

Экспериментальное изучение нелинейных эффектов при фильтрации.

ИДГ РАН

С. Б. Турунтаев

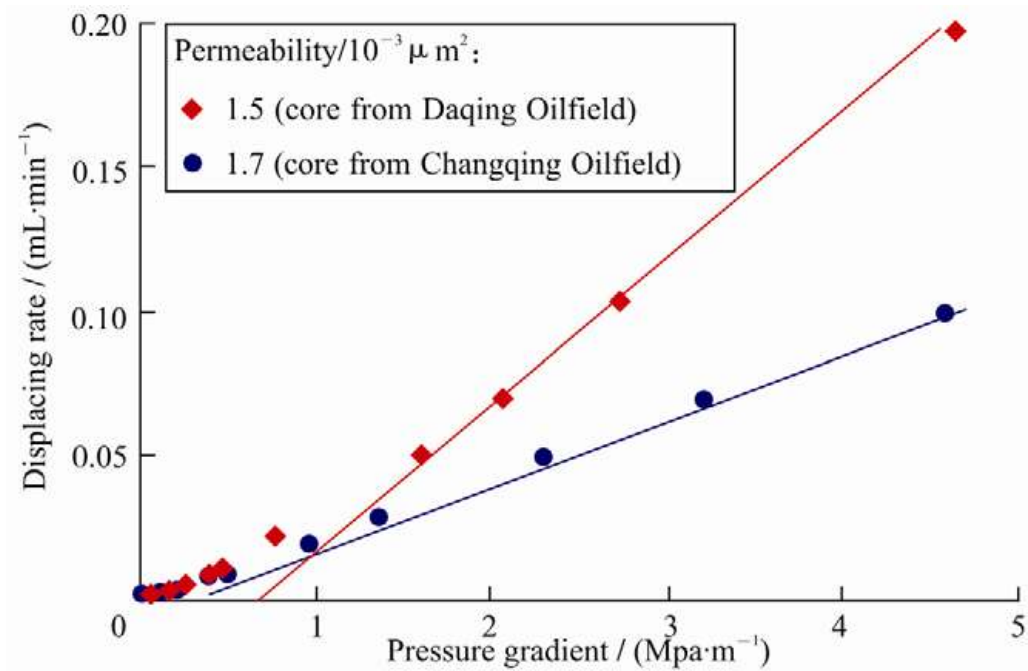
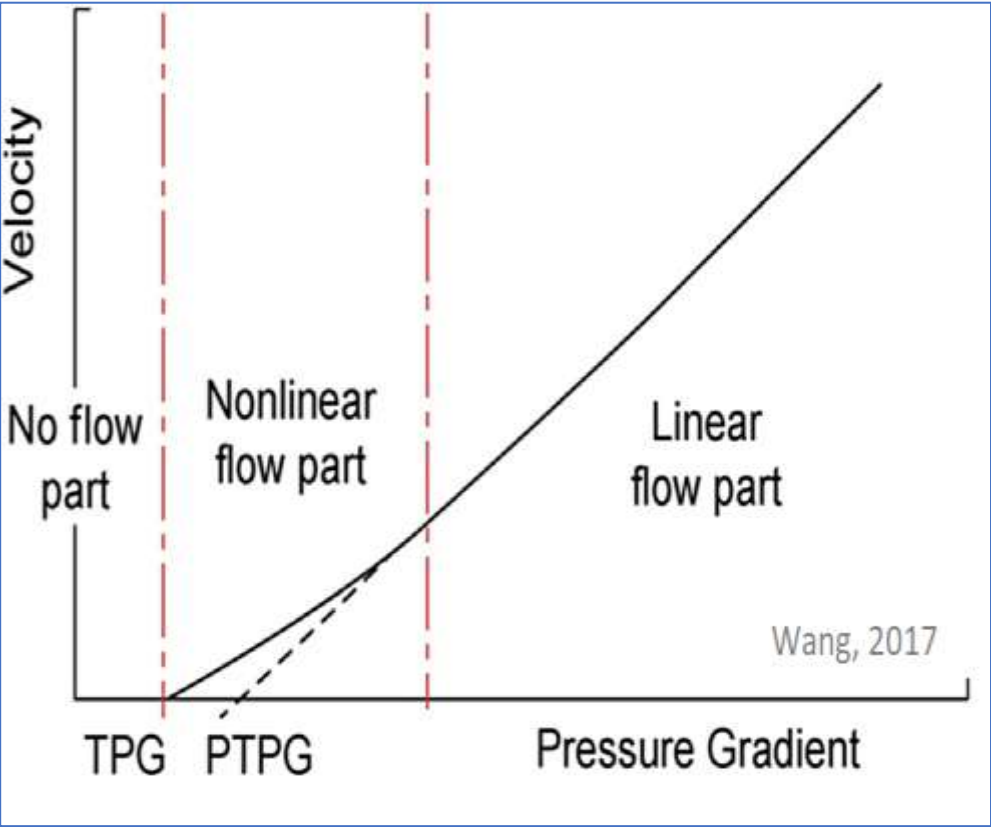


Содержание

- Введение
- Фильтрация с низкими скоростями
- Фильтрация в деформируемой среде
- Гидроразрыв пласта
- Неустановившийся режим фильтрации
- Заключение

- Байков В. А., Галеев Р. Р., Колонских А. В., Якасов А. В., Торопов К. В. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Влияние на технологические показатели разработки месторождения //Научно-технический вестник «НК «Роснефть». 2013. №2. вып. 31(апрель-июнь). С. 17–19
- Kadet, V.V., Koryuzlov, A.S. Effective viscosity of mineralized water flowing in a porous medium: theory and experiment. Theor Found Chem Eng 42, 899–904 (2008). <https://doi.org/10.1134/S0040579508060122>
- Мархасин И.Л. Физико-химическая механика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1977. - 214 с.
- Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. Изд.: Юрайт, 2014 г. 445 с.
- Xiukun Wang, James J. Sheng, Discussion of liquid threshold pressure gradient, Petroleum, Volume 3, Issue 2, 2017, Pages 232-236, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2017.01.001>.
- Song Fuquan, Song Xingxing, Wang Yong, Sun Yeheng, Single- and two-phase flow model in low-permeability reservoir, Petroleum, Volume 5, Issue 2, 2019, Pages 183-190, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.05.004>.
- Xiong Wei, Lei Qun, Gao Shusheng, Hu Zhiming, Xue Hui. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs, Petroleum Exploration and Development, Volume 36, Issue 2, 2009, Pages 232-236, [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(09\)60123-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(09)60123-3)
- Wong, R.C.K. & Mettananda, D.C.A. Permeability Reduction in Qishn Sandstone Specimens due to Particle Suspension Injection. Transp Porous Med (2010) 81: 105. <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9387-0>
- F. Hao, L. S. Cheng, O. Hassan, J. Hou, C. Z. Liu & J. D. Feng (2008) Threshold Pressure Gradient in Ultra-low Permeability Reservoirs, Petroleum Science and Technology, 26:9, 1024-1035, DOI: 10.1080/10916460701675033
- Song, F., Wang, J. Investigation of Influence of Wettability on Poiseuille Flow Via Molecular Dynamics Simulation. J Hydrodyn 22, 513–517 (2010). [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60083-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60083-4)
- Mikhailov, D. N., Ryzhikov, N. I., & Shako, V. V. (2015). Experimental investigation of transport and accumulation of solid particle and clay suspensions in rock samples. Fluid Dynamics, 50(5), 691–704. doi:10.1134/s0015462815050117
- Oliveira M. A., Vaz A.S.L., Siqueira D.F., Yang Y., You Z., Bedrikovetsky P.. (2014) Slow migration of mobilised fines during flow in reservoir rocks: Laboratory study, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 122, 2014, Pages 534-541, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.08.019>.
- Bradford, S. A., Torkzaban S., and Wiegmann A.. (2011). Pore-Scale Simulations to Determine the Applied Hydrodynamic Torque and Colloid Immobilization. Vadose Zone J. 10:252-261. doi:10.2136/vzj2010.0064

Подходы к описанию зависимости скорости течения от градиента давления



1. Модель порогового градиента для скорости фильтрации

$$v = \begin{cases} 0, & |gradP| \leq G, \\ \frac{K_0}{\eta} (|gradP| - G), & |gradP| > G, \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k(|gradP|) = K_0 \left(1 - \frac{G}{|gradP|} \right)$$

Причины отклонения от линейного закона фильтрации:

- поверхностные явления
- неньютоновские свойства жидкости;
- многофазная фильтрация.

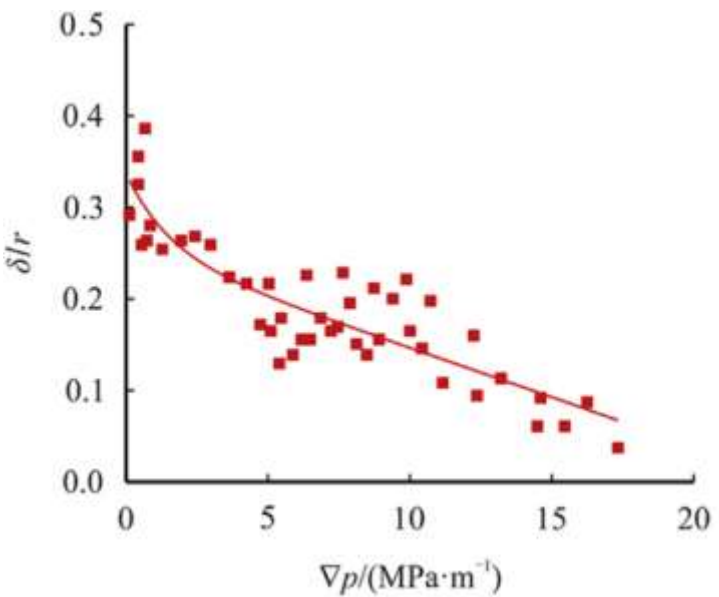
2. Модель адсорбционного слоя

$$v = \frac{K_0}{\eta} (1 - \delta_D e^{-c \nabla p}) |gradP| \approx \frac{K_0}{\eta} \left(1 - \frac{\delta_D}{1 + c |gradP|} \right) |gradP|$$

$$\Rightarrow k(|gradP|) = K_0 \left(1 - \frac{\delta_D}{1 + c |gradP|} \right)$$

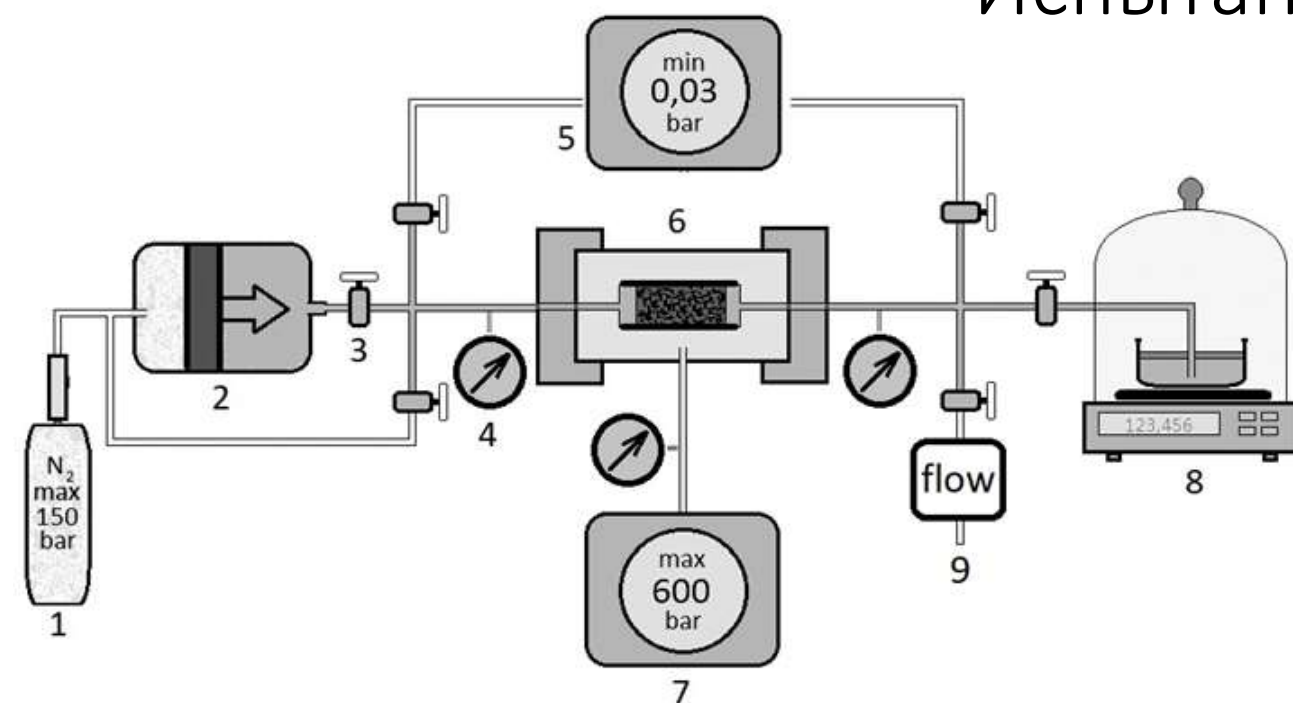
где $\delta = \delta_D r_0 e^{-c \nabla p}$ – Толщина адсорбционного слоя

c – параметр смачиваемости





Испытание при медленном спаде давления



1 – буферная ёмкость; 2 – гидроаккумулятор; 3 – краны; 4 – датчики давления; 5 – вакуумный насос; 6 – кернадержатель с образцом; 7 – насос высокого давления; 8 – весы с ёмкостью для собранной жидкости; 9 – термомассовый расходомер

$$T \sim \frac{1}{P_1} - \frac{1}{P} + \frac{1}{P_0} \ln \left| \frac{P(P_1 - P_0)}{P_1(P - P_0)} \right|$$

$$T \sim m_1 - m + \ln \left| \frac{m_0 - m_1}{m_0 - m} \right|$$

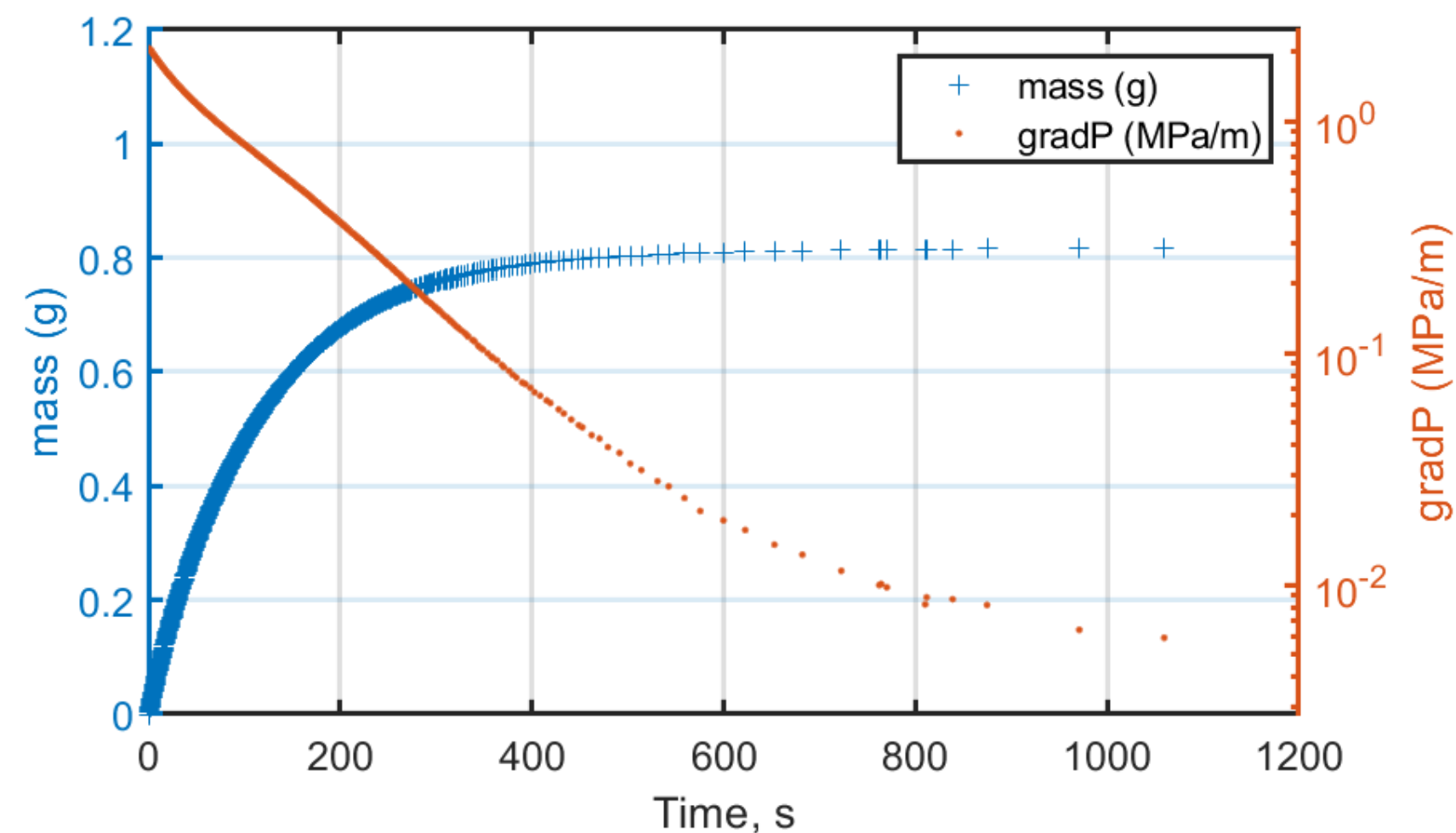


Скорость фильтрации

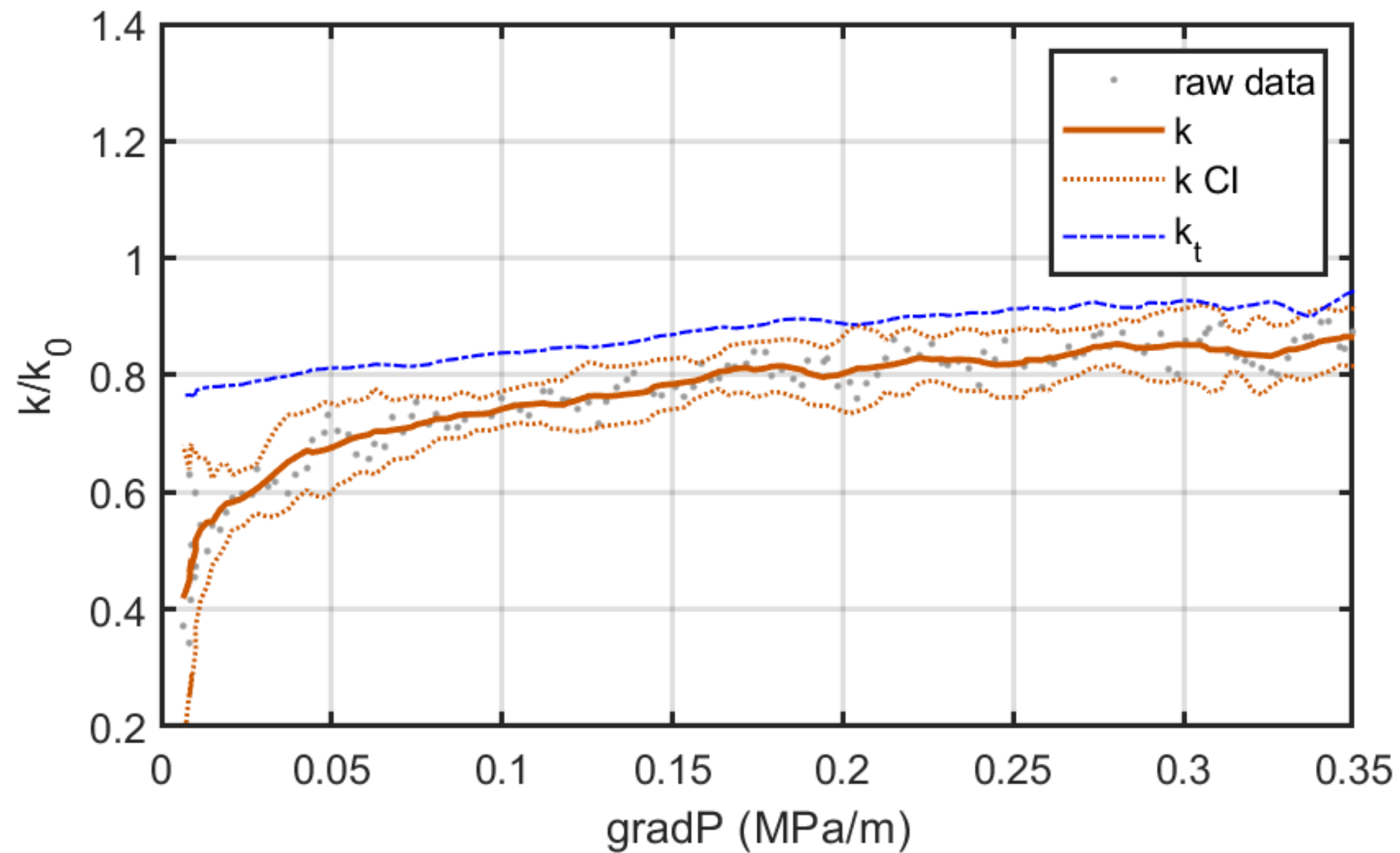
$$U = \frac{1}{\rho S} \frac{dm}{dt}$$



Закон Дарси $k = \eta \frac{U}{|gradP|}$



Зависимость проницаемости от градиента давления при медленном спаде давления



- Известняк $k_0 \sim 7$ мД
- Вода

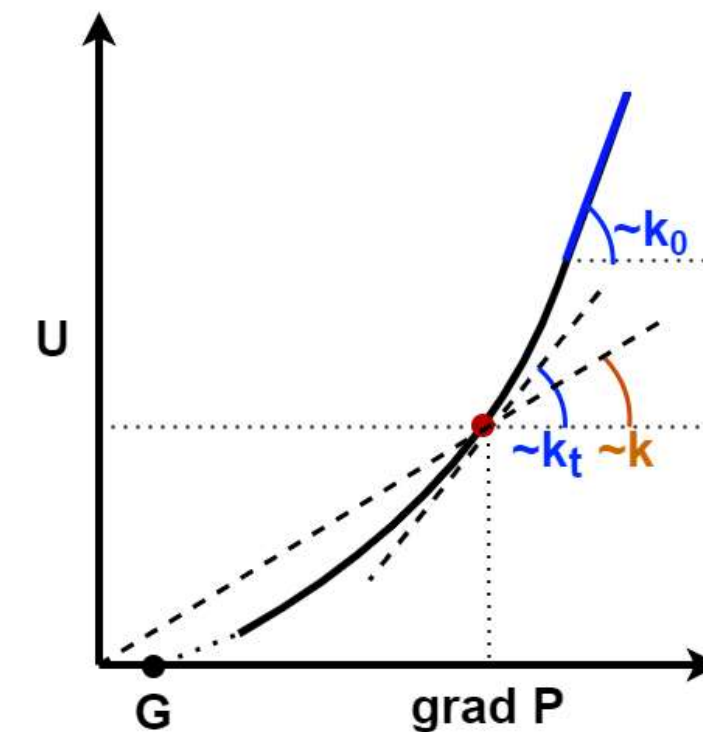


Секущая проницаемость

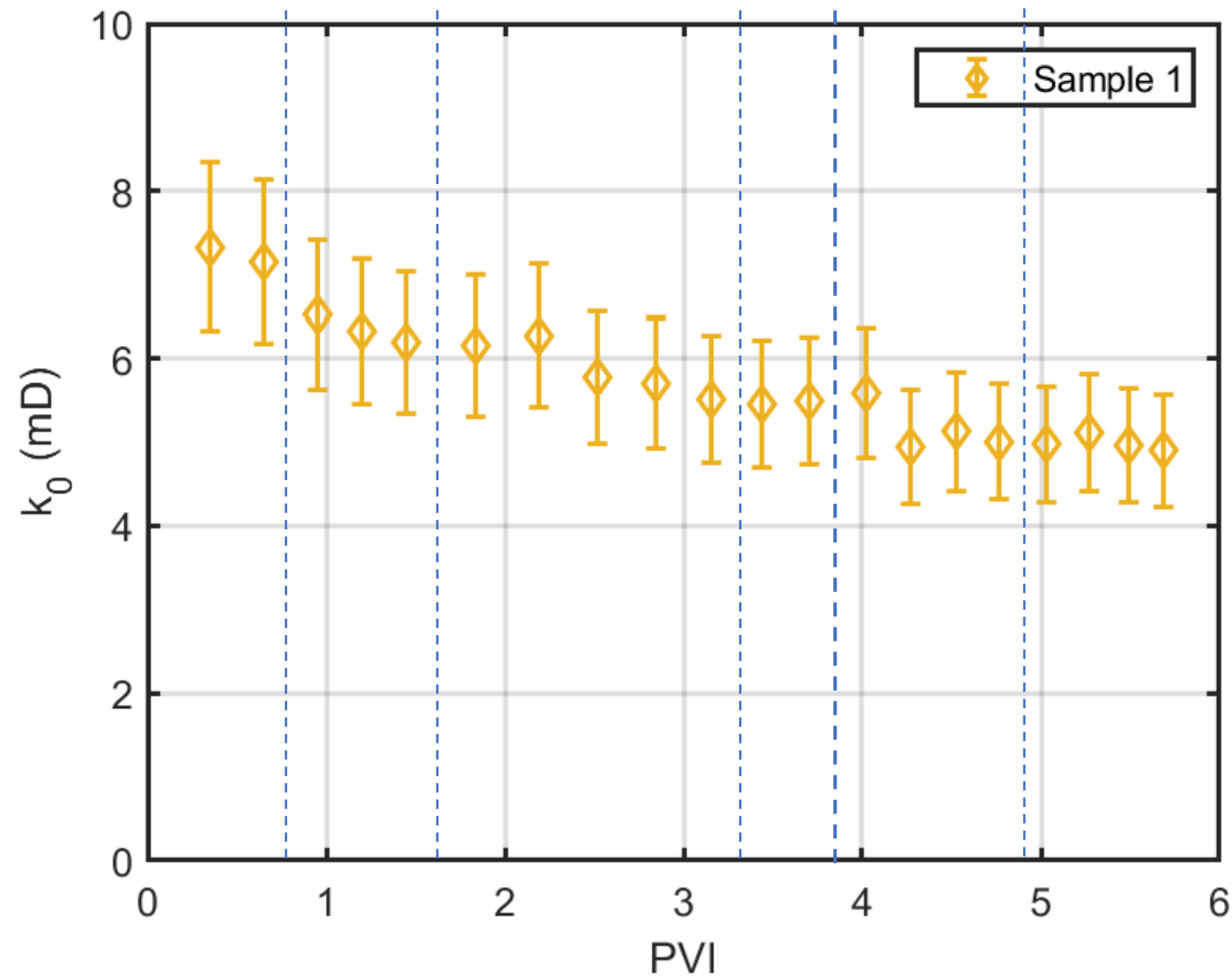
$$k = \eta \frac{U}{|\text{grad}P|}$$

Тангенциальная проницаемость

$$k_t = \eta \frac{dU}{d(|\text{grad}P|)}$$



Изменение начальной проницаемости k_0 в ходе серии испытаний

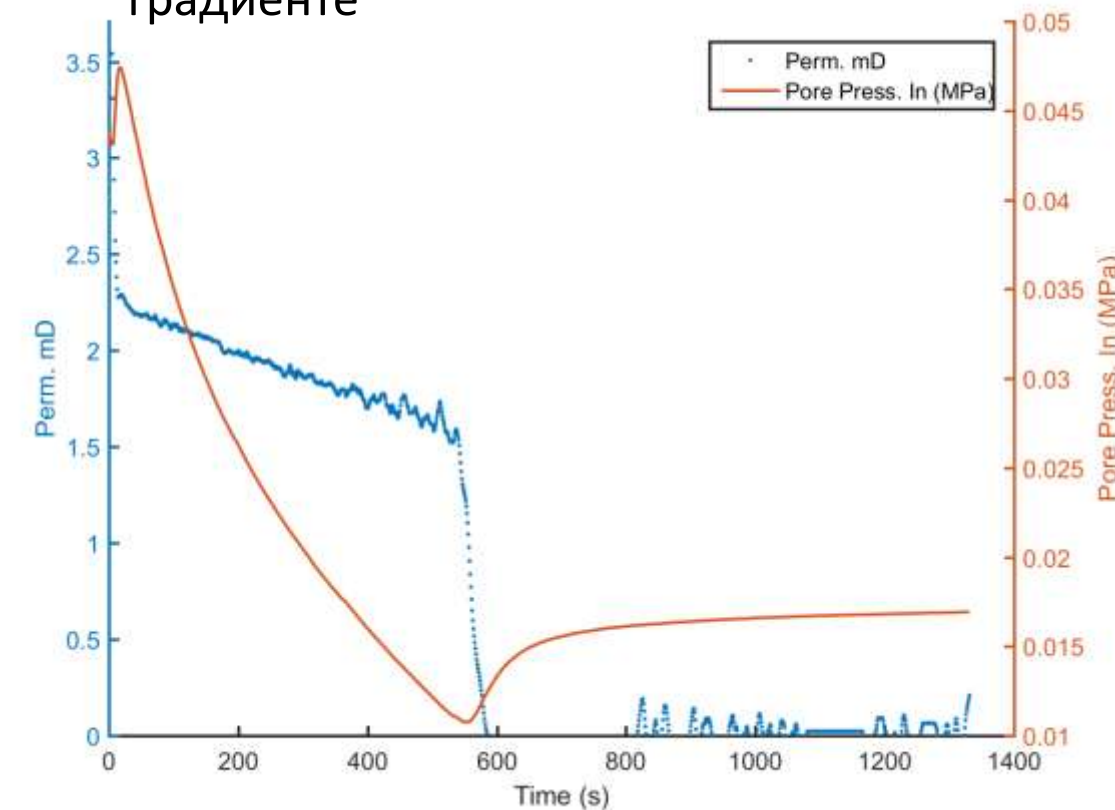


Изменение проницаемости при кольматационном процессе пропорционально закачанному объёму суспензии:

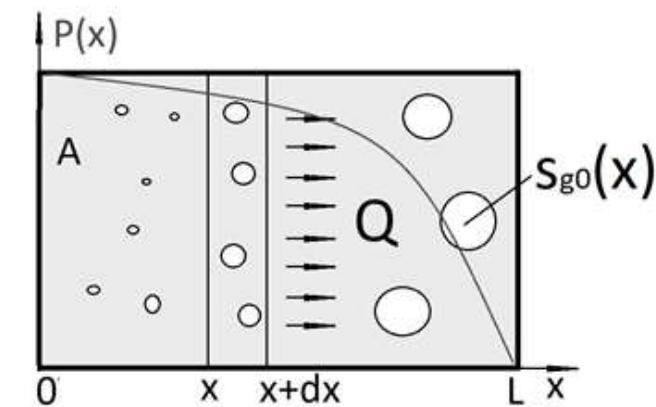
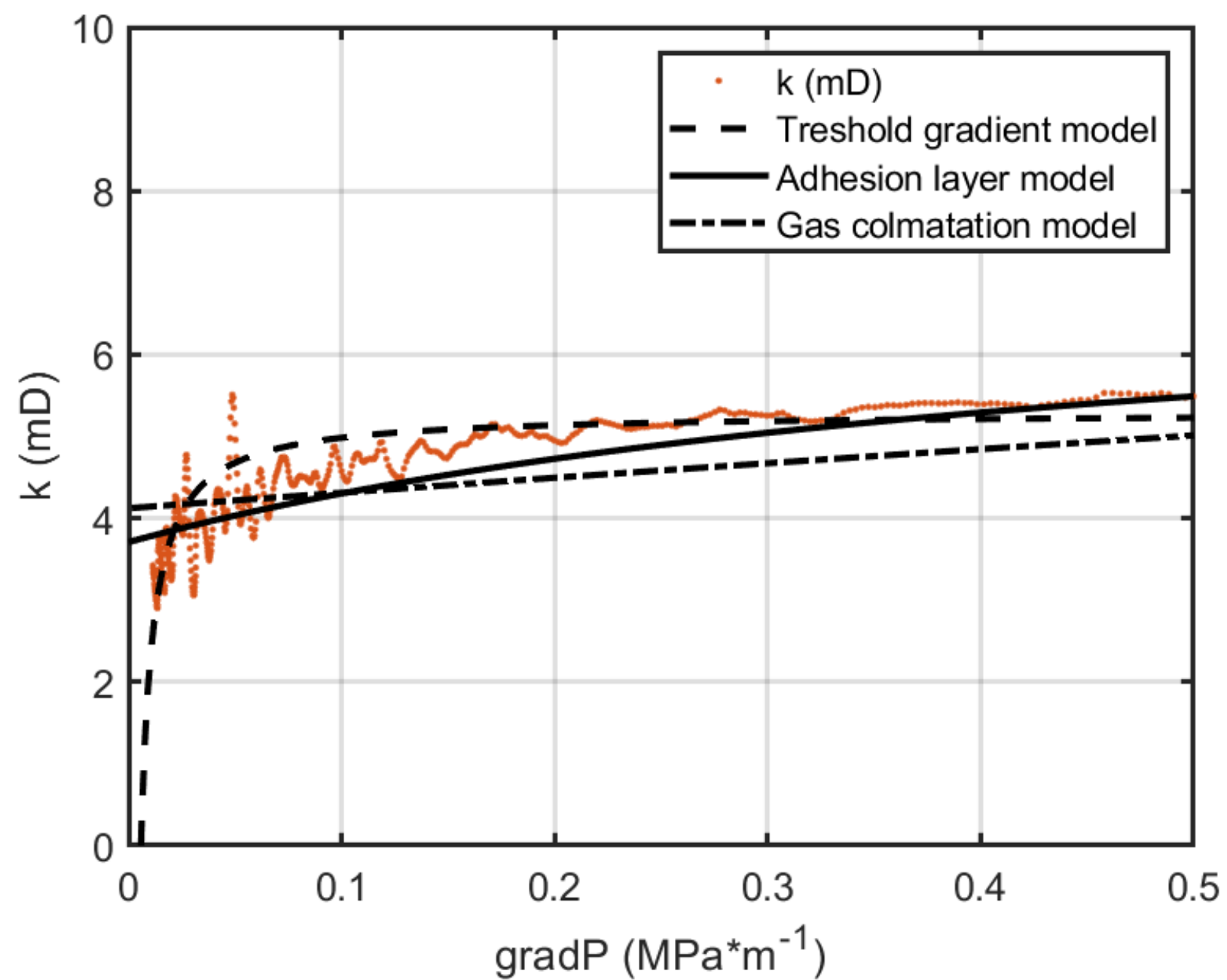
$$k \approx K \left(1 - \beta C \frac{V_{inj}(t)}{V_{pore}} \right)$$

$$PVI = \frac{V_{inj}}{V_{pore}}$$

полное перекрытие пор при малом градиенте



- Эндогенные частицы (Bradford, 2011; Bedrikovetsky, 2014)
 - Пороговая скорость мобилизации эндогенных частиц порядка $10^{-2} - 10^{-3}$ см/с
 - Быстрое развитие засорения – доли PVI
- Экзогенные частицы (Herzieg, 1970; Wong, 2010)
 - Медленное развитие засорения – сотни PVI
- **Эффект от присутствия газа в порах?**



Модель газовой кольматации:

$$s_g(x) = s_{g0}(x) P_0 [P(x) + P_c]^{-1} \quad (1)$$

$$Q = -A \cdot k(s) \frac{K_0}{\eta} \frac{\partial P(x)}{\partial x} \quad (2)$$

$$k(s) = 1 - s_g \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad (4)$$

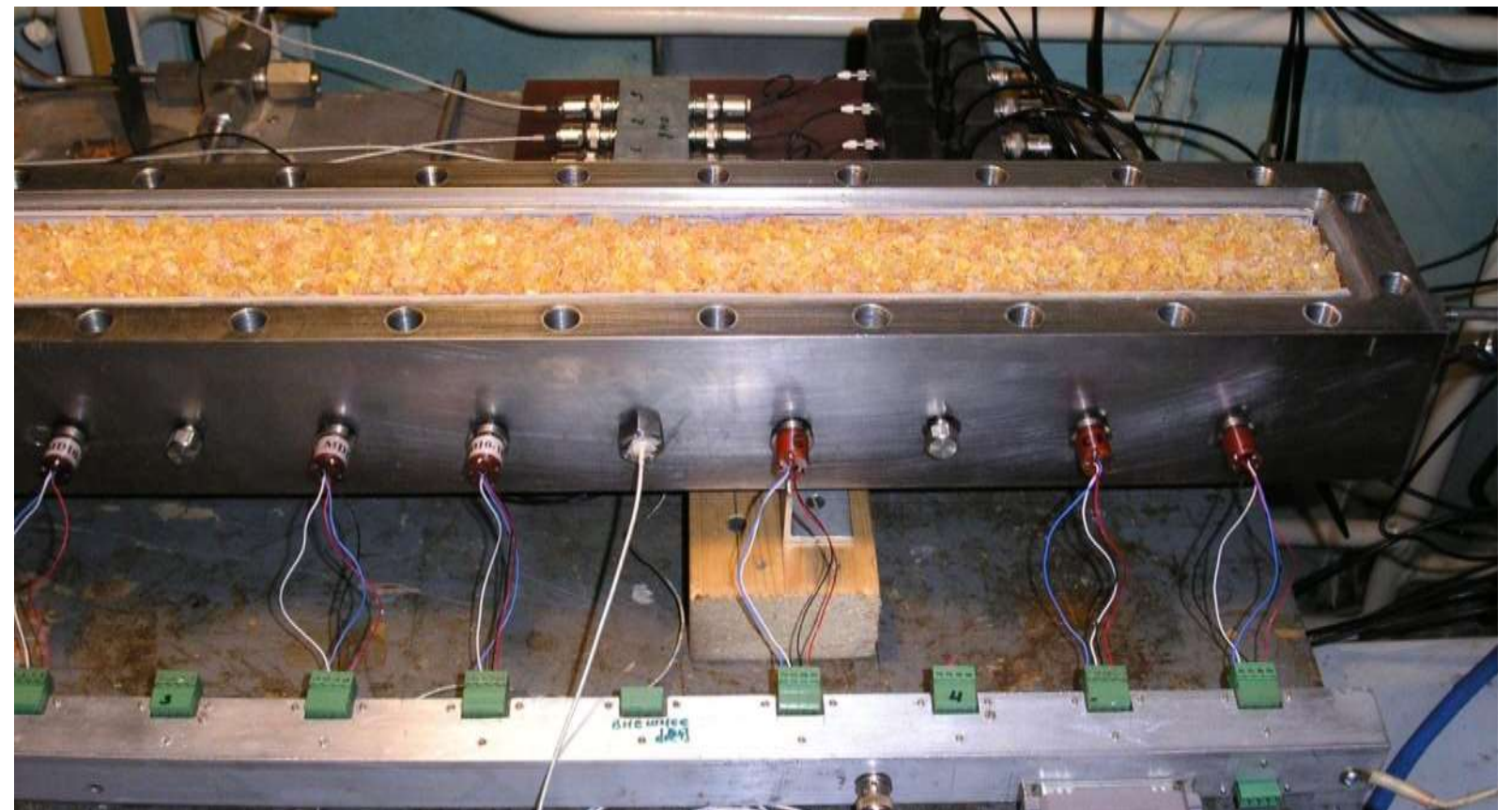
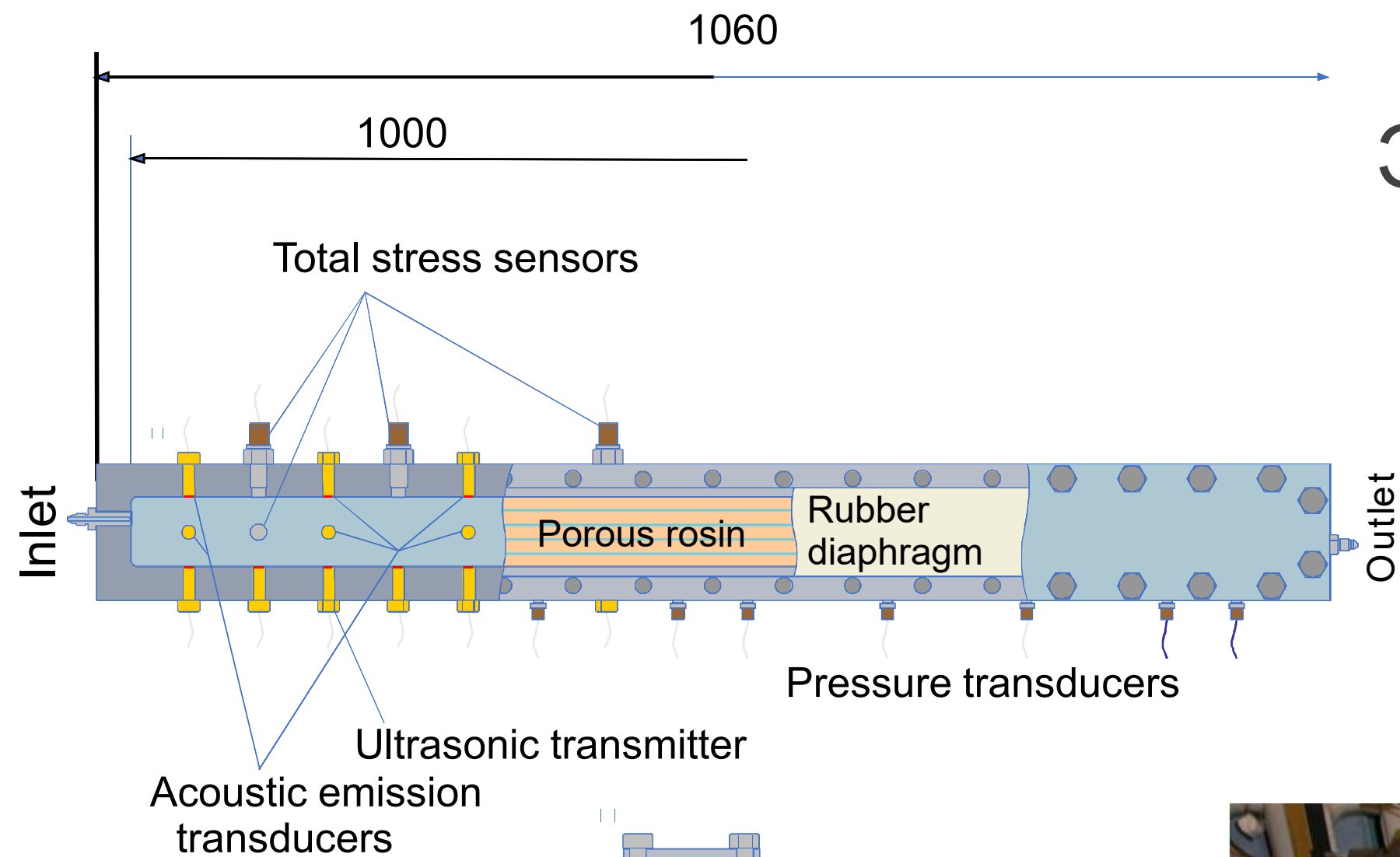
$$k_{eff} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = K_0 \left[1 - \frac{a}{\left| \frac{\Delta P}{L} \right|} \ln \left(1 + b \left| \frac{\Delta P}{L} \right| \right) \right]$$

$$\text{где } a = S \cdot \frac{P_0}{L} \quad b = \frac{L}{P_{out} + P_c}$$

Результаты

- Отработана методика испытаний на медленном спаде давления, которая позволяет проводить исследования зависимости эффективной проницаемости от градиента порового давления в диапазоне скоростей порядка 10^{-6} м/с, что сопоставимо с характерными скоростями фильтрации, возникающими в ходе разработки нефтяных месторождений.
- Причиной отклонения закона фильтрации от линейного при лабораторных исследованиях может служить засорение газом пор образца.
- Возможность газового засорения необходимо учитывать при лабораторном изучении нелинейности потоков жидкости. Для определения засорения рекомендуется проводить серию идентичных испытаний на каждом образце.

Эксперименты по связи АЭ с изменением порового давления



- Уравнение пороупругости определяет связь между давлением p и временем t , проницаемость может рассматриваться как параметр.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\mu \beta m} \nabla^2 p$$

$$p(x, t) = p_0 + b(1 - x) - 2b \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-\mu_k^2 a^2 t}}{\mu_k^2} \cos \mu_k x,$$

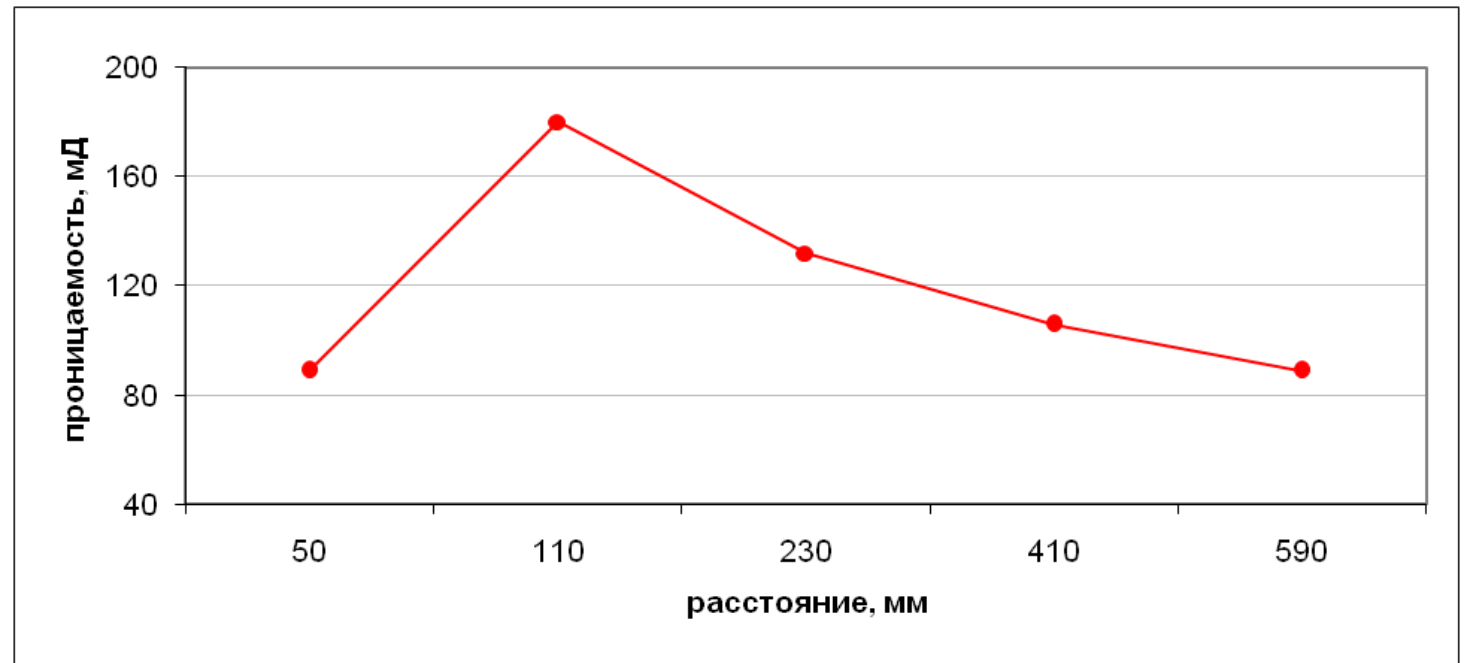
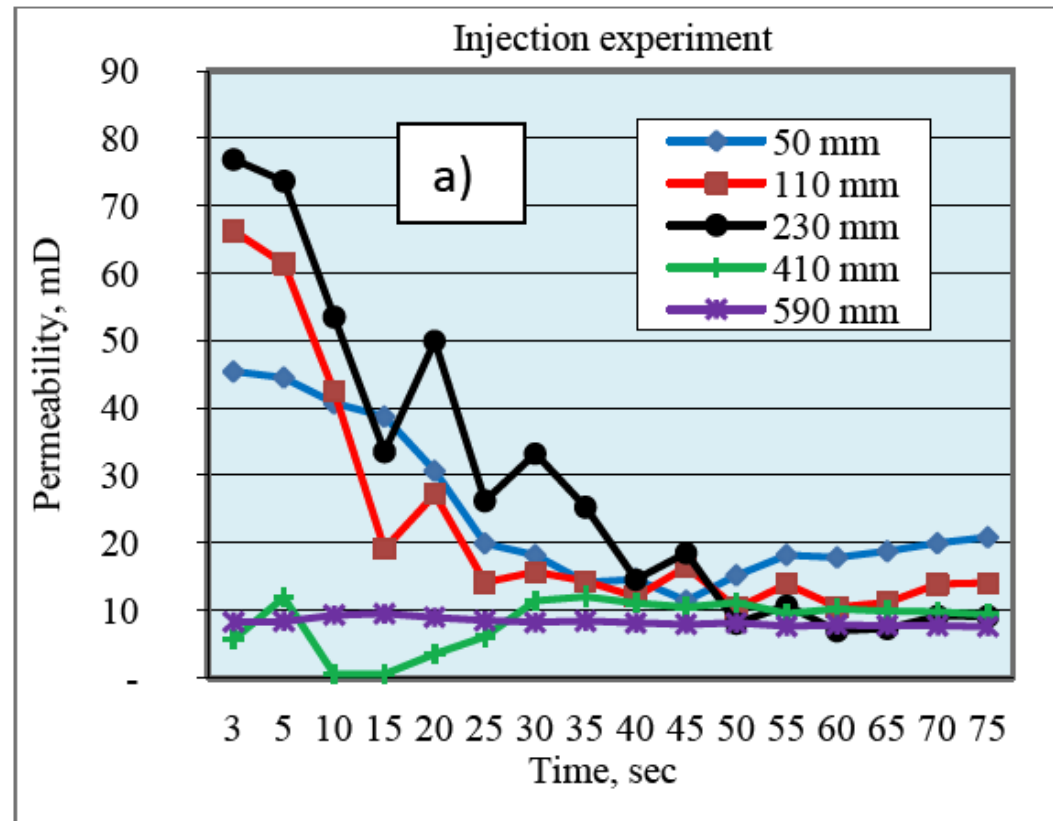
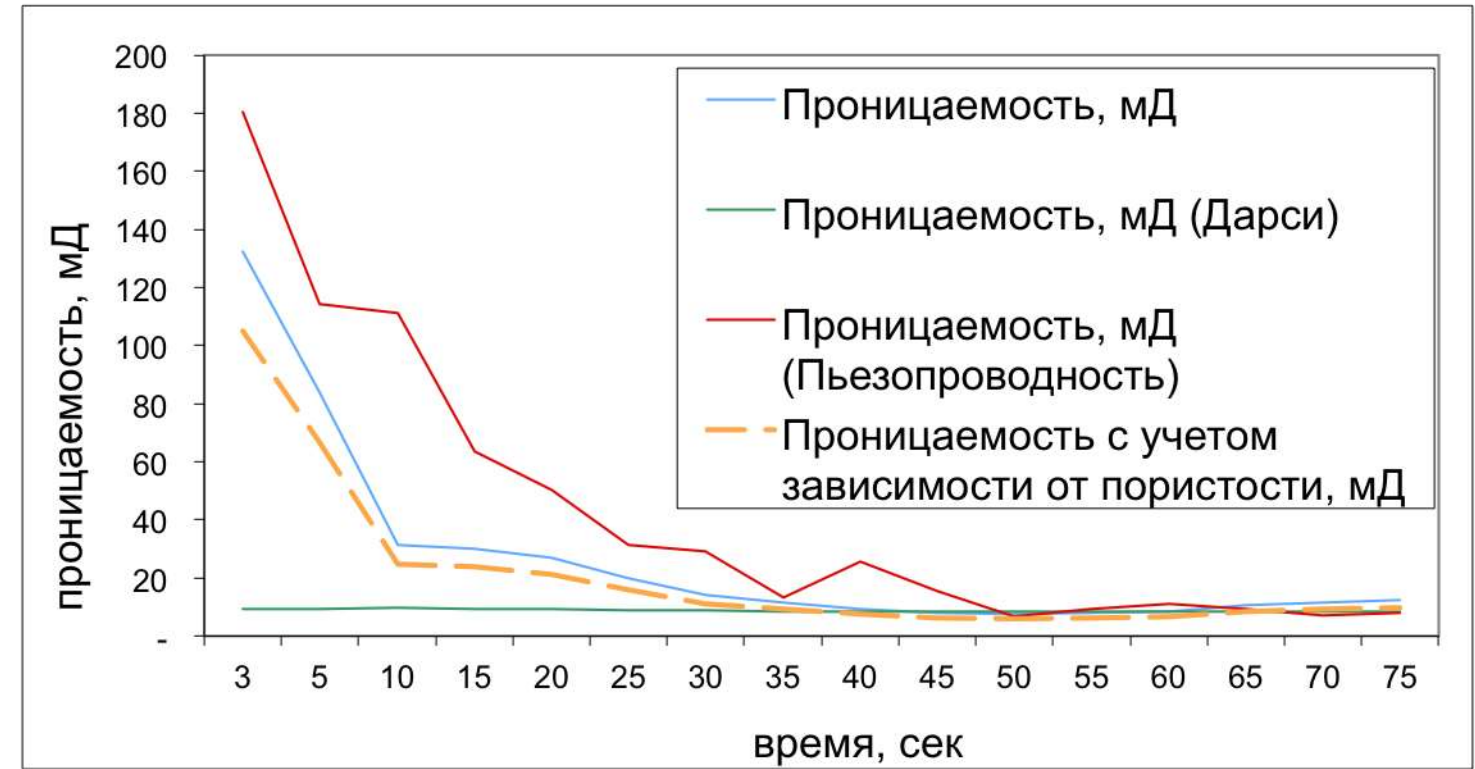
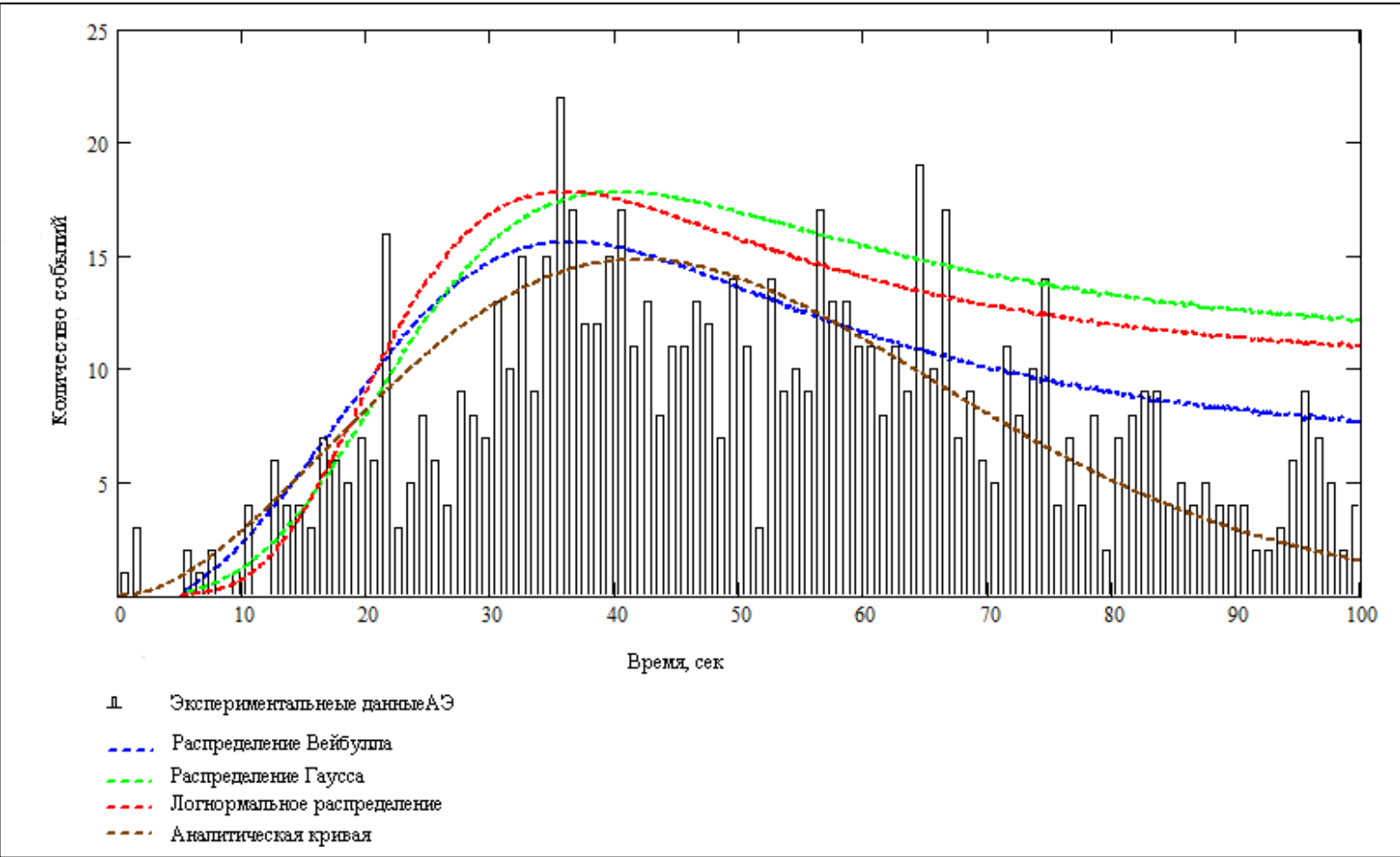
$$a^2 = \frac{k}{\mu_0 \beta m_0}, b = \frac{Q \mu_0}{S k}, \mu_k = \frac{\pi}{2} + \pi k, k \in \{0\} \cup N$$

- Сейсмическое событие возникает, когда поровое давление достигает некоторой критической величины, причем распределение критических величин может быть описано с помощью распределения Вейбулла

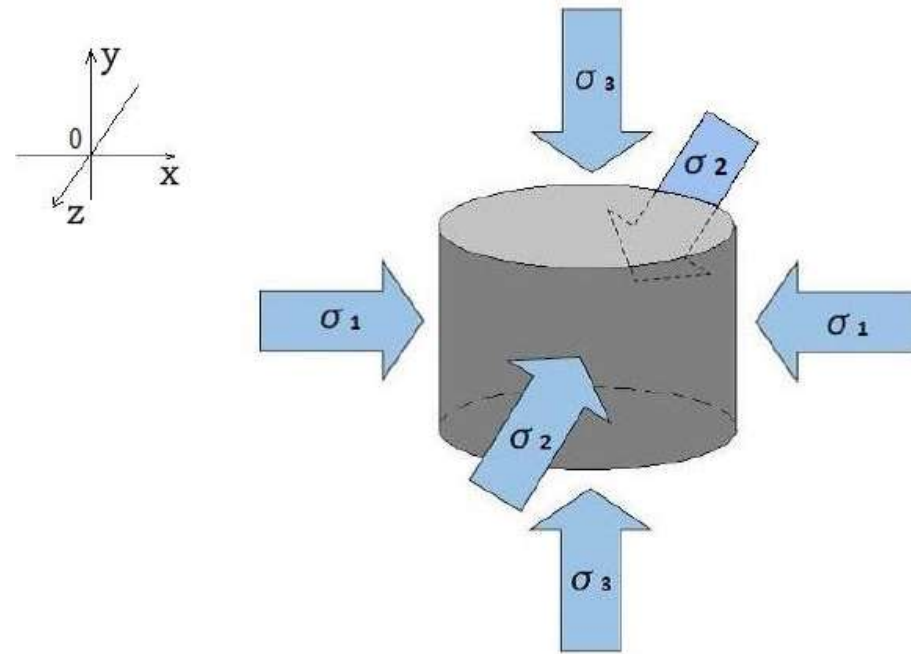
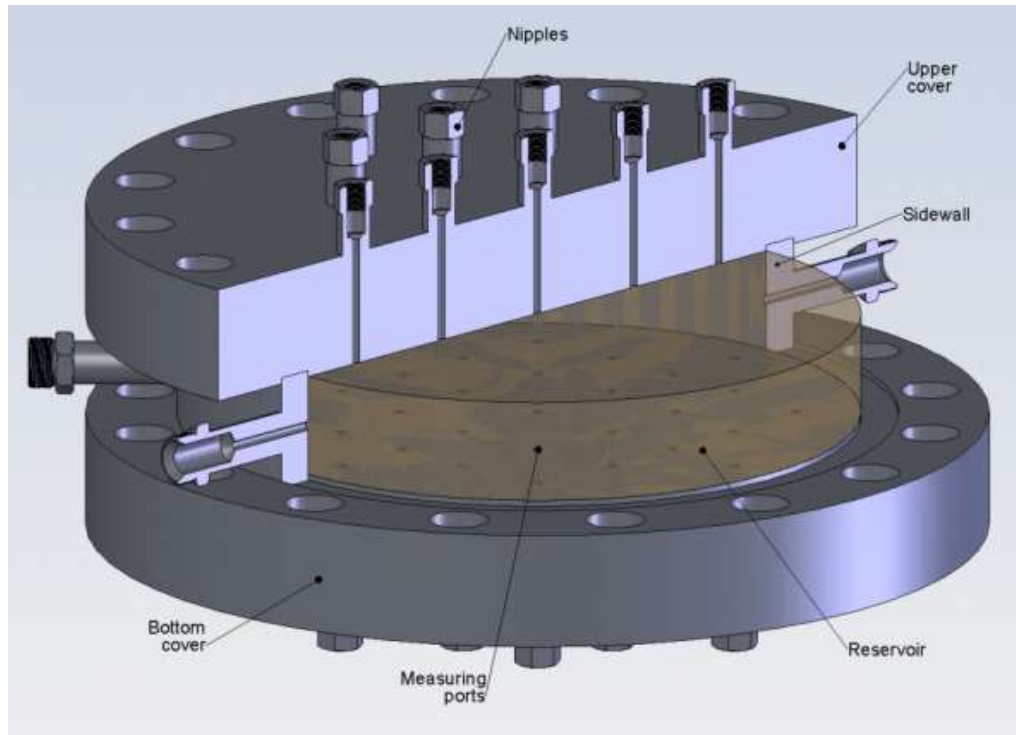
$$N(p^*) = b a^{-b} (p^*)^{b-1} e^{-\left(\frac{p^*}{a}\right)^b}$$

- Таким образом, можно численно оценить проницаемость k в каждый момент времени, если известно поровое давление и количество инициированных событий.

Оценка проницаемости по распространению АЭ



Описание эксперимента



Параметры установки:

• Размеры рабочей камеры

- Диаметр - 430 мм
- Высота - 65 мм

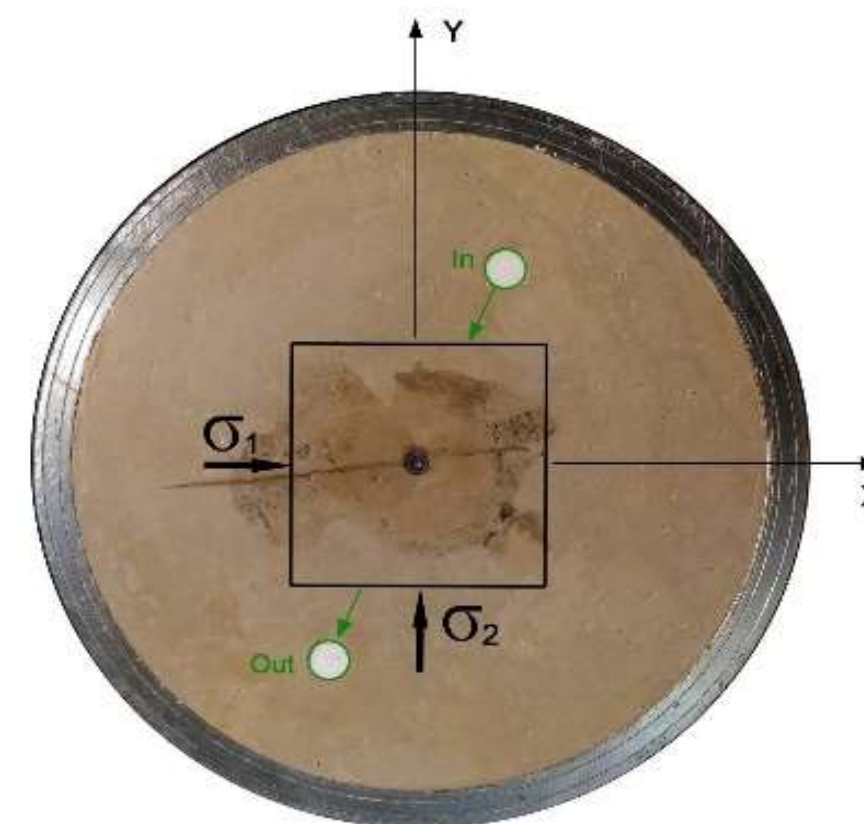
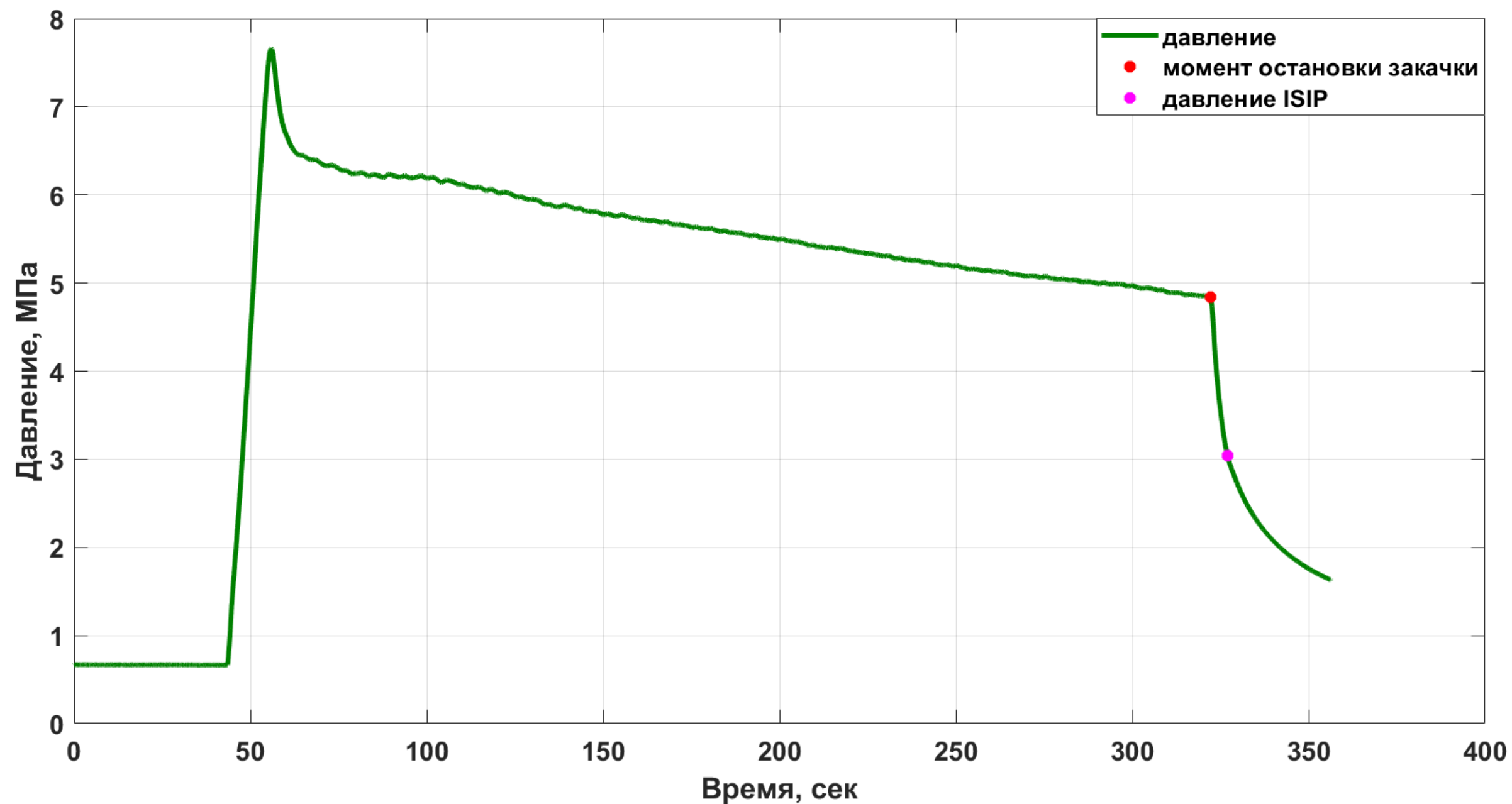
• Параметры нагружения

- Максимальное вертикальное напряжение - 120 атм
- Минимальное вертикальное напряжение - 80 атм
- Максимальная разность поровых давлений - 80 атм

• Параметры закачки

- Максимальное постоянное давление - 100 атм
- Максимальная постоянная скорость закачки: 0,3 см³/с

Изменение давления закачки в эксперименте



Определение давления образования трещины гидроразрыва

Формула для определения давления образования трещины выводится из решения задачи о концентрации напряжений вокруг вертикальной скважины, вскрывающей пласт

$$FBR = 3\sigma_h - \sigma_H - (P_w - P_0) + UTS$$

FBR - давление образования трещины

σ_h - минимальное горизонтальное напряжение

σ_H - максимальное горизонтальное напряжение

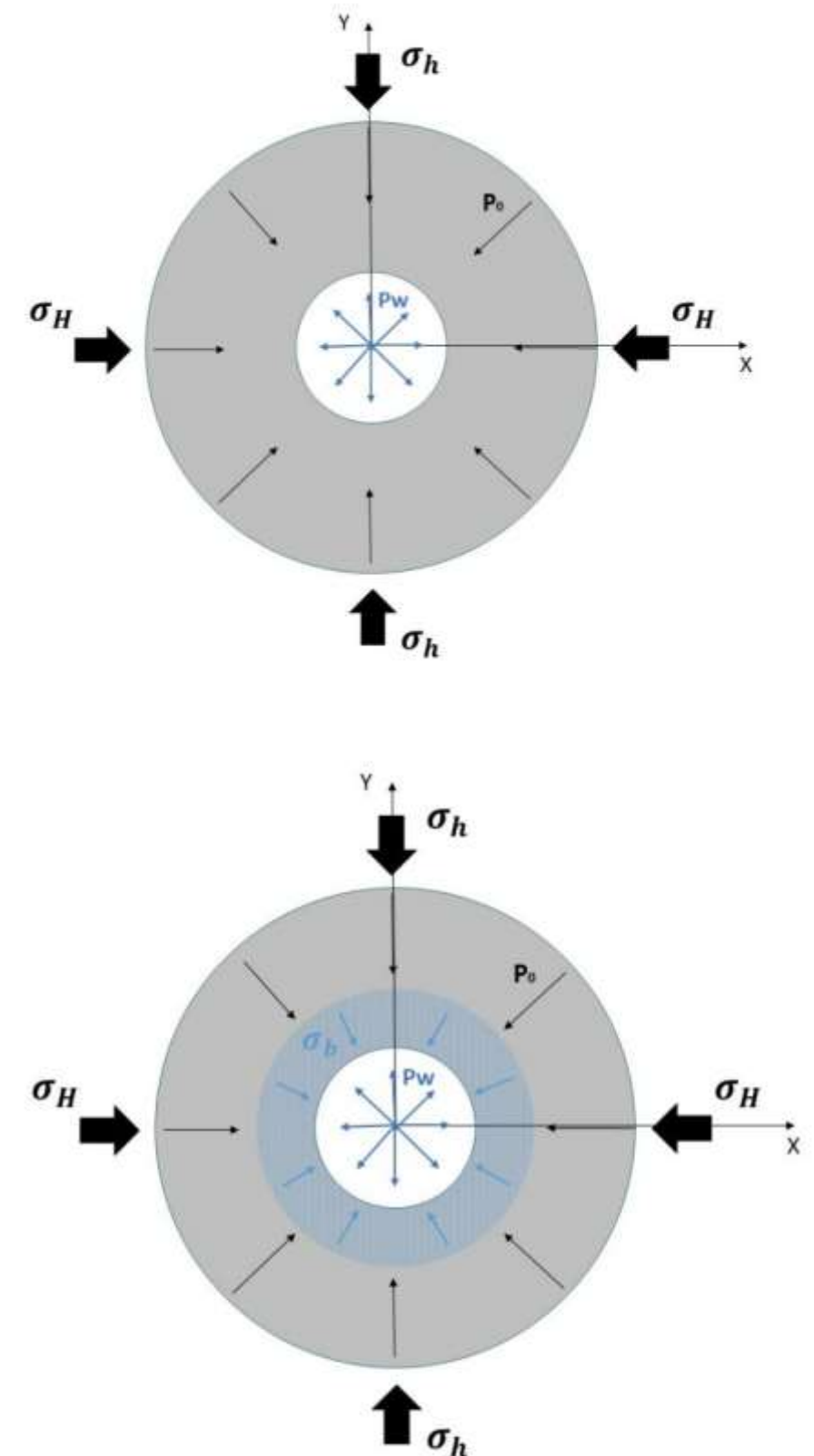
P_w - давление бурового раствора

P_0 - поровое давление

UTS – прочность среды на одноосное растяжение

[Kirsch, 1898; Haimson, Fairhurst, 1969; Jaeger, Cook, 1979]

$$FBR = 3\sigma_h - \sigma_H - (P_w - P_0) + UTS + 2\sigma_b$$



Метод G-функции

Уравнение непрерывности:

$$-\frac{\partial Q(z, t)}{\partial z} = \lambda(z, t) + \frac{\partial A(z, t)}{\partial t}$$

Проинтегрировав по всей длине трещины получаем:

$$\Delta P(\delta_0, \delta) = \frac{CH_p E' \sqrt{t_0}}{H^2 \beta_s} G(\delta, \delta_0) \quad (\text{Nolte, 1979; Castillo, 1987})$$

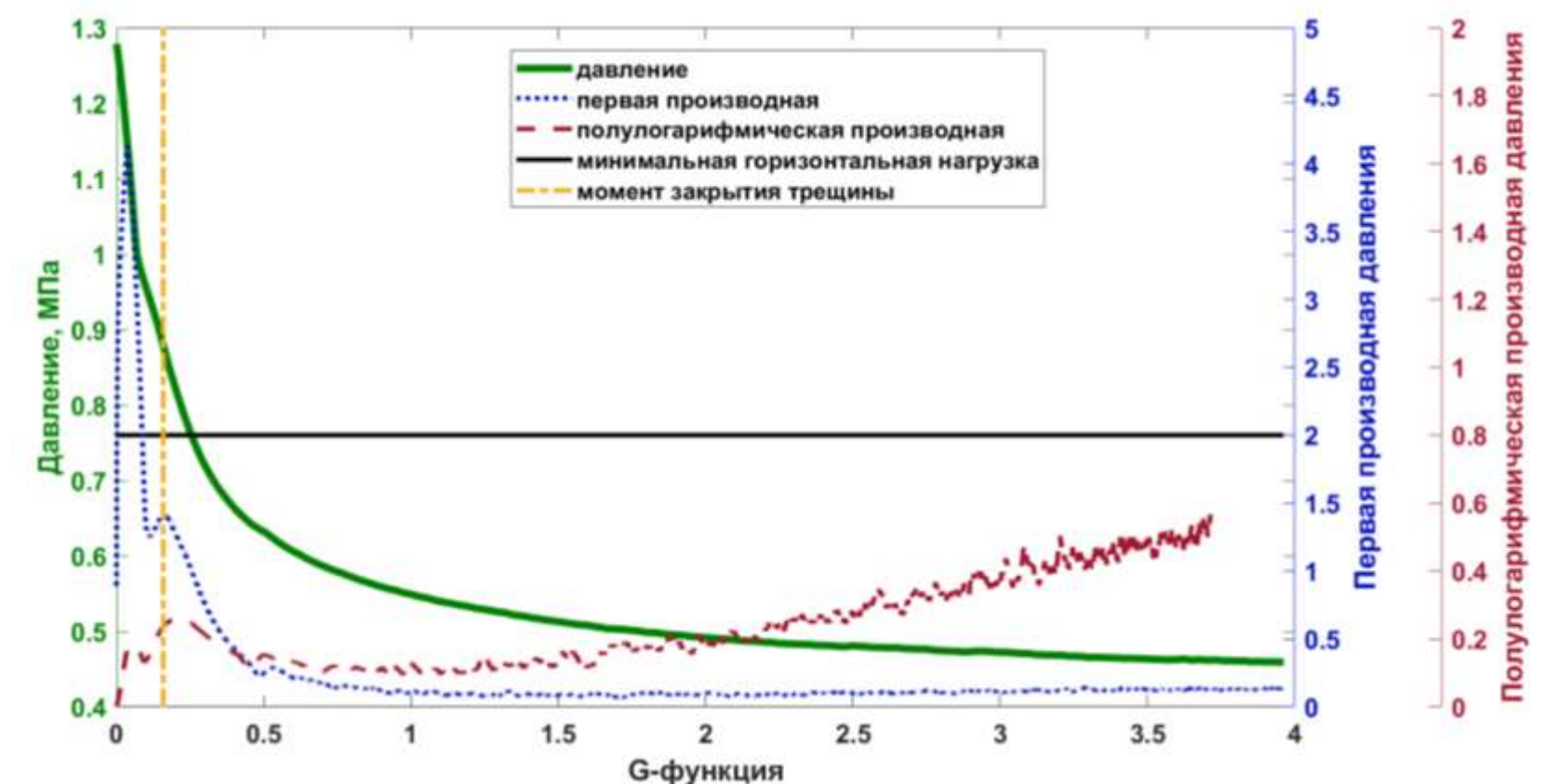
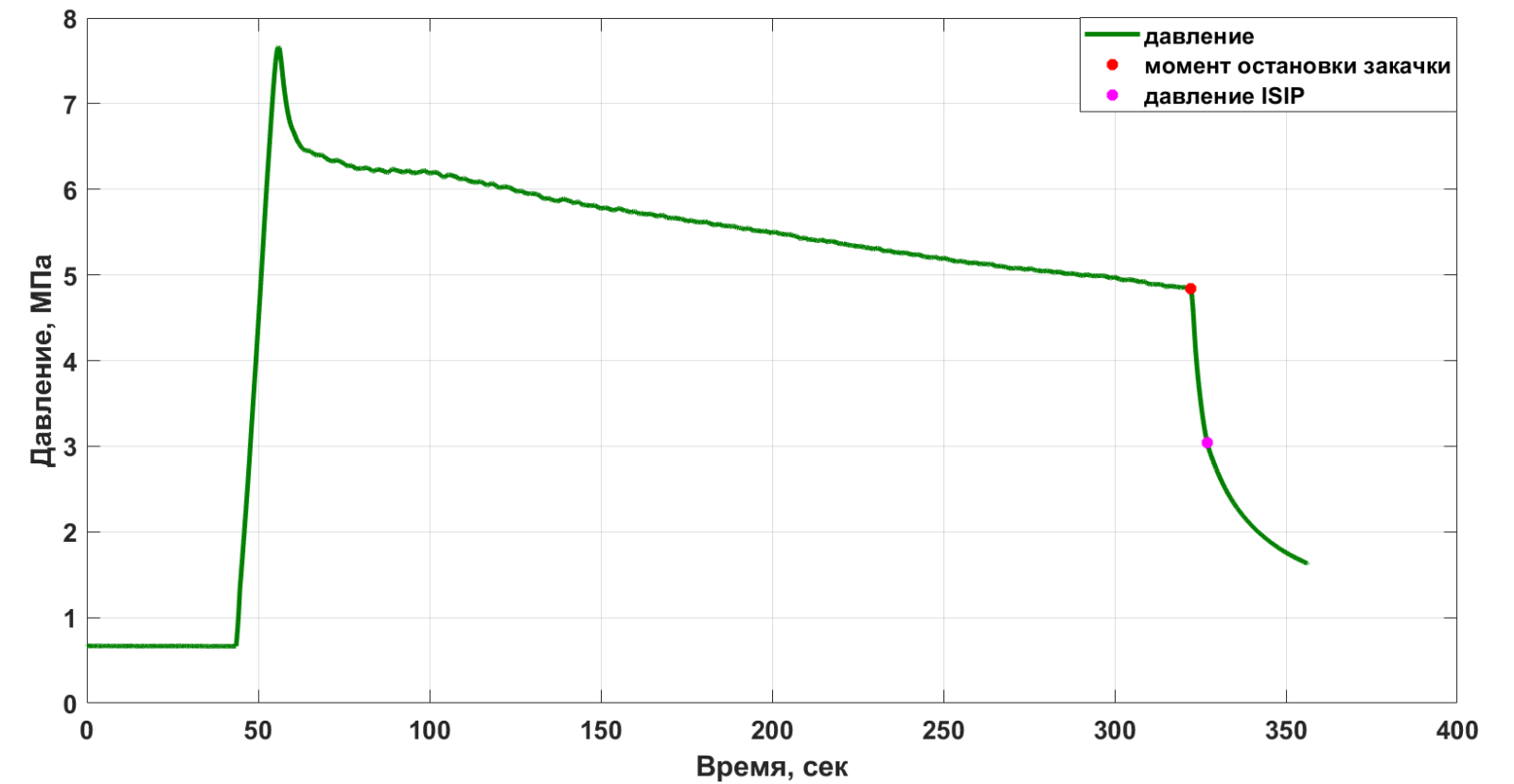
, где

$\delta = \frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t - t_0}{t_0}$ - безразмерная функция, зависящая от времени

$\Delta P(\delta_0, \delta) = P(\delta_0) - P(\delta)$ - спад давления

$G(\delta, \delta_0) = \frac{4}{\pi} [g(\delta) - g(\delta_0)]$ - G – функция

, где $g(\delta) = \frac{4}{3} \left[(1 + \delta)^{\frac{3}{2}} - \delta^{\frac{3}{2}} - 1 \right]$.



Эффект обратного напряжения в пласте

$\Gamma_f = \{-L(t) \leq x \leq L(t), y = 0\}$ – часть пласта, которая занята трещиной

$\Gamma_s = \{-R < x < -L(t), y = 0\} \cup \{L(t) < x < R, y = 0\}$ – остальная часть пласта (Golovin, Baykin, 2016)

$p_c = \sigma_{min} + \sigma_b$, где

p_c - напряжение закрытия трещины

σ_{min} - минимальное тектоническое напряжение

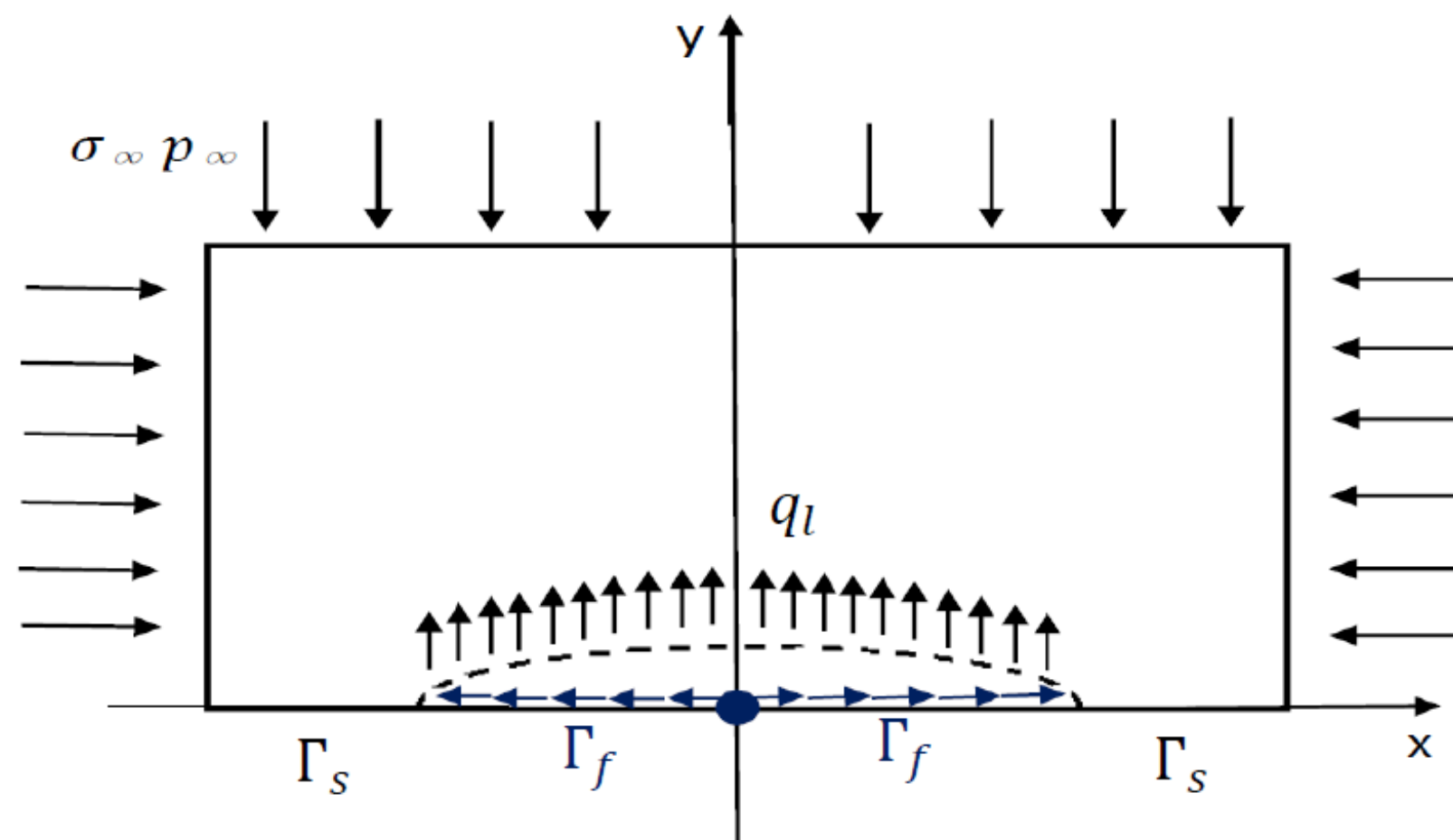
σ_b – напряжение back-stress

$$\sigma_b = \eta(p_{fr} - p_0), \quad \eta = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)}$$

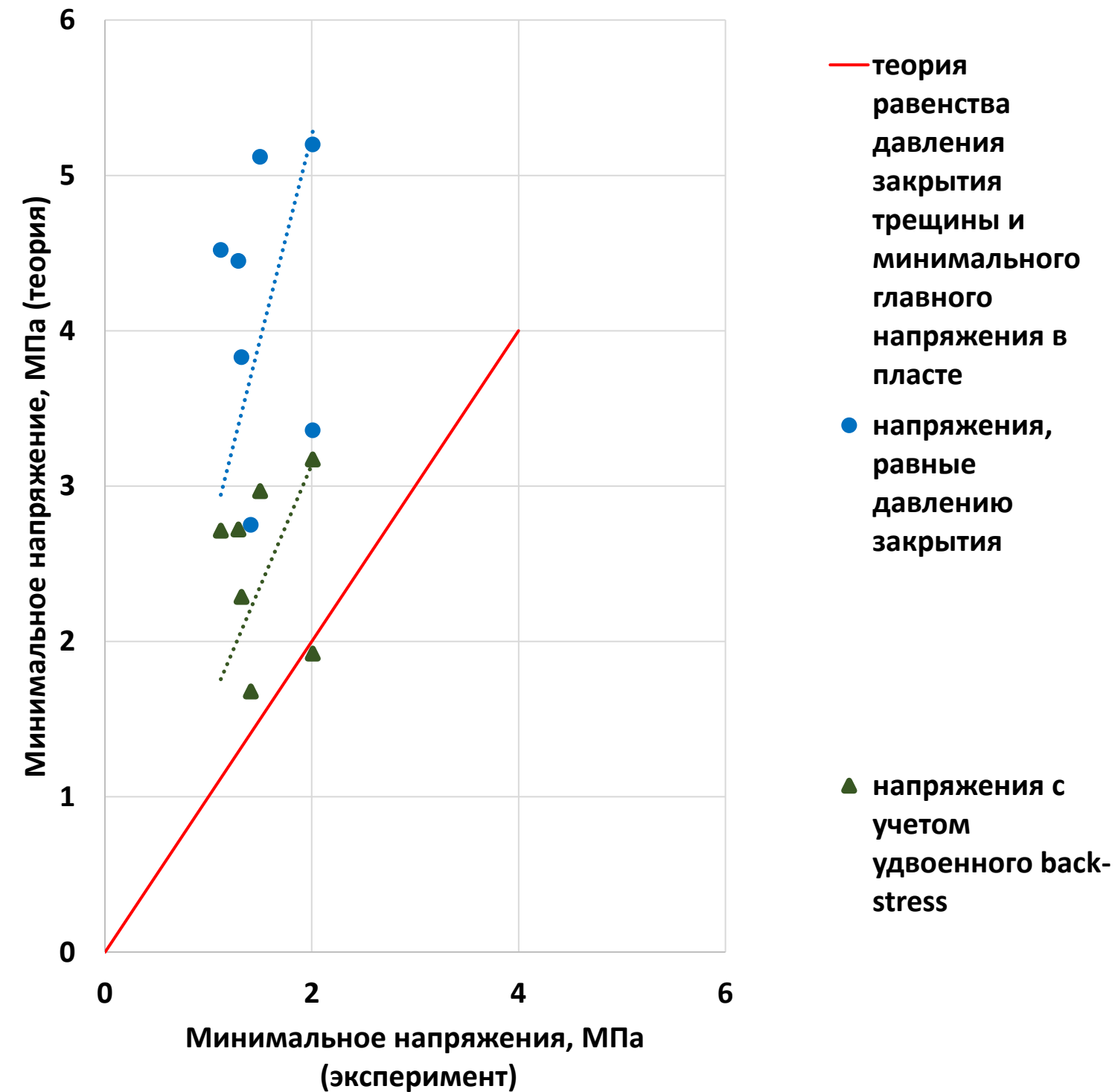
p_{fr} - давление жидкости в трещине

p_0 - поровое давление в пласте (Cleary, 1980)

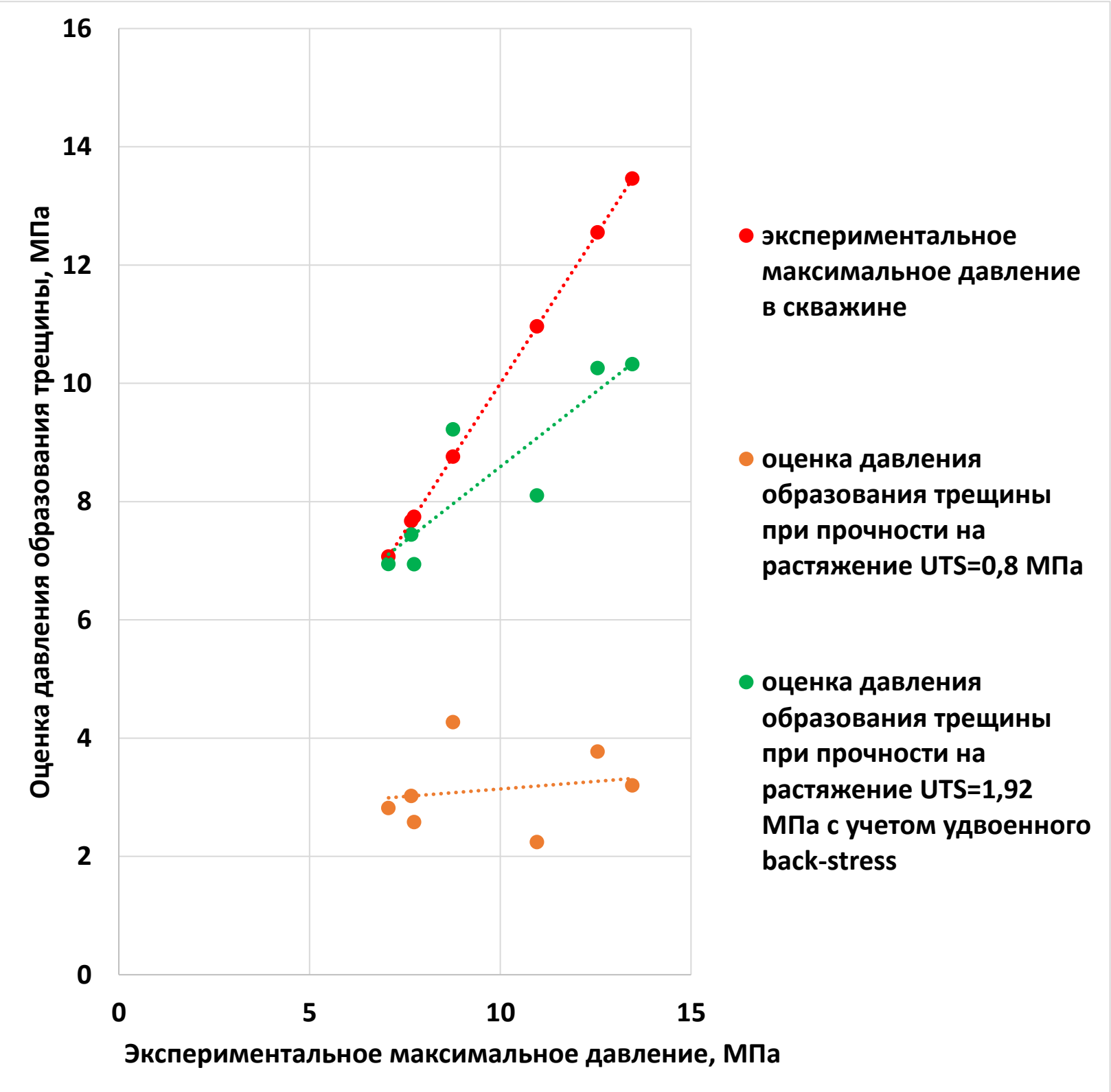
- В случае распространения трещины в непроницаемой среде существует предположение о необходимости удвоения напряжения back-stress (Vandamme 1990; Boon, Detournay 1990).



Расчет минимальных «тектонических» напряжений

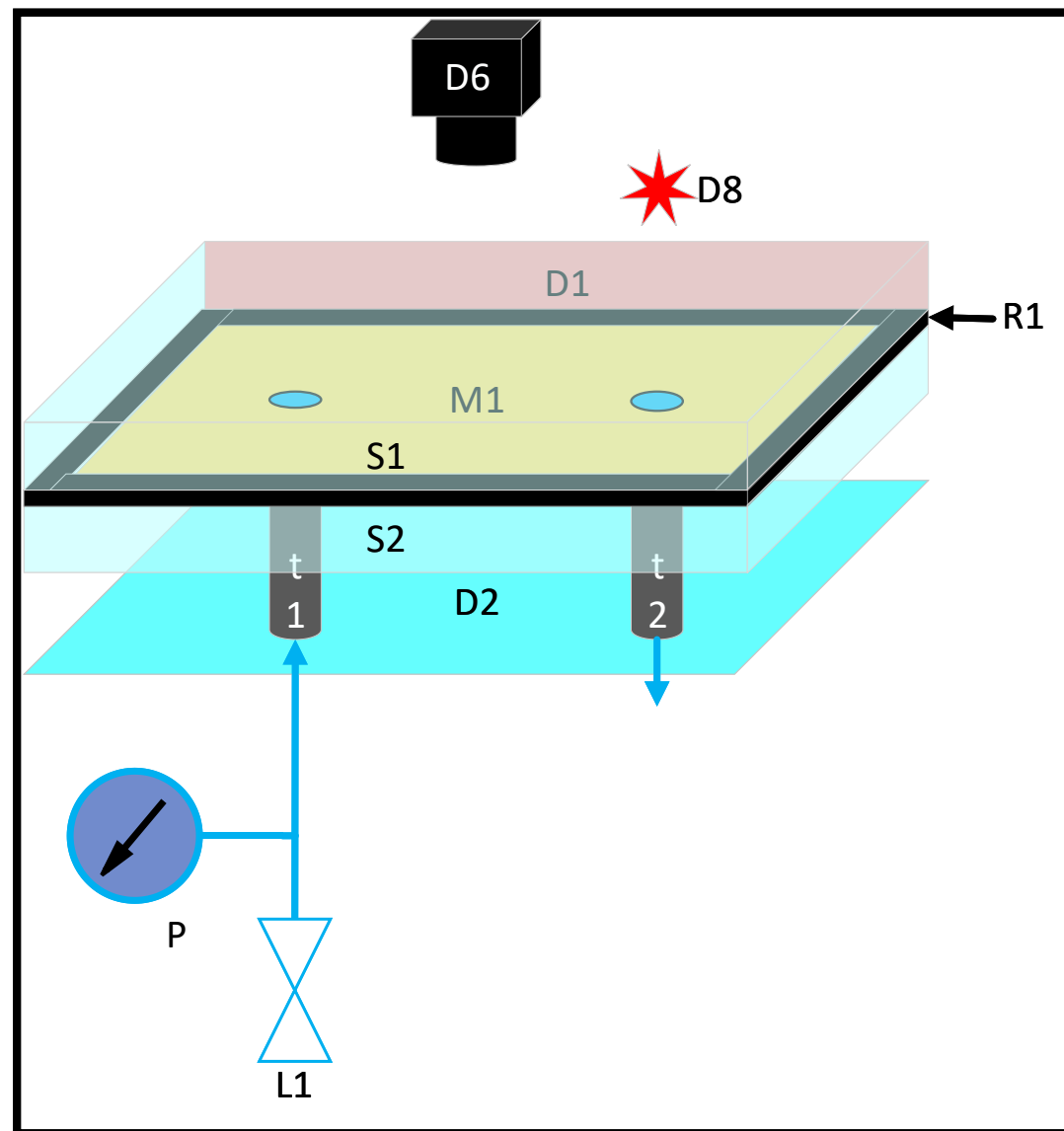


Оценка влияния прочности на растяжение на давление образования трещины гидроразрыва



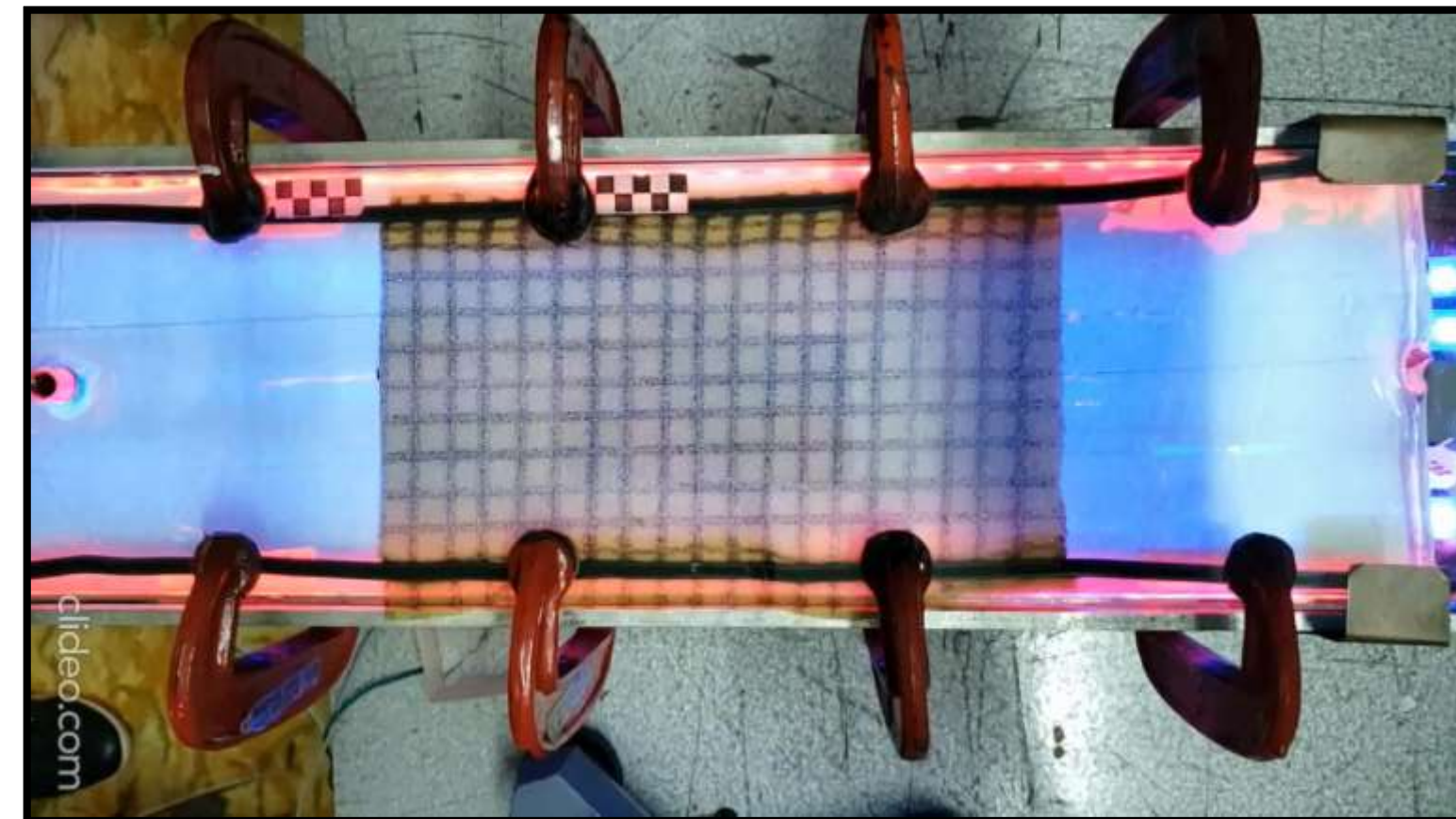
Деформация среды при фильтрации

Схема установки

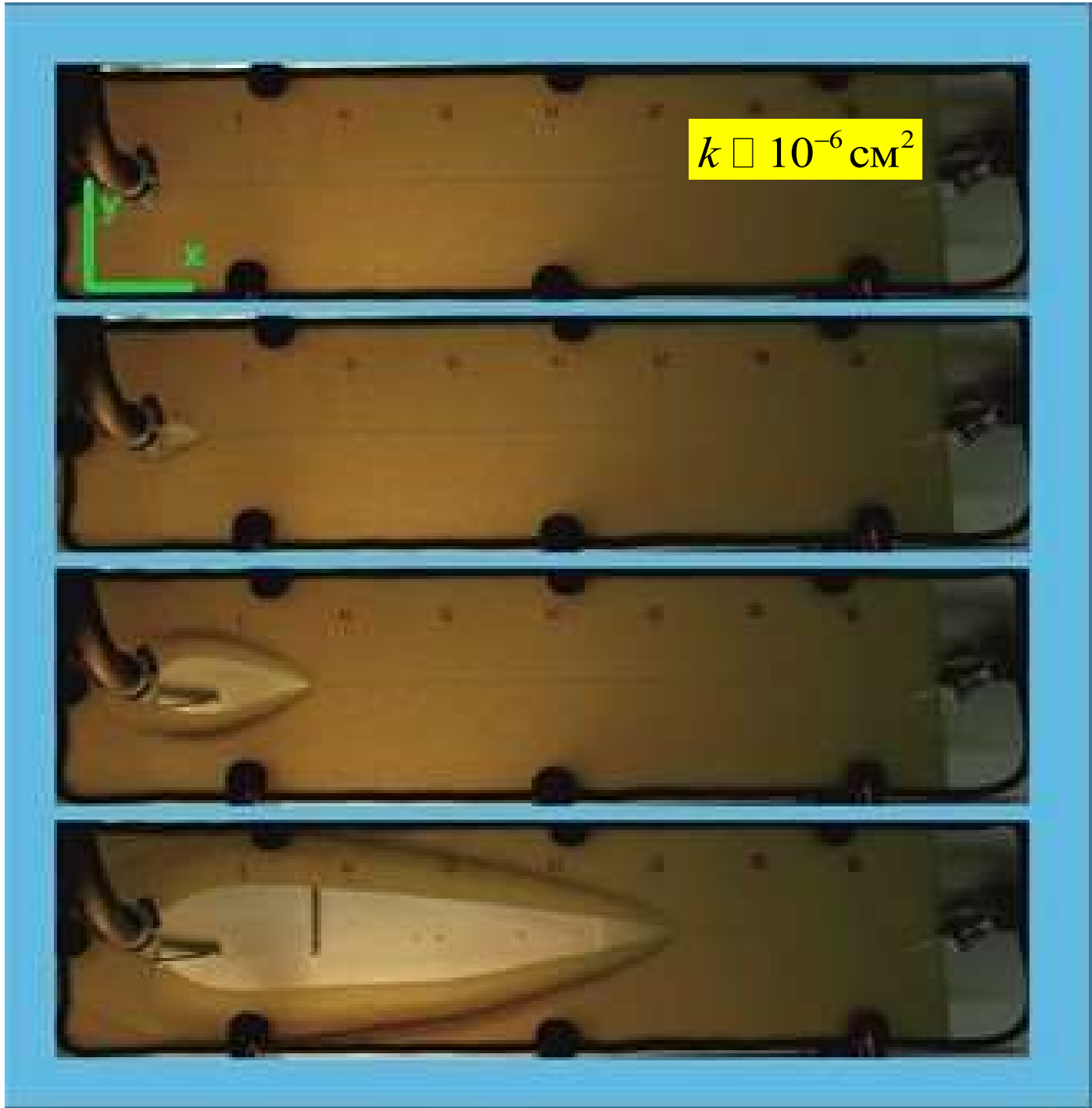


M1 – пористая среда;
R1 – непроницаемые стенки;
S1 и S2 – стеклянные пластины;
D1 и D2 – подсветка;
D6 – камера;
D8 - индикатор включения крана;
L1 – кран;
P – преобразователь давления.

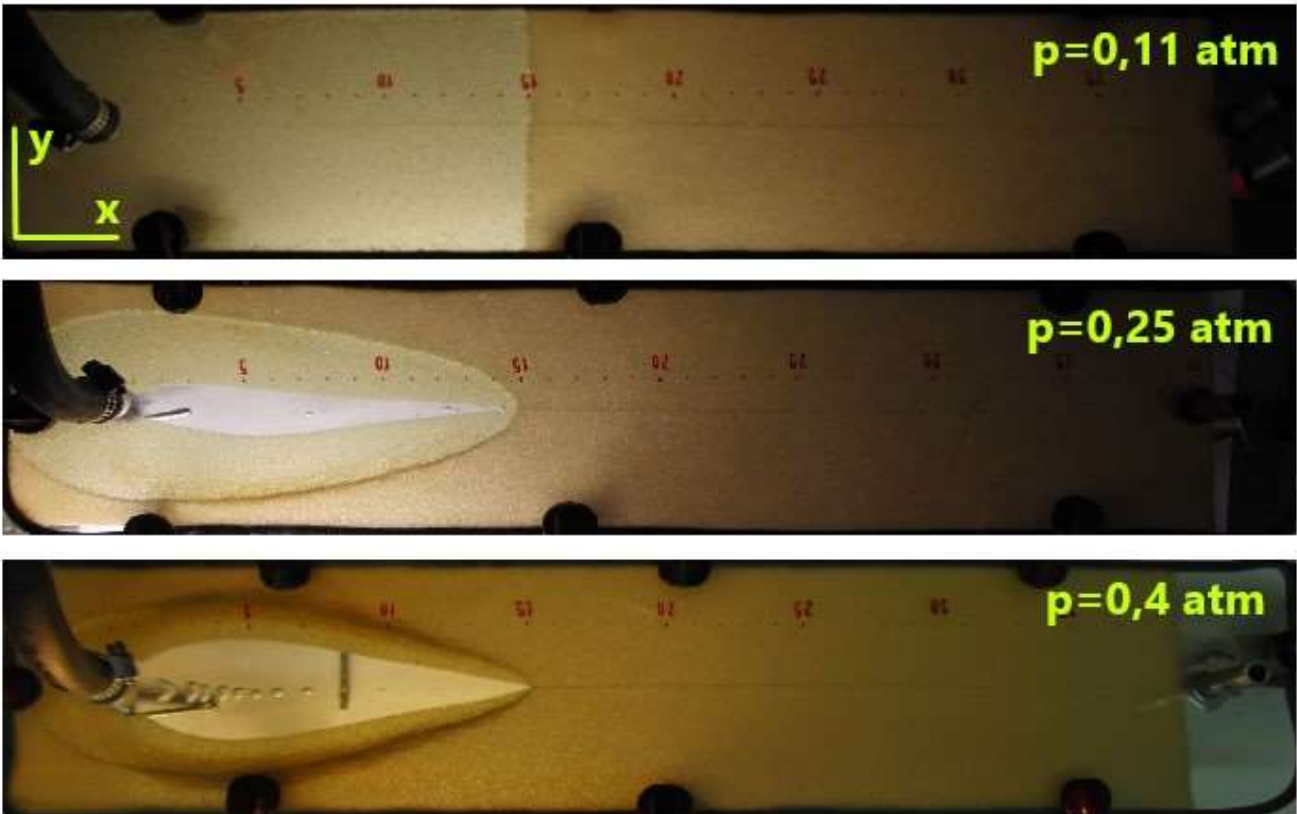
Эксперимент при давлении
нагнетаемой жидкости 2 атм



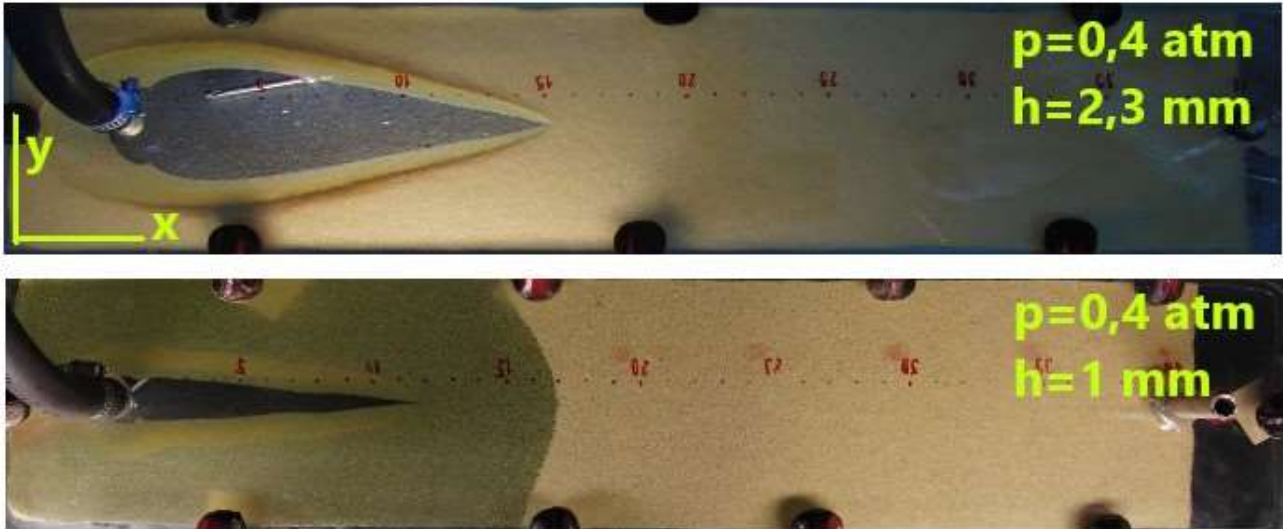
Раскрытие «трещины» (щели) в пористом материале



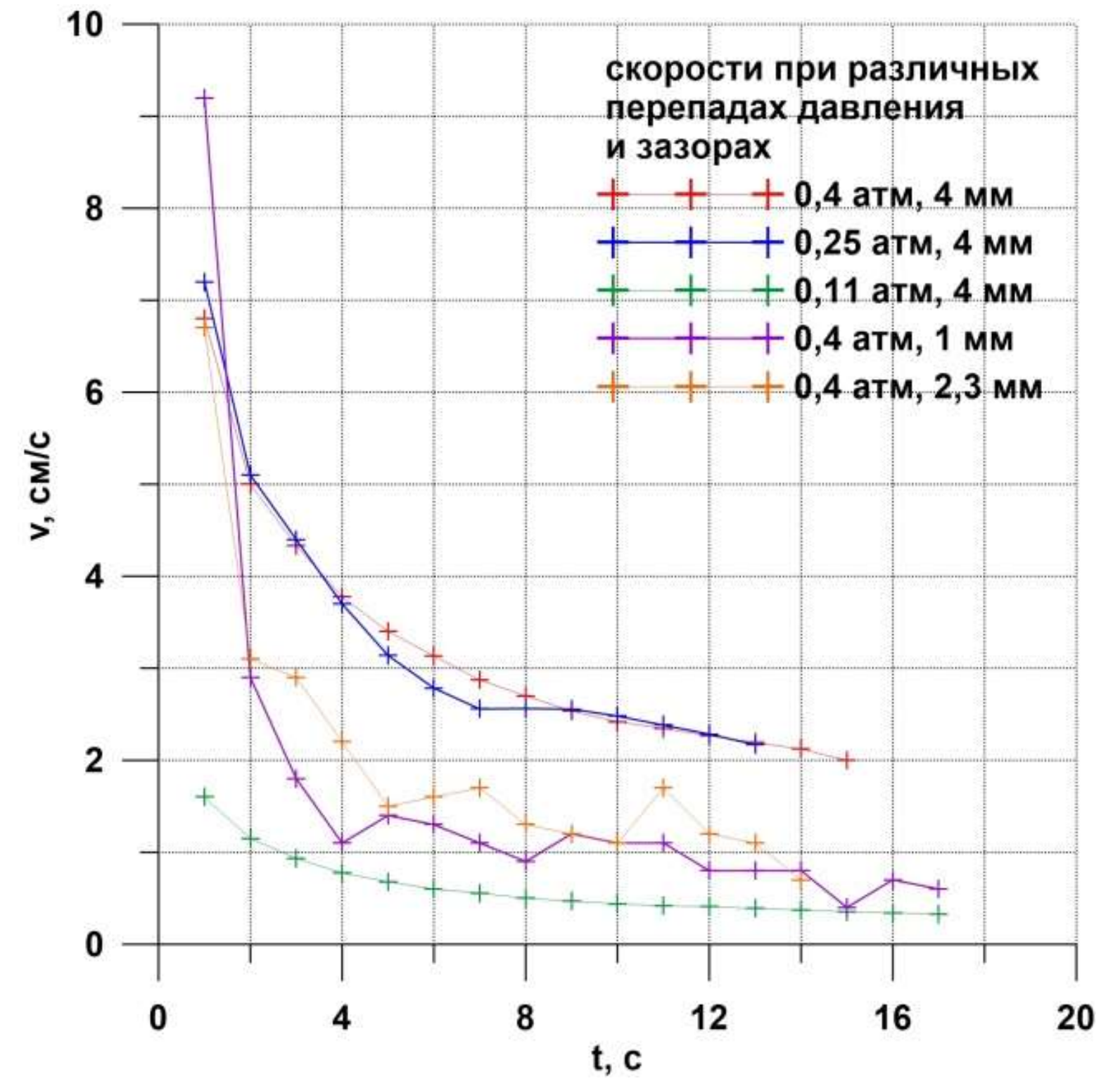
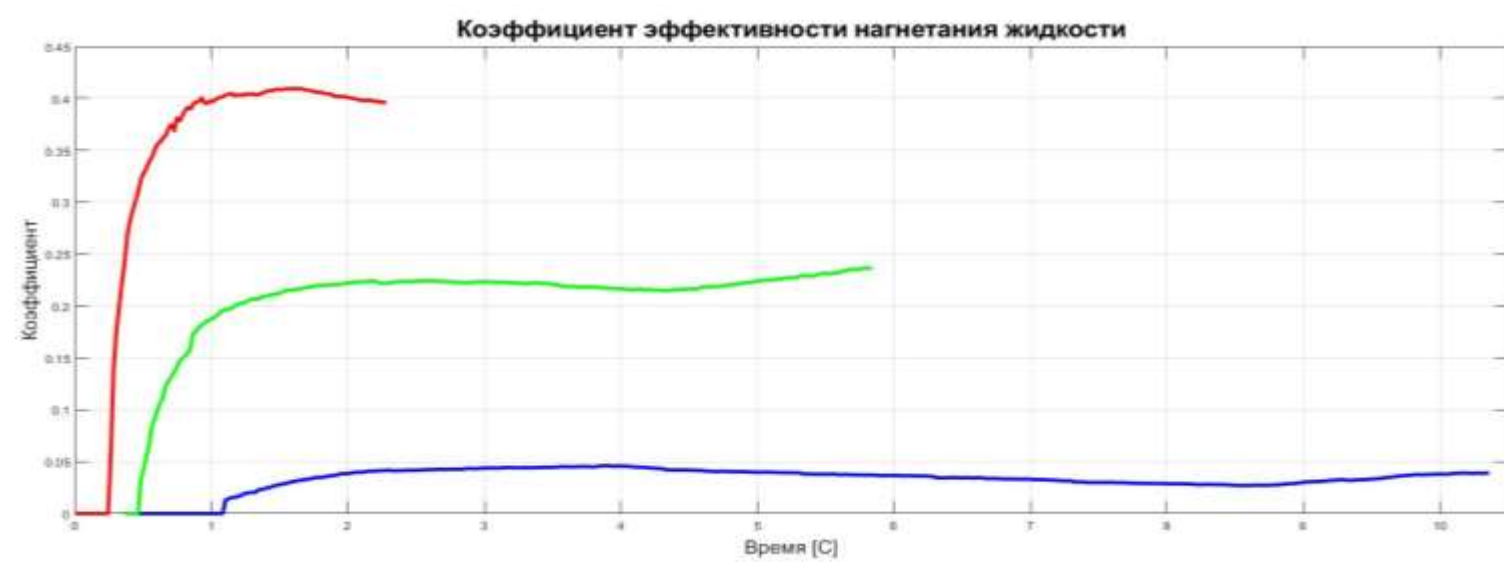
Разные моменты времени. Толщина слоя 4 мм.



Разные давления закачки



Разная проницаемость



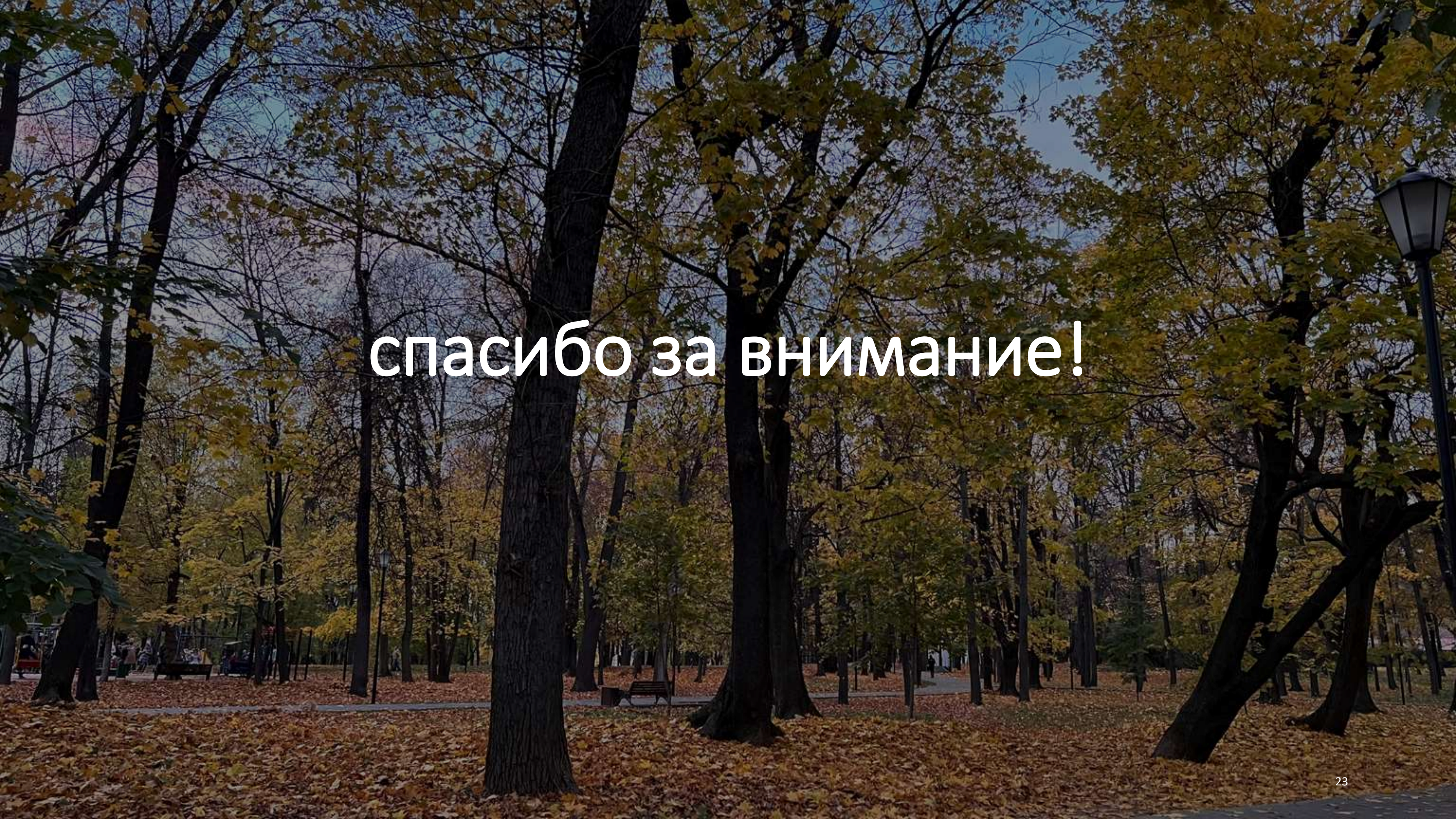
Заключение

- В лабораторных экспериментах обнаруживается нелинейность процессов фильтрации.
- Условия возникновения нелинейных эффектов в реальных условиях могут меняться в зависимости от геомеханических параметров конкретных пластов.
- Усложнение моделей процессов фильтрации может идти как по пути введения нелинейных членов в уравнения, так и с использованием подходов вероятностного описания.

The image shows a handwritten derivation of the derivative of $f(x) = x^2$ using the limit definition. The steps are as follows:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$
$$f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^2 - x^2}{h}$$
$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^2 + 2xh + h^2 - x^2}{h}$$
$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{2xh + h^2}{h}$$
$$= \lim_{h \rightarrow 0} h(2x + h)$$

Other partial derivations are visible on the right side of the chalkboard, including $f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$ and $f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$.

A photograph of a park in autumn. The ground is covered in fallen yellow and orange leaves. Several large trees with dark trunks and yellowing foliage stand in the foreground and middle ground. A paved path winds through the park. In the background, a playground with a red structure is visible. A black lamppost stands on the right side of the frame. The sky is a pale blue.

спасибо за внимание!