

РЕФЕРАТ

31 с., 8 рис., 5 табл., 0 приложений, 68 источников

Гидроразрыв пласта, модифицированная постановка, PKN, KGD, P3D

Данная работа посвящена моделированию трещины гидроразрыва пласта в модифицированной квазитрехмерной постановке, позволяющей более точно, чем в двумерных моделях, и с низкими затратами вычислительных ресурсов оценивать развитие трещины гидроразрыва в слоистой среде.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1.1 Обзор литературы	3
1.1.1 Методы математического моделирования	3
1.1.2 Аналитические модели	4
1.1.3 Плоские трёхмерные, псевдотрёхмерные и трёхмерные модели ГРП	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1 Геометрия PKN и P3D	7
Течение жидкости.....	8
2.2 Гипотезы моделей PKN и P3D	10
2.3 Определение осреднённых характеристик для однослойной модели	11
2.4 Уравнение баланса массы жидкости в традиционной и модифицированной постановках	12
2.5 Система уравнений для модели PKN	13
2.6 Переход к P3D модели	14
2.7 Решение задачи механики	14
2.8 Используемый численный метод решения системы дифференциальных уравнений ...	16
2.9 Сравнение с MFRAC	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
ОХРАНА ТРУДА	29
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	34

ВВЕДЕНИЕ

Гидроразрыв пласта (ГРП) — самый распространенный метод интенсификации добычи в нефтедобывающей промышленности. Технология гидроразрыва позволяет увеличить приток к скважине путем формирования в горной породе трещины со значительно более высокой проницаемостью, чем проницаемость самой породы. В процессе гидроразрыва в скважину поэтапно закачивается смесь вязкой жидкости и твердых частиц (проппанта). Давление нагнетаемой жидкости приводит к тому, что горная порода, слагающая продуктивные пласты разрушается с образованием протяженной трещины. Объем такой трещины заполняется закачиваемой смесью. С течением времени жидкая основа теряет вязкость и утекает в пласт, либо откачивается обратно, а проппант остается в трещине, предотвращая её полное смыкание. Таким образом, гидроразрыв пласта – это комплексный процесс, включающий в себя различные процессы и явления: деформирование и разрушение горной породы, течение жидкости в трещине, транспорт проппанта. Для моделирования процесса развития трещины гидроразрыва необходимо решать задачу, лежащую на пересечении нескольких областей знаний. В общем случае необходимо рассматривать распространение трещины под давлением, создаваемым жидкостью со сложной реологией, в неоднородной упругой или пластичной пористой среде, в которую возможны утечки жидкости из трещины.

Актуальность моделирования процесса гидроразрыва заключается в достаточно высокой степени неопределенности получаемых результатов в результате проведения операции вследствие низкой точности существующих инструментов измерения характеристик получаемой трещины ГРП (микросейсмический мониторинг, температурный каротаж и др.). Инструменты численного моделирования позволяют добиваться лучшего понимания и контроля прогнозируемой геометрии трещины ГРП.

1.1 Обзор литературы

1.1.1 Методы математического моделирования

Для решения задачи о моделировании гидроразрыва в первую очередь необходимо определиться с моделью происходящих процессов. Полная модель ГРП может содержать в себе модели нескольких различных процессов. Например, ниже приведены четыре основные модели:

- модель деформирования горной породы (упругая, пороупругая, пластичная и др.);
- модель продвижения трещин(ы) в породе (и их взаимодействия);

- модель течения многофазной жидкости в трещине и её утечек в породу;
- термодинамическую модель для многокомпонентной системы.

С учётом нынешнего уровня развития вычислительной техники, выбор конкретной модели во многом сводится к анализу возможности данной модели описать процесс на должном уровне. Каждая модель включает в себя некоторое количество априори выполняющихся законов (например, законы сохранения или баланса) и определяющие соотношения, которые есть ни что иное, как гипотезы (например, законы упругости или пластичности).

1.1.2 Аналитические модели

Две основополагающие модели распространения трещины ГРП представляют собой модель KGD (Kristianovich-Zhel'tov, Geertsma-de Klerk) [1], [2], и модель PKN (Perkins, Kern, Nordgren) [3], [4]. Геометрия данных моделей отображена на Рис. 1.1-1.2. Обе модели рассматривают плоскую трещину, распространяющуюся в направлении, перпендикулярном минимальному напряжению. Течение жидкости в трещине считается одномерным вдоль длины трещины, саму жидкость принято считать Ньютонской (в современных работах было сделано обобщение до степенной реологии жидкости, например, [5]). Утечки определяются моделью Картера [6], а порода считается однородной изотропной и линейно упругой. Основное различие моделей заключается в способе перехода от трёхмерной задачи теории упругости к плоской. Модель KGD предлагает считать, что деформация является плоской в горизонтальном сечении, а в модели PKN плоские деформации относят к вертикальному сечению.

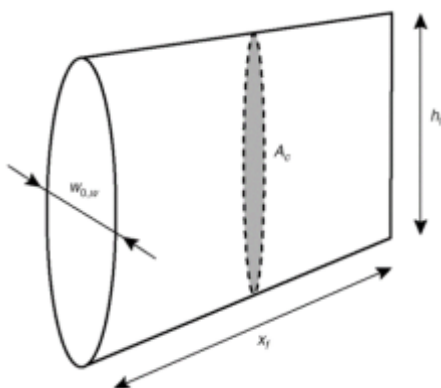


Рисунок 1.1. Геометрия трещины в модели PKN

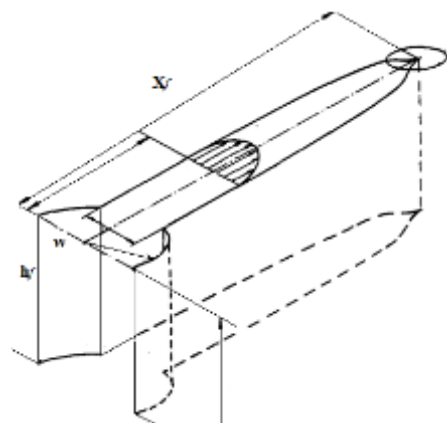


Рис. 1.2. Геометрия трещины в модели KGD

Дополнительно стоит упомянуть об осесимметричной модели распространения трещины (радиальная модель), в которой течение описывается одномерным уравнением, в

качестве пространственной координаты в котором выступает расстояние от скважины до точек трещины [7], [8].

1.1.3 Плоские трёхмерные, псевдотрёхмерные и трёхмерные модели ГРП

Существенной особенностью моделей KGD и PKN является необходимость априорного задания высоты трещины или предположения о её радиальном распространении.

Трёхмерная модель, как правило, не содержит предположений об ориентации трещины. Она получается в результате моделирования на основании данных об ориентации скважины, направления перфорации и других данных. Для работы с такими моделями требуются относительно большие вычислительные мощности [9].

Псевдотрёхмерные модели основаны на стремлении, с одной стороны, уменьшить вычислительные затраты, а с другой - использовать наиболее важные черты трёхмерных моделей. Одна из основных таких моделей — «ячеистая модель». Такие модели рассматривают трещину как ряд друг с другом связанных ячеек. Они не определяют заранее форму трещины, но полагают наличие плоской деформации и не связывают окончательно расчёт течения жидкости в вертикальном направлении с вычислением геометрии трещины. Основными предположениями этого типа моделей, согласно [10], являются:

- кончик трещины — вертикальная линия постоянной высоты;
- вертикальной составляющей потока жидкости можно пренебречь;
- плоское напряжённое состояние реализуется в каждой вертикальной плоскости;
- наиболее предпочтительный вариант утечки — утечка по Картеру.

Плоские трёхмерные (PL3D) модели основаны на предположении о том, что трещина - плоская и ориентирована перпендикулярно минимальному напряжению на бесконечности. PL3D модели не учитывают возможность отклонения трещины от этого направления [11]. При этом для вычисления развития трещины в ширину решаются уравнения трёхмерной теории упругости, что делает PL3D-модели более точными, но значительно более затратными с точки зрения вычислений. Дополнительным преимуществом PL3D-моделей является более широкая область применимости. Например, численные реализации псевдотрёхмерных моделей имеют свойство терять устойчивость в случае немонотонной зависимости напряжений в породе от глубины [12].

И плоские трёхмерные и псевдотрёхмерные модели могут использовать данные об окружающих зонах (например, пропластков с пониженным напряжением) для

предсказания роста трещины в эти зоны. Плоские трёхмерные модели используют в расчётах полное двумерное течение жидкости и трёхмерное упругое состояние породы, а псевдотрёхмерные модели аппроксимируют эти модели тем или иным способом [9].

Основным преимуществом P3D моделей является достаточно высокий уровень проработки геометрии трещины со сравнительно небольшими вычислительными затратами. Такое оптимальное сочетание характеристик модели приводит к тому, что P3D модель является основной применяемой в индустрии моделью, в то время как более точные, но значительно более ресурсоемкие 3D модели находят применение в отдельных случаях, требующих значительной детализации проработки развития трещины, особенно в нестандартных геологических условиях.

Целью данной работы является создание прозрачной в своих положениях и эффективной квазитрёхмерной (P3D) модели гидроразрыва пласта (ГРП). Примененная модифицированная постановка задачи позволяет получить более точное решение численной схемы, которая в свою очередь приводит к более устойчивому решению. В рамках работы представлена полная математическая постановка задачи, описание программной реализации модели на языке Python, продемонстрированы результаты тестовых расчётов и результаты сравнения расчетов с широко используемым в индустрии симулятором ГРП MFRAC ©.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Геометрия PKN и P3D

Модель PKN [4] рассматривает трещину, которая растёт в длину, оставаясь постоянной по высоте. Геометрия модели и основные обозначения отображены на Рис. 2.1. Развивающийся фронт трещины принимается прямолинейным, вблизи фронта трещина должна становиться более узкой. Поперечное сечение трещины имеет эллипсоидальную форму, полуоси которой в физическом масштабе существенно различаются: раскрытие трещины должно быть много меньше высоты. Сечение в данной модели может быть задано двумя величинами: длинами двух осей эллипса. Длина большей оси должна совпадать с фиксированной высотой трещины, тогда описание раскрытия трещины в сечении можно свести к одной независимой величине, в качестве которой будем использовать среднее раскрытие по высоте:

$$w_{av} = \frac{1}{h_f} \int_{z_l}^{z_u} w(z) dz, \quad (2.1.1)$$

z_l, z_u — координаты вдоль высоты для нижней и верхней вершины трещины, $h_f = z_u - z_l$ — высота трещины, $w(z)$ — зависимость раскрытия трещины от координаты по высоте.

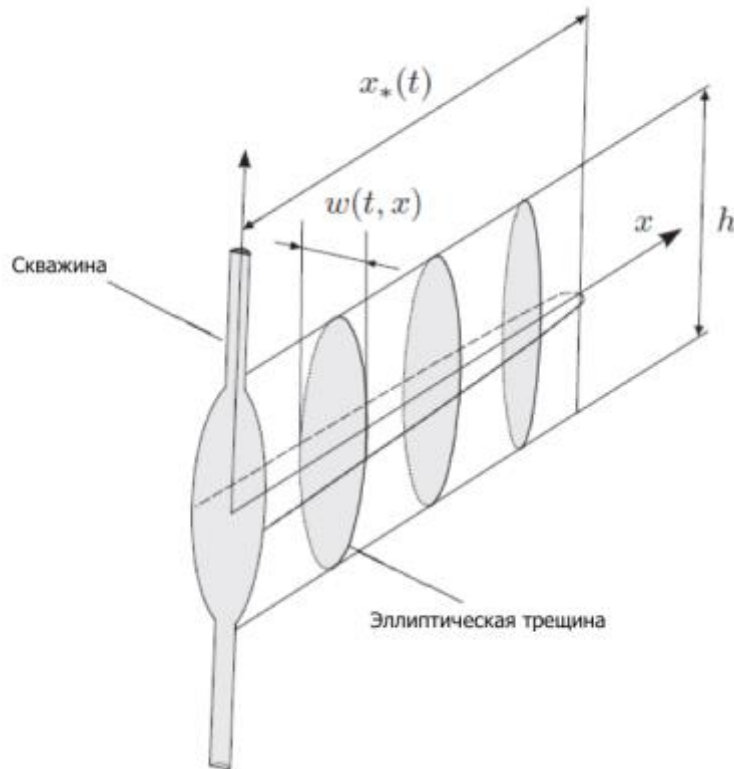


Рисунок 2.1 Геометрия PKN

Среднее раскрытие является функцией от продольной координаты: $w_{av} = w_{av}(x)$.

На линии фронта трещины среднее раскрытие должно становиться нулевым: $w_{av}(x_*) = 0$, x_* — координата фронта, равная длине трещины.

Псевдотрёхмерные модели (P3D) [63] являются развитием модели PKN, в рамках этих моделей поперечное сечение трещины может менять высоту. Геометрия ячеистых псевдотрёхмерных моделей по своей сути близка к геометрии PKN с той разницей, что трещина представляется разделённой по своей длине на отдельные ячейки, каждая из которых может иметь свою высоту и раскрытие (Рис. 2.2). Поскольку численное решение задачи Нордгрена [4] удобно производить в конечных разностях, используя продольную дискретизацию, то по сути схема PKN может быть представлена также как ячеистая, но с фиксированной высотой ячейки.

Ввиду вышесказанного расчётные схемы для модели PKN и ячеистой псевдотрёхмерной модели оказываются близки. Далее рассматривается постановка задачи Нордгрена (PKN), а затем описывается переход к постановке с переменными высотами ячеек.

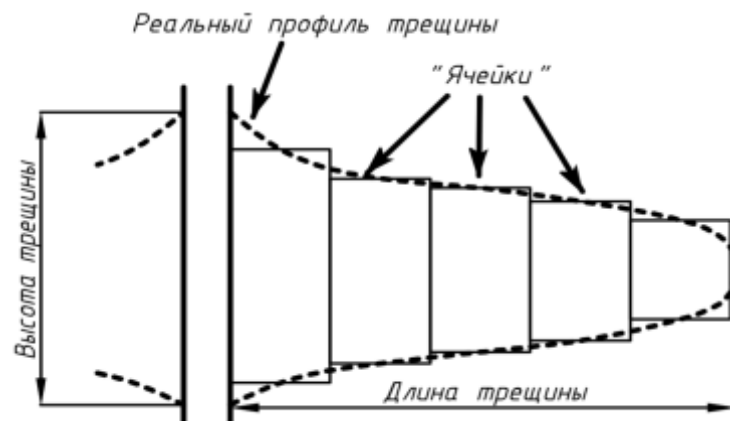


Рисунок 2.2 Ячеистая модель

2.2 Течение жидкости

Рассматривается течение несжимаемой вязкой жидкости со степенной реологией:

$$\tau = M\dot{\gamma}^n. \quad (2.2.1)$$

Поскольку геометрия модельной трещины такова, что одно из направлений (раскрытие) много меньше двух других, можно перейти от общей трёхмерной постановки задачи гидродинамики к двумерной. В модели PKN высота остаётся постоянной, трещина значительно развивается продольно, поэтому оправданным выглядит последующее упрощение задачи о течении до одномерной. Для описания этого течения используется теория течения вязких жидкостей в узком канале. В качестве граничных

условий на стенках канала используется условие прилипания (то есть жидкость вблизи стенок почти не движется).

Скорость течения жидкости в канале может меняться в зависимости от расстояния до стенки, достигая максимального значения в центре канала. Из-за того, что раскрытие трещины много меньше высоты, перепад скоростей при движении от центра к границе вдоль раскрытия гораздо более существенный, чем при движении вдоль высоты. Следовательно, можно пренебречь силами вязкого трения, возникающими из-за перепада скоростей по высоте. В этом случае задача гидродинамики разбивается на несвязанные подзадачи в горизонтальных сечениях. Каждая ячейка, связанная с точкой дискретизации по длине трещины, будет характеризоваться своим значением среднего раскрытия. Зная зависимость раскрытия по высоте трещины $w = w(z)$ в каждом горизонтальном сечении ячейки можно решить задачу течения жидкости. Каждая такая задача полностью эквивалентна задаче Пуазейля для течения между двумя плоскостями.

При описании переноса жидкости в канале нас может интересовать такая характеристика однонаправленного потока, как средняя скорость жидкости в сечении. Для упомянутой задачи Пуазейля с граничными условиями прилипания решение известно [64]. В каждом горизонтальном сечении ячейки средняя скорость будет равна

$$v(z) = \left(-k_f w^{n+1} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{1/n}, \quad (2.2.2)$$

$$k_f = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2(2(2+1/n))^n}.$$

Свяжем среднюю скорость течения жидкости через сечение площадью A с потоком жидкости через это сечение q :

$$v_{av} = \frac{q}{A} \quad (2.2.3)$$

Полный поток через сечение можно найти интегральным суммированием по горизонтальным сечениям:

$$q = \int_{z_l}^{z_u} w(z) v(z) dz \quad (2.2.4)$$

Учитывая также $A = w_{av} h_f$, после подстановки (2.2.2) в (2.2.4), а затем в (2.2.3) и преобразований имеем:

$$v_{av} = \left(-k_f w_{av}^{n+1} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{1/n} \frac{1}{h_f w_{av}^{2+1/n}} \int_{z_l}^{z_u} w^{2+1/n} dz \quad (2.2.5)$$

2.3 Гипотезы моделей PKN и P3D

Далее представлены основные положения, принимаемые для моделей PKN и P3D [63].

PKN:

- 1) Представления о геометрии трещины: плоская трещина с линейным фронтом, эллипсоидальным поперечным сечением, одна ось которого много меньше второй.
- 2) Линейно-упругий пласт однороден и изотропен. В каждом поперечном сечении реализуется плоско деформированное состояние. Нормальные к плоскости трещины напряжения не меняются по длине и высоте. В этом случае реализуется линейная связь между раскрытием трещины и чистым давлением $p_{net} = k_r w_{av}$, где чистое давление $p_{net} = p - \sigma$, разность между давлением жидкости и нормальным напряжением пласта, постоянно в сечении.
- 3) Жидкость со степенной реологией (2.2.1) движется однонаправленно. Реализуется течение Пуазейля.

P3D:

- 1) Плоская трещина представляет из себя совокупность поперечных ячеек, каждая из которых имеет свою высоту и раскрытие.
- 2) Пласт содержит несколько горизонтальных слоёв, в которых могут действовать разные нормальные к плоскости трещины напряжения, слои могут характеризоваться разной трещиностойкостью. Упругие свойства, тем не менее, принимаются однородными и изотропными, как это было принято для классических псевдо 3D моделей.
- 3) Форма раскрытия может отклоняться от эллипсоидальной в соответствии с решением задачи упругости для слоистой среды.
- 4) Несмотря на то, что высота ячеек может меняться в процессе симуляции, будем считать, что она меняется относительно медленно, трещина распространяется преимущественно продольно. В этом случае мы всё ещё можем рассматривать однонаправленное движение жидкости, полагая вертикальную компоненту скорости малой.
- 5) Трещина растёт в высоту квазистатически (equilibrium height assumption), в качестве критерия роста принимается достижение коэффициентом интенсивности первой моды критического значения

$$K_I = K_{IC} \quad (2.3.1)$$

2.4 Определение осреднённых характеристик для однослойной модели

Для определения среднего раскрытия и средней скорости жидкости в сечении необходимо вычислить интегралы:

$$J_1 = \int_{z_l}^{z_u} w dz, \quad (2.4.1)$$

$$J_2 = \int_{z_l}^{z_u} w^{2+1/n} dz \quad (2.4.2)$$

Для модели РКН известно решение задачи линейной упругости, связь раскрытия с чистым давлением имеет вид:

$$w(z) = \frac{4}{E'} P_{net} \sqrt{(z - z_l)(z_u - z)}, \quad (2.4.3)$$

где $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ — упругая характеристика пласта при плоской деформации. В этом случае

искомые интегралы (2.4.1), (2.4.2) принимают следующий вид:

$$J_1 = \frac{\pi}{2E'} h_f^2 P_{net}, \quad (2.4.4)$$

$$J_2 = h_f \left(\frac{4}{E'} h_f P_{net} \right)^{2+1/n} \mathbf{B} \left(2 + \frac{1}{2n}, 2 + \frac{1}{2n} \right), \quad (2.4.5)$$

здесь $\mathbf{B}(a, b)$ — бета-функция Эйлера.

Тогда осреднённые характеристики вычисляются следующим образом:

$$w_{av} = \frac{\pi}{2E'} h_f P_{net} \quad (2.4.6)$$

$$v_{av} = \left(-k_f w_{av}^{n+1} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{1/n} k_v, \quad (2.4.7)$$

$$k_v = \left(\frac{8}{\pi} \right)^{2+1/n} \mathbf{B} \left(2 + \frac{1}{2n}, 2 + \frac{1}{2n} \right)$$

В общем случае (когда зависимость $w(z)$ может быть иной) искомые интегралы находятся численно. Представленные выше соотношения могут использоваться для первичной верификации модели.

2.5 Уравнение баланса массы жидкости в традиционной и модифицированной постановках

Высота и раскрытие трещины для разных ячеек не связаны напрямую, но это не значит, что они не связаны вообще. Если масса жидкости в какой-либо ячейке уменьшается, соседние ячейки будут испытывать повышенное давление в связи с притоком жидкости. Поэтому в такой системе резкие независимые изменения объёма ячеек невозможны. Таким образом, уравнение баланса массы жидкости — основное уравнение, связывающее все элементы модели воедино. Если жидкость несжимаемая, то уравнение баланса массы эквивалентно сохранению объёма жидкости.

В традиционной постановке для модели PKN уравнение баланса массы в локальной форме записывается с использованием понятия потока жидкости [62]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + q_l = 0, \quad (2.5.1)$$

источниковый член q_l в контексте решаемой задачи отвечает за скорость утечки жидкости в пласт.

Для того, чтобы повысить эффективность конечно-разностной расчётной схемы, можно перейти к модифицированной постановке. Опишем суть этой постановки.

В том случае, когда нет отставания фронта жидкости от фронта трещины, зависимость раскрытия от расстояния до вершины трещины r имеет степенной вид:

$$w = C_w \cdot r^\alpha \quad (2.5.2)$$

Показатель степени известен для модели PKN и жидкости со степенной реологией

[61]: $\alpha = \frac{1}{n+2}$. Тогда зависимость $w(r)$ имеет особую точку $r=0$ (фронт трещины), в которой производная этой зависимости будет бесконечной. Для того, чтобы более точно аппроксимировать производные при использовании равномерной сетки, лучше перейти к переменной, которая меняется вблизи фронта линейно $y = w^{1/\alpha}$. Далее эта переменная именуется как модифицированное раскрытие.

Вместо потоков используется средняя скорость течения (2.2.3). От переменной x производится переход к переменной $\zeta = \frac{x}{x_*}$, которая меняется вдоль трещины от 0 до 1.

После подстановки и несложных преобразований можно получить запись закона неразрывности в модифицированной постановке:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{y}{\alpha x_*} \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{\zeta v_* - v}{x_*} \frac{\partial y}{\partial \zeta} - \frac{y^{1-\alpha}}{\alpha} q_l \quad (2.5.3)$$

Модифицированная постановка позволяет пользоваться широким классом современных интеграторов для систем умеренной жёсткости.

2.6 Система уравнений для модели PKN

Система уравнений для модели PKN представлена ниже [61]:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{y}{\alpha x_*} \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{\zeta v_* - v}{x_*} \frac{\partial y}{\partial \zeta} - \frac{y^{1-\alpha}}{\alpha} q_l \quad (2.6.1)$$

$$v = \frac{k}{x_*^{1/n}} \left(-\frac{\partial y}{\partial \zeta} \right)^{1/n} \quad (2.6.2)$$

$$y(\zeta, t_0) = y_0(\zeta) \quad (2.6.3)$$

$$\left[y^\alpha v \right]_{\zeta=0} = q_0(t) \quad (2.6.4)$$

$$y(1, t) = 0 \quad (2.6.5)$$

$$v_*(t) = \frac{dx_*}{dt} = [v]_{\zeta=1} \quad (2.6.6)$$

Основным уравнением является уравнение неразрывности (2.6.1). Средняя скорость течения в сечении определяется зависимостью типа Пуазейля (2.6.2), которая получается из (2.2.5) после замены давления p_{net} при помощи линейной связи (2.4.6). Уравнение (2.6.3) представляет из себя начальное условие, (2.6.4) — левое граничное условие, определяющее поток на входе, (2.6.5) — граничное условие на фронте трещины. Последнее уравнение констатирует тот факт, что скорость фронта трещины совпадает со скоростью фронта жидкости.

2.7 Переход к Р3D модели

Псевдотрёхмерная модель, в отличие от модели РКН, рассматривает слоистую среду (Рис 2.3). Поэтому зависимость раскрытия по высоте трещины не будет соответствовать эллиптической форме, а зависимость чистого давления от раскрытия примет нелинейный характер. Стоит отметить, что под чистым давлением в данном случае мы будем понимать разность между давлением жидкости и нормальным

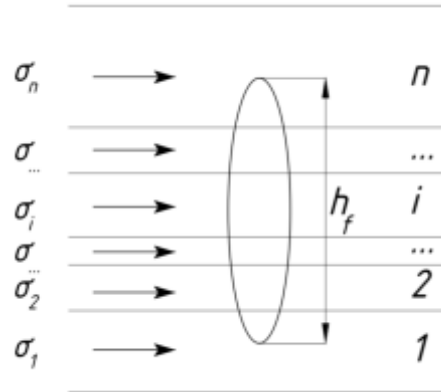


Рис. 2.3. Слоистая модель среды

напряжением в среднем слое: $p_{net} = p - \sigma_{cp}$, для связи с постановкой РКН.

Ранее сформулированная модель использует представление о среднем раскрытии и средней скорости течения.

При записи уравнений (2.6.1)-(2.6.6) мы оперировали величинами, приведённым на постоянную высоту трещины. Нетрудно убедиться в том, что если высота ячеек становится переменной, то для того, чтобы сохранить прежнюю форму записи уравнений мы должны использовать величины, приведённые на некоторую постоянную величину h_r , имеющую размерность длины. К примеру, на высоту среднего слоя. Для раскрытия

$w = \frac{A}{h_r} = w_{av} \frac{h_f}{h_r}$, для потока на входе $q_0 = \frac{Q_0}{h_r}$, для интенсивности утечек $q_l = \frac{Q_l}{h_r}$. После

такого переобозначения система (2.6.1)-(2.6.6) становится справедлива для Р3D модели с той лишь разницей, что скоростная зависимость типа Пуазейля потребует численного поиска значений интегральных выражений (2.4.1) и (2.4.2).

2.8 Решение задачи механики

Принимается предположение о квазистатическом росте ячейки. В этом случае механическая задача может быть решена отдельно, что позволяет значительно ускорить и упростить процедуру расчёта [63]. Задача механики сводится к определению формы сечения как функции чистого давления.

Если трещина растёт в высоту квазистатически, то для нижней и верхней вершины трещины в сечении можно искать коэффициент интенсивности напряжений исходя из

решения статической задачи. Для слоистой среды с однородными упругими свойствами известны аналитические зависимости коэффициентов интенсивности от высоты трещины и давления [65]:

$$K_{Iu} = \sqrt{\frac{\pi h_f}{2}} \left(p_{net} - \Delta\sigma_n + \rho g \left(h_{cp} - \frac{3}{4} h_f \right) \right) + \sqrt{\frac{2}{\pi h_f}} \sum_{i=1}^n \left[(\sigma_{i+1} - \sigma_i) \left(\frac{h_f}{2} \arccos \left(\frac{h_f - 2h_i}{h_f} \right) - \sqrt{h_i(h_f - h_i)} \right) \right] \quad (2.8.1)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{\pi h_f}{2}} \left(p_{net} - \Delta\sigma_1 + \rho g \left(h_{cp} - \frac{1}{4} h_f \right) \right) + \sqrt{\frac{2}{\pi h_f}} \sum_{i=1}^n \left[(\sigma_{i+1} - \sigma_i) \left(\frac{h_f}{2} \arccos \left(\frac{h_f - 2h_i}{h_f} \right) - \sqrt{h_i(h_f - h_i)} \right) \right] \quad (2.8.2)$$

Величины σ_i и h_i — напряжения в слоях и высоты слоёв, отсчитанные от нижней вершины трещины (схема на Рис. 2.3), h_{cp} — высота середины перфораций, $\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{cp}$.

Эти выражения можно рассматривать как систему нелинейных уравнений, которую можно решать итеративно. Если известно давление и позиции нижней и верхней вершины, то можно найти приращение высоты. Когда известны новые положения вершин можно использовать известную формулу для связи раскрытия и давления [65]:

$$w(z) = \frac{4}{E'} \left(p_{cp} + \rho g (h_{cp} - z) - \sigma_n \right) \sqrt{z(h_f - z)} + \frac{4}{\pi E'} \sum_{i=1}^{n-1} (\sigma_{i+1} - \sigma_i) \left((h_i - z) \operatorname{arch} \left(\frac{z}{|z - h_i|} \frac{h_f - 2h_i}{h_f} + \frac{h_i}{|y - h_i|} \right) + \sqrt{z(h_f - z)} \arccos \left(\frac{h_f - 2h_i}{h_f} \right) \right) \quad (2.8.3)$$

Подобные аналитические соотношения можно получить далеко не для любой задачи, поэтому если требуется рассмотреть чуть более сложную структуру (к примеру, с переменными упругими свойствами по слоям), то можно решать такую задачу численно, используя богатый арсенал современных методов.

2.9 Используемый численный метод решения системы дифференциальных уравнений

Выше в работе была представлена полная система дифференциальных уравнений, граничных и начальных условий для квазитрёхмерной постановки задачи распространения трещины ГРП. Для эффективного решения задачи необходимо разбить расчётную область на конечное количество расчётных узлов, записывая конечно-разностную аппроксимацию производных и сводя задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Для аппроксимации производных давлений и раскрытий по длине трещины хорошо зарекомендовал себя подход [61], использующий масштабируемую сетку с постоянным числом точек дискретизации. Число точек дискретизации должно быть оптимальным с точки зрения производительности и консервативности схемы. По умолчанию количество точек принимается равным $N = 81$, что обеспечивает точность выполнения глобального баланса объёма для широкого спектра примеров в пределах 1%.

При расчёте правой части получаемой системы дифференциальных уравнений ресурсоёмкой задачей оказывается вычисление интегралов по высоте трещины. Для оптимизации скорости расчёта можно вычислять интегралы лишь в некоторых точках дискретизации.

Для аппроксимации контура трещины используется фиксированная сетка, состоящая из узлов роста. При этом профиль высот между узлами роста аппроксимируется при помощи линейной интерполяции (Рис. 2.4).

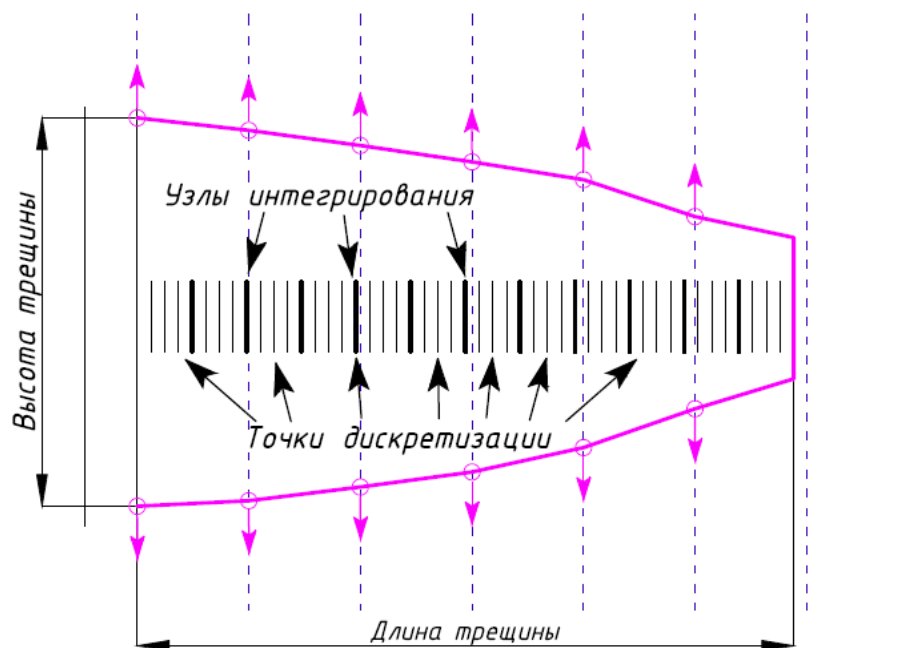


Рис. 2.4 Схема дискретизации

При решении многих практических задач возникают системы дифференциальных уравнений, обладающие высокой жёсткостью и, как следствие, плохо поддающиеся решению традиционными методами (такими, как методы Рунге- Кутты, Адамса и т.д.). К системе такого класса сводится система уравнений для постановки РЗД после дискретизации. Для таких систем уравнений разработаны специальные методы. Наиболее распространёнными из них являются методы Гира.

Далее приводится краткое описание рассматриваемого алгоритма. Пусть дана задача Коши:

$$y' = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0, \quad (2.9.1)$$

где каждая переменная представляет собой вектор размерности N . Метод Гира основан на так называемых формулах дифференцирования назад (backward differentiation formulae, BDF) порядка q :

$$\sum_{i=0}^q [\alpha_{n,i} y_{n-i}] + h\beta_n f(t_n, y_n) = 0. \quad (2.9.2)$$

Здесь y_n — значение вектора переменных на шаге по времени n , α_i, β_i — система постоянных коэффициентов [67].

Используемая реализация алгоритма содержится в библиотеке CVODE [68], и основана на использовании так называемого вектора Нордсика (Nordsieck vector) (подробное описание см. в [69]). Решение дифференциального уравнения $y' = f(x, y)$ представляется как нахождение аппроксимирующего полинома, представленного вектором, содержащим q производных y :

$$z = \left[y_n, h y_n', \dots, \frac{h^q y_n^{(q)}}{q!} \right]. \quad (2.9.3)$$

Этот подход имеет ряд преимуществ с точки зрения скорости вычислений и является стандартным при реализации алгоритмов Гира. Как видно из формулы (2.9.2), формулы дифференцирования назад являются неявными. Поэтому для получения значения интегрируемой функции на очередном шаге требуется решение системы, в общем случае, нелинейных алгебраических уравнений. Чаще всего используется итерационный метод Ньютона. В свою очередь, метод Ньютона требует решения системы линейных алгебраических уравнений. Для этого используется одна из вариаций метода Гаусса.

Более подробное описание используемых алгоритмов приведено в руководстве пользователя для библиотеки CVODE [68].

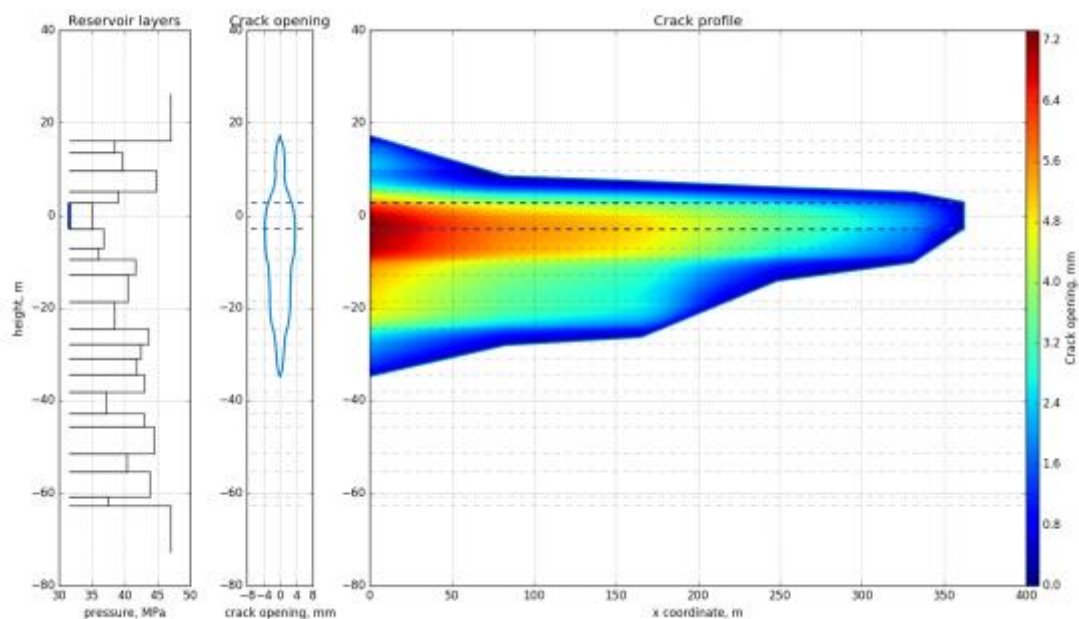


Рис.2.5 Пример результата расчета модели

2.10 Сравнение с MFRAC

Было проведено сравнение результатов расчётов в рамках разрабатываемой модели с результатами, получаемыми в известном коммерческом симуляторе гидроразрыва пласта MFRAC. Для того, чтобы результаты возможно было корректно сравнивать, в MFRAC были отключены модули, отсутствующие в разрабатываемой модели. А именно: не рассчитывалась гидравлика ствола, не учитывалось изменение концентрации пропанта, не учитывалась теплопередача, была выбрана постоянная модель потери жидкости, вязкость жидкости не менялась во время расчёта.

На вход разрабатываемой программы подаётся файл в формате «*.csv», в котором задаются следующие параметры:

- абсолютная глубина подошвы слоя (TVD);
- минимальное горизонтальное напряжение;
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;
- трещиностойкость;
- коэффициент утечек Картера;
- вязкость жидкости разрыва;

- расход;
- общий объем закачки;
- координаты интервала перфорации.

В MFRAC в соответствующих окнах задавались аналогичные значения.

Было проведено сравнение на 70 наборах данных для ньютоновской жидкости: 22 с низкими вязкостями жидкости разрыва (0.03-0.1 Па*с, приблизительно соответствует вязкости линейного геля) (Таблица 2.4) и 48 с высокими (0.5-1.1 Па*с, приблизительно соответствует вязкости сшитого геля) (Таблица 2.5). Входные параметры генерировались случайным образом в пределах диапазонов, соответствующих значениям в базах данных пород и жидкостей (Таблица 2.1):

Таблица 2.1 Диапазоны изменения входных параметров

	Минимальное значение	Максимальное значение	Единицы измерения	Примечания
Количество слоёв	20	30	шт	
Мощность	2	7	М	кроме проперфорированного слоя
Напряжение*	30	60	МПа	
Дельта напряжений*	0	10	МПа	
Модуль Юнга	35	50	ГПа	константа по слоям
Коэффициент Пуассона	0.17	0.35		константа по слоям
Трещиностойкость	700	3000	кПа*м ^{1/2}	константа по слоям
Коэффициент Картера	1.00E-05	1.00E-04	м*мин ^{1/2}	константа по слоям
Вязкость для пула данных с низкими значениями	0.03	0.1	Па*с	
Вязкость для пула данных с	0.5	1.1	Па*с	

ВЫСОКИМИ значениями				
Расход	2	5	м3/мин	
Объем закачки	50	150	м3	
Перфорация	координаты кровли и подошвы самого мощного слоя		м	

* При генерации значения напряжения берётся случайное число из диапазона для напряжений и назначается в качестве напряжения для всех слоёв. Затем к этой величине для каждого слоя прибавляется случайное значение из диапазона для дельты напряжений.

На Рис. 2.6 и Рис 2.7 приведены графические сравнения профилей, полученных при одинаковых наборах входных параметров (Таблица 2.2 и Таблица 2.3) в MFRAC (красная линия) и в разрабатываемой модели (синяя линия). Последняя имеет большое количество степеней свободы для создания профиля трещины, что позволяет точнее описывать процесс, в то время как MFRAC использует только два полуэллипса, усредняя значения по всей длине.

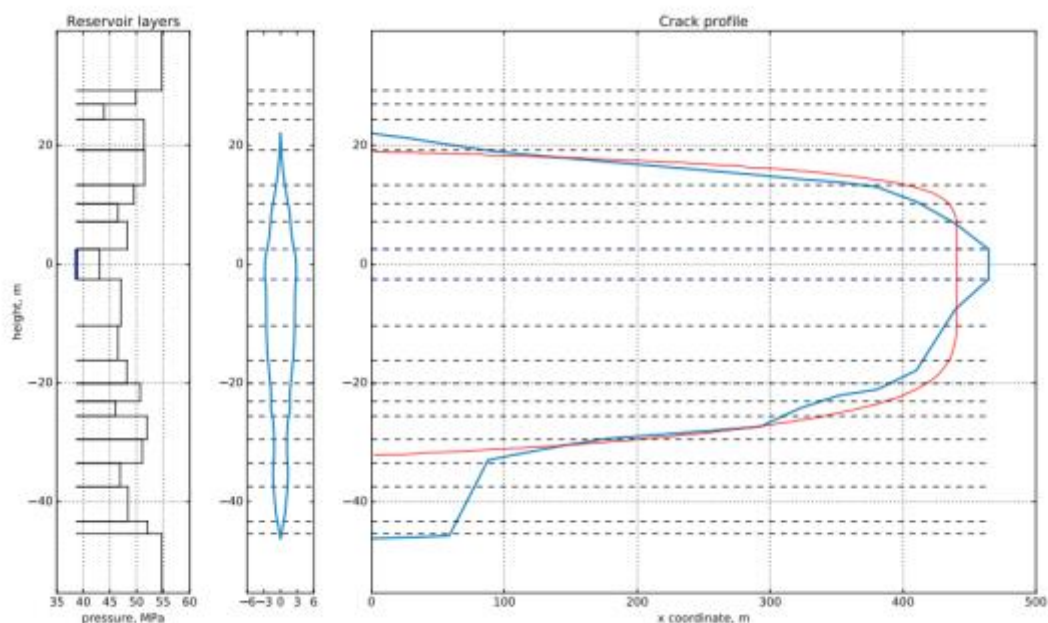


Рис.2.6 Графическое сравнение профилей, полученных в MFRAC (красная линия) и в разрабатываемой модели (синяя линия), пример 1

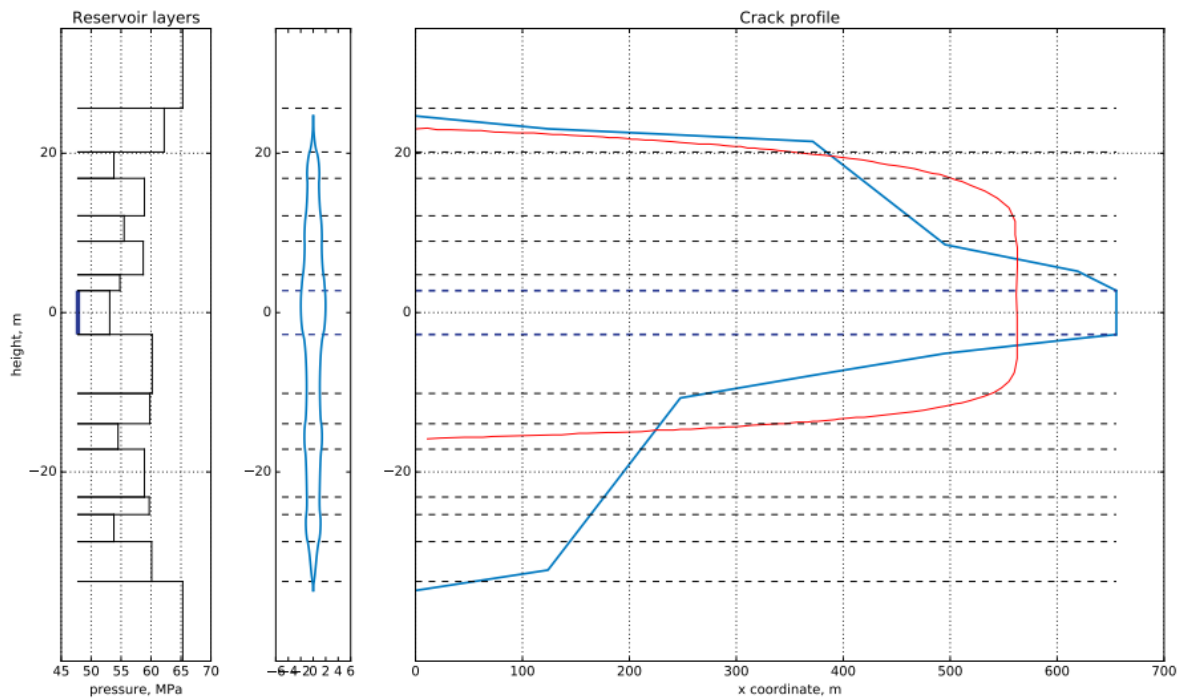


Рис 2.7 Графическое сравнение профилей, полученных MFRAC (красная линия) и в разрабатываемой модели (синяя линия), пример 2

Таблица 2.2 Входные параметры, пример 1

TVD	Напряжение	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Трещиностойкость	Коэффициент Картера
М	МПа	Гпа		кПа*м ^{1/2}	м*мин ^{1/2}
3019.2	54.7	49	0.33	700	1.00E-05
3021.5	49.9	49	0.33	700	1.00E-05
3024.1	43.9	49	0.33	700	1.00E-05
3029.2	51.4	49	0.33	700	1.00E-05
3035.1	51.5	49	0.33	700	1.00E-05
3038.3	49.5	49	0.33	700	1.00E-05
3041.3	46.5	49	0.33	700	1.00E-05
3045.9	48.3	49	0.33	700	1.00E-05
3051	43	49	0.33	700	1.00E-05
3058.8	47.1	49	0.33	700	1.00E-05
3064.6	46.5	49	0.33	700	1.00E-05
3068.5	48.2	49	0.33	700	1.00E-05

3071.5	50.7	49	0.33	700	1.00E-05
3074	46.1	49	0.33	700	1.00E-05
3077.9	52	49	0.33	700	1.00E-05
3081.9	51.1	49	0.33	700	1.00E-05
3085.9	46.9	49	0.33	700	1.00E-05
3091.7	48.4	49	0.33	700	1.00E-05
3093.8	52.1	49	0.33	700	1.00E-05
3097.5	54.7	49	0.33	700	1.00E-05

Таблица 2.2 Входные параметры, пример 2 (продолжение)

Вязкость	Расход	Объем закачки	Кровля инт. перф.	Подошва инт. перф.
Па*с	м3/мин	м3	М	м
0.03	2	100	3045.9	3051

Таблица 2.3. Входные параметры, пример 2

TVD	Напряжение	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Трещиностойкость	Коэффициент Картера
М	МПа	Гпа		кПа*м ^{1/2}	м*мин ^{1/2}
3033.8	65.3	50	0.34	2000	1.00E-05
3039.3	62.2	50	0.34	2000	1.00E-05
3042.6	53.8	50	0.34	2000	1.00E-05
3047.3	58.9	50	0.34	2000	1.00E-05
3050.5	55.5	50	0.34	2000	1.00E-05
3054.7	58.7	50	0.34	2000	1.00E-05
3056.7	54.8	50	0.34	2000	1.00E-05
3062.2	53.1	50	0.34	2000	1.00E-05
3069.6	60.2	50	0.34	2000	1.00E-05
3073.4	59.8	50	0.34	2000	1.00E-05
3076.6	54.5	50	0.34	2000	1.00E-05
3082.6	58.9	50	0.34	2000	1.00E-05
3084.8	59.7	50	0.34	2000	1.00E-05
3088.2	53.8	50	0.34	2000	1.00E-05

3093.2	60.1	50	0.34	2000	1.00E-05
3095.7	65.3	50	0.34	2000	1.00E-05

Таблица 2.3. Входные параметры, пример 2 (продолжение)

Вязкость	Расход	Объем закачки	Кровля инт. перф.	Подошва инт. перф.
Па*с	м3/мин	м3	М	м
0.01	1	70	3056.7	3062.2

Пример 1 отражает ситуацию, когда разрабатываемая модель и известный коммерческий симулятор MFRAC дают схожие профили трещины. Пример 2 показывает характерные различия, которые могут быть получены при сравнении этих моделей. Различия связаны с принципиальной разницей в геометрических гипотезах моделей. Разрабатываемая модель имеет существенно большее число степеней свободы при описании роста трещины в высоту, следствием чего является более точное моделирование геометрии, и, что может критично сказываться на планировании проведения операции, более детальное моделирование роста трещины в высоту и прорыв в нижележащие слои.

Ниже (Рис 2.8) приведены гистограммы распределения величин отклонения (с учётом знака) геометрических характеристик трещины (высота и максимальное раскрытие в призабойной зоне, длины трещины), полученных в разрабатываемой модели от MFRAC. Видно, что модель даёт завышенные значения относительно MFRAC.

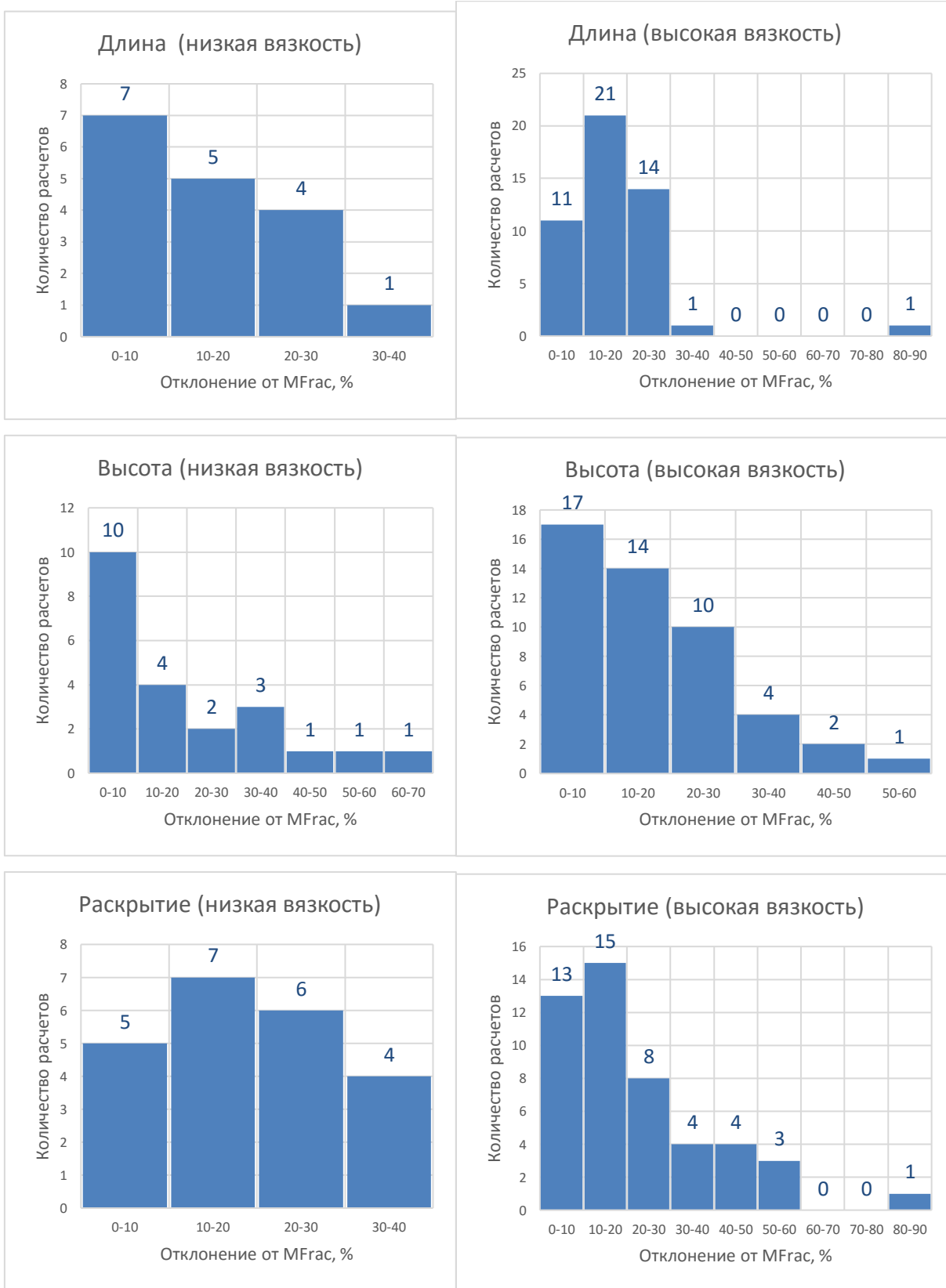


Рис 2.8. Гистограммы распределения количества расчётов по диапазонам разброса характеристик

Таблица 2.4 Результаты расчётов для пула данных с низкими вязкостями в MFRAC и разрабатываемой квазитрёхмерной модели при идентичных входных данных.

Примеры с низкой вязкостью (0.03-0.1 Па*с)									
№	MFRAC			P3D			Отклонение параметра (d), доли ед		
	Длина	Высота	Раскрытие	Длина	Высота	Раскрытие	Длина	Высота	Раскрытие
1	276.90	49.30	5.40	347.40	53.06	5.87	0.25	0.08	0.09
2	410.40	47.50	5.57	475.86	62.83	7.40	0.16	0.32	0.33
3	633.90	45.30	4.67	649.41	75.15	6.14	0.02	0.66	0.31
4	440.90	51.21	5.15	437.90	68.22	5.75	-0.01	0.33	0.12
5	184.00	53.56	5.51	250.53	60.71	6.01	0.36	0.13	0.09
6	319.50	57.20	5.34	342.92	60.45	5.62	0.07	0.06	0.05
7	237.30	56.16	4.83	234.70	65.80	5.98	-0.01	0.17	0.24
8	188.40	43.40	4.65	196.17	45.20	5.25	0.04	0.04	0.13
9	251.90	50.40	4.66	283.67	73.56	5.88	0.13	0.46	0.26
10	277.80	68.60	5.50	355.03	79.52	6.37	0.28	0.16	0.16
11	340.30	33.76	4.68	372.26	35.11	5.25	0.09	0.04	0.12
12	242.20	59.01	5.84	255.11	62.68	6.74	0.05	0.06	0.15
13	357.90	43.91	4.13	375.27	55.72	4.54	0.05	0.27	0.10
14	169.00	72.60	3.94	181.24	74.91	5.45	0.07	0.03	0.38
15	151.20	60.85	5.35	165.04	65.91	6.64	0.09	0.08	0.24
16	615.90	38.61	5.44	620.51	47.70	6.21	0.01	0.24	0.14
17	257.40	42.00	4.10	281.68	47.43	5.62	0.09	0.13	0.37
18	380.50	39.01	3.96	345.07	41.03	4.73	-0.09	0.05	0.19
19	244.40	64.28	4.15	252.90	66.19	5.11	0.03	0.03	0.23
20	362.00	38.70	5.80	447.94	35.08	5.48	0.24	-0.09	-0.06
21	215.20	58.00	4.85	281.24	80.59	6.13	0.31	0.39	0.26
22	562.30	39.00	3.47	598.33	58.79	4.45	0.06	0.51	0.28

Мат. ожидание (M)	0.11	0.19	0.19
Дисперсия	0.01	0.03	0.01
Станд. отклонение	0.12	0.19	0.11

Таблица 2.5 Результаты расчётов для пула данных с высокими вязкостями в MFRAC и разрабатываемой квазитрёхмерной модели при идентичных входных данных.

Примеры с высокой вязкостью (0.5-1.1 Па*с)									
№	MFRAC			P3D			Отклонение параметра		
	Длина	Высота	Раскрытие	Длина	Высота	Раскрытие	Длина	Высота	Раскрытие
23	194.60	71.70	8.93	242.91	83.22	11.21	0.25	0.16	0.26
24	139.40	79.75	10.82	143.60	101.64	15.16	0.03	0.27	0.40
25	103.00	60.98	6.73	114.53	76.99	10.11	0.11	0.26	0.50
26	127.60	46.06	9.11	153.46	48.49	9.60	0.20	0.05	0.05
27	106.60	67.80	9.33	103.13	91.03	14.07	-0.03	0.34	0.51
28	151.60	76.34	9.67	159.74	86.91	14.28	0.05	0.14	0.48
29	132.10	65.94	10.03	161.80	93.32	12.74	0.22	0.42	0.27
30	85.41	68.33	9.41	91.44	75.24	12.73	0.07	0.10	0.35
31	152.40	62.16	8.96	170.46	74.12	10.43	0.12	0.19	0.16
32	196.60	66.16	9.95	230.12	86.21	12.59	0.17	0.30	0.27
33	122.80	68.38	11.15	150.69	83.87	13.61	0.23	0.23	0.22
34	164.50	74.29	12.04	184.04	84.17	13.58	0.12	0.13	0.13
35	139.70	56.41	10.15	156.43	54.40	10.10	0.12	-0.04	0.00
36	169.00	70.71	11.14	193.84	99.53	12.81	0.15	0.41	0.15
37	201.30	57.04	9.05	254.44	57.22	9.29	0.26	0.00	0.03
38	213.90	75.33	9.98	248.56	79.38	11.25	0.16	0.05	0.13
39	164.40	67.82	10.17	190.60	68.30	11.07	0.16	0.01	0.09
40	137.80	75.51	10.14	150.33	82.63	11.57	0.09	0.09	0.14
41	140.10	52.31	9.29	156.29	54.94	9.85	0.12	0.05	0.06
42	180.50	53.23	8.30	206.69	53.02	8.30	0.15	0.00	0.00
43	105.10	51.51	11.30	124.16	49.97	11.09	0.18	-0.03	-0.02
44	169.10	70.96	9.30	197.78	81.72	10.76	0.17	0.15	0.16
45	170.10	83.36	10.04	206.52	92.63	12.08	0.21	0.11	0.20
46	253.50	61.17	9.89	311.31	75.42	11.13	0.23	0.23	0.13
47	97.15	52.45	11.13	106.18	51.95	11.29	0.09	-0.01	0.01
48	99.06	74.12	8.64	102.84	82.59	11.58	0.04	0.11	0.34
49	145.70	74.77	8.18	158.20	81.12	10.81	0.09	0.08	0.32
50	152.20	72.79	10.14	168.71	87.30	15.61	0.11	0.20	0.54
51	107.70	65.95	6.92	133.99	79.52	9.70	0.24	0.21	0.40
52	106.10	57.74	9.15	192.51	61.80	9.29	0.81	0.07	0.02
53	129.80	50.80	9.91	156.08	52.99	10.51	0.20	0.04	0.06

54	127.40	66.27	9.95	149.22	78.20	11.53	0.17	0.18	0.16
55	174.70	77.86	12.69	192.57	88.05	14.37	0.10	0.13	0.13
56	139.40	58.16	7.67	167.79	59.80	8.50	0.20	0.03	0.11
57	166.10	69.52	9.84	212.68	84.71	11.54	0.28	0.22	0.17
58	144.60	57.63	10.90	175.07	65.75	11.45	0.21	0.14	0.05
59	155.20	65.34	10.40	202.48	69.10	12.21	0.30	0.06	0.17
60	107.70	58.11	6.37	127.17	64.48	7.12	0.18	0.11	0.12
61	114.40	53.87	9.17	132.45	44.59	9.59	0.16	-0.17	0.05
62	128.30	80.51	8.00	161.69	93.27	11.52	0.26	0.16	0.44
63	161.50	79.48	12.47	196.71	98.18	14.97	0.22	0.24	0.20
64	143.60	71.73	10.20	152.20	96.74	12.37	0.06	0.35	0.21
65	157.30	94.49	8.69	127.07	117.73	16.02	-0.19	0.25	0.84
66	117.00	57.96	9.73	134.14	74.81	11.45	0.15	0.29	0.18
67	174.00	53.88	10.79	203.58	52.12	10.39	0.17	-0.03	-0.04
68	129.80	65.05	12.67	149.62	83.66	14.59	0.15	0.29	0.15
69	185.60	60.41	11.02	217.85	81.37	13.31	0.17	0.35	0.21
70	146.10	69.29	8.77	134.49	109.53	11.96	-0.08	0.58	0.36

Мат. ожидание (M)	0.16	0.16	0.21
Дисперсия	0.02	0.02	0.03
Станд. отклонение	0.13	0.14	0.18

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены существующие подходы к моделированию ГРП, включающие простые двумерные модели Христиановича-Гиртсма-де Клерка, Перкинса-Керна-Нордгрена, квазитрёхмерную модель и трёхмерную модель. Описана модифицированная схема классической квазитрёхмерной модели, позволяющая производить эффективный расчёт. Подробно рассмотрены основные гипотезы модели, дана математическая постановка задачи, рассмотрены вопросы моделирования течения жидкости, механики разрушения и механики упругой деформации. Сформулированная модель сочетает в себе наиболее простые, проверенные элементы, позволяющие с низкими затратами вычислительных ресурсов моделировать гидроразрыв. Результатом работы также стал набор программных модулей, позволяющий моделировать распространение трещины ГРП в слоистой среде, принимая во внимание утечки. Произведено сравнение получаемых результатов с результатами расчётов в коммерческом симуляторе MFRAC на наборе из 70 сгенерированных примеров.

ОХРАНА ТРУДА

Дипломная работа носит научно-исследовательский характер, поэтому исполнитель большую часть рабочего времени проводит за компьютером. Сложность работы за компьютером подтверждается как субъективными ощущениями пользователей, так и объективными исследованиями различных реакций на воздействие тех или иных производственных факторов.

Работа за компьютером связана с восприятием изображения на экране и с одновременным различением текста рукописных или печатных материалов, с выполнением машинописных графических работ и других операций, что способствует зрительному утомлению, которое усиливается из-за бликов, мерцаний и других отклонений визуальных параметров экрана и световой среды помещения.

Основные вредные и опасные факторы при работе с компьютером:

- нервное напряжение;
- повышенное зрительное напряжение;
- электромагнитные поля и последствия их воздействия;
- костно-мышечные напряжения.

Указанные факторы приводят к тому, что постоянная работа за компьютером по степени развития утомления занимает второе место среди всех видов деятельности. Для оптимального варианта организации работы необходимо свести к минимуму его неблагоприятное воздействие на здоровье пользователя, то есть привести рабочее место в соответствие с требованиями эргономики и охраны труда.

Зрительное напряжение

Повышенная нагрузка на зрение способствует возникновению близорукости, приводит к переутомлению глаз, к мигрени и головной боли, повышает раздражительность, нервное напряжение, может вызвать стресс. Важным фактором, определяющим степень зрительного утомления, является освещение рабочих мест и помещений, где расположены компьютеры.

Согласно документу «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (СанПиН 2.2.2.1340-03) существует ряд требований к освещению рабочего места при работе с компьютером.

Помещения для эксплуатации ПК (Персональный Компьютер) должны иметь систему общего освещения (естественное и искусственное освещение). Оконные светопроемы в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, должны быть преимущественно ориентированы на север и северо-восток и оборудованы регулируемыми устройствами типа: занавесей, жалюзи, внешних козырьков и др.

Рабочие столы следует размещать так, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 400 – 500 лк. Рекомендуется норма освещенности рабочего места оператора в системе общего освещения — 150 – 200 лк. Допускается установка светильников местного освещения для подсветки документов. Местное освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк. Освещение рабочих поверхностей осуществляется с помощью люминесцентных ламп ЛБ белого света, которые предназначены для помещений с нормальными условиями труда.

Освещенность поверхности экрана должна быть не более 300 лк. Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения $50 - 90^\circ$ с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40° . Светильники местного освещения должны иметь не просвечивающий отражатель с защитным углом не менее 40° . В качестве источников света при искусственном освещении следует применять преимущественно люминесцентные лампы ЛБ (белого света) и ЛТБ (тепло-белого) мощностью 40Вт или 80Вт, у которых высокая световая отдача (до 120лм/Вт и более), продолжительный срок службы (до 10000ч), малая яркость светящейся поверхности, близкий к естественному спектральный состав излучаемого света, что обеспечивает хорошую светопередачу. Помещение является помещением с нормальными условиями среды, что позволяет использовать в системе освещения светильники ЛСПО 2 (пыле- и водо-незащищенное исполнение) с люминесцентными лампами ЛХБ 40Вт со световым потоком 2780лм по ГОСТ 6825-91. В светильниках местного освещения допускается применение ламп накаливания, в том числе галогенных. Применение светильников без рассеивателей и экранирующих решеток не допускается.

Организация рабочего места, в связи с активностью оператора

Работы оператора ЭВМ связана с пониженной мышечной активностью (гипокинезией) и длительным статическим напряжением мышц спины, шеи, рук и ног, что приводит к быстрому утомлению. Утомление существенно увеличивается при нерациональной высоте рабочей поверхности стола и сидения, отсутствии опорной спинки и подлокотников, неудобных углах сгибания в плечевом и локтевом суставах, углах наклона головы, неудобном размещении документов, видеотерминала и клавиатуры, неправильном угле наклона экрана, отсутствии пространства и подставки для ног. В соответствии с требованиями эргономики, рабочее место должно быть приспособлено для конкретного вида труда и для работников определённой квалификации с учётом их физических и психических возможностей и особенностей. Конструкция рабочего места должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать быстроту, безопасность, простоту и экономичность технического обслуживания в нормальных и аварийных условиях;
- полностью отвечать предполагаемым условиям эксплуатации.

Расположение монитора в месте рабочей зоны должно обеспечивать удобство зрительного наблюдения в вертикальной плоскости под углом от нормальной линии взгляда оператора. Монитор должен иметь возможность поворачиваться вокруг горизонтальной и вертикальной осей. Согласно санитарных правил с учётом ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600мм, шириной – не менее 500мм, глубиной на уровне колен – не менее 450мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650мм. Рабочий стул (кресло) должен быть подъёмно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона и по расстоянию спинки от переднего края сиденья. Конструкция его должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400мм;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 – 450мм;
- углы наклона вперёд 15° и назад 5° ;
- высоту опорной поверхности спинки 30 ± 20 мм;
- ширину опорной поверхности спинки не менее 380мм;
- радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400мм;

- пределы угла наклона спинки в вертикальной плоскости $0 \pm 30^\circ$.

Требования пожаробезопасности

Согласно ГОСТ 12.1.004-91 существуют следующие опасные факторы: пламя и искры, повышенная температура окружающей среды, токсичные продукты горения и термического разложения, пониженная концентрация кислорода. Противопожарная защита обеспечивается следующими мерами:

- Применение средств пожаротушения, установка сигнализации и устройств тушения, ограничивающих распространение пожара, мероприятия по эвакуации людей, наличие средств индивидуальной защиты и средств противодымной защиты.
- Наличие противопожарных перегородок и отсеков, устройств автоматического отключения систем.
- Планировка эвакуационных путей и выходов.
- Оповещение людей.
- Технические средства для эвакуации и спасения людей.
- Наличие огнетушащих веществ.

Пожарную опасность в ВЦ представляют носители информации, поэтому помещение должно быть оборудовано несгораемыми стеллажами и шкафами. Хранение перфокарт, лент, дисков должно производиться в металлических кассетах. Не допускается размещение складских помещений, а также пожаровзрывоопасных производств над и под залами ПК, а также смежных с ними помещениях. Система вентиляции ВЦ должна быть оборудована устройством, обеспечивающим автоматическое отключение ее при пожаре, а также огнедымозадерживающими устройствами. Подача воздуха к ПК для охлаждения должна осуществляться по самостоятельному воздуховоду. Присоединение этих воздухопроводов к общему коллектору допускается только после огне- и дымозадерживающих клапанов. Система электропитания ПК должна иметь блокировку, отключающую ПК в случае остановки системы кондиционирования и охлаждения.

Электромагнитные поля

Особое внимание при анализе безопасности в процессе работы за компьютером следует уделять воздействию электромагнитных полей мониторов во время их эксплуатации, так как они могут быть причиной возникновения кожных сыпей,

помутнения хрусталика глаза, патологии беременности и других серьезных нарушений здоровья. Мониторы являются источниками широкого спектра электромагнитных излучений, таких как рентгеновское, ультрафиолетовое, видимого спектра, инфракрасное. Кроме того, они создают электростатическое поле. Временные допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПК, не должны превышать значений:

- напряженность электрического поля (в диапазоне частот 5Гц–2кГц) — 25Вт/м
- напряженность электрического поля (в диапазоне частот 5кГц – 400кГц) — 2.5Вт/м
- плотность магнитного потока (в диапазоне частот 5Гц – 2кГц) — 250нТл
- плотность магнитного потока (в диапазоне частот 5кГц – 400кГц) — 25нТл
- поверхностный электростатический потенциал экрана видеомонитора — 500В

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures.* **Geertsma, J. и Klerk, F. de.** 1969 г., Journal of Petroleum Technology.
2. *Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Fluids.* **Kristianovich, S.A. и Zheltov, Y.P.** Rome, Italy : б.н., 1955. 4th World Petroleum Congress, 6-15 June.
3. *Widths of hydraulic fractures.* **Perkins, Т.К. и Kern, L.R.** 9, 1961 г., Journal of Petroleum Technology, Т. 13, стр. 937-949.
4. *Propagation of vertical hydraulic fractures.* **Nordgren, R.** 4, 1972 г., Society of Petroleum Engineers, Т. 12, стр. 306-314.
5. *Analytical Solution of Hydraulic Fracture Problem for a Non-Newtonian Fluid.* **A. M. Linkov.** 1, 2013 г., Journal of mining science, Т. 49.
6. **Rahman, M.M. and Rahman, M. K.** A review of hydraulic fracture models and development of an improved pseudo-3D model for stimulating tight oil/gas sand. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* Taylor & Francis, 2010 г., Т. 32, 15.
7. *Propagation of a penny-shape hydraulic fracture in an impermeable rock.* **Savitski, Alexei J. и Detournay, Emmanuel J.** Vail : American Rock Mechanics Association, 1999. The 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
8. **Bunger, A. P. и E., Detournay.** Asymptotic solution for a penny-shaped near-surface hydraulic fracture. *Engineering Fracture Mechanics.* 2005 г., Т. 75, стр. 2468-2486.
9. **Акулич, А. В.** Взаимное влияние растущей трещины гидроразрыва и природного разлома коллектора пласта. *Диссертация.* 2011 г.
10. **Adachi, J. I., Detournay, E. and Peirce, A. P.** An Analysis of the Classical Pseudo-3D Model for Hydraulic Fracture with Equilibrium Height Growth across Stress Barriers. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* Elsevier, 2010, Vol. 47, 4.
11. **Li, Q. и al., et.** A Review on Hydraulic Fracturing of Unconventional Reservoir. *Petroleum.* 2015 г.
12. **Adachi, J. and et, al.** Computer simulation of hydraulic fractures. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.* 2007, Vol. 44, pp. 739-757.
13. **Lam, K.Y. и Cleary, M.P.** Slippage and re-initiation of (hydraulic) fractures at frictional interfaces. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.* 589-604, 1984 г., Т. 8.

14. *Effect of natural fractures on hydraulic fracture propagation.* **Potluri, N., Zhu, D. и Hill, A.D.** Sheveningen : SPE - European Formation Damage Conference, 2005.
15. **M.L., Cooke и C.A., Underwood.** Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening. *Structural Geology*, 2001 г., Т. 23, 2.
16. **A, Ghassemi.** A Thermoelastic Hydraulic Fracture Design Tool for Geothermal Reservoir Development. *2001 University Research Summaries*. 2003 г.
17. **A., Cheng, GhassemiU, A. и Detournay, E.** Modeling heat extraction from a fracture in hot dry rock using an integral equation method. *Cerca con Google*. 2001 г.
18. *Partially Decoupled Modeling of Hydraulic Fracturing Processes.* **Settari, A., Puchyr, P. J. и Bachman, R.C.** 1, 1990 г., SPE Production Engineering, Т. 5, стр. 37-44.
19. *Coupling Fluid-Flow and Geomechanics in Dual-Porosity Modeling of Naturally Fractured Reservoirs.* **Chen, Her-Yuan и Teufel, Lawrence W.** San Antonio : Society of Petroleum Engineers, 1997. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
20. *Coupled Fluid-Flow And Geomechanics In Naturally Fractured Reservoirs.* **Jalali, M.R. и Dusseault, M.B.** Tehran : International Society for Rock Mechanics, 2008. ISRM International Symposium - 5th Asian Rock Mechanics Symposium.
21. **П. Бенерджи, Р. Баттерфилд.** *Методы граничных элементов в прикладных науках.* 1981г.
22. *Двумерная пошаговая модель распространения трещины гидроразрыва.* **О.П. Алексеенко, Д.В. Есипов, Д.С. Куранаков, В.Н. Лапин, С. Г. Черный.** 26.08.2011 г.
23. *Modeling hydraulic fractures with a reservoir simulator coupled to a boundary element method.* **Benjamin Ganis, Mark E. Mear, A. Sakhaee-Pour, Mary F. Wheeler, Thomas Wick.** 16 July 2013 г.
24. *Numerical modeling of hydraulic fracture initiation and development.* **V. V. Zubkov, V. F. Koshelev, and A. M. Lin'kov.** 2007 г.
25. **М., Деклу Ж.** *Метод конечных элементов: Пер. с франц.* 1976.
26. **Arman Khodabakhshnejad, Fred Aminzadeh.** An Extended Finite Element Method Based Modeling of Hydraulic Fracturing. April 20, 2015 г.
27. *Finite element modeling of hydraulic fracturing in vertical wells.* **Eulher C. Carvalho, Marko A. L. Bendezu, Maria F. F. de Oliveira, Deane M. Roehl, Luis C. de Sousa Jr.** 15-18 November 2010 г.

28. *Finite element modeling of hydraulic fracturing in 3D*. **Wangen, Magnus**. 22 March 2013 г.
29. **Kim, J. и Moridis, G. J.** Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, 2015 г., Т. 76.
30. **Kim, J.** Sequential methods for coupled geomechanics and multiphase flow. *Dissertation*. 2010 г.
31. **Чекалюк, Э. Б.** *Термодинамика нефтяного пласта*. Москва : Недра, 1965.
32. **Jeffrey, R., Bisheng, W. и Zhang, X.** The effect of thermoelastic stress change in the near wellbore region on hydraulic fracture growth. *thirty-seventh workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, https://pangea.stanford.edu/ERE/db/IGAsstandard/record_detail.php*.
33. *Двумерная пошаговая модель распространения трещины гидроразрыва*. **Алексеевко, О.П., и др.** 26.08.2011 г.
34. **Деклу, Ж.М.** *Метод конечных элементов: Пер. с франц.* 1976.
35. **Ghassemi, A.** A Thermoelastic Hydraulic Fracture Design Tool for Geothermal Reservoir Development. *2001 University Research Summaries*. 2003 г.
36. *Analytical Solution of Hydraulic Fracture Problem for a Non-Newtonian Fluid*. **Linkov, A. M.** 1, 2013 г., *Journal of mining science*, Т. 49.
37. **Cheng, A., Ghassemi, A. и Detournay, E.** Modeling heat extraction from a fracture in hot dry rock using an integral equation method. *Cerca con Google*. 2001 г.
38. *Modeling hydraulic fractures with a reservoir simulator coupled to a boundary element method*. **Ganis, B.; Mark E. Mear, A. Sakhaee-Pour, Mary F. Wheeler, Thomas Wick**. 16 July 2013 г.
39. *Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Fluids*. **Khristianovic, S.A. и Zheltov, Y.P.** Rome, Italy : б.н., 1955. 4th World Petroleum Congress, 6-15 June.
40. **Cooke, M.L. и Underwood, C.A.** Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening. *Structural Geology*, 2001 г., Т. 23, 2.
41. *Numerical modeling of hydraulic fracture initiation and development*. **Zubkov, V. V.; Koshelev V. F.; Linkov, A. M.** . 2007 г.
42. **Бенерджи, П.; Баттерфилд, Р.** *Методы граничных элементов в прикладных науках*. 1981г.

43. **Чекалюк, Э. Б.** *Термодинамика нефтяного пласта.* Москва : Недра, 1965.
44. **Александров, А.В. и Потапов, В.Д.** . *Сопротивление Материалов.* 3-е изд. испр. б.м. : М.: Высш. шк., 2003. стр. 560 с.: ил.
45. *Primary factors governing hydraulic fractures in heterogeneous stratified porous formations.* **Cleary, M. P.** Houston, TX, 1978. In Paper 78-Pet-47 ASME ETC Conference, November 5-9.
46. **Economides, M. J. и Nolte, K. G.** *Reservoir Stimulation.* 3rd edn. Houston, Texas : Schlumberger Dowell, 2000.
47. **Economides, M.J., Oligney, R. и Valkó, P.** *Unified fracture design.* Alvin, Texas : Orsa Press, 2002.
48. *High fracturing pressures for shales for which tip effects may be responsible.* **Gardner, D. C.** Washington, DC : SPE, 1992. SPE 24852. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
49. *The Importance Of In-Situ-Stress Profiles In Hydraulic-Fracturing Applications.* **Hopkins, C.W.** б.м. : S.A. Holditch & Assocs. Inc., 1997 г.
50. *Fracture Toughness Testing of Rock Cores.* **Hsiao, C. и El Rabaa, A.W.** Tucson, Arizona : б.н., 1987. Presented at the 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics. стр. 141-148.
51. *The combined effect of fluid lag and fracture toughness on hydraulic fracture propagation.* **Jeffrey, R. G.** Denver, CO : б.н., 1989. SPE 18957. Presented at SPE Low Permeability Symposium.
52. *A Systematic Method for Applying Fracturing Pressure Decline: Part I.* **Nolte, K.G., Mack, M.G. и Lie, W.L.** Denver, CO : б.н., 1993. SPE 25845, presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting and Low Permeability Reservoirs Symposium.
53. *Fracture toughness testing of limestone.* **Schmidt, R. A.** 1976 г., Experimental Mechanics.
54. *Layered Modulus Effects on Fracture Propagation, Proppant Placement, and Fracture Modeling.* **Smith, M.B., и др.** New Orleans, Louisiana : б.н., 2001. SPE 71654 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
55. **Smith, M.B. и C.T., Montgomery.** *Hydraulic Fracturing.* б.м. : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
56. *Hydraulic Fracture Geometry: Fracture Containment in Layered Formations.* **Van Eekelen, H.A.** 1982 г., SPEJ 22: 341-349.

57. **Warpinski, N.R., и др.** *The Formation Interface Fracturing Experiment: An In-Situ Investigation of Hydraulic Fracture Behavior Near a Material Property Interface.* б.м. : Sandia National Laboratories Report, 1981.
58. *In-situ stresses: The predominant influence on hydraulic fracture containment.* **Warpinski, N. R.** 34, 1982 г., Journal of Petroleum Technology.
59. *Measurement of width and pressure in a propagating hydraulic fracture.* **Warpinski, N. R.** 25, 1985 г., Society of Petroleum Engineers Journal, стр. 46-54.
60. *Fracture tip and critical stress intensity factor of a hydraulically induced fracture.* **Yew, C. и Liu, G. H.** 8(03), 1993 г., SPE Production & Facilities, стр. 171–177.
61. **Linkov, Mishuris.** Modified formulation, ε -regularization and the efficient solution of hydraulic fracture problems. Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, Dr. Rob Jeffrey (Ed.); (2013).
62. **Mishuris, Wrobel, Linkov.** On modeling hydraulic fracture in proper variables: stiffness, accuracy, sensitivity. International Journal of Engineering Science (2012), vol. 61, pp. 10-23.
63. Mack, Warpinski. Mechanics of hydraulic fracturing. In: Economides, Nolte (eds) Reservoir simulation, 3-rd edn. John Willey & Sons; (2000), 6.
64. Linkov. The particle velocity, speed equation and universal asymptotics for the efficient Modelling of hydraulic fractures. Journal of Applied Mathematics and Mechanics (2015).
65. Fung et al. Calculation of Vertical Fracture Containment in Layered Formations, paper SPE, SPE Formation Evaluation (1987) 2, №4.
66. Bermejo R. Stiff System. Dynamical Systems in Physiology and Medicine, Urbino (Italy) July 8–19, 2002.
67. Hindmarsh A.C., Serban R. User Documentation for ccode v2.4.0. Center for Applied Scientific Computing, Lawrence Livermore National Laboratory, March 24, 2006.
68. Wanner G., Hairer E., Nørsett S.P. Solving Ordinary Differential Equations. Springer Series In Computational Mathematics; Vol. 8. Springer-Verlag New York, Inc. New York, NY, USA, 1993.