

Описание приложения

Приложение для дизайна трещины гидроразрыва

Приложение позволяет рассчитать **оптимальные параметры трещины** гидроразрыва, при которых продуктивность скважины максимальна при заданной массе закачиваемого проппанта для конкретных характеристик продуктивного пласта и свойствах проппанта. Помимо этого, определяется **реальное размещение** проппанта в трещине в зависимости от технологических ограничений, а также параметры **режима обработки**.

Расчеты в приложении основаны на методике **Унифицированного дизайна гидроразрыва пласта**, предложенной М. Economides. Данная методика позволяет оценить проведение гидроразрыва в высокопроницаемых и в низкопроницаемых пластах.

1. Входные параметры

M_{prop}	Масса проппанта для 2 крыльев трещины, кг – является важнейшей переменной для характеристики величины обработки
ρ_{prop}	Удельная плотность проппанта (для воды = 1)
m_{prop}	Пористость упаковки проппанта – изменяется в зависимости от давления смыкания
k_f	Проницаемость упаковки проппанта, мД - зависит от давления смыкания и степени загрязнения трещины остатками жидкости разрыва
$D_{p\ max}$	Максимальный диаметр проппанта, мм – зависит от размера сита (mesh)
k	Проницаемость горной породы, мД
h_p	Проницаемая мощность (утечек), м – используется в расчетах коэффициента продуктивности (и объемной эффективности проппанта) и кажущегося коэффициента утечек
r_w	Радиус скважины, м – необходим для расчета псевдоскин-фактора
r_e	Радиус дренирования, м
s_f	Скин-фактор до обработки
h_f	Высота трещины, м – один из ключевых параметров планирования гидроразрыва

E'	Модуль плоской деформации, атм – определяется через модуль Юнга и коэффициент Пуассона
q_i	Скорость закачки смеси (для 2 крыльев, жидкость с проппантом), м ³ /мин
K'	Показатель реологии, (Н/м ²) · с – показатель постоянства закачиваемого флюида
n'	Показатель степенного закона поведения потока
C_L	Коэффициент утечек в проницаемом слое, м · мин ^{1/2}
S_p	Коэффициент мгновенной водоотдачи, м ³ /м ²
c_{max}	Максимально возможная концентрация проппанта, кг/м ³ чистой жидкости – главное ограничение, устанавливаемое оборудованием
K_{long}	Коэффициент увеличения оптимальной длины
K_{Nolt}	Коэффициент увеличения поправки Нолта

2. Оптимизация параметров трещины

Длина трещины и безразмерная проводимость трещины являются основными переменными, определяющими коэффициент продуктивности скважины с проведенным на ней гидроразрывом. Безразмерная проводимость трещины C_{fD} определяется как отношение пропускной способности трещины и фильтрационной в дренируемом объеме пласта:

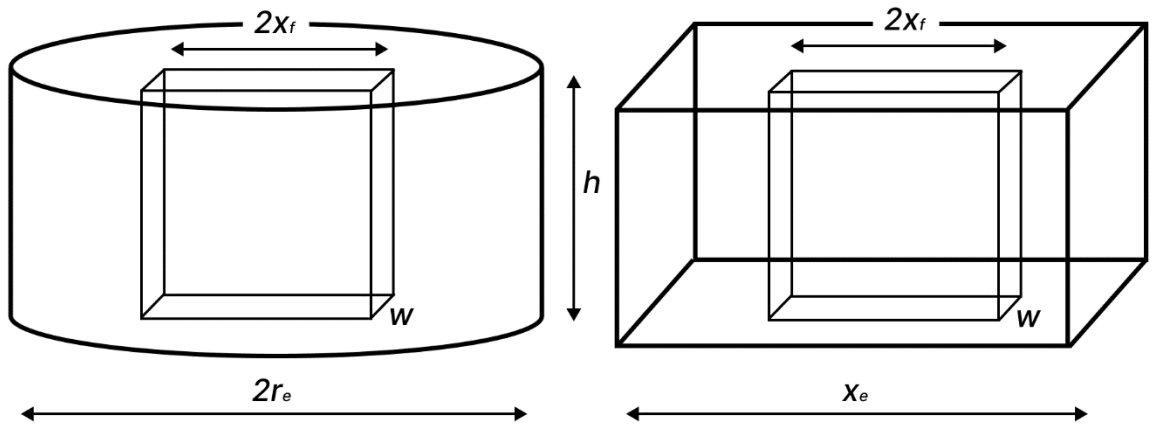
$$C_{fD} = \frac{k_f \cdot w}{k \cdot x_f} \quad (2.1)$$

где x_f – полудлина трещины, w – ширина трещины, k – проницаемость пласта, k_f – проницаемость проппантной упаковки.

В системе скважина-трещина-пласт рассматривается трещина, вскрывающая весь продуктивный слой. Площадь дренирования в реальности не является круглой или прямоугольной, однако эта аппроксимация является достаточной для большинства из них.

Связь между площадью дренирования A , радиусом дренирования r_e и длиной боковой стороны x_e задается соотношением:

$$A = \pi r_e^2 = x_e^2 \quad (2.2)$$



Глубина проникновения трещины в направлении x определяется как:

$$I_x = \frac{2x_f}{x_e} \quad (2.3)$$

где x_f – полудлина трещины, x_e – длина стороны прямоугольной области дренирования.

Для определения необходимых соотношений между длиной и шириной трещины при планировании ГРП наиболее важным параметром является *безразмерное число проппанта* N_{prop} , связывающее глубину проникновения и безразмерную проводимость трещины:

$$N_{prop} = I_x^2 \cdot C_{fD} \quad (2.4)$$

$$N_{prop} = \frac{2k_f}{k} \cdot \frac{V_{prop}}{V_{res}} \quad (2.5)$$

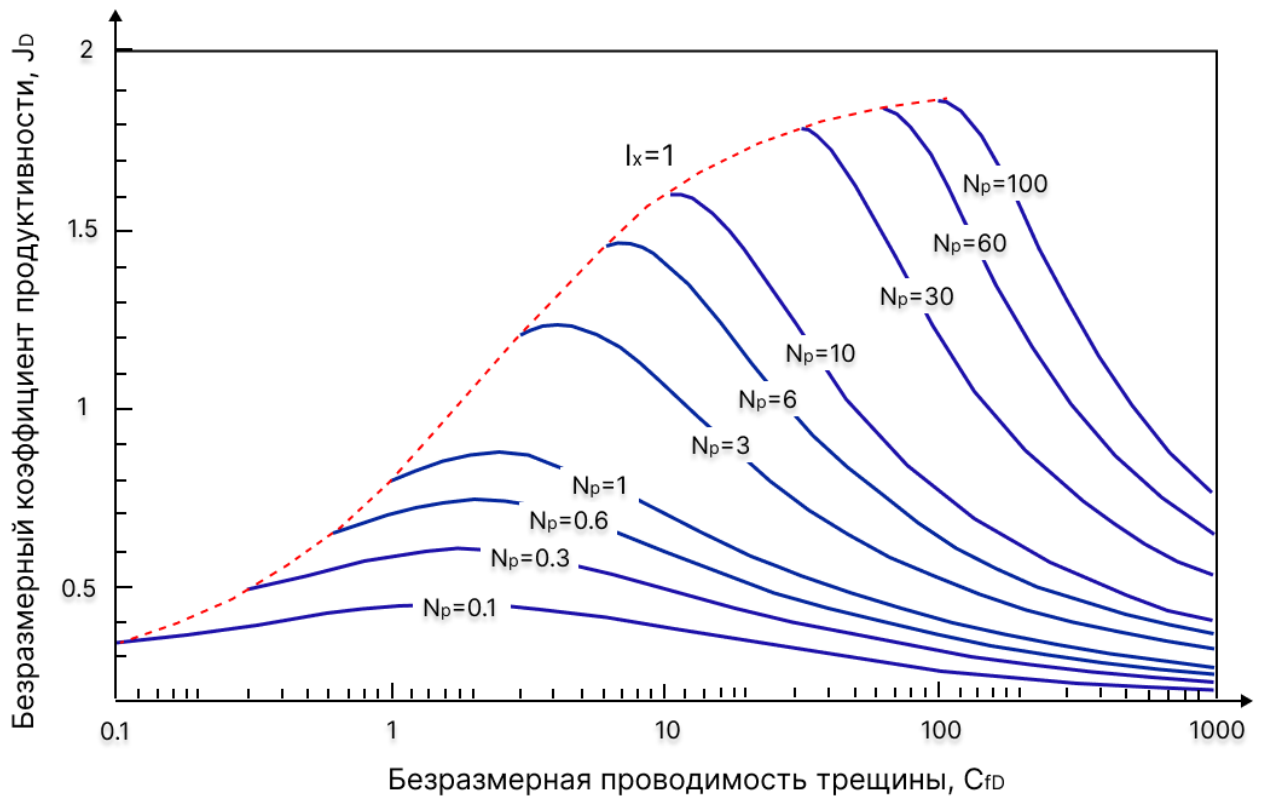
Объем трещины гидроразрыва:

$$V_{prop} = \frac{M_{prop} \cdot r_p}{1000 \cdot \rho_{prop} \cdot (1 - m_{prop})} \quad (2.6)$$

$$r_p = \frac{h_p}{h_f} \quad (2.7)$$

Цель оптимизации заключается в определении таких параметров трещины, при которых *безразмерная продуктивность скважины* J_d при заданном безразмерном числе проппанта N_{prop} (эквивалентно массе проппанта M_{prop}) имела бы максимальное значение.

Безразмерная продуктивность скважины является функция от безразмерного числа проппанта и безразмерной проводимости трещины: $J_d^{opt} = f(N_{prop}, C_{fD}^{opt})$.



Оптимальная полудлина трещины:

$$x_f = \left(\frac{V_f k_f}{C_{fD,opt} h k} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

где V_f - объем одного из крыльев трещины (внутри продуктивного слоя), м^3

Оптимальная усредненная ширина трещины:

$$w = \left(\frac{C_{fD,opt} V_f k}{h k_f} \right)^{1/2} = \frac{V_f}{x_f h} \quad (2.9)$$

3. Оценка эффективности гидроразрыва

Проведение гидроразрыва увеличивает коэффициент продуктивности и, соответственно, приводит к уменьшению скин-эффекта. При ГРП более правильно говорить о *псевдоскин-эффекте*, так как, помимо устранения загрязнений призабойной зоны, создаются новые и расширяются старые каналы течения жидкости.

При унифицированном дизайне гидроразрыва в качестве показателя эффективности обработки используется *безразмерный (приведенный) коэффициент продуктивности J_d* . Изменение этой переменной демонстрирует реальное влияние трещины, закрепленной пропантом, на характеристики работы скважины.

Для скважины, находящейся в центре круговой площади дренирования, выражение для безразмерного коэффициента продуктивности для псевдоустановившегося режима выглядит следующим образом:

$$J_d = \frac{1}{\ln \left[\frac{0,472 r_e}{r_w} \right] + s_f} = \frac{1}{\ln \left[\frac{0,472 r_e}{r'_w} \right]} \quad (3.1)$$

где r_e – радиус дренирования, r_w – радиус скважины, s_f – псевдоскин, r'_w – эффективный радиус скважины ($r'_w = e^{-s_f}$).

Кратность увеличения продуктивности скважины после проведения ГРП рассчитывается через соотношение безразмерных продуктивностей скважины до проведения обработки и после.

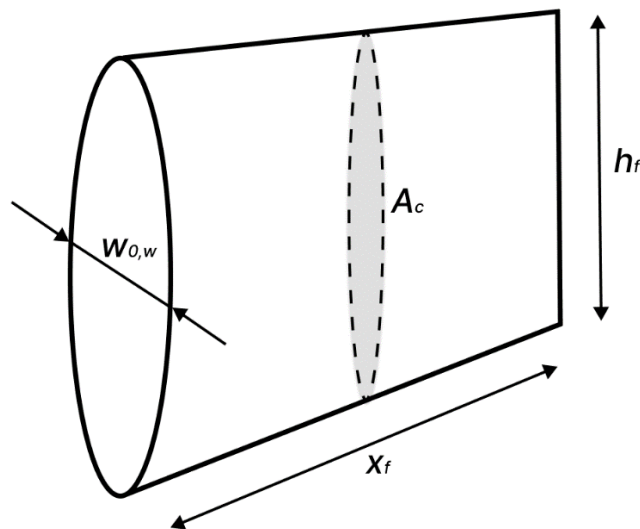
4. Реальное размещение пропанта в трещине

Технологические и экономические ограничения зачастую не позволяют достигнуть оптимального размещения пропанта в трещине. Это связано с производительностью насосных агрегатов, свойствами жидкости разрыва

(максимально возможная концентрация проппанта в жидкости, показатели реологии) и др.

В приложении для дизайна ГРП в качестве модели распространения трещины использовалась модель *PKN* (Перкинса-Керна-Нордгрена).

Модель *PKN* предполагает, что состояние плоской деформации характерно для всех плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения трещины. Однако напряжения и давления в этих плоскостях не всегда принимаются одинаковыми. Подразумевается, что плоскость является вертикальной и проходит по нормали к направлению развития трещины. Составляющая давления, направленная вертикально, пренебрегается. Полезное давление p_n рассматривается как функция от горизонтальной координаты x . В вертикальном направлении давление принимается постоянным в данной координате x и определяет эллиптическое сечение.



Максимальная ширина эллипса:

$$w_0 = \frac{2h_f p_n}{E'} \quad (4.1)$$

В модели принято, что чистое давление равно 0 на конце трещины, и средняя линейная скорость жидкости оценена как отношение скорости закачки q_i к площади сечения.

Уравнение потерь давления:

$$\frac{dp_n}{dx} = \frac{-4\mu q_i}{\pi w_0^3 h_f} \quad (4.2)$$

Ширина трещины:

$$w_0(x) = w_{w,0} \left(1 - \frac{x}{x_f}\right)^{1/4} \quad (4.3)$$

Максимальная ширина эллипса в призабойной зоне скважины задается выражением:

$$w_0(x) = 3,57 \left(\frac{\mu q_i x_f}{E'}\right)^{1/4} \quad (4.4)$$

По значению ширины трещины в призабойной зоне можно рассчитать среднюю ширину трещины, умножив ее на постоянный коэффициент формы γ :

$$\bar{w} = \gamma w_{w,0} \quad (4.5)$$

где $\gamma = \frac{\pi}{4} \frac{4}{5} = \frac{\pi}{5} = 0,628$

Коэффициент формы имеет две составляющие. Первая равна $\frac{\pi}{4}$ и учитывает эллиптичность вертикальной формы. Вторая равна $\frac{4}{5}$, учитывает изменение максимальной ширины в горизонтальном направлении.

Максимальная концентрация проппанта, кг/м³ суспензии:

$$c_{e \max} = \frac{c_{\max}}{1 + \frac{c_{\max}}{1000 \cdot \rho_{prop}}} \quad (4.6)$$

Концентрация проппанта в жидкости, когда весь проппант размещается в трещине, кг/м³ суспензии:

$$c_e = \frac{M_{prop}}{h_f \cdot \bar{w} \cdot 2x_f \cdot K_{long}} \quad (4.7)$$

где \bar{w} – усредненная ширина трещины, м; h_f – высота трещины, м; x_f – длина трещины, м; K_{long} – коэффициент увеличения оптимальной длины.

При $c_e > c_{e \max}$ оптимальное размещение проппанта в трещине невозможно. Закачанная масса проппанта на 2 крыла трещины:

$$M_{act} = M_{prop} \cdot \frac{c_{e \max}}{c_e} \quad (4.8)$$

5. Режим обработки

Фактические утечки жидкости разрыва в пласт определяются как фильтрационной коркой, так и условиями течения жидкости в пласте.

Скорость утечки v_L задается I уравнением Картера:

$$v_L = \frac{C_L}{\sqrt{t}} \quad (5.1)$$

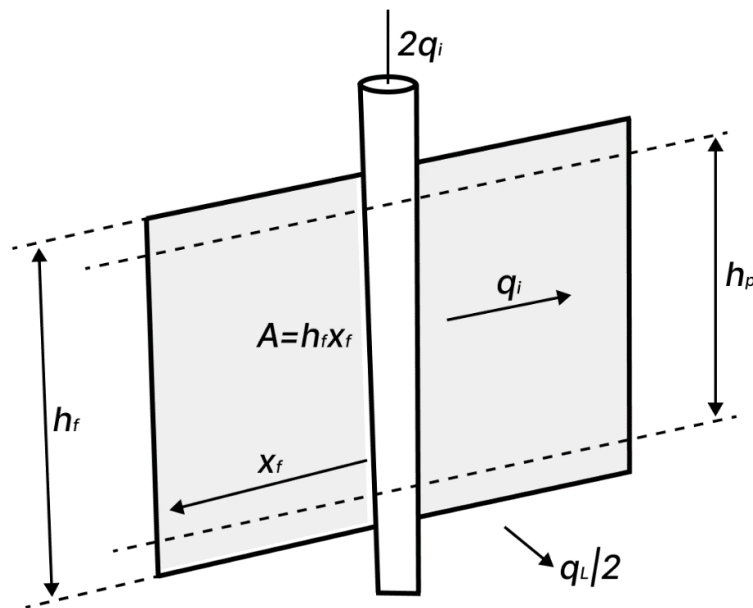
где C_L – коэффициент утечек (м/с^{1/2}), t – время с начала процесса утечки.

Интегральная форма уравнения Картера:

$$\frac{V_{lost}}{A_L} = 2C_L\sqrt{t} + S_p \quad (5.2)$$

где V_{lost} – объем жидкости, проходящей через поверхность A_L за период времени от 0 до t , S_p – коэффициент мгновенных утечек.

Коэффициент мгновенных утечек можно рассматривать как поток жидкости, мгновенно проходящего через поверхность в начале процесса утечек в пласт. Коэффициенты C_L и S_p могут быть рассчитаны в ходе лабораторных экспериментов или из интерпретации калибровочного теста.



Время закачки жидкости t_e определяется из уравнения:

$$\frac{q_i t_i}{h_f x_f} - 2K_L C_L \sqrt{t} - (\overline{w_e} + 2S_p) = 0 \quad (5.3)$$

Объем нагнетания:

$$V_i = q_i t_e \quad (5.4)$$

Эффективность флюида:

$$\eta_i = \frac{h_f x_f \overline{w_e}}{V_i} \quad (5.5)$$

При заданном времени закачки и объеме суспензии, ступенчатый график работы насоса требуется для получения дизайна упакованной проппантом трещины. Жидкость, закачанную без проппанта в начале работы, называют «подушкой». Она инициирует и открывает трещину. После закачки «подушки» концентрация проппанта в суспензии нарастает ступенчато до максимальной величины, достигаемой в конце обработки.

Показатель степени концентрации закачиваемого проппанта:

$$\varepsilon = \frac{1 - \eta_e}{1 + \eta_e} \quad (5.6)$$

Объем «подушки» и время для его закачки:

$$V_{pad} = \varepsilon V_i \quad (5.7)$$

$$t_{pad} = \varepsilon t_e \quad (5.8)$$

Требуемая концентрация (масса на единицу объема закачиваемого раствора):

$$c = c_e \left(\frac{t - t_{pad}}{t_e - t_{pad}} \right)^\varepsilon \quad (5.9)$$

где c_e – максимальная концентрация проппанта в закачиваемом растворе в конце обработки

Поверхностная концентрация проппанта после смыкания трещины:

$$c_s = \frac{M_{act}}{h_f \cdot 2x_f} \quad (5.10)$$