

ООО «РН-УфаНИПНефть»



**РОСНЕФТЬ**

**Эволюция самопроизвольно растущих трещин с учетом динамического изменения смыкающих усилий.**

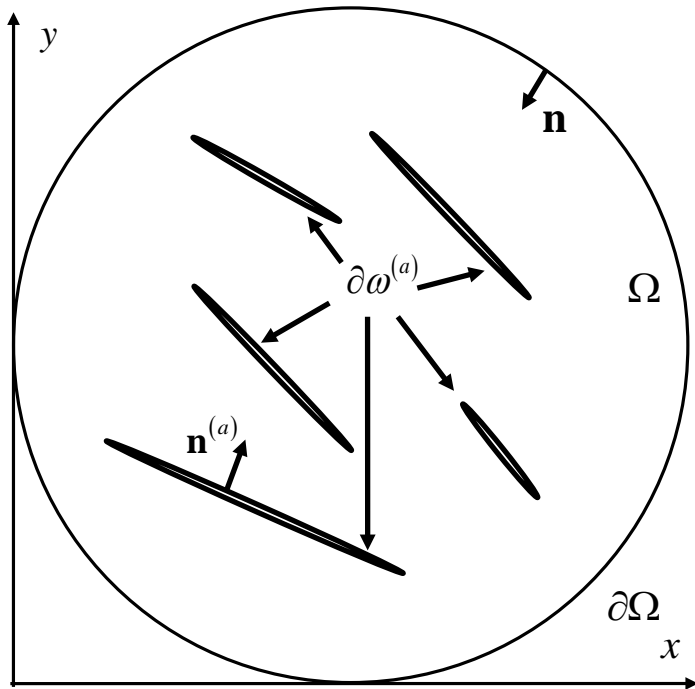
**Федоров А.И.**





# Напряженное состояние в присутствии трещин. Область решения и уравнения равновесия.

Область решения



Расчет поля давления  
выполняется сторонним  
симулятором.

Уравнение равновесия в пористой среде  
с учетом фильтрации:

$$\Delta \mathbf{u} + \frac{1}{1-2\nu} \operatorname{div} \mathbf{u} + \frac{1}{\mu} \mathbf{f} = 0,$$

$\mathbf{f} = -\alpha \nabla p$  - объемная сила – градиент давления

Уравнение состояния для тензора напряжений:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{ll} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \alpha p \delta_{ij},$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

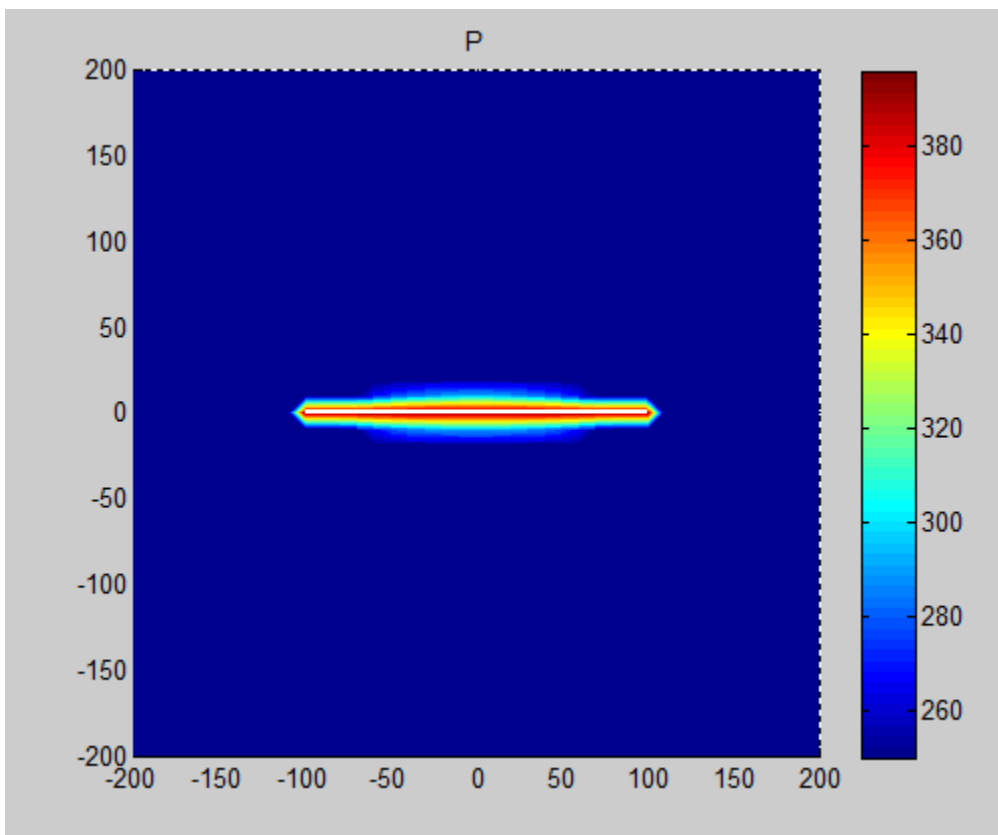
$$\lambda = \frac{\gamma K}{\gamma + K} - \frac{2}{3} \mu \text{ - коэффициент Ламе,}$$

$\nu$  - коэффициент Пуассона,

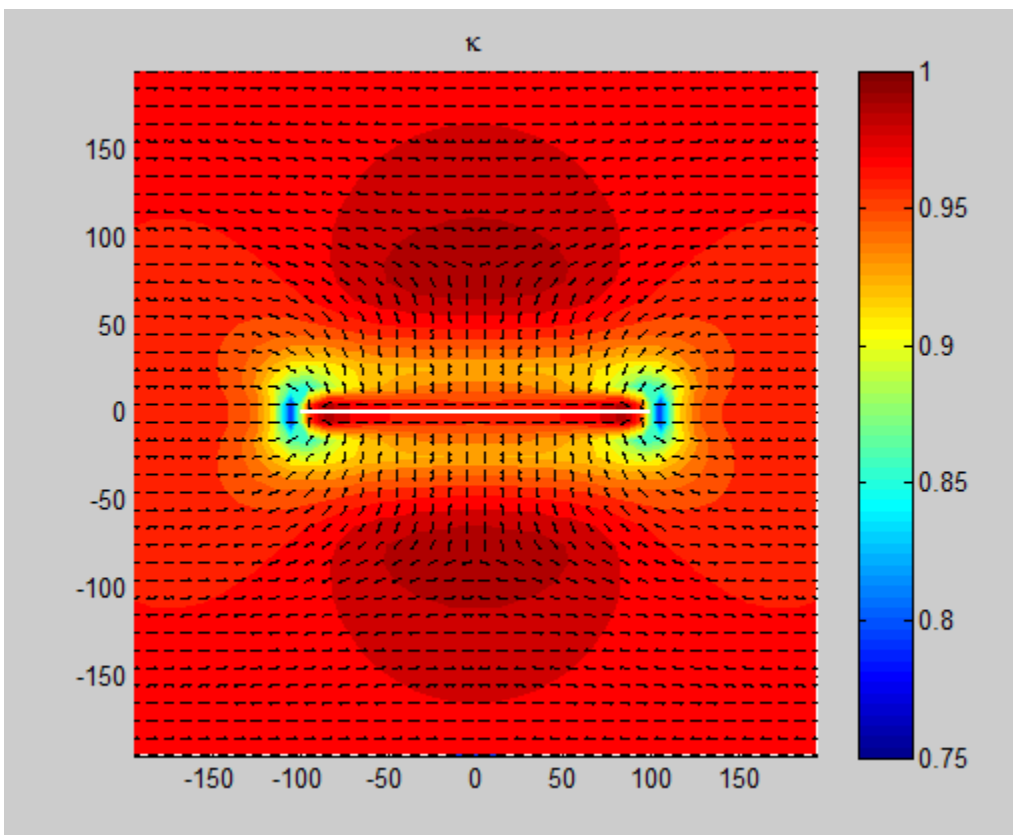
$\alpha$  - коэффициент порозластичности.



Поле давления



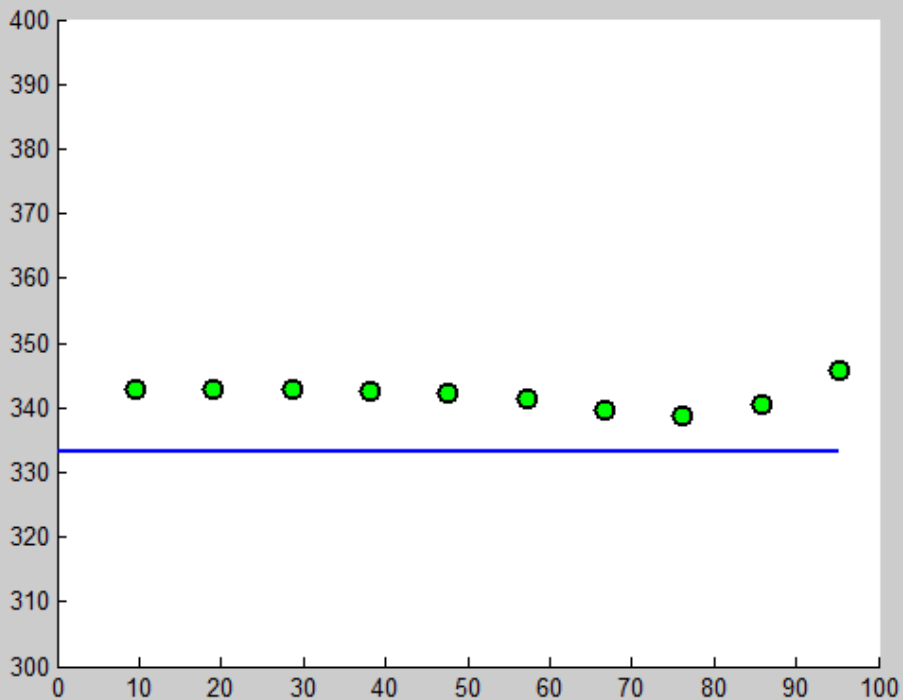
Поле коэффициента анизотропии и  
направление максимальных  
напряжений



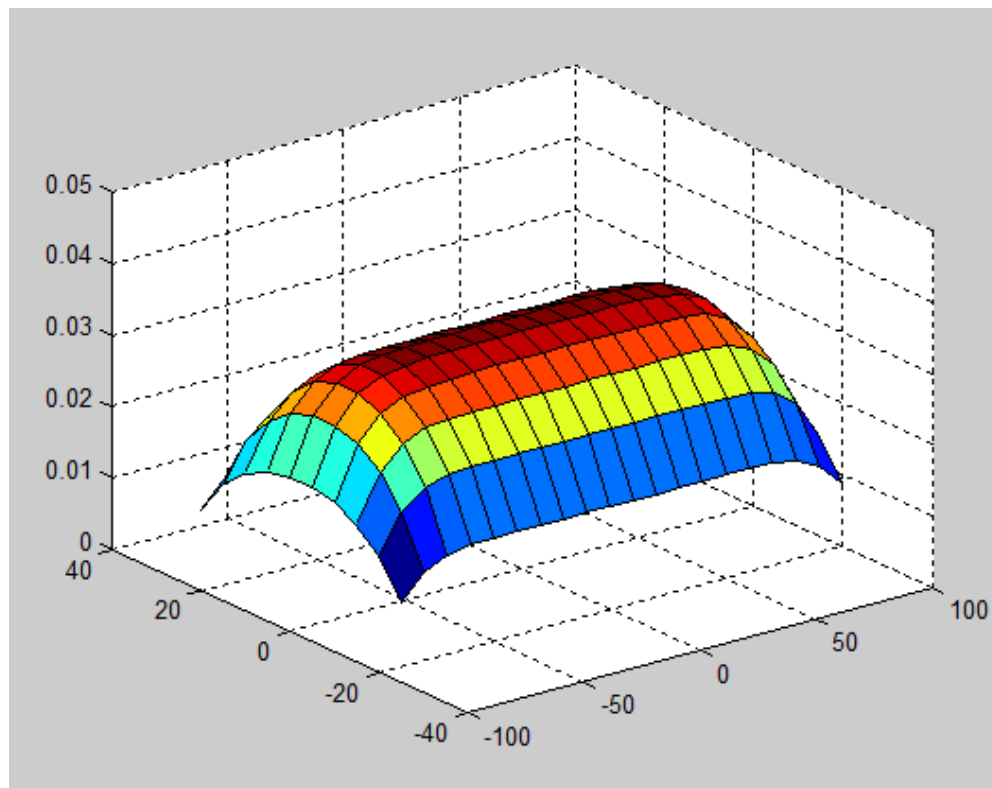


# Динамика напряженного состояния. Давление смыкания и геометрия трещины.

## Профиль смыкающих усилий



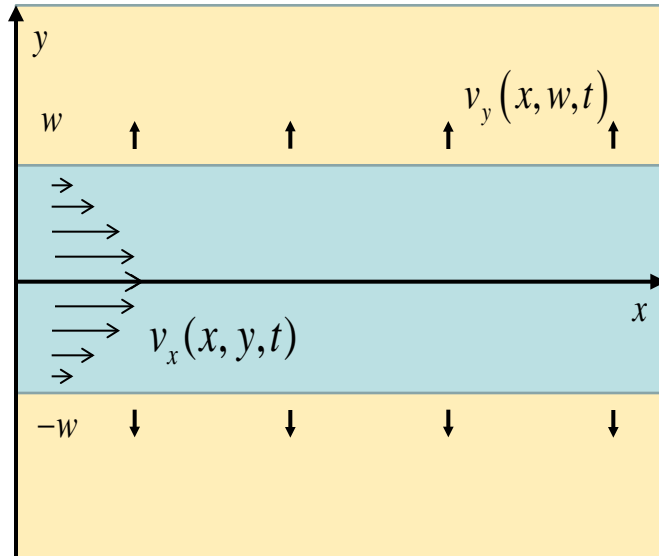
## Форма трещины



**При моделировании роста трещин автоГРП необходимо учитывать изменение напряженного состояния даже в отсутствие окружения.**



# Уравнение Пуазейля для течения в тонком слое.



**Усреднение уравнений Навье-Стокса по вертикальной оси:**

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{3\mu}{w^2} v \right),$$

$$v = \frac{1}{2w} \int_{-w}^w v_x(x, y, t) dy, \quad |v_y(x, y, t)| \ll |v_x(x, y, t)|.$$

**Приближение смазочного слоя:**

$$v = -\frac{k_f}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad k_f = \frac{w^2}{3}.$$

**Закон сохранения массы:**

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = -q_L,$$

$$q = wv,$$

$$q_L(x, t) = 2v_y(x, w, t).$$



**Уравнение течения смазочного слоя с утечкой:**

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{1}{3\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left( w^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + q_L(x, t) = 0.$$



# Замкнутая система уравнений для описания течения в трещине<sup>1</sup>.

## I. Внешняя область.

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial P_I}{\partial t} = \Delta P_I$$

## II. Область вытеснения.

$$u(x, t) = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P_{II}}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad w \leq |y| \leq y_f,$$

$$\frac{\partial y_f}{\partial t} = \frac{1}{m} u(x, y_f, t).$$

## III. Трещина.

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{wk_f}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + q_L(x, t) = 0,$$

$$w = A_{PKN} P_{net}, \quad P_{net} = (1 - \alpha) P(x, t) - \Sigma'_0,$$

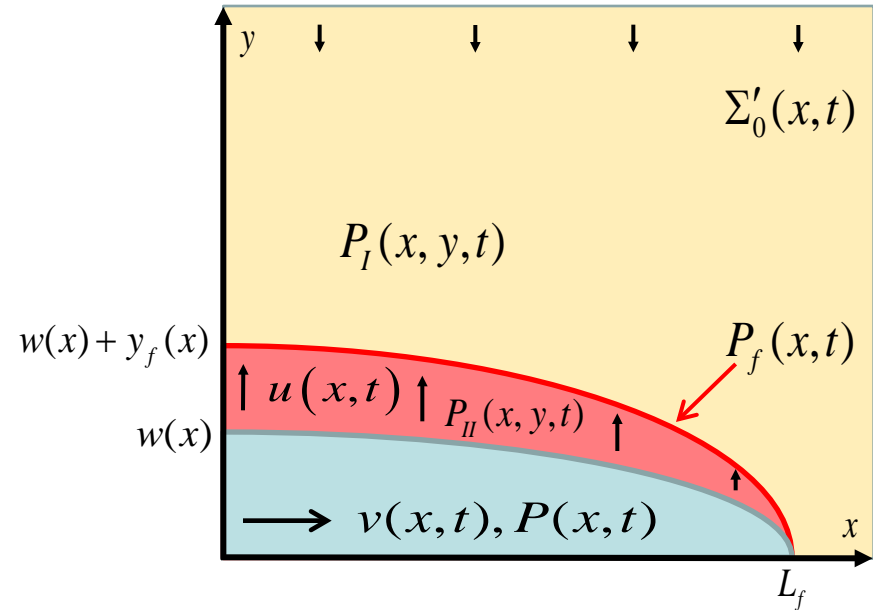
$$A_{PKN} = \frac{\pi H (1 - \nu^2)}{E}.$$

$\Sigma'_0$  - смыкающее усилие (считается вдоль траектории).

Доп. предположение:

$$w, y_f \ll L \Rightarrow P_I(x, y_f, t) \approx P_I(x, 0, t).$$

Область решения:



Граничные условия:

$$P_I(x, y_f, t) = P_{II}(x, y_f, t) \equiv P_f(x, t),$$

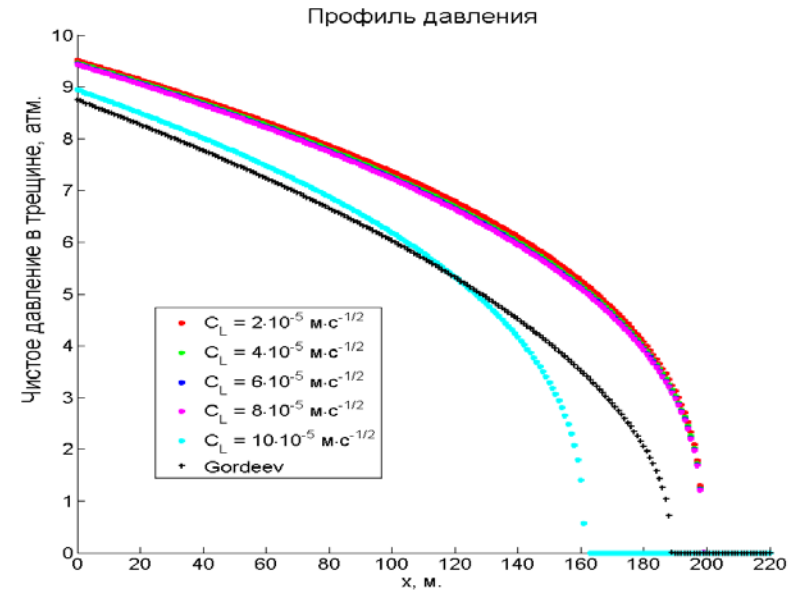
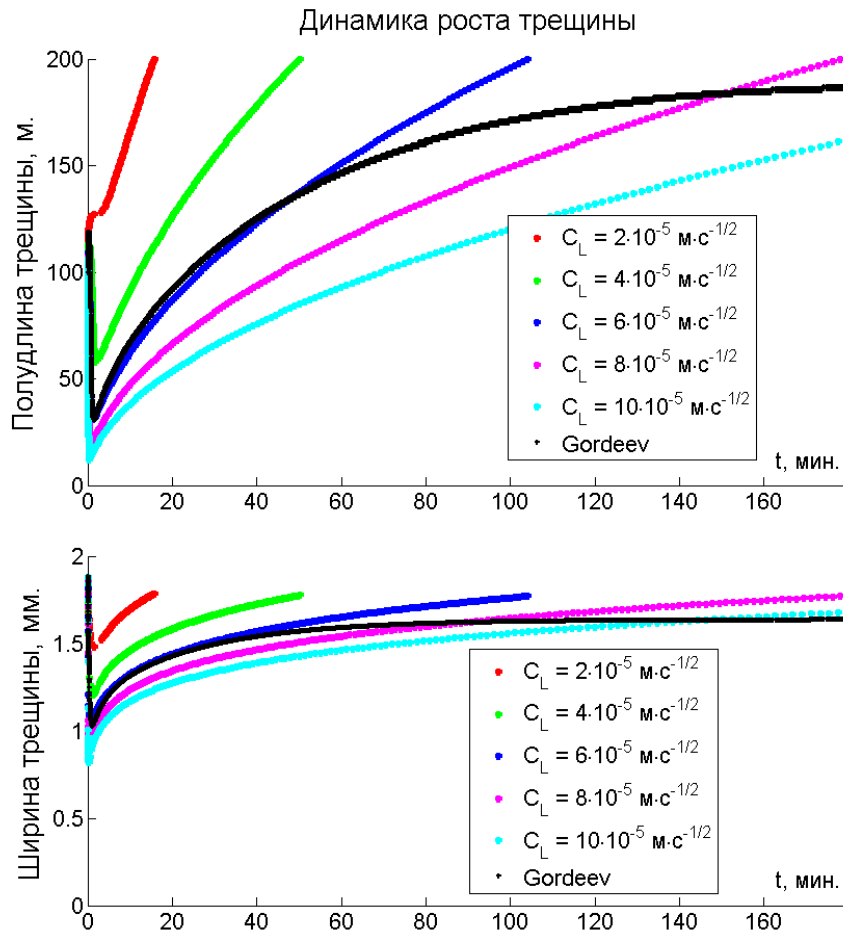
$$P_{II}(x, w, t) = P(x, t),$$

$$q_L(x, t) = u(x, t) = -\frac{k}{\mu} \frac{P(x, t) - P_f(x, t)}{y_f(x, t)},$$

$$P_{net}(L(t)) = 0.$$



# Динамика развития трещин ГРП. Модель Картера (1D) и модель Гордеева (2D).



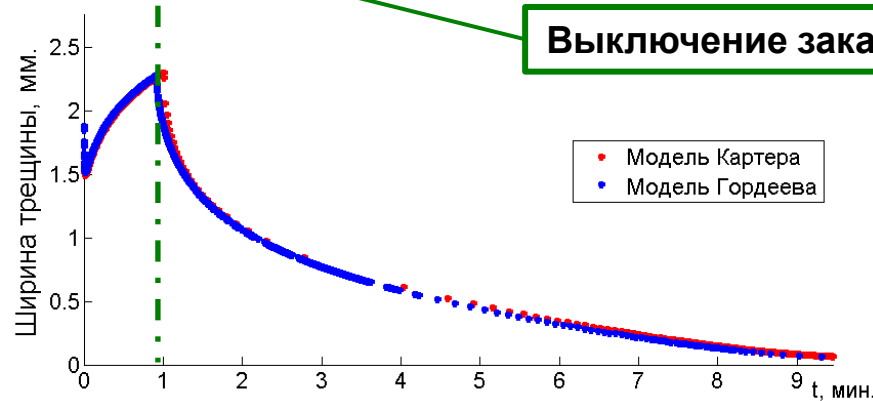
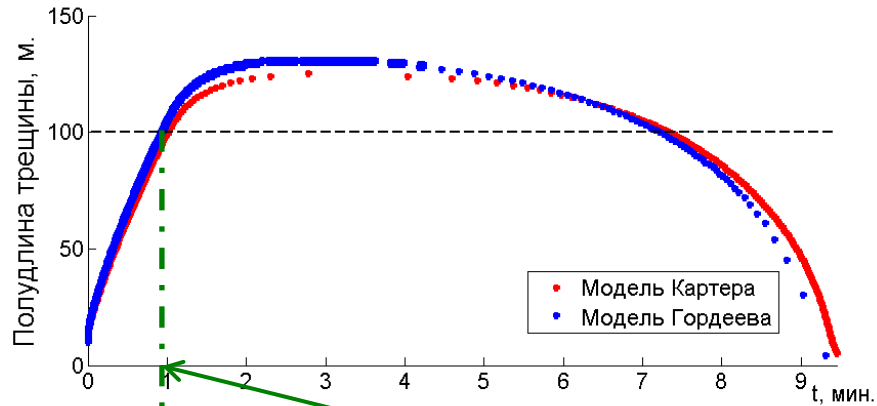
- Скорость роста трещины в модели Гордеева падает со временем по сравнению с моделью Картера.
- Модель Гордеева учитывает изменение коэффициента приемистости пласта во времени.
- Профиль давления в модели Гордеева характеризуется более быстрым падением

Поток жидкости на входе в трещину	0.01 м <sup>3</sup> /с
Начальная полудлина трещины	100 м



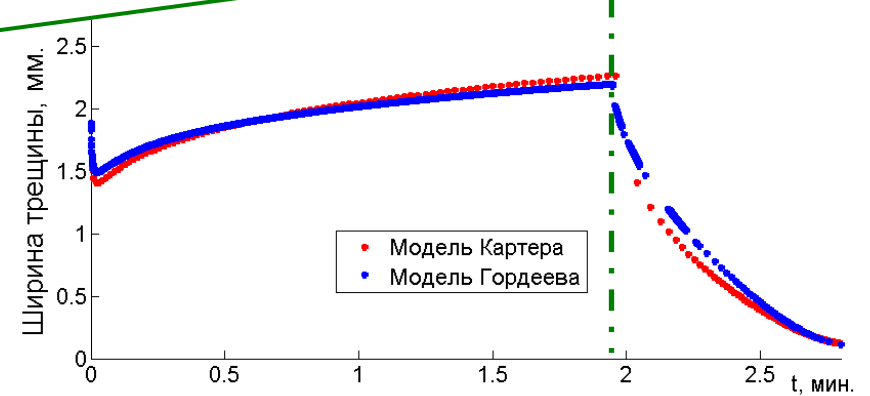
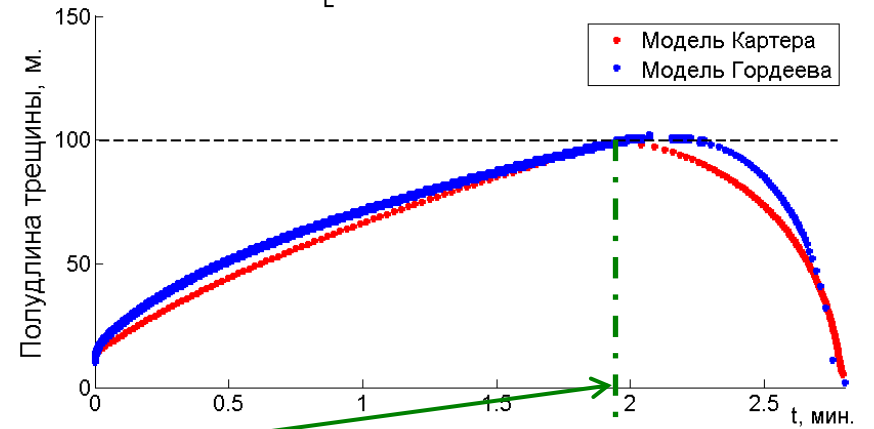
# Динамика закрытия трещин ГРП. Модель Картера (1D) и модель Гордеева (2D).

Сравнение динамики раскрытия/закрытия трещины  
(модель Картера  $C_L = 1.3 \cdot 10^{-5}$  и модель Гордеева  $k = 2$  mD)



**Выключение закачки**

Сравнение динамики раскрытия/закрытия трещины  
(модель Картера  $C_L = 5.4 \cdot 10^{-5}$  и модель Гордеева  $k = 10$  mD)

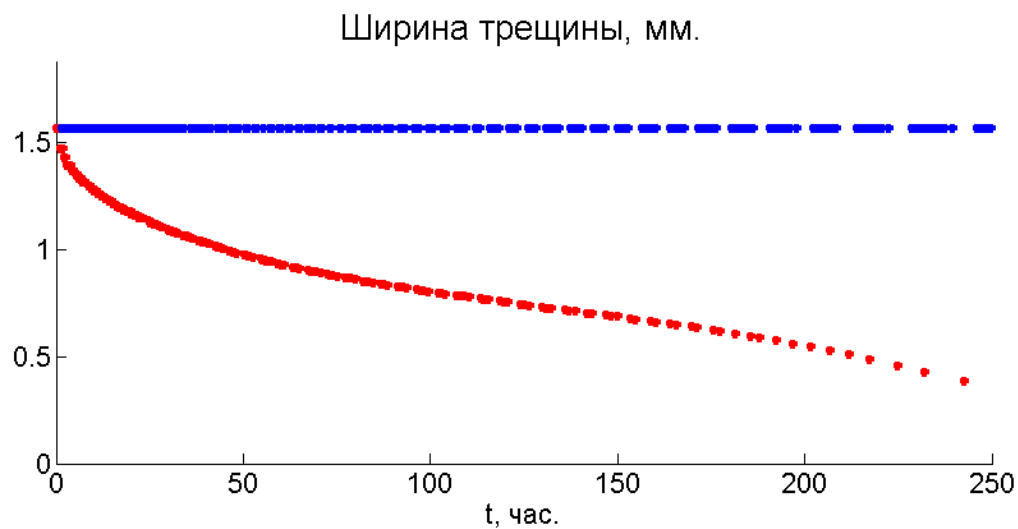
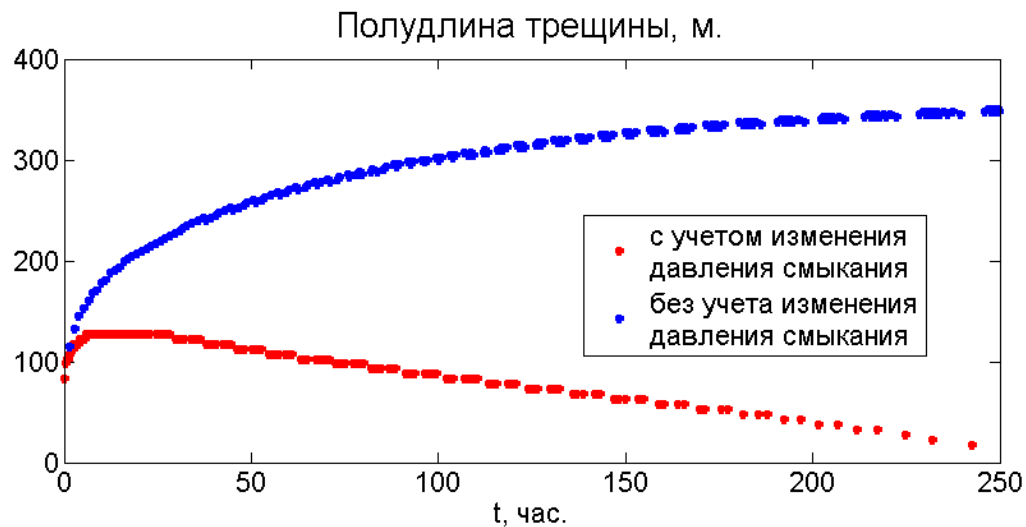


\* Для сравнения моделей в модели Картера подобран коэффициент  $C_L$  так, чтобы динамика роста/закрытия в обеих моделях была максимально близка.





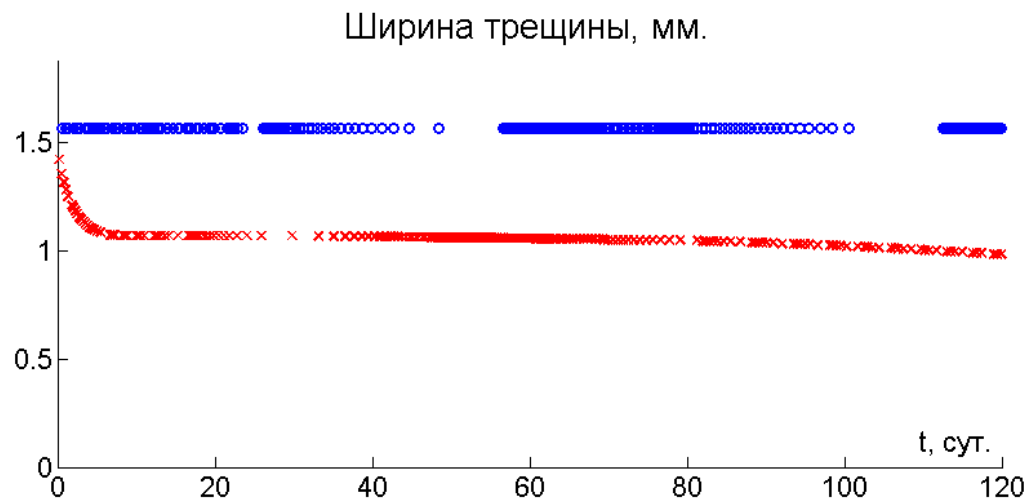
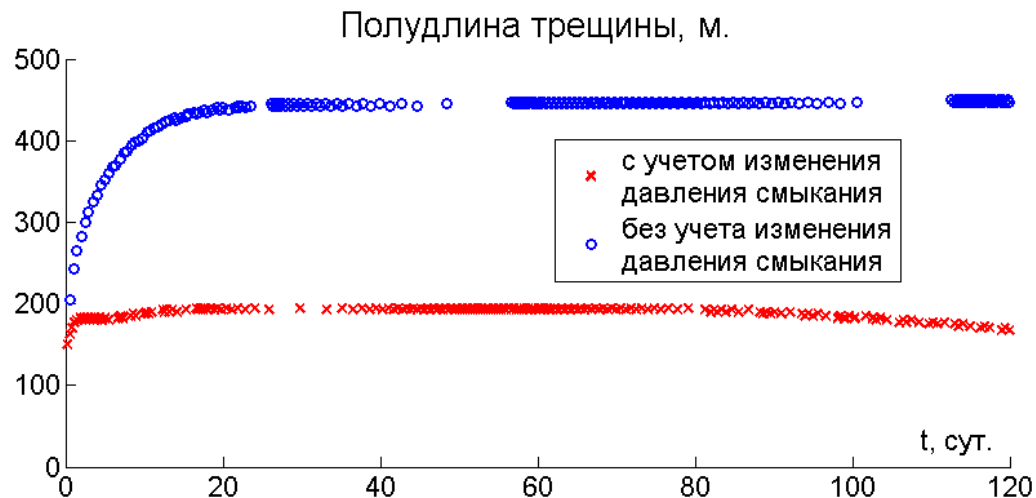
# Динамика роста длинных трещин. Включение динамики смыкающих усилий.



**Изменение смыкающих усилий  
во времени приводит к  
ограничению роста трещин  
автоГРП.**



# Динамика роста длинных трещин. Включение динамики смыкающих усилий.



**Изменение смыкающих усилий  
во времени приводит к  
ограничению роста трещин  
автоГРП.**



# Рост трещин автоГРП. ГДИС на нагнетательных скважинах.

**В процессе проведения ГДИС трещина может существенно подрастать, изменяя поле давления на удалении от закрепленной части трещины.**

