

# Иерархия моделей трещин, распространяющихся под действием закачиваемой жидкости

---

*В.Н. Лапин, к.ф.-м.н., с.н.с.  
ФИЦ ИВТ, Новосибирск*

1. Процессы и их описание в моделях
2. Трёхмерная модель начального этапа распространения трещины  
Искривление трещины на начальном этапе
3. Модель трещины на границе материалов  
Нарушение гидроизоляции скважины
4. Модель радиальной трещины  
Потери бурового раствора
5. Модель трещины PKN типа  
Размытие пробки проппанта

Процесс	Модель, уравнения	Должно учитываться
Деформация породы	Упругого равновесия, трехмерные	Пористость, естественная трещиноватость, неоднородность, температурные деформации
Разрушение породы	Трехмерные критерии разрушения	Пластичность, разрушение фронта, естественная трещиноватость
Движение жидкости	Движения в двумерном канале	Реология, сжимаемость, зависимость от времени и температуры, турбулентность
Фильтрация жидкости в породу	Фильтрация многофазной жидкости	Трещиноватость, движение границы проникновения, закупоривание
Перенос проппанта	Многофазной жидкости с примесями	Оседание, перемешивание, различные формы твердых добавок, закупоривание
Химические процессы	Уравнения реакций	Изменение свойств жидкости, температуры



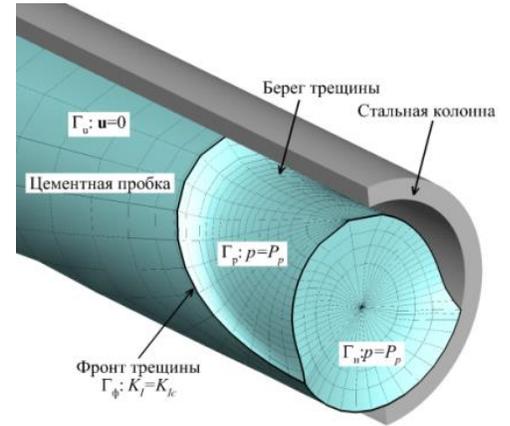


Трехмерная модель

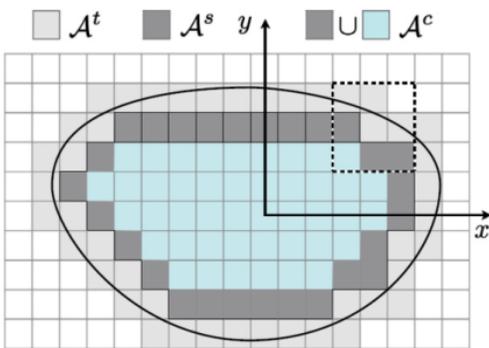
*Поверхность трещины задана*

Модель трещины на границе материалов

*Поверхность трещины – плоскость*



Плоская трехмерная



*Все направления равнозначны*

Радиальная

*Длина много больше высоты*

Трещины РКН-типа

## Трехмерная модель начального этапа распространения трещины \*

### Деформация породы

Порода - однородный, изотропный, линейно упругий материал

Дуальный метод граничных элементов  $W = W(p, \Gamma^f)$

### Распространение и разрушение трещины

Неявный глобальный критерий распространения  $F(\Gamma^f, p) = 0$

### Движение жидкости в трещине

Однофазное, модель Гершеля-Балкли

$$p = p(W, \Gamma^p), \mathbf{q} = \mathbf{q}(W, \Gamma^p),$$

### Движение фронта жидкости

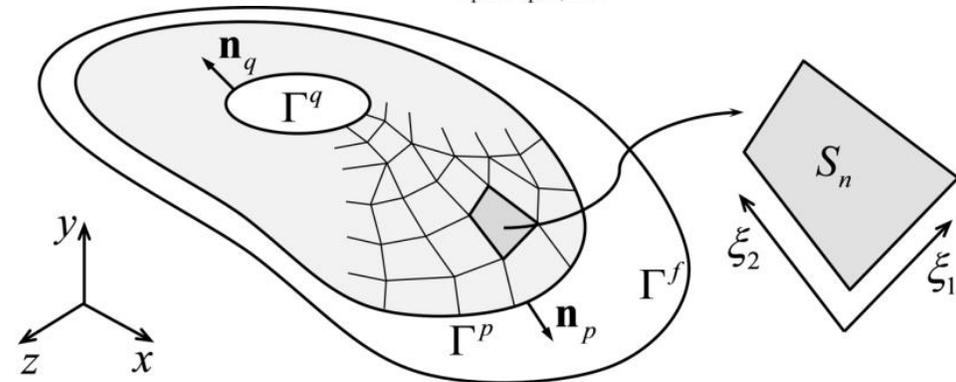
$$\text{Условие Стефана } \frac{\partial \Gamma^p}{\partial t} = \frac{\mathbf{q}}{W}$$

Фильтрация жидкости в породе - Закон Картера

Проппант – отсутствует

### Цель разработки

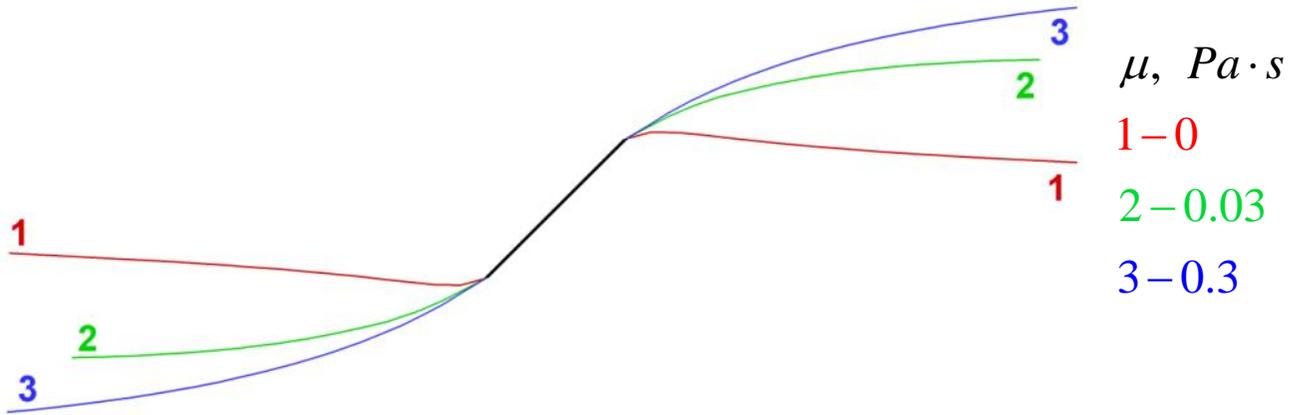
Описание искривления трещины на начальном этапе



\* Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В., Куранаков Д.С. Методы моделирования зарождения и распространения трещин ИВТ СО РАН, 2016

# Что влияет на траекторию трещины?

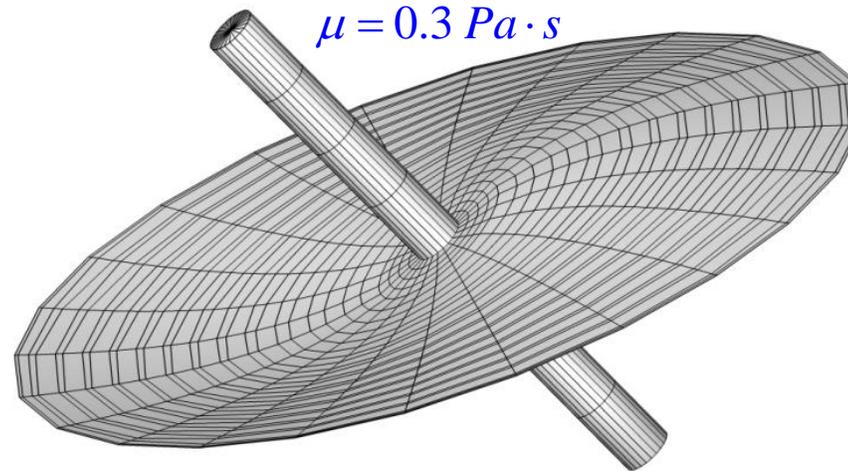
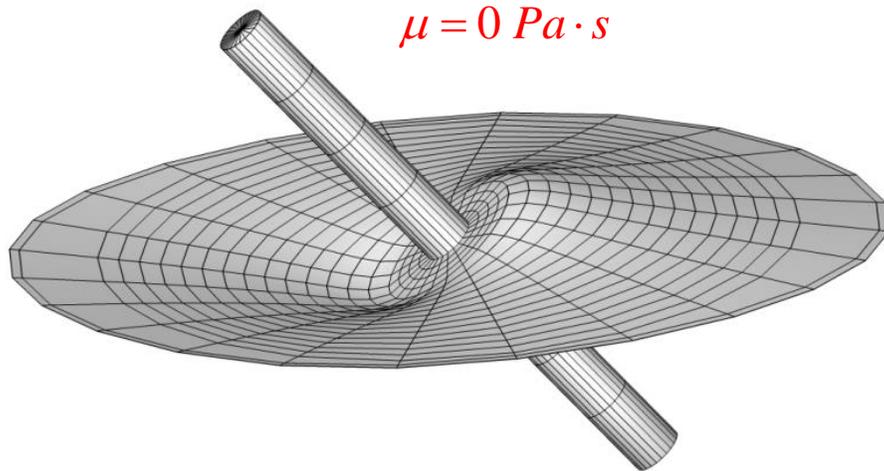
Траектория трещины (сечение)



Что влияет на траекторию трещины

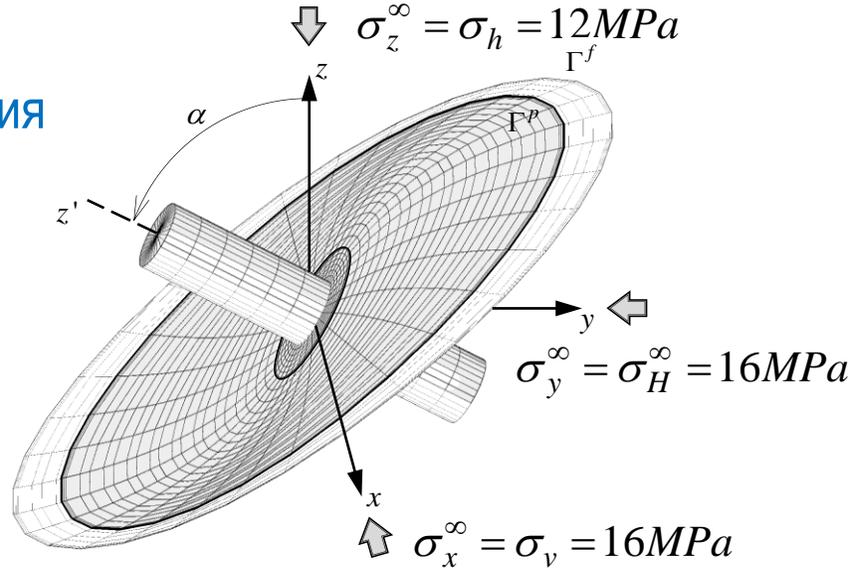
- Разница сжимающих напряжений
- Угол наклона зародышевой трещины
- Реология жидкости и закачка
- Трещиностойкость

Вид трещины при различной вязкости жидкости

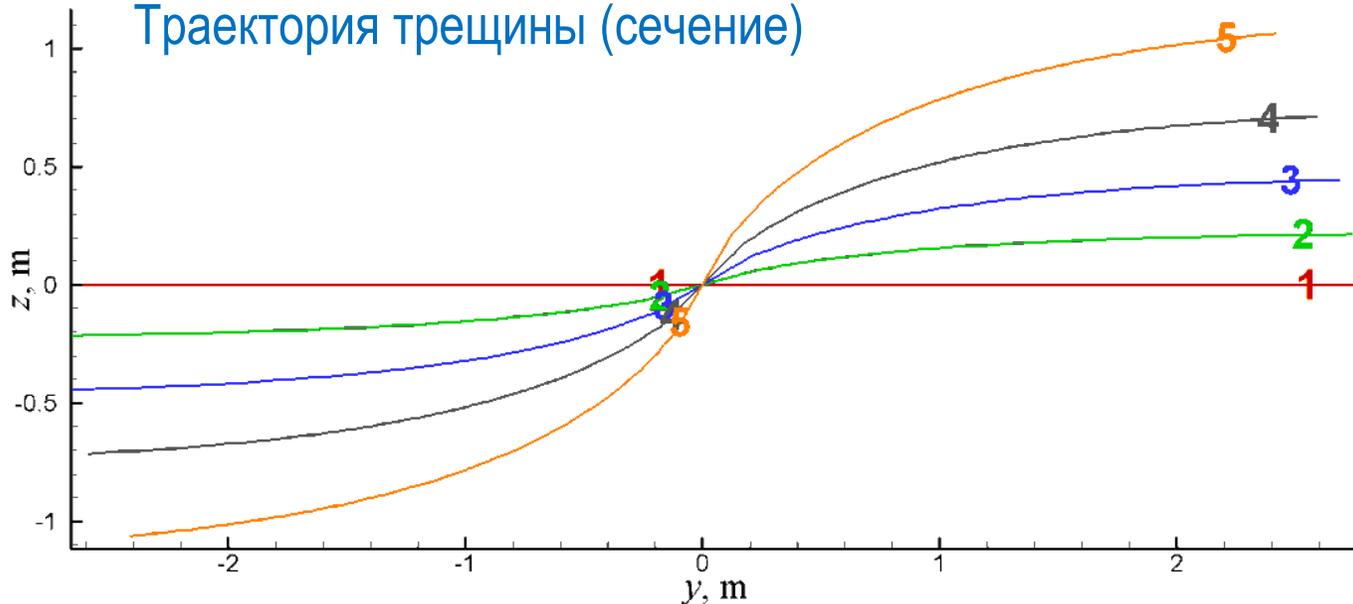


На что может повлиять изменение траектории трещины?

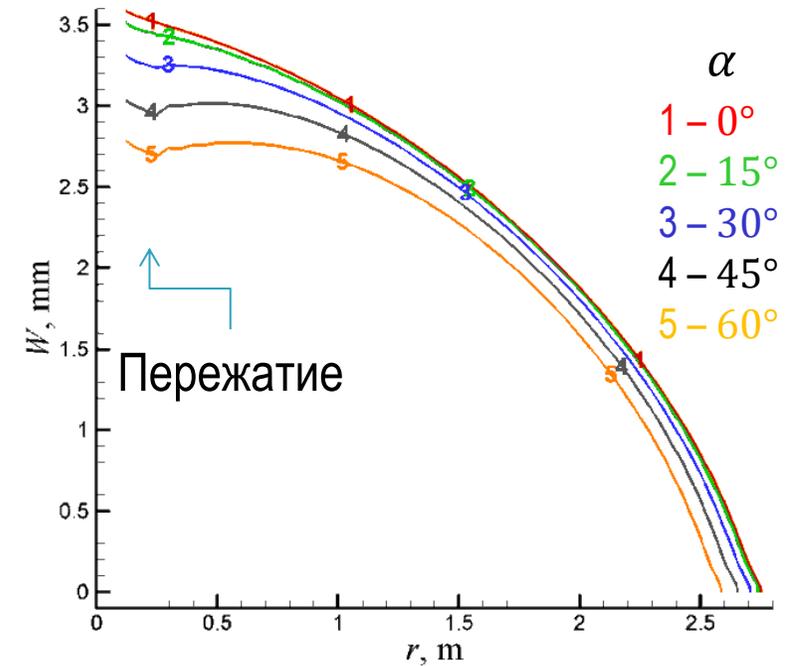
Геометрия задачи



Траектория трещины (сечение)

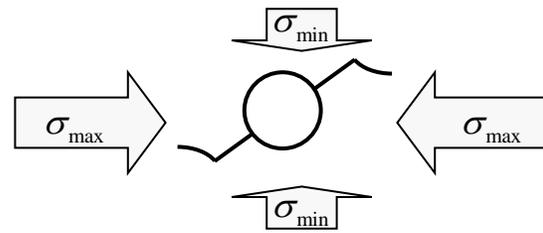
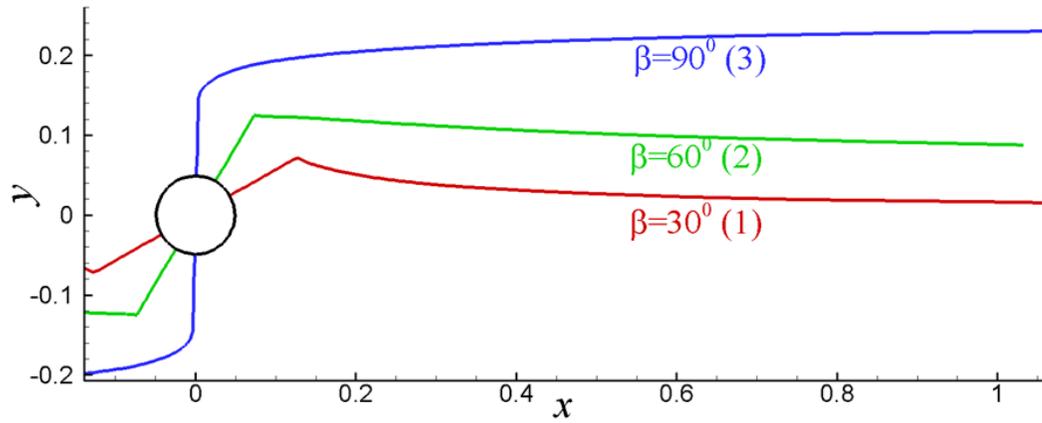


Ширина трещины

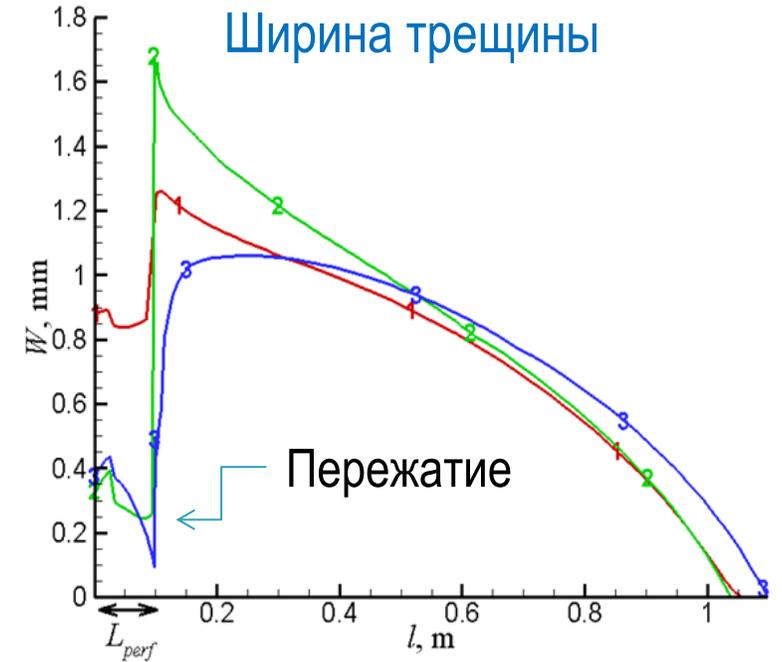
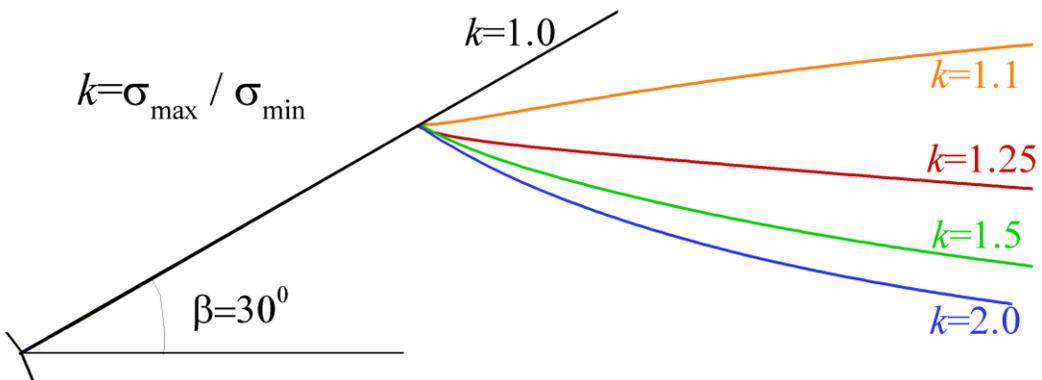


- Если скважина неправильно ориентирована, то искривление поперечной трещины слабо влияет на ширину

## Влияние угла перфорации



## Влияние разницы напряжений



- Если перфорация неправильно ориентирована, то искривление продольной трещины может вызвать пережатие трещины у скважины

Упрощение трехмерной модели:

Распространение и разрушение трещины

Неявный глобальный критерий

распространения  $\Gamma^f = \Gamma^f(p)$

Трехмерная модель:

$$K_I = K_{Ic}, \quad K_{II} = K_{III} = 0 \rightarrow \Delta L, \Theta$$

Трещина на границе:

$$K_I = K_{Ic} \rightarrow \Delta L, \Theta$$

Причины перетока жидкости\*

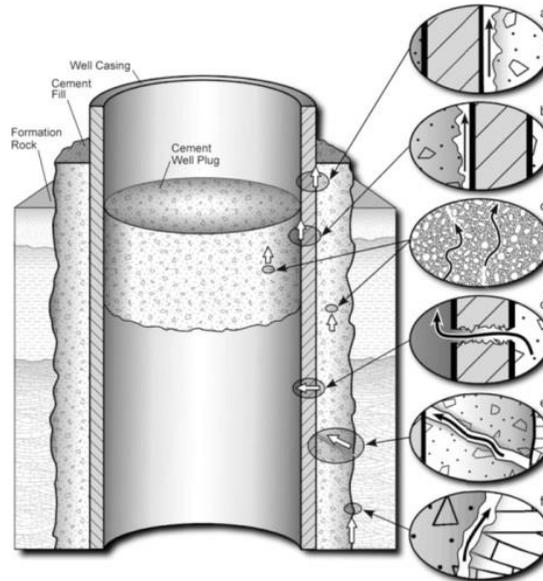
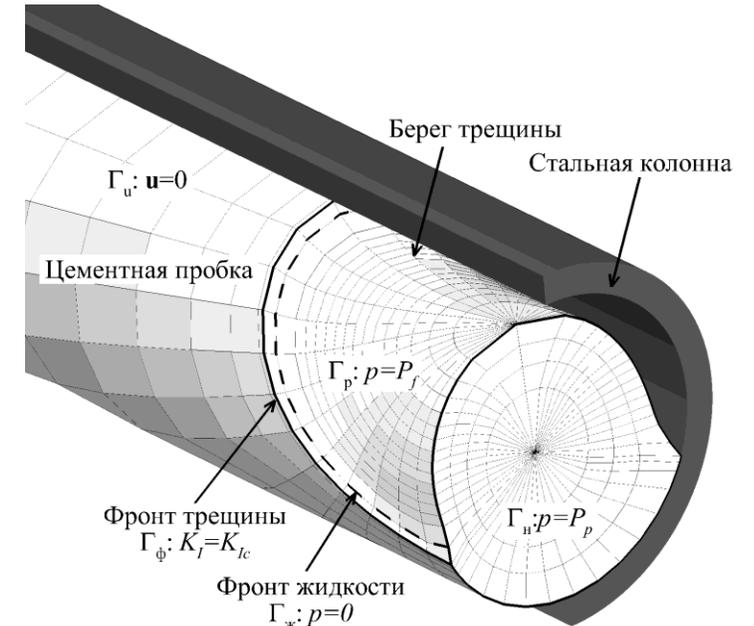


Схема трещины в пробке



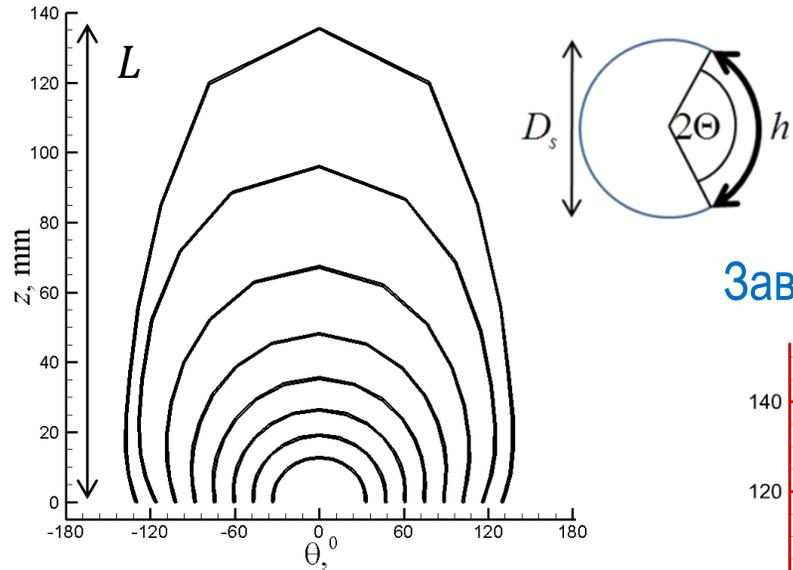
Цель разработки:

При каких условиях происходит распространение по границе пробка-обсадная колонна?

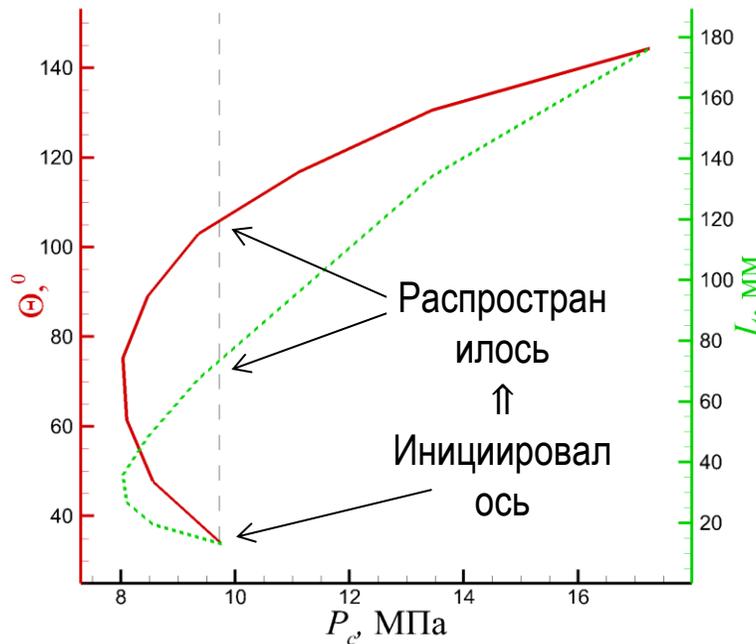
Определить что влияет на прочность пробки и скорость распространения трещины?

\* Gasda S. E., Bachu S., Celia M. A. Spatial characterization of the location of potentially leaky wells penetrating a deep saline aquifer in a mature sedimentary basin. Environmental Geology, 2004, vol. 46, no. 6, p. 707-720.

## Инициация: Фронт при постоянном давлении



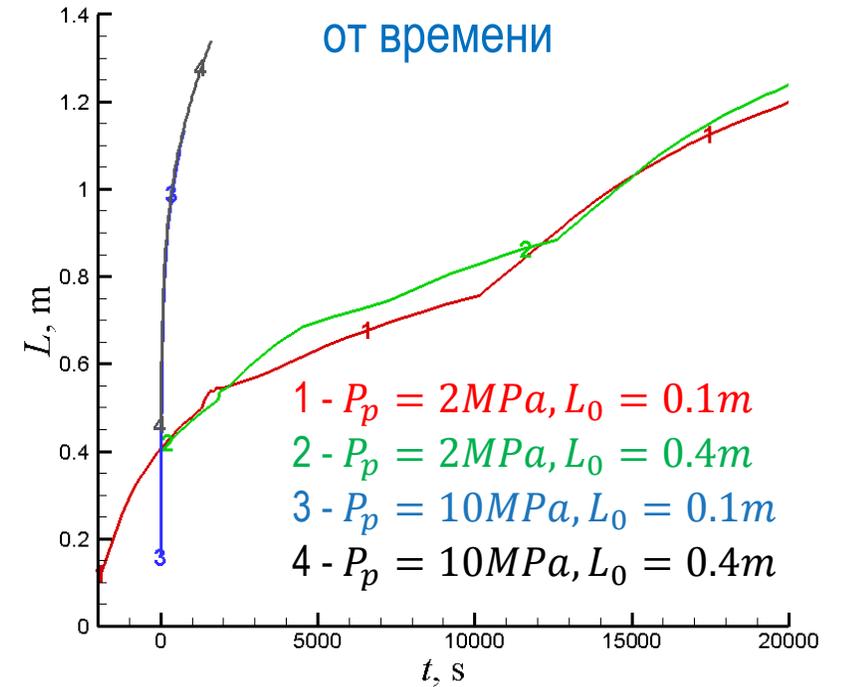
## Зависимость размеров от давления



## Инициация:

- Размер начального дефекта не важен. Давление для начала распространения падает при росте трещины

## Распространение: Зависимость длины от времени



## Распространение:

Скорость распространения

- не зависит от размера начального эффекта
- сильно зависит от давления

\* Lapin V.N., Fomina A.A. On the global implicit criterion of a fracture propagation under mixed load // Journal of Applied and Industrial Mathematics. - 2019. - Vol.13. - Iss. 4. - P.653-662.

Модель потерь бурового раствора \*

Деформация породы

Интегральное выражение для раскрытия

Распространение и разрушение трещины

Существующая естественная трещина  $K_I = 0$

Движение жидкости в трещине

Однофазное, модель Гершеля-Балкли

Движение фронта жидкости

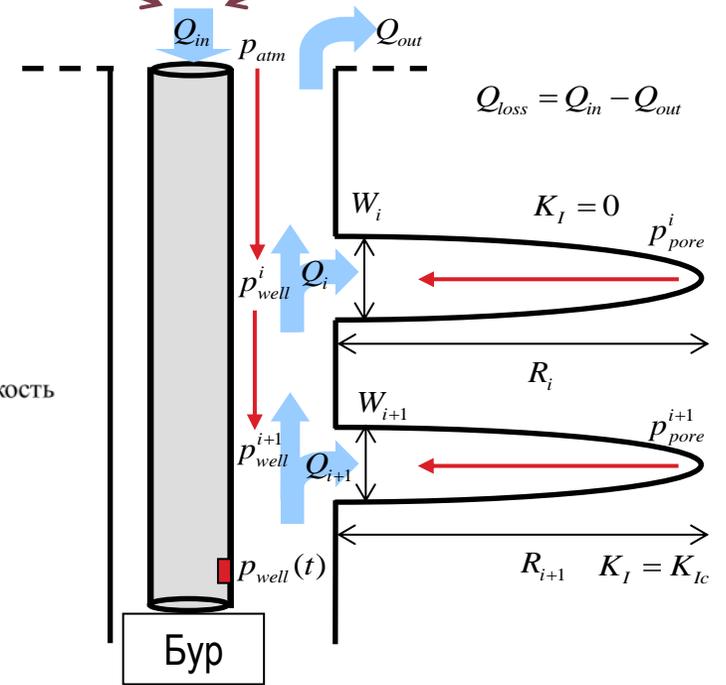
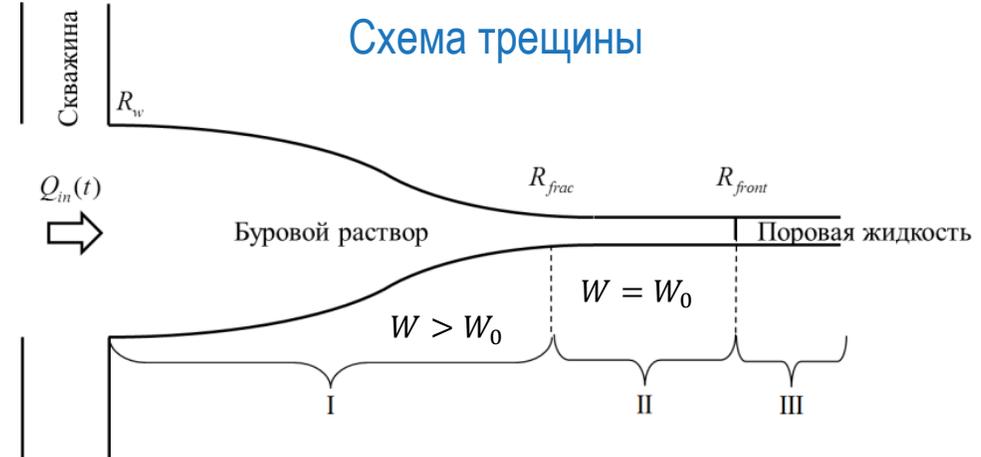
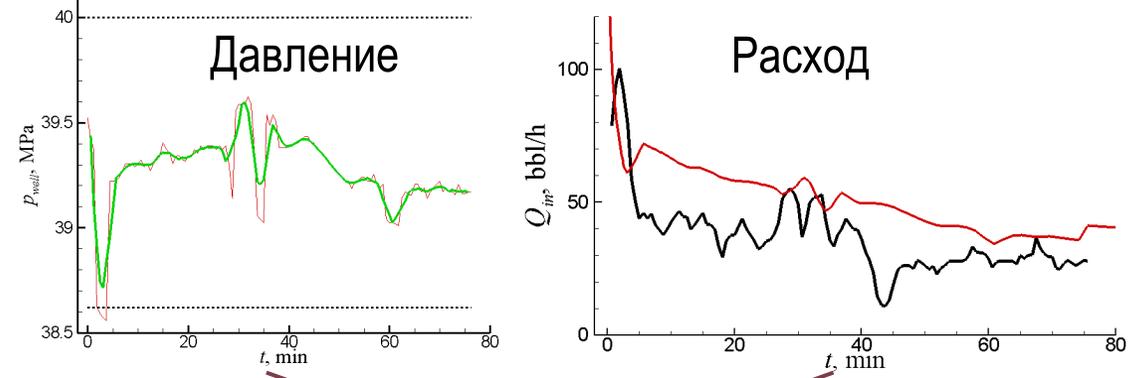
Условие Стефана, фронт жидкости опережает фронт

трещины  $R_{frac} < R_{front}$

Цель разработки:

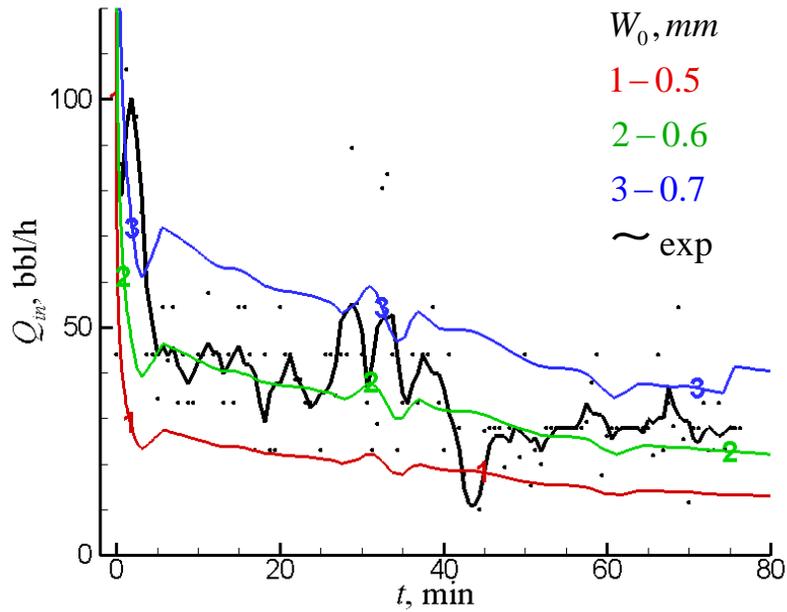
По величине потерь бурового раствора и давлению в скважине определить ширину и количество естественных трещин

Схема задачи определения параметров трещиноватой среды



\* Лапин В.Н. Модель потерь бурового раствора в систему трещин в задаче определения параметров трещиновато-пористой среды // Вычислительные технологии. - 2019. - Т.24. - № 4. - С.38-55.

## Прямая задача расчета потерь

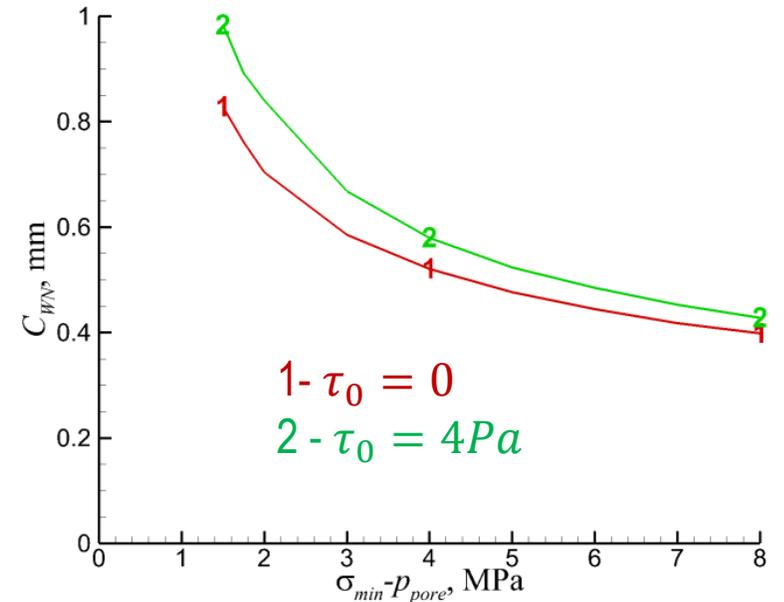
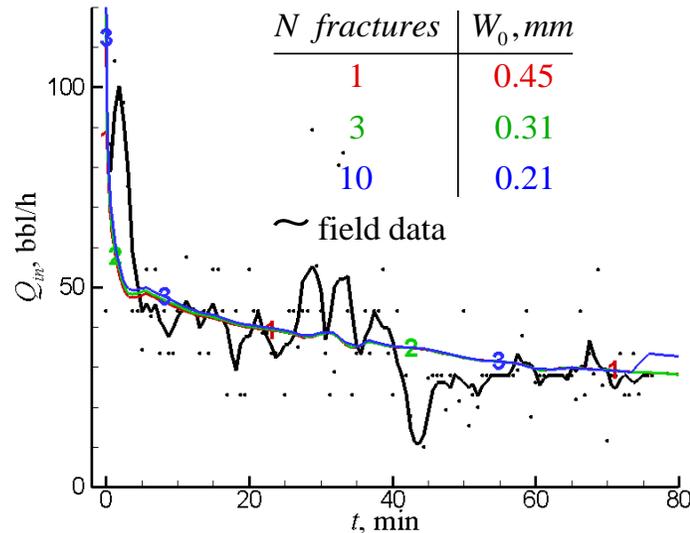


- Объем потерь зависит от ширины естественной трещины, значит можно подобрать ширину так, чтобы объемы совпадали

## Обратная задача определения параметров

- Нельзя одновременно определить ширину и количество трещин
- Можно указать их соотношение  $C_{WN} = W_0/N^{\frac{1}{3}}$
- При сохранении  $C_{WN}$  изменение количества или ширины не приводит к изменению величины потерь

## Зависимости коэффициента $C_{WN}$ от порового давления



Модель трещины с пропантом РКН-типа \*

Деформация породы

Локальная связь раскрытие – среднее давление

Движение смеси в трещине

Двумерное, двухфазное, ньютоновская несущая фаза

Перенос пропанта и несущей фазы

Метод частиц в ячейках – меньше размытие пропанта

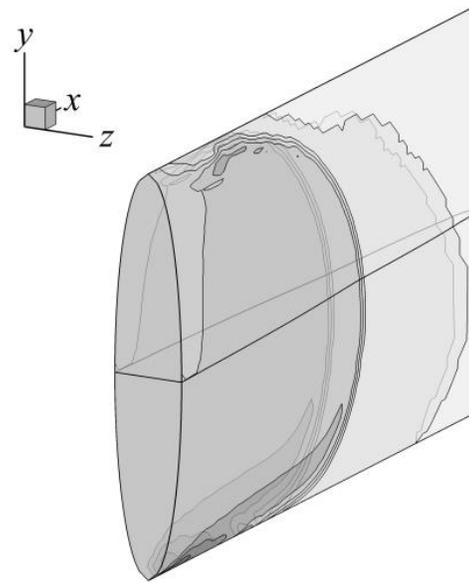
До закупоривания: перенос жидкостью + оседание

После закупоривания: фильтрация через пробку

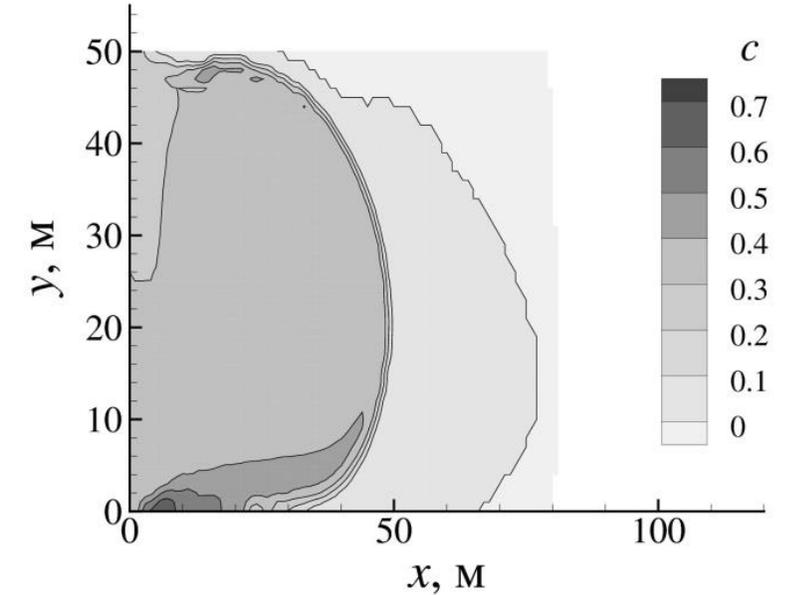
Цель разработки:

Полигон для тестирования моделей переноса пропанта

Трёхмерное представление



Двумерное представление

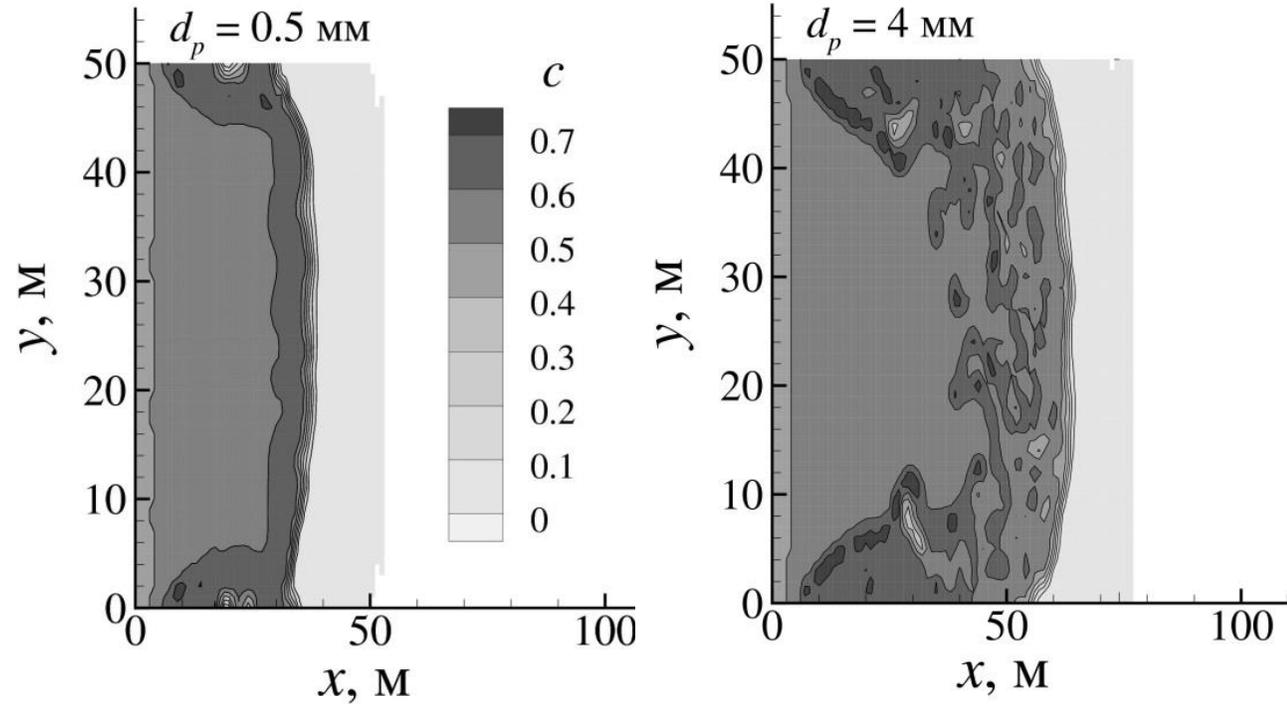


\* Карнаков П.В., Куранаков Д.С., Лапин В.Н., Черный С.Г., Есипов Д.В. Особенности распространения трещины гидроразрыва породы при закачке в нее смеси пропанта и жидкости // Теплофизика и аэромеханика. - 2018. - Т.25. - № 4. - С.611-628

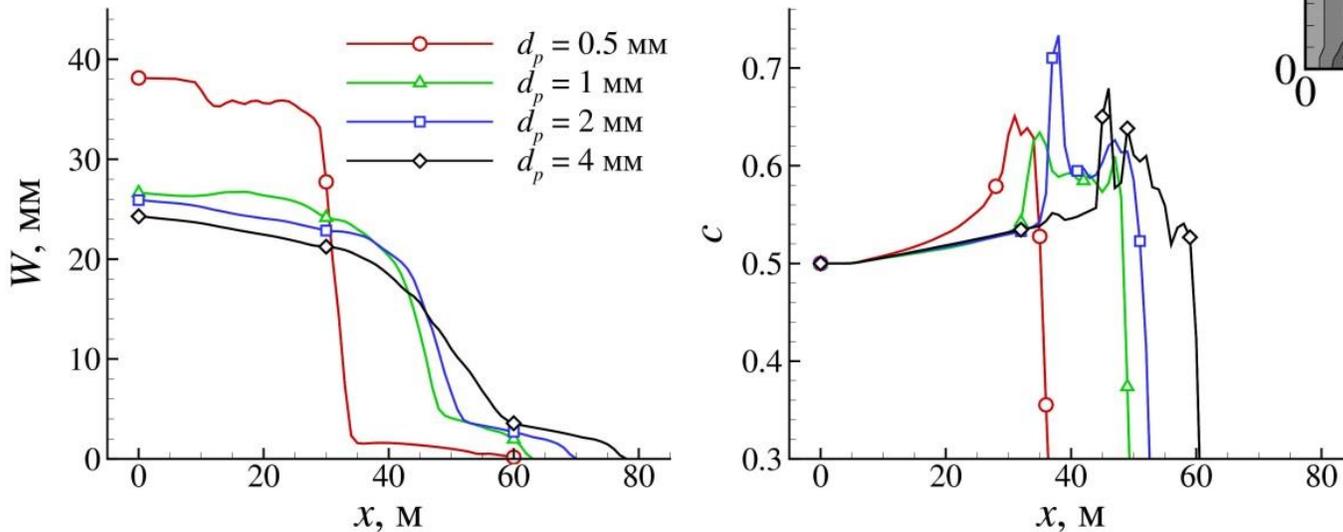
## Влияние диаметра проппанта

1. Пробка образуется при  $T = 4000c$  для всех диаметров
2. Малый диаметр ( $d_p = 0.5\text{ мм}$ ) => малая проницаемость, пробка не размывается
3. Большой диаметр ( $d_p = 1, 2\text{ мм}$ ) => хорошая проницаемость, жидкость фильтруется за пробку и раскрывает трещину

## Распределение в трещине проппанта различного диаметра



## Ширина и концентрация проппанта



Модели разного уровня сложности объединены в общую иерархию

- Тестирование моделей

- Проверка справедливости базовых предположений

Описание процессов моделями разного уровня

- Скорость vs точность

- Стоимость разработки vs уровень детализации

Модификации упрощенных моделей применены для решения узких задач

- Нарушение гидроизоляции

- Потери бурового раствора

- Размытие пропантовой пробки