

**Общая информация.**

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

**Содержание**

<b>1</b>	<b>Лекция 16.02.2021.</b>	<b>2</b>
1.1	Из чего состоит любая модель ГРП? Основные компоненты . . . . .	2
1.2	Модель утечки по Картеру . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Лекция 02.03.2021.</b>	<b>4</b>
2.1	Уравнение упругости, ЗСМ. Задача для полубесконечной трещины . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Лекция 09.03.2021.</b>	<b>6</b>
3.1	Задача для полубесконечной трещины (продолжение), плоская трещина . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Лекция 16.03.2021.</b>	<b>7</b>
4.1	Модель радиальной трещины и модель PKN . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Лекция 23.03.2021.</b>	<b>8</b>
5.1	Модель EP3D . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Лекция 02.04.2021.</b>	<b>9</b>
6.1	Модель Planar3D ILSA: основные уравнения, классификация элементов . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Лекция 08.04.2021.</b>	<b>10</b>
7.1	Модель Planar3D ILSA: дискретизация, поиск фронта, алгоритм . . . . .	10
<b>8</b>	<b>Лекция 13.04.2021.</b>	<b>11</b>
8.1	Модель Planar3D Biot: постановка задачи, перенос граничных условий . . . . .	11
<b>9</b>	<b>Лекция 20.04.2021.</b>	<b>12</b>
9.1	Модель Planar3D Biot: слабая постановка, штраф, пороупругие эффекты . . . . .	12
<b>10</b>	<b>Лекция 27.04.2021.</b>	<b>13</b>
10.1	Перенос проппанта: постановка задачи, обезразмеривание, оседание . . . . .	13
<b>11</b>	<b>Лекция 30.04.2021.</b>	<b>14</b>
11.1	Перенос проппанта: осреднение, численный алгоритм, бриджинг . . . . .	14

# Гидроразрыв пласта

## Конспект лекций и семинаров

Муравцев А.А.<sup>1</sup>

30 января 2023 г.

### 1 Лекция 16.02.2021.

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

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, затем поставить перегородку, сделать ещё несколько трещин 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 повторяюсь, что концептуально основная физика везде одинакова.

#### 1.1 Из чего состоит любая модель ГРП? Основные компоненты

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);
- 2) уравнение течения жидкости в трещине;
- 3) равновесие (упругость) горной породы;
- 4) условие распространения трещины;
- 5) транспорт проппанта

---

<sup>1</sup>конспектирует; email: almuravcev@yandex.ru

## **1.2 Модель утечки по Картеру**

## 2 Лекция 02.03.2021.

### 2.1 Уравнение упругости, ЗСМ. Задача для полубесконечной трещины

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.

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 сделать 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).

### **3 Лекция 09.03.2021.**

#### **3.1 Задача для полубесконечной трещины (продолжение), плоская трещина**

## **4 Лекция 16.03.2021.**

### **4.1 Модель радиальной трещины и модель PKN**

## **5 Лекция 23.03.2021.**

### **5.1 Модель EP3D**



## **6 Лекция 02.04.2021.**

### **6.1 Модель Planar3D ILSA: основные уравнения, классификация элементов**

## **7 Лекция 08.04.2021.**

### **7.1 Модель Planar3D ILSA: дискретизация, поиск фронта, алгоритм**

## **8 Лекция 13.04.2021.**

### **8.1 Модель Planar3D Biot: постановка задачи, перенос граничных условий**

## **9 Лекция 20.04.2021.**

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

## **10 Лекция 27.04.2021.**

### **10.1 Перенос проппанта: постановка задачи, обезразмеривание, оседание**

## **11 Лекция 30.04.2021.**

### **11.1 Перенос пропантa: осреднение, численный алгоритм, бриджинг**