Paper SPE 18194, 1988.

13 Лекция 18.05.2021 (Байкин А.Н.)

13.1 Модели инициации трещины гидроразрыва

13.1.1 Моделирование гидроразрыва

Моделирование гидроразрыва



С точки зрения моделирования гидроразрыва мы с вами по большей части рассматривали распространение уже так называемой развитой трещины, т.е. когда она инициировалась, вышла на направление перпендикулярное минимальным главным напряжениям в пласте и распространяется по определённому закону.

Практика показывает, что эта магистральная трещина распространяется преимущественно в некоторой выделенной плоскости (по крайней мере в однородном пласте).

СЕГОДНЯ мы с вами рассмотрим процесс, который изображён на первом рисунке на слайде, т.е. процесс инициации: есть открытый ствол или перфорация и начинаем закачивать жидкость, растёт давление и спрашивается, при каком давлении порода порвётся и трещина начнёт распространяться.

Есть ещё промежуточный процесс между инициацией трещины и развитой трещиной – это так называемое начальное распространение трещины: трещина, инициированная из открытого ствола скважины или перфорации (которые могут быть ориентированы под некоторым углом), может быть не перпендикулярна минимальным сжимающим напряжениям, тогда в процессе начального распространения эта трещина попытается выйти в магистральную плоскость каким-то образом. Во время этого переходного процесса трещина может изгибаться, может пе-

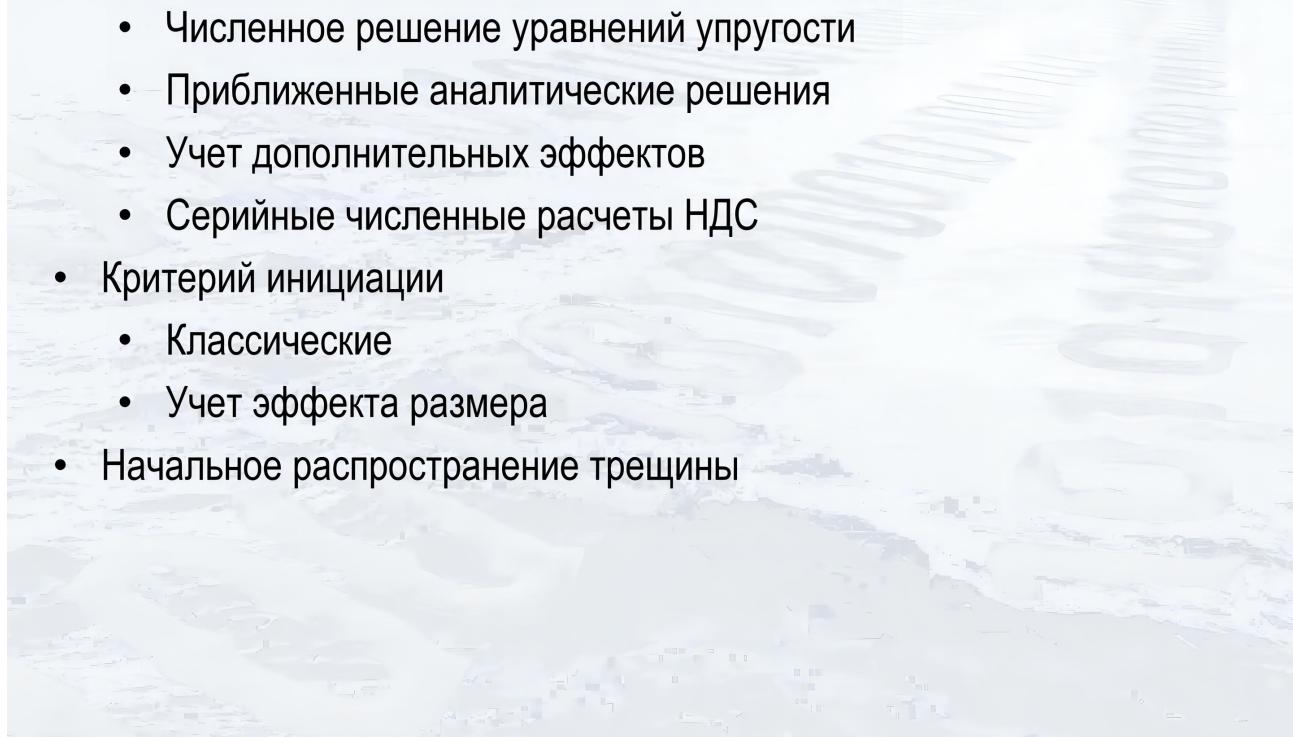
регибаться, что даст дополнительное гидродинамическое сопротивление в этой зоне (вообще говоря можно получить сток); если трещина сильно перегнётся в этой зоне, то это даст неблагоприятные последствия.

13.1.2 Инициация трещины

Инициация трещины

Этапы расчета :

- Напряженно-деформированное состояние
 - Численное решение уравнений упругости
 - Приближенные аналитические решения
 - Учет дополнительных эффектов
 - Серийные численные расчеты НДС
- Критерий инициации
 - Классические
 - Учет эффекта размера
- Начальное распространение трещины



Здесь представлен небольшой outline нашей сегодняшней беседы. Будут продемонстрированы результаты группы Чёрного из института вычислительных технологий.

13.1.3 Расчёт напряжённо-деформированного состояния

Расчет напряженно-деформированного состояния

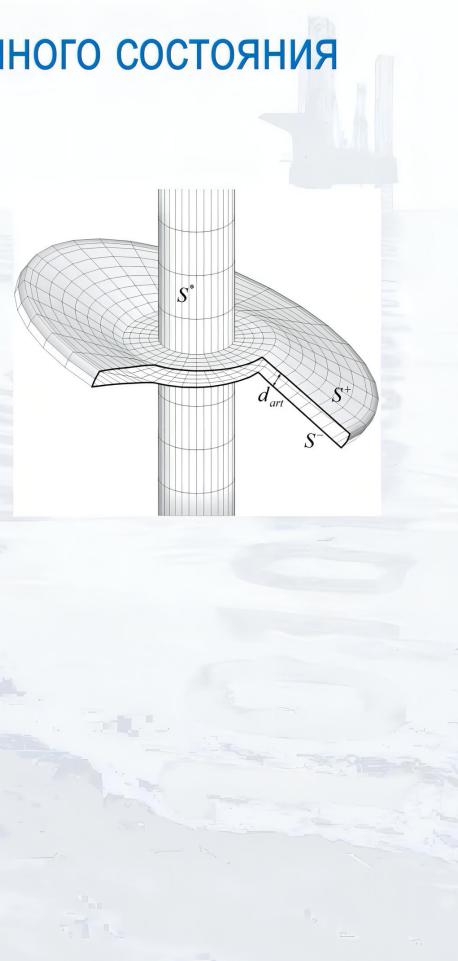
Постановка задачи

$$\sigma_{ij,j}(x) = 0, \quad x \in V \quad \text{уравнения равновесия}$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{kk} \quad \text{закон Гука}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{определение деформаций}$$

$$t(x)|_{S_i} = g(x) \quad \text{границные условия}$$



4
5/15/2020

Сначала давайте поговорим, как формулируется задача об инициации. Понятно, что у нас есть скважина (с перфорацией) и вокруг есть некоторая упругая среда, представляющая собой породу. Эта упругая среда подчиняется уравнению равновесия и закону Гука (в самом простом случае без учёта пластичности, нелинейных вкраплений и так далее), также есть связь между деформациями и перемещениями.

Далее необходимо поставить граничные условия. Здесь на слайде они выписаны в общем виде, но сразу скажу, что это будут граничные условия на бесконечности (или в какой-то дали от ствола скважины – условной бесконечности; можно показать, что если отойти на расстояние порядка 10 диаметров от ствола скважины, то скважина перестанет влиять на напряжённо-деформированное состояние), а на самой скважине задаётся давление жидкости (которое всегда действует перпендикулярно поверхности, т.е. оно будет действовать по нормали и пытаться как-бы сдвинуть/расширить породу).

Сразу пробегусь, как можно это всё решить численно. На рисунке на слайде сетка изображена не просто так. Группа Чёрного предлагает решать эту задачу методом граничных элементов.

13.1.4 Численные решения уравнений упругого равновесия

Численные решения уравнений упругого равновесия

Метод граничных элементов

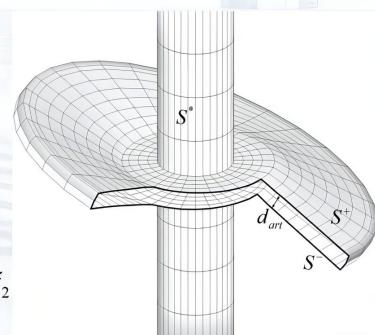
Интегральное уравнение для точки границы

$$-0.5u_i(x') = \int_S U_{ij}(x', x) t_j(x) dS(x) - \int_S T_{ij}(x', x) u_j(x) dS(x)$$

Выражение координат и неизвестных функций через базисные функции

$$\mathbf{x}(\xi_1, \xi_2) = \sum_{m=1}^M \mathbf{x}^m \varphi_m(\xi_1, \xi_2), \quad \mathbf{u}(\xi_1, \xi_2) = \sum_{m=1}^M \mathbf{u}^m \varphi_m(\xi_1, \xi_2), \quad \mathbf{t}(\xi_1, \xi_2) = \sum_{m=1}^M \mathbf{t}^m \varphi_m(\xi_1, \xi_2)$$

Искусственный разрез
для классического МГЭ



Система линейных уравнений для коэффициентов разложения

$$-0.5u_j(x') + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_{ij}^{nm} t_j^{nm} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M T_{ij}^{nm} u_j^{nm}$$

$$(T^* - \frac{1}{2}I)\mathbf{u} = U^*\mathbf{t}$$

5
5/15/2020

В прошлом семестре у вас уже был метод граничных элементов. Он основан на так называемой теореме взаимности.

В чём основная фишка этого метода? Он позволяет свести вообще говоря трёхмерную задачу к можно сказать двумерной, т.е. когда уравнения и неизвестные записываются в некоторой двумерной поверхности.

Основной минус: матрица системы получается в итоге полностью заполненной – это является накладными расходами этого метода.

В интегральное соотношение необходимо подставить дискретизацию. Можно сказать, что это такой метод конечных элементов на поверхности. И после этого у нас формируется система линейных уравнений.

Это такой в данном случае метод, где можно «бить пушкой по воробьям» (в смысле этой задачи по инициации). Можно задать перфорацию произвольной формы, можно добавить обсадную колонну; здесь же разные варианты могут быть: открытый ствол (когда у нас просто есть скважина, в которую начали качать жидкость – как порвалась порода, так и порвалась), второй вариант – взять обсадную колонну и проделать в ней перфорацию (тогда на итог будет влиять и обсадная колонна, и перфорация), третий вариант – зона перфорирования изолируется так называемым пакером (тогда есть давление после пакера и давление перед пакером). Т.е. задачи разные, но все они похожие и в принципе каждую из них можно решать (в частности с помощью метода граничных элементов).

Мы пошли по другому пути: студент второго курса нашей программы уехал на 1.5 года во Францию и занимается задачами инициации, но с точки зрения конечных элементов. Рассказал вам общую информацию про численный метод; давайте пойдём дальше.

13.1.5 Приближённые решения (2D)

Приближенные решения (2D)

Задача Кирша

Одностороннее растяжение пластины с круговым вырезом

$$\sigma_{\theta\theta}(r = a) = \sigma - 2\sigma \cos(2\theta)$$

Растяжение с 2x сторон:

$$\sigma_{\theta\theta}(r = a) = \sigma_x^\infty - 2\sigma_x^\infty \cos(2\theta)$$

$$+ \sigma_y^\infty - 2\sigma_y^\infty \cos(2\theta - \pi) =$$

$$(\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos(2\theta)$$

$$+$$

Тимошенко, Гудиер Теория упругости //Гл.4, стр.107

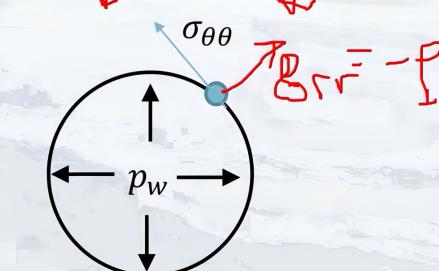
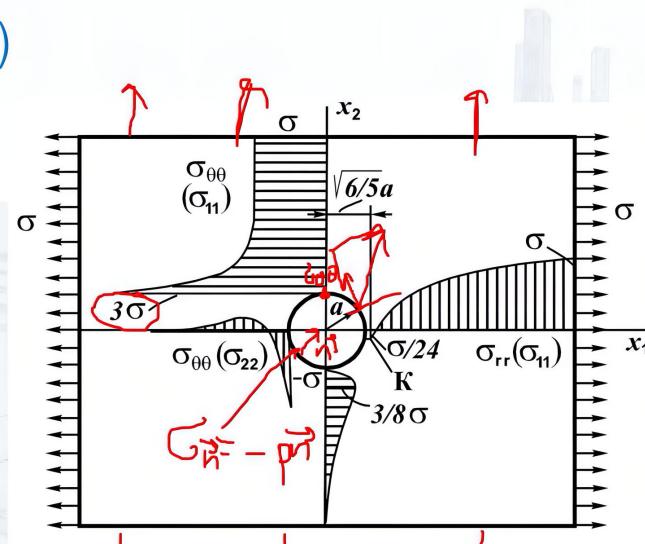
Упр. Растяжение внутренним давлением

Одностороннее растяжение пластины с круговым вырезом

6
5/15/2020

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{a^2}{r^2} p_w$$

$$u_r = u_r(r)$$



Нулевые напряжения на бесконечности

Чтобы вы понимали (хотя бы на пальцах), как в простых ситуациях это всё (НДС вблизи скважины) работает, мы сейчас рассмотрим с вами аналитические решения.

С одной стороны, чтобы сформировать некоторое понимание, а с другой стороны, чтобы уже получить какие-то конечные формулы, мы рассмотрим вспомогательную задачу, а именно задачу Кирша. Это двумерная задача в условиях плоской деформации пластины. В центре пластины есть отверстие радиуса a , которое изначально не нагружено. Мы начинаем тянуть (растягивать) пластину справа и слева по горизонтали с напряжением σ , а сверху и снизу напряжений не прикладываем.

Тогда можно показать, что решение задачи (напряжение на границе отверстия) задаётся в следующем виде:

$$\sigma_{\theta\theta}(r = a) = \sigma - 2\sigma \cos(2\theta) \quad (13.1)$$

В книге Тимошенко, Гудиер это получено с помощью функции напряжений. Видим, что есть зависимость $\sigma_{\theta\theta}$ от угла θ . Максимальное напряжение на границе отверстия достигается при $\theta = \pm\pi/2$ и равно 3σ .

Давайте усложним задачу, а именно дополнительно приложим растягивающие напряжения σ_y^∞

сверху и снизу по вертикали; напряжения σ_x^∞ по горизонтали оставим неизменными. В силу линейности рассматриваемых уравнений упругости решение задачи (напряжение на границе отверстия) в этом случае запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta}(r = a) &= \sigma_x^\infty - 2\sigma_x^\infty \cos(2\theta) + \sigma_y^\infty - 2\sigma_y^\infty \cos(2\theta - \pi) = \\ &= (\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos(2\theta)\end{aligned}\quad (13.2)$$

Далее снимем растягивающие напряжения (нулевые напряжения на бесконечности), но начнём в скважину закачивать жидкость с давлением p_w . Тогда получим

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{a^2}{r^2} p_w \quad (13.3)$$

При $r = a$ напряжение $\sigma_{\theta\theta} = p_w$. Это означает, что когда вы действуете давлением, то с одной стороны у вас возникает напряжение $\sigma_{rr} = -p_w$, перпендикулярное границе отверстия, а с другой стороны дополнительно появляется окружное напряжение $\sigma_{\theta\theta} = p_w$. И именно за счёт этого окружного напряжения порода будет рваться.

Используя линейность рассматриваемых уравнений упругости, по принципу суперпозиции можем получить решение комбинированной задачи, когда в главных осях заданы напряжения на бесконечности и задано давление жидкости в скважине. Получаем:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta}(r = a) &= \sigma_x^\infty - 2\sigma_x^\infty \cos(2\theta) + \sigma_y^\infty - 2\sigma_y^\infty \cos(2\theta - \pi) + p_w = \\ &= (\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \cos(2\theta) + p_w\end{aligned}\quad (13.4)$$

Вам я предлагаю вывести формулу (13.3) самостоятельно. Небольшое указание: если будете искать решение в виде $u_r = u_r(r)$, то быстро придёте к результату.

Приближенные решения (2D)

Полное решение

Вводя переобозначения

$$\sigma_x^\infty = -\sigma_{min}$$

$$\sigma_y^\infty = -\sigma_{max}$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r = a) = p_w - (\sigma_{max} + \sigma_{min}) - 2(\sigma_{max} - \sigma_{min})\cos(2\theta) \rightarrow \max$$

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta}(\theta) = 0$$

Давление инициации

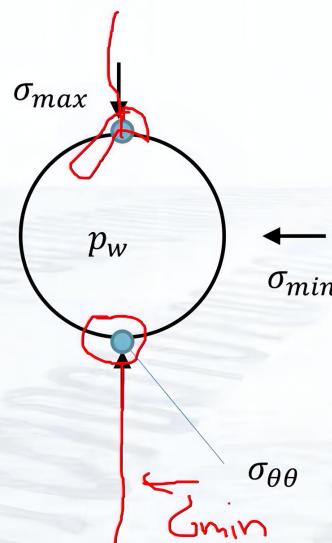
Растягивающие напряжения

$$\sigma_{\theta\theta} = -3\sigma_{min} + \sigma_{max} + p_w$$

Условие разрушения

$$\max\{\sigma_{\theta\theta}\} = \sigma_t$$

7
5/15/2020



Необходимое давление в скважине

$$p_w = 3\sigma_{min} - \sigma_{max} + \sigma_t$$

Посмотрим на решение, которое только что мы с вами получили.

Так как в породе действуют сжимающие напряжения, то мы поменяем знак напряжений на бесконечности $\sigma_x^\infty = -\sigma_{min}$ и $\sigma_y^\infty = -\sigma_{max}$ и подставим их в формулу (13.4):

$$\sigma_{\theta\theta}(r = a) = p_w - (\sigma_{max} + \sigma_{min}) - 2(\sigma_{max} - \sigma_{min})\cos(2\theta) \quad (13.5)$$

Теперь наша задача понять, в каком месте инициируется трещина.

Самой простой критерий звучит так: как только в какой-то точке скважины растягивающее напряжение достигает некоторого критического значения σ_t , тогда возникает разрушение.

Соответственно необходимо решить задачу максимизации функции $\sigma_{\theta\theta}$. Для этого (ясное дело) можно посчитать производную. Но в нашем случае всё просто: максимум достигается при $\cos(2\theta) = -1$, т.е. разрушение будет возникать при $\theta = \pm\pi/2$.

Это соответствует нашим ожиданиям (представлениям о процессе), потому что трещина действительно пойдёт перпендикулярно минимальным сжимающим напряжениям.

Давление инициации:

$$p_w = 3\sigma_{min} - \sigma_{max} + \sigma_t \quad (13.6)$$

Здесь стоит заметить, что часто σ_t пренебрегают (говорят, что она мала по сравнению с σ_{min} и σ_{max} – напряжение σ_t порядка каких-то мегапаскалей, а напряжения σ_{min} и σ_{max} порядка нескольких десятков мегапаскалей).

13.1.6 Приближённые решения (3D)

Приближенные решения (3D)

Полное решение

$$\sigma_{rr} = -p$$

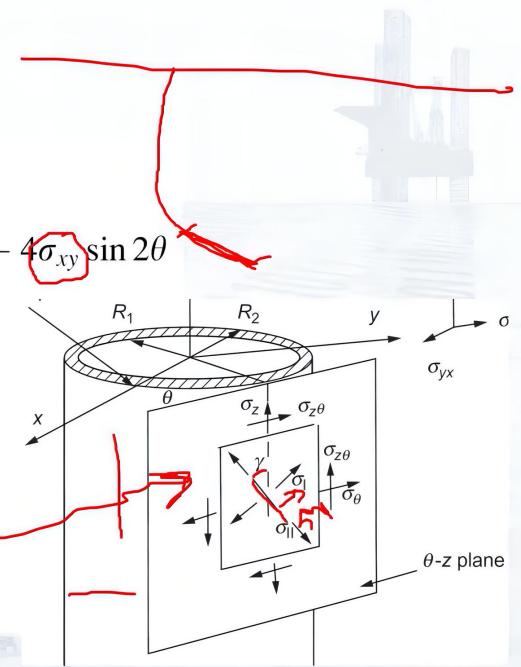
$$\sigma_{\theta\theta} = p + \underline{\sigma_{xx}}(1 - 2 \cos 2\theta) + \underline{\sigma_{yy}}(1 + 2 \cos 2\theta) - 4\underline{\sigma_{xy}} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{zz} = \underline{\sigma_{zz}^\infty} - v[2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta + 4\sigma_{xy} \sin 2\theta]$$

$$\sigma_{r\theta} = 0$$

$$\sigma_{rz} = 0$$

$$\sigma_{\theta z} = -\underline{\sigma_{xz}} \sin \theta + 2\underline{\sigma_{yz}} \cos \theta$$



Удовлетворяют условиям совместности
(Уравнения Бельтрами-Митчела)!

* $\sigma_{zz}^\infty - \sigma_{zz}$ вдали (для ясности)
γ – угол между трещиной и осью z

$$\sigma_{\max}(\theta) = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + \sigma_{\theta z}^2}$$

При $\underline{\sigma_{\theta z}} = 0$
 $\sigma_{\max} = \max(\underline{\sigma_{\theta\theta}}, \underline{\sigma_{zz}})$

Ching H. Yew, Xiaowei Weng **Mechanics of Hydraulic Fracturing 2nd Edition**

Дальше будем усложнять задачу: во-первых, скважина может быть наклонена и тогда мы не будем находиться в главных осях (в тензоре напряжений могут возникнуть внедиагональные элементы); во-вторых, действуют напряжения σ_{zz}^∞ сверху.

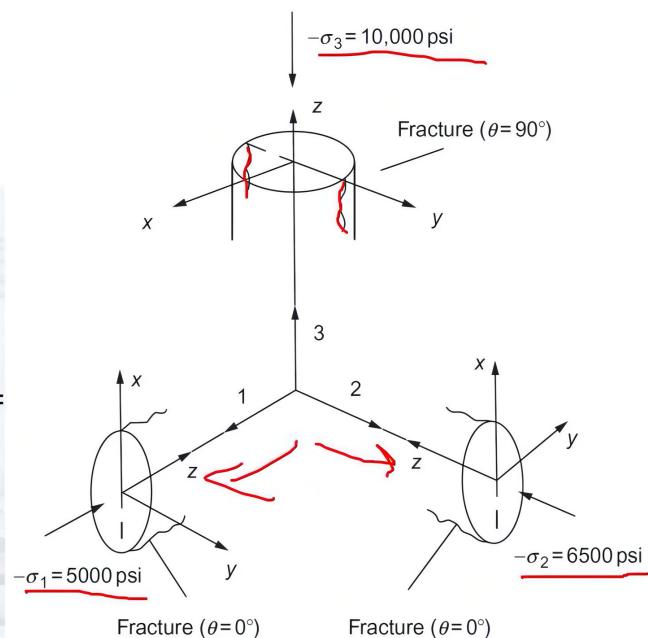
Пример (3D)

Вертикальная скважина

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta} - p_w &= (\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty)\cos(2\theta) = \\ &= -(5000 + 6500) + 2(5000 - 6500)\cos(2\theta) = \\ &= -11500 - 3000\cos(2\theta)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\max(\sigma_{\theta\theta}) &= -11500 - 3000 * (-1) = \\ &= -8500 + p_w \\ \theta &= \pm\pi/2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta} &= -3\sigma_{min} + \sigma_{max} + p_w = \\ &= -15000 + 6500 + p_w = -8500 + p_w\end{aligned}$$



Горизонтальная скважина (упр.)

9
5/15/2020

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{\theta z}}{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}} \right)$$

Давайте рассмотрим конкретный пример, как эти формулы уже можно применить. Представьте, что у вас есть вертикальная скважина: по вертикали действует напряжение $\sigma_3 = -10000$ psi, минимальное горизонтальное напряжение $\sigma_1 = -5000$ psi, максимальное горизонтальное напряжение $\sigma_2 = -6500$ psi.

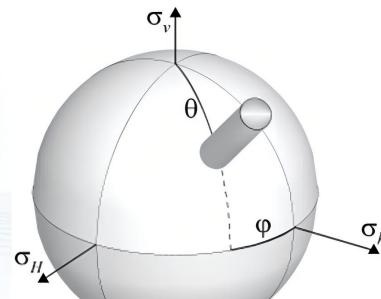
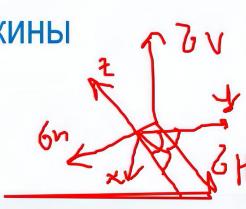
Упражнение: посчитать давление инициации и угол для горизонтальной скважины. Здесь есть два варианта: скважина расположена вдоль первого направления (минимальных горизонтальных напряжений) или вдоль второго направления (максимальных горизонтальных напряжений).

13.1.7 НДС для перфорированной скважины

НДС для перфорированной скважины

1. Напряжения в СК, связанной со скважиной

$$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v \rightarrow \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy} \dots$$



2. Напряжения в цилиндрической СК

$$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy} \rightarrow \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}, \dots$$

3. Добавка давления в скважине

$$\sigma_{rr} + p_w$$

4. Плоская задача для перфорации

$$\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}, \dots \rightarrow \sigma_{xx}^p, \sigma_{yy}^p, \sigma_{xy}^p$$

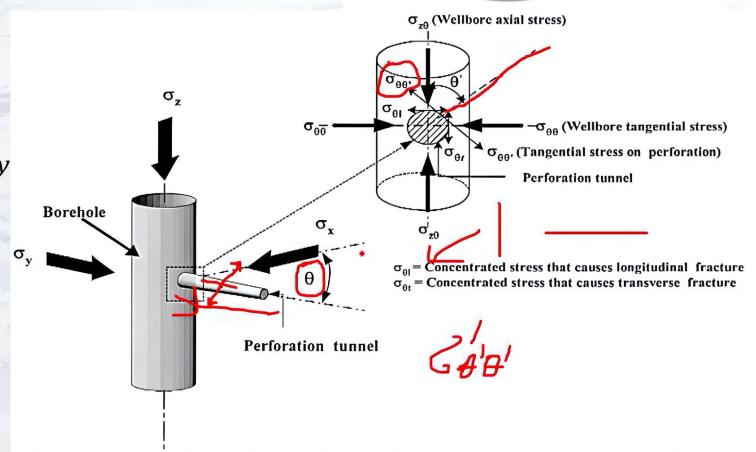
5. Напряжения на границе

перфорации в цилиндрической СК

$$\sigma_{xx}^p, \sigma_{yy}^p, \sigma_{xy}^p \rightarrow \sigma_{\theta\theta}^p, \sigma_{rr}^p, \sigma_{r\theta}^p$$

6. Давление инициации для перфорации

$$\sigma_{\theta\theta}^p, \sigma_{rr}^p, \sigma_{r\theta}^p \rightarrow p_{init}$$



θ – угол ориентации перфорации!

θ' - окружной угол в сечении перфорации, отсчит. от σ_{zz}

10
5/15/2020

M.M. Hossain, M.K. Rahman, S.S. Rahman **Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes** // Journal of Petroleum Science and Engineering 27 2000 129–149 (Сжимающие напряжения – пропорциональны в этой статье! Поэтому напряжения с толщиной по зонам!)

Дальше будем усложнять задачу, а именно добавим перфорацию.

13.1.8 Примеры для перфорированной скважины

Примеры для перфорированной скважины

Вертикальная скважина

$$\underline{\sigma_z = \sigma_v} \quad \underline{\sigma_x = \sigma_H} \quad \underline{\sigma_y = \sigma_h}$$

$\theta = 0$ – ориентация
вдоль макс. горизонт.
напряжения

$$\theta' = 0$$

$$\underline{\sigma_{\theta 1} = 9\sigma_h - 3\sigma_H - \sigma_{z\theta} - 4P_w} \sim \cancel{6+}$$

$$\underline{\sigma_{z\theta} = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)} \quad \text{С минусом, т.к. сжимающие стрессы положительны}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta'} &= (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_{z\theta}) + 2(\sigma_x + \sigma_y - \sigma_{z\theta})\cos 2\theta' \\ &\quad - 2(\sigma_x - \sigma_y)(\cos 2\theta + 2\cos 2\theta \cos 2\theta') \\ &\quad - 4\tau_{xy}(1 + 2\cos 2\theta)\sin 2\theta - 4\tau_{z\theta}\sin 2\theta' \\ &\quad - P_w(2\cos 2\theta' + 2) \end{aligned} \quad (29)$$

Поперечная трещина $\theta' = \pi/2$

$$\sigma_H \geq \sigma_h + \frac{\sigma_v}{2\nu}$$

Горизонтальная скважина $\theta = 0$ и $\theta = 90$

$$P_{w0} = \frac{1}{4} \{ 9\sigma_H - \sigma_h - 3\sigma_v + 2\nu(\sigma_v - \sigma_H) \}$$

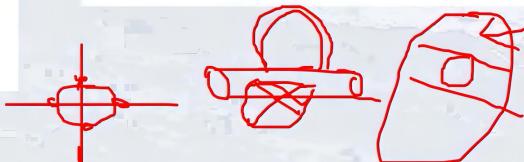
$$P_{w90} = \frac{1}{4} \{ 9\sigma_v - \sigma_h - 3\sigma_H + 2\nu(\sigma_v - \sigma_H) \}$$

© 10/2020

Поперечная трещина

$$\theta' = \pi/2$$

$$\sigma_{\theta 1} = 3\sigma_h - (\sigma_v - \sigma_H)(2 - 6\nu) - \sigma_v - \sigma_H$$



13.1.9 Дополнительные эффекты

Дополнительные эффекты

Пористость

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \alpha \delta_{ij} p$$

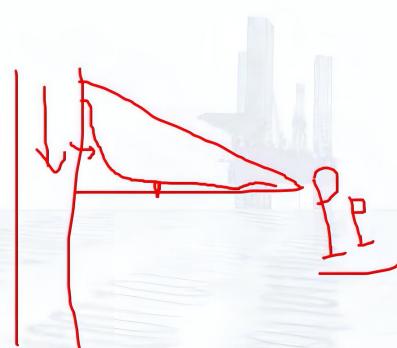
закон Гука

$$P_{wf} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + \sigma_t$$

Верхняя оценка

$$P_{wf, lower} = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - 2P_p + \sigma_t}{2(1-v)}$$

Нижняя оценка



Valko Economides **Hydraulic fracture mechanics**, 1995

Температура

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \beta(3\lambda + 2\mu)(T - T_0)\delta_{ij}$$

закон Гука

Обсаженная колонна

... 3. Добавка давления в скважине

$$\sigma_{rr} + C p_w$$

$C \sim 0.2 \div 0.5$

12
5/15/2020

Что ещё может влиять на инициацию трещины?

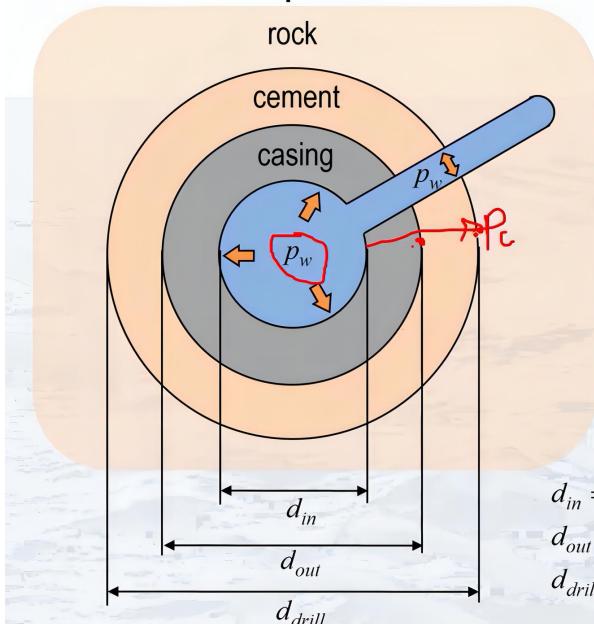
Во-первых, это поровое давление, т.е. когда мы начинаем качать жидкость в открытый ствол, то часть жидкости начинает фильтроваться в породу (динамическое воздействие). Вообще говоря, у нас даже изначально есть некоторый уровень порового давления и это давление уменьшает давление инициации трещины. По сути оно помогает инициировать трещину.

Во-вторых, температура.

В-третьих, обсадная колонна.

Обсаженная колонна

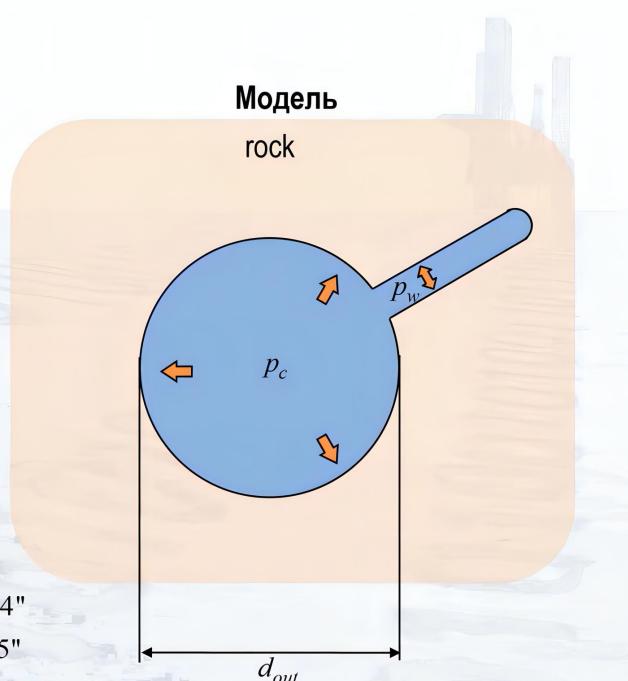
Эксперимент



$$p_c = p_0 + k \cdot (p_w - p_0)$$

Условие непрерывности смещений и напряжений

Модель



$$\begin{aligned}d_{in} &= 3.74'' \\d_{out} &= 4.5'' \\d_{drill} &= 5.875''\end{aligned}$$

p_w – давление жидкости в скважине

p_c – давление, ослабленное casing

p_0 – давление цементирования

5/15/2020

k – коэффициент ослабления давления за счет обсадной колонны

13.1.10 Серийные численные расчёты

Серийные численные расчеты

Вспомогательные задачи

$$1. \underline{\sigma_{xx} = 1}, \sigma_{xy} = 0, \sigma_{yy} = 0, \dots \quad p_w = 1$$

$$2. \sigma_{xx} = 0, \sigma_{xy} = 1, \sigma_{yy} = 0, \dots$$

...

$$6. \sigma_{xx} = 0, \sigma_{xy} = 0, \dots, \sigma_{zz} = 1,$$

$$7. \underline{\sigma = 0, p_w = 1}$$

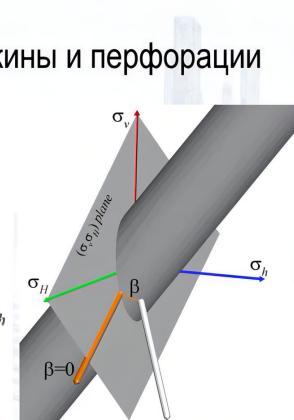
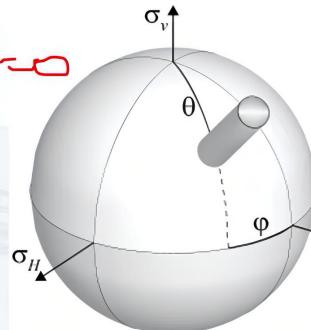
Решая находим $\sigma_3^k(x)$ для каждой задачи $k=1\dots 7$

Для каждой ориентации

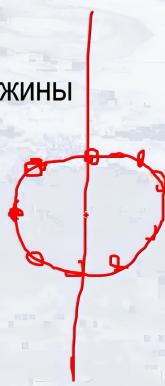
1. Находим $\sigma_k = \sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy} \dots$ в СК скважины

$$2. \underline{\sigma_3(x) = \sum_k \sigma_3^k(x) \rho_k}$$

Ориентация скважины и перфорации



σ – тензор напряжений на бесконечности

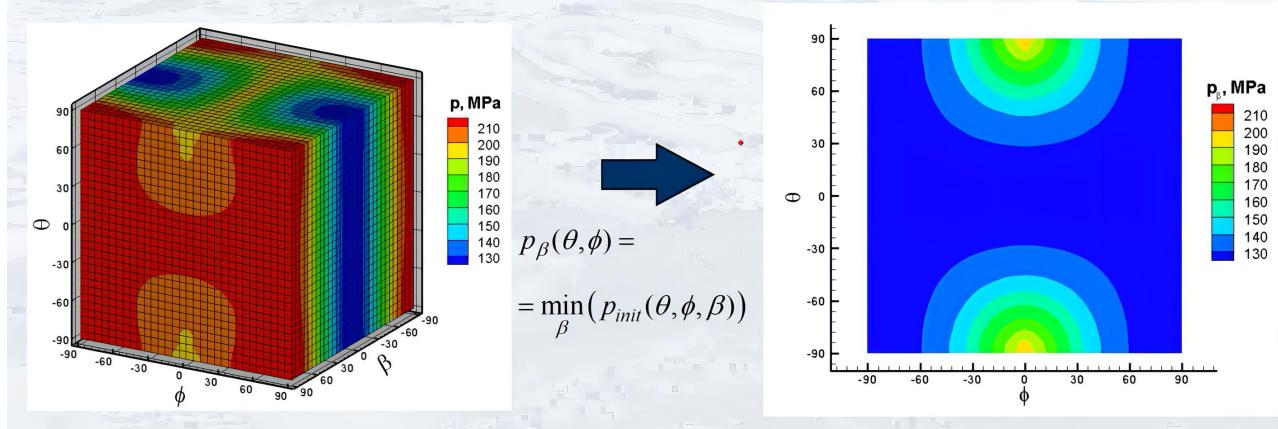
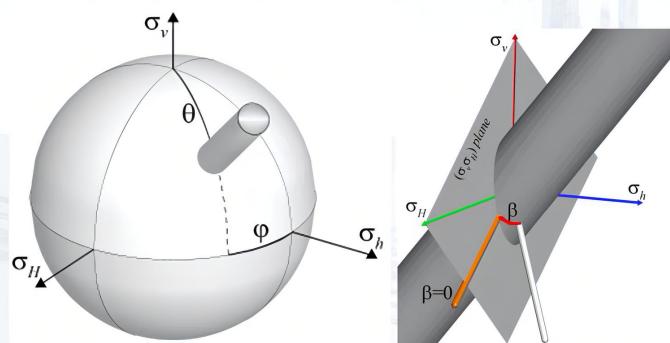


Серийные численные расчеты

Для каждой ориентации получаем давление инициации $p_{init}(\theta, \phi, \beta)$

Как анализировать три параметра?

Ориентация скважины и перфорации



Влияние ориентации скважины и перфорации на давление инициации

Месторождение Амин (Оман)

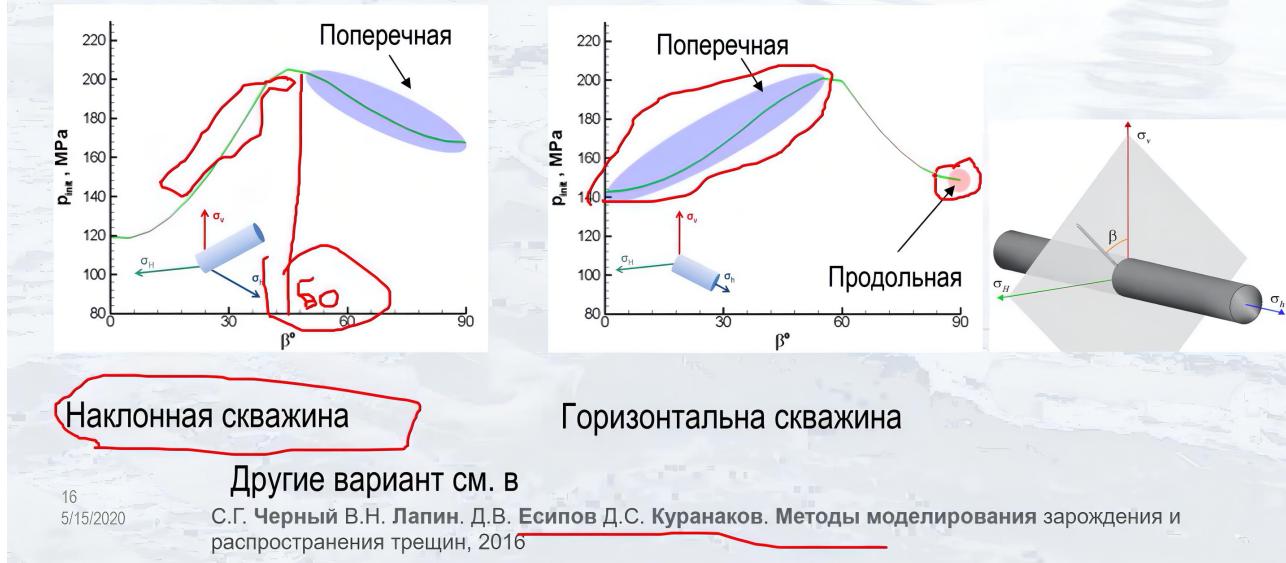
$$E = 50 \text{ GPa} \quad \sigma_H = 116 \text{ MPa}$$

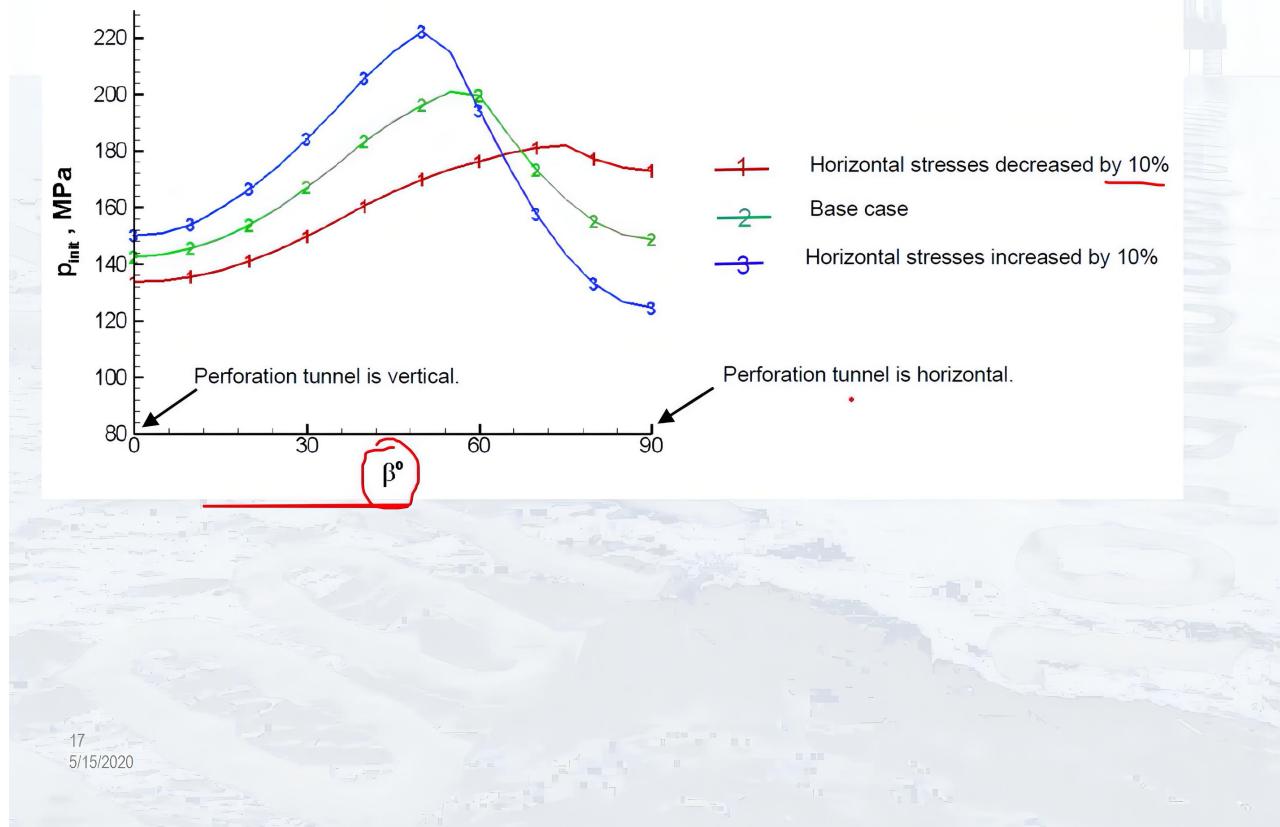
$$\nu = 0.13 \quad \sigma_h = 96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = 20 \text{ MPa} \quad \sigma_v = 118 \text{ MPa}$$



Зависимость давления от ориентации перфорации



Влияние точности определения средних напряжений σ_H 

13.1.11 Критерии инициации трещины

Критерии инициации трещины

$$F_s(x, u, \varepsilon, \sigma, \dots) \geq F_m(\sigma_t, K_{Ic}, \dots)$$

$F_s(x, u, \varepsilon, \sigma, \dots)$ – зависит от НДС

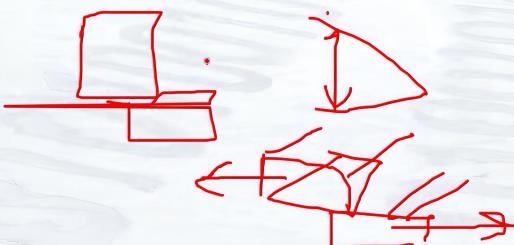
$F_m(\sigma_t, K_{Ic}, \dots)$ – определяется материалом и геометрией задачи

Классические критерии

Растягивающих напряжений

$$\sigma_3 \geq \sigma_t,$$

$\sigma_3 = \max \sigma_k$, σ_k - собственные числа σ



Разрушится ли материал, если напряжения только сжимающие ?

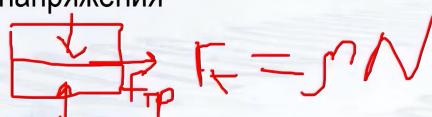
Критерии для сжимающих напряжений

Треска

$$\tau(\sigma) \geq \tau_c$$

$\tau(\sigma)$ – максимальные сдвиговые напряжения

τ_c - параметр материала



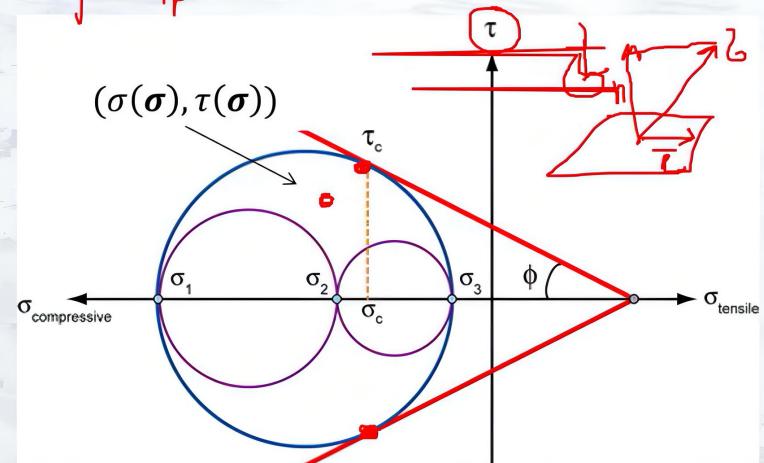
Мора-Кулонна

$$\tau(\sigma) \geq \sigma(\sigma) \tan \phi + c$$

c – сцепление

ϕ – угол внутреннего трения

Разрушение возникает, если прямая касается внешнего Круга Мора



https://ru.qwe.wiki/wiki/Mohr%20-%20Coulomb_theory

<https://www.youtube.com/watch?v=TcHXLJCPx68>

13.1.12 Учёт эффекта размера

Учет эффекта размера

Эффект размера

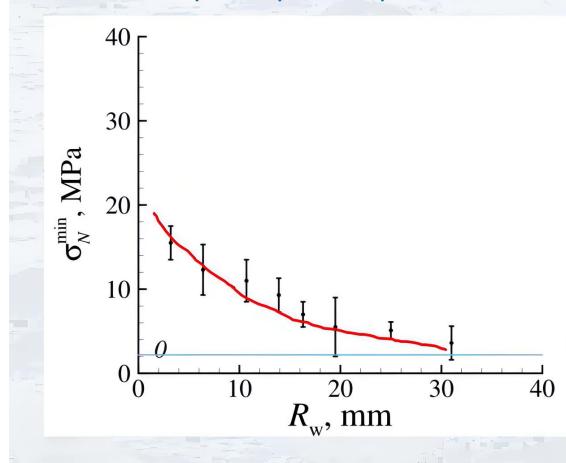
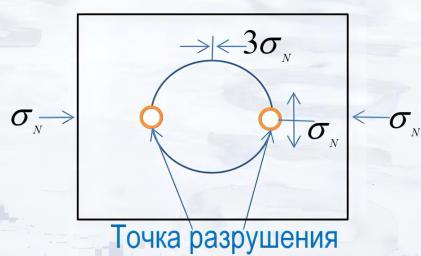
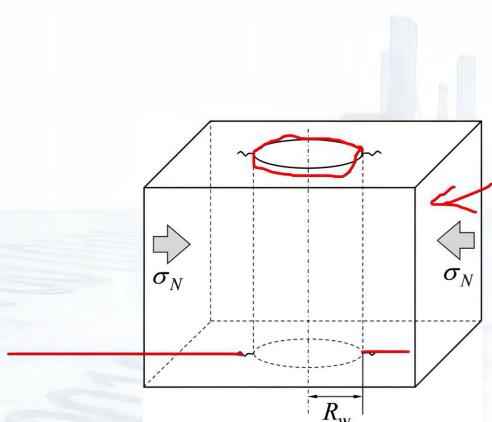
Эксперимент о сжатии куба с отверстием

Точка разрушения известна

Напряжения в точках разрушения $\sigma_3 = \sigma_N$

Разрушение наступит при $\sigma_3 = \sigma_N = \sigma_t$

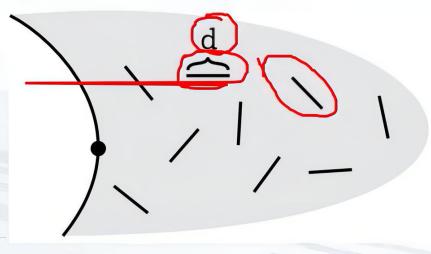
Зависимость давления разрушения
от размера отверстия



Учет трещин в материале

$$K_I(\sigma) \geq K_{Ic}$$

K_{Ic} - трещиностойкость материала

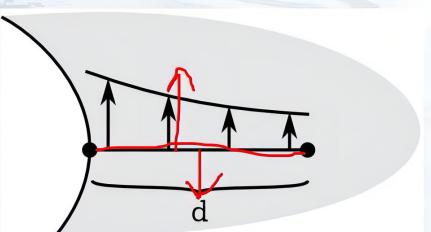


Осреднение

$$\frac{1}{d} \int_0^d \sigma_y dx \geq \sigma_t$$



$$\frac{1}{V} \int_V \sigma_{\theta\theta} dV \geq \sigma_t$$



$S = \sigma : \epsilon$ - плотность энергии деформации

$$S_c = \frac{\sigma_t^2}{2E}$$

d, V - размер области осреднения параметры материала

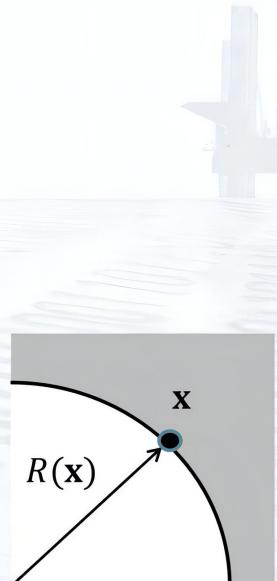
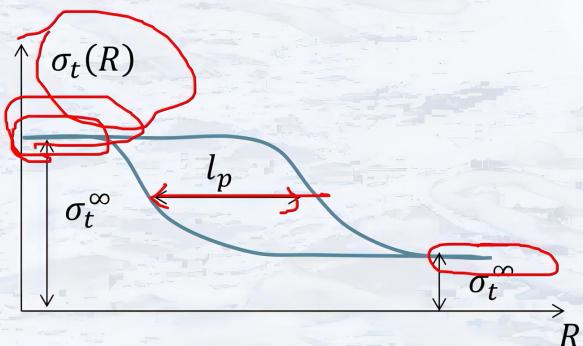
21
5/15/2020

Кривизна поверхности

$$\sigma_3 \geq \sigma_t(R)$$

$$\sigma_t(R) = \frac{\sigma_t^0 + R_l(R)\sigma_t^\infty}{1 + R_l(R)}, \quad R_l(R) = \frac{R}{l_p}$$

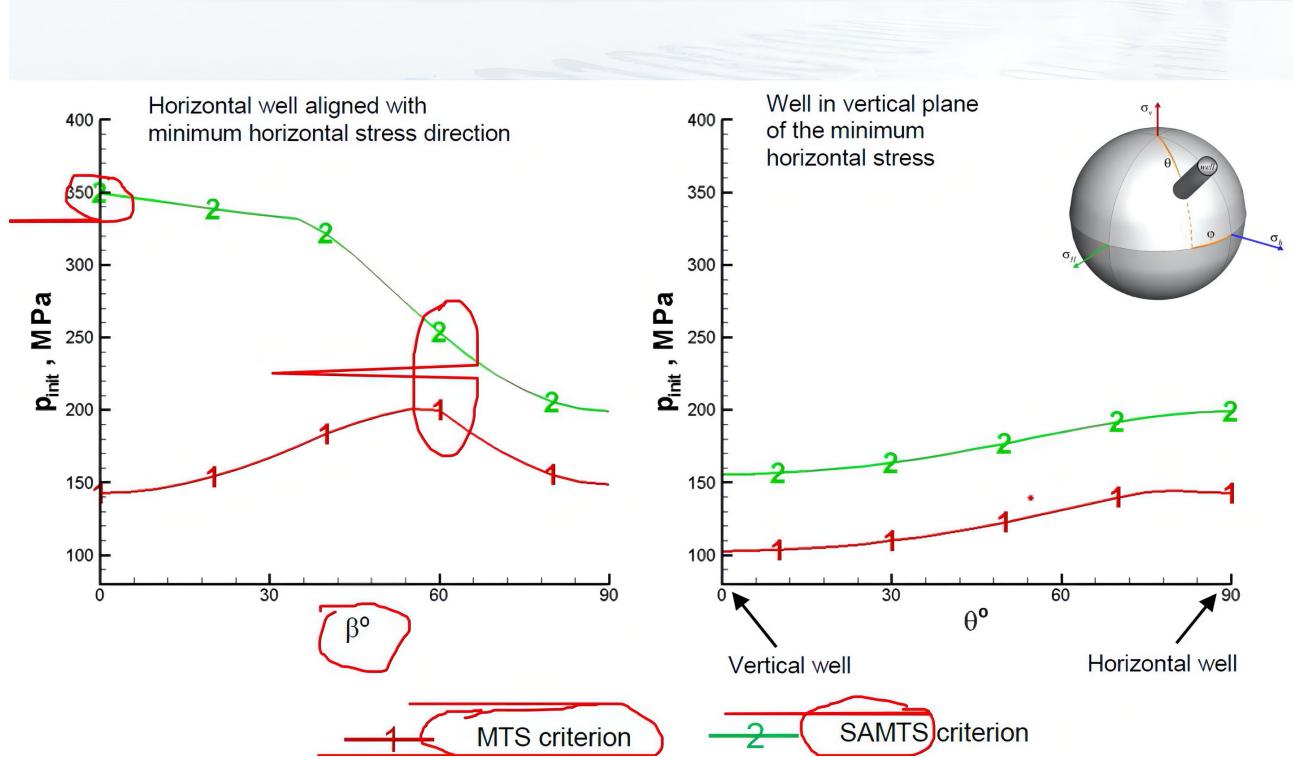
$l_p, \sigma_t^0, \sigma_t^\infty$ - параметры материала



22
5/15/2020

Bazant Z. P., Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 1998. 640 p.

Влияние эффекта размера на давление инициации



14 Условие задачи

14.1 Законы Кирхгофа для перераспределения потоков между трещинами

Весь расход, который закачиваем в скважину, перераспределяется между трещинами (первый закон Кирхгофа):

$$Q_0 = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (14.1)$$

Можно независимо рассматривать каждый из путей (к каждой из трещин) и считать гидродинамические сопротивления независимо (второй закон Кирхгофа):

$$p_0 = \sigma_{min,i} + p_{net,i} + \Delta p_{perf,i} - \sum_{j=1}^i \Delta p_{h,j} + \sum_{j=1}^i \Delta p_{fric,j}, \quad (14.2)$$

где

$\sigma_{min,i}$ – давление закрытия (минимальное напряжение в пласте) на i -ой трещине;

$p_{net,i} = p_{frac,i} - \sigma_{min,i}$ – давление на i -ой трещине (из модели трещины);

$\Delta p_{perf,i}$ – падение давления вдоль перфорации i -ой трещины;

$\Delta p_{h,i}$ – падение гидростатического давления между i -ой и $(i-1)$ -ой трещинами;

$\Delta p_{fric,i}$ – падение давления трения между i -ой и $(i-1)$ -ой трещинами.

В итоге, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_0 = \sum_{i=1}^N Q_i \\ p_0 = \sigma_{min,i} + p_{net,i}(Q_i) + \Delta p_{perf,i}(Q_i) - \sum_{j=1}^i \Delta p_{h,j} + \sum_{j=1}^i \Delta p_{fric,j}(Q_i) \end{cases} \quad (14.3)$$

относительно неизвестных расходов Q_i и забойного давления p_0 .

14.2 Формула для давления $p_{net,i}$ на i -ой трещине

Аналитический подход (с использованием РКН модели):

$$p_{net,i}(Q_i) = a_i Q_i^{\frac{n}{2n+3}} V_i^{\frac{1}{2n+3}}, \quad (14.4)$$

где $a_i = \left(\frac{(n+3)(2n+1)^n \cdot K \cdot (E'_i)^{2n+2}}{\pi 2^{2n} n^n \phi^n h_i^{3n+3}} \right)^{\frac{1}{2n+3}}$ – параметр жёсткости,

Q_i и V_i – расход на i -ой трещине и объём i -ой трещины;

K и n – реологические параметры степенной (неньютоновской) жидкости;

E'_i – модуль плоской деформации i -ой трещины;

h_i – мощность продуктивной зоны.

14.3 Формула для падения давления $\Delta p_{perf,i}$ на перфорациях

14.4 Формула для гидростатического давления $\Delta p_{h,i}$

14.5 Формула для падения давления $\Delta p_{fric,i}$ на трение

14.6 Итеративная процедура решения с помощью метода Ньютона