



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НЕФТИ и ГАЗА

имени И. М. ГУБКИНА

Моделирование кислотного ГРП

Р.Д. Каневская, А.В. Новиков

Сравнение техник ГРП

Проппантный ГРП

- Преимущественно терригенный коллектор

Риски в карбонатном коллекторе

- Потеря проводимости трещины
 - Вдавливание проппанта
- Риск недостижения планируемых показателей продуктивности
 - Высокая трещиноватость коллектора

Кислотный ГРП

- Карбонатный коллектор

Преимущества

- Относительно низкая стоимость
- Вытравливание высокопроводимых каналов
- Увеличение площади охвата кислотного воздействия за счёт системы естественных трещин



Обзор методик моделирования КГРП

- **Расчёт проводимости трещины на основе эмпирических корреляций**

- корреляция Нироуда-Крука
 - учитывает закачанный объём кислоты, сдвигающие напряжения пласта
- корреляция Гонга
 - учитывает неровность берегов трещины
- корреляция Денга-Му
 - учитывает минералогические и петрофизические неоднородности берегов трещины

- **Расчёт течения кислоты по трещине**

- Мгновенная скорость реакции на берегах трещины
- Использование корреляций для расчёта проводимости трещины
- Settari (1993, 1998), Romero (1998), Oeth (2013)

Преимущества:

- простота использования

Недостатки:

- Ограниченность
- Большой разброс значений используемых констант

Преимущества:

- Точный расчёт течения в трещине

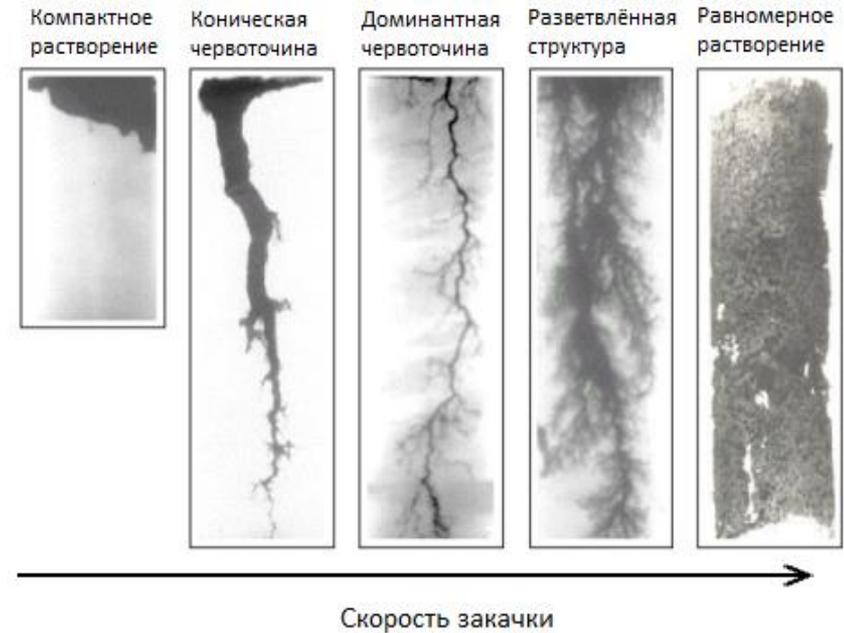
Недостатки:

- Равновесность растворения – вся кислота реагирует на берегах
- Использование корреляций для учёта сдвигающих напряжений



Учёт червоточин

- **Фильтрационные эксперименты с керном**
 - Подбор оптимальной* скорости закачки кислоты
 - Влияние различных факторов на оптимальные параметры закачки
 - Температура
 - Состав кислотной системы
 - Концентрация
 - Оценка скорости роста червоточин
- **Скейлинг результатов лабораторных экспериментов**
 - На основе 3D моделирования керна
 - Специальные эксперименты на больsherазмерных кернах



*Оптимальная скорость закачки кислоты – скорость нагнетания, при которой тратится наименьший объём кислоты для достижения червоточины фиксированной длины (длины керна, в эксперименте)



Предлагаемый подход

Распространение кислоты в пласт

- Расчёт распространения кислоты в пласт
 - Крупномасштабное приближение
 - Двухфазная многокомпонентная фильтрация
- Расчёт кинетики растворения
 - Кальцит, доломит
 - Соляная, уксусная, муравьиная кислоты
 - Чистая кислота, эмульгированные и загущенные кислотные системы

Течение кислоты по трещине

- Расчёт течения раствора кислоты по трещине
- Расчёт нескольких стадий процедуры
 - Предварительная/окончательная промывка
 - Закачка жидкости разрыва
 - Закачка кислоты



Эффективные характеристики стимулированной области

- Размер и форма
- Проводимость и ОФП
 - Скин-фактор



Распространение кислоты в пласте

$$\frac{\partial}{\partial t}(m(1-s)\rho_o) + \text{div} \rho_o \mathbf{v}_o = q_o$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms\rho_w) + \text{div} \rho_w \mathbf{v}_w = q_w = q_{h2o} + q_a + q_s + q_{co2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(msc_{h2o}\rho_w) + \text{div} c_{h2o}\rho_w \mathbf{v}_w = q_{h2o}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(msc_a\rho_w) + \text{div} c_a\rho_w \mathbf{v}_w = q_a$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(msc_s\rho_w) + \text{div} c_s\rho_w \mathbf{v}_w = q_s$$

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-m)\rho_{sk}) = q_{sk}$$

$$q_a = (v''_\alpha - v'_\alpha) M_\alpha \left[\frac{s(c_a - c_a^{eq})^n \rho_w}{M_w} a_0 \frac{1-m}{1-m_0} \right] \left[A_k \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \right]$$

$$\mathbf{v}_i = -\frac{k_{ri}}{\mu_i} (\nabla p - \rho_i \mathbf{g}), \quad i = \{w, o\}$$

$$k_{ri}(m, s) = \frac{m-m_0}{m^*-m_0} s + \frac{m^*-m}{m^*-m_0} k_{ri}$$

Модель двухфазного
многокомпонентного
вытеснения нефти
раствором кислоты

Кинетика гетерогенных
реакций

Модификация ОФП при
растворении породы

Нижние индексы: “o” – фаза нефти, “w” – фаза воды, “h2o” – вода, “a” – кислота, “s” – соль, “co2” – углекислый газ, “sk” – скелет, m – максимально возможная пористость, v''_α, v'_α – стехиометрические коэффициенты вещества α , M_α – молекулярная масса вещества α , A – предэкспоненциальный множитель реакции, E_k – энергия активации, n – порядок реакции, a_0 – начальная удельная поверхность реак-



Течение кислоты в трещине

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla c_a = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial c_a}{\partial y} \right),$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = q_{inj}$$

$$v_x = \frac{3\widehat{v}_x}{2} \left(1 - \left(\frac{2y}{w} \right)^2 \right), v_y = v_L \left(\frac{3}{2} \left(\frac{2y}{w} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{2y}{w} \right)^3 \right)$$

$$v_x = \frac{2n' + 1}{n' + 1} \widehat{v}_x \left(1 - \left(\frac{2y}{w} \right)^{\frac{n'+1}{n'}} \right), v_y = \frac{2n' + 1}{n' + 1} v_L \left(1 - \left(\frac{2y}{w} \right)^{\frac{n'+1}{n'}} \right)$$

Трёхмерная модель
распространения примеси в
трещине

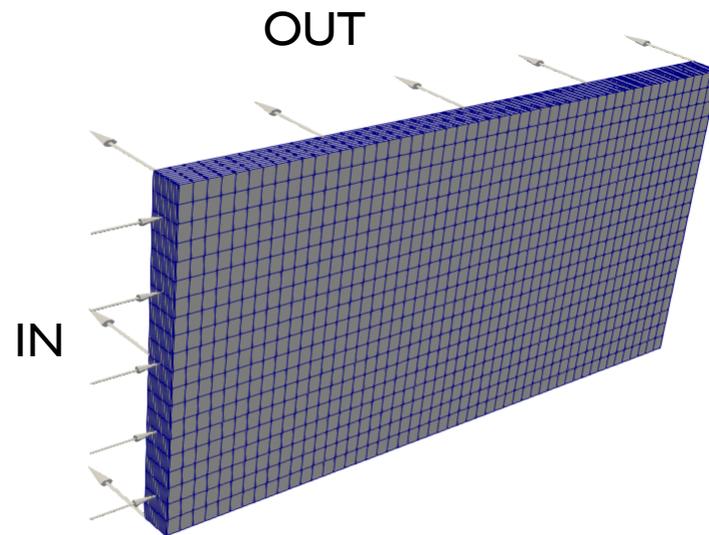
Ньютоновская и
неньютоновская
реологии кислотной
системы

Нижние индексы: “*a*” – кислота, “*eff*” – эффективный, “*inj*” – нагнетаемый, *D* – коэффициент молекулярной диффузии, *c* – концентрация кислоты, *v* – скорость течения раствора,
w – ширина трещины, *p* – давление. *v_x* – скорость вдоль канала, *v_y* – скорость поперёк канала, *n'* – показатель степени для жидкости
степенной реологии, *p_{net}* – чистое давление



Расчёты

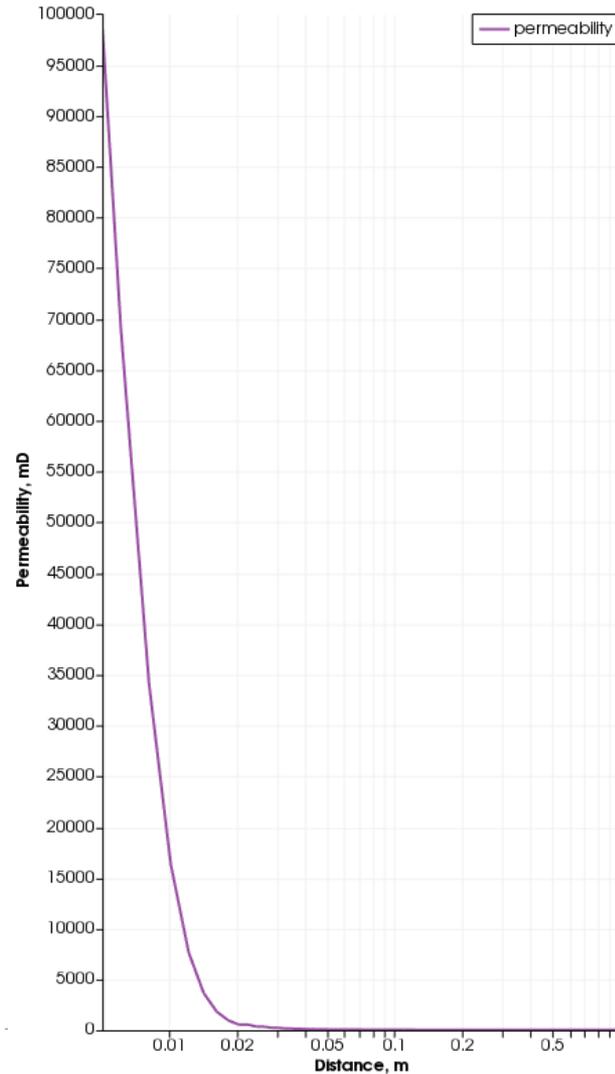
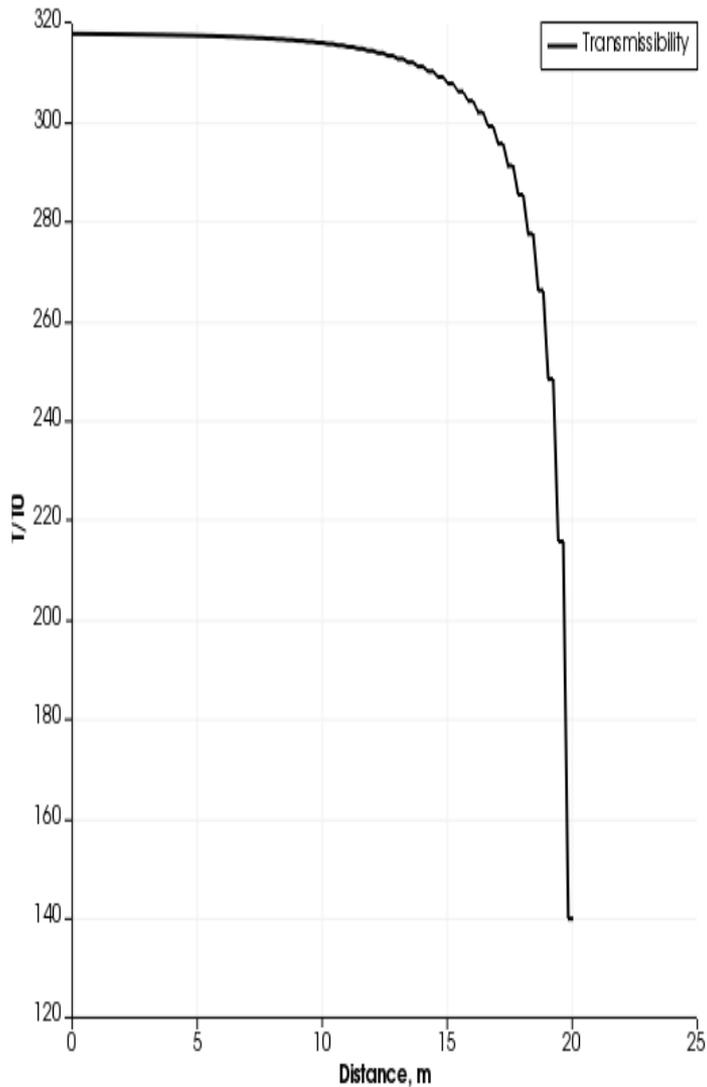
- ▶ Заданная трещина фиксированной длины и ширины
- ▶ Соляно-кислотное воздействие 15% раствором на породу из известняка
- ▶ Расчёт распространения кислоты
 - ▶ по трещине (3D модель)
 - ▶ в пористой среде с учётом химических реакций (множество 1D моделей)
- ▶ Две стадии – нагнетание кислоты и остановка на реакцию
- ▶ Результирующее распределение пористости, проницаемости, ОФП, проводимость



Вид модельной трещины с расчётной сеткой



Проводимость вдоль трещины

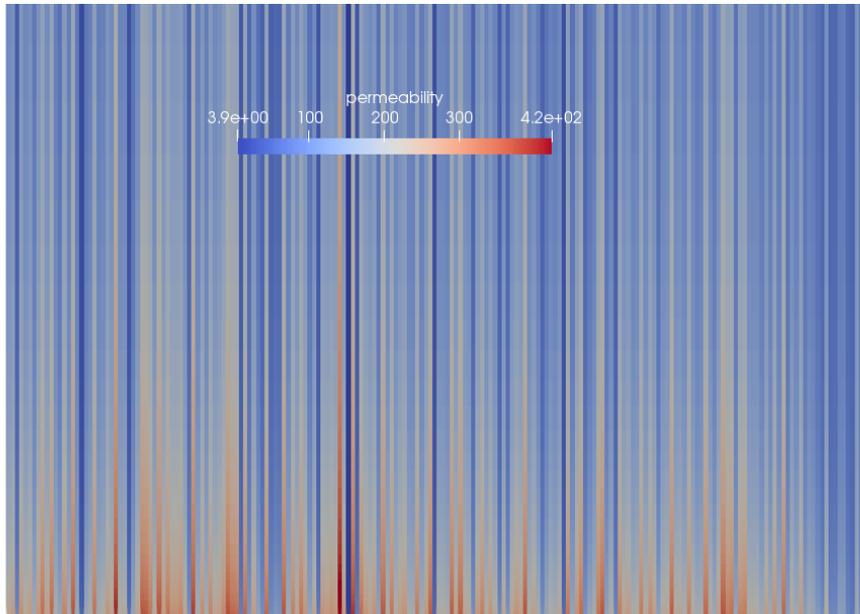


$k_0 = 100 \text{ mD}$
 $L/2 = 20 \text{ m}$
 $Q_{\text{avg}} = 2800 \text{ m}^3/\text{day}$
 $T_{\text{stop}} = 20 \text{ min}$
 $T_{\text{full}} = 5 \text{ hours}$

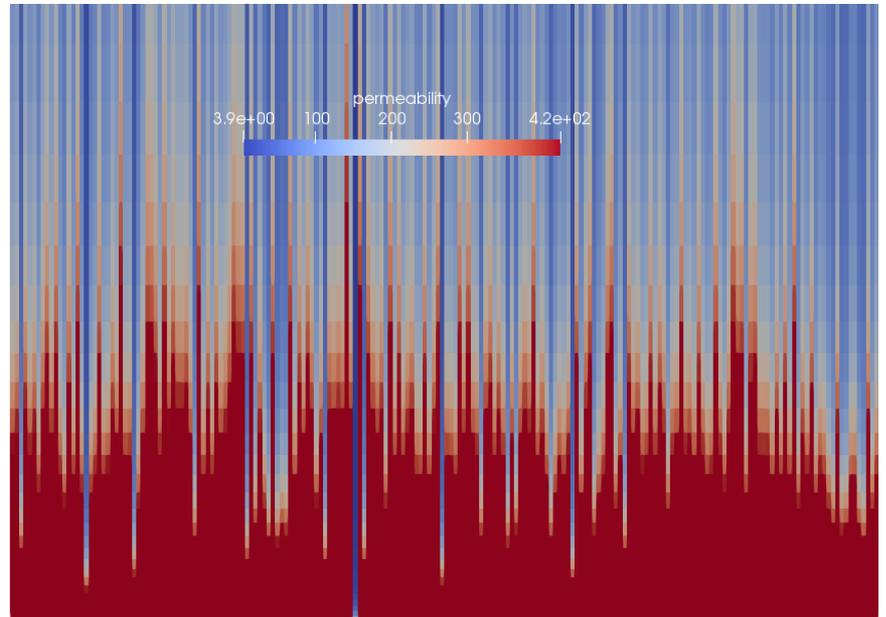
 $T = 300 \text{ mD}\cdot\text{m}$
 $T_{\text{NK}} = 100 \text{ mD}\cdot\text{m}$



Случайное распределение проницаемости



На момент остановки
на реакцию $t = 20$ мин



К концу процедуры $t = 5$ час



Выводы

- ▶ Представлена модель расчёта проводимости трещины КГРП
- ▶ Рассчитаны две стадии процедуры, а также результирующие распределения пористости и проницаемости в стимулированной области и оценена проводимость трещины
- ▶ Рассчитано распределение проницаемости для случая случайного распределения

