

Сетевая модель двухфазной фильтрации в неоднородных пористых средах

Шаббир Кафи Ул, М03-3046

Центр образовательных программ ФАКТ, МФТИ

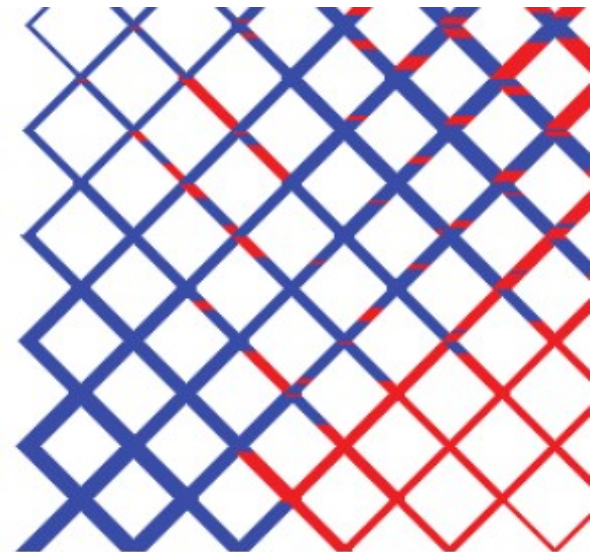
Научный руководитель: Извеков О. Я.

Научный консультант: Конюхов А.В.

ГК-211, 11:00, 19.05.2025

Содержание

1. Мотивация и цель
2. Обзор подходов к моделированию движения флюидов в неоднородных средах
3. Новая сетевая модель
4. Задачи
 1. Пропитка изолированного блока (imbibition)
 2. Вытеснение в среде с периодической неоднородностью
 3. Релаксационная модель Кондаурова
5. Выводы

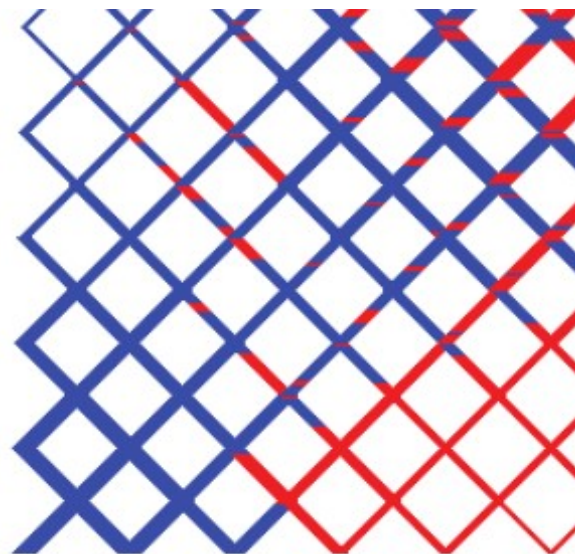


Мотивация и цель

Доля нефти, добываемой из нетрадиционных пластов со сложным строением, увеличивается год от года

Цель работы:

моделирование эффектов капиллярной неравновесности двухфазных течений в пористой среде на основе неоднородной сетевой модели



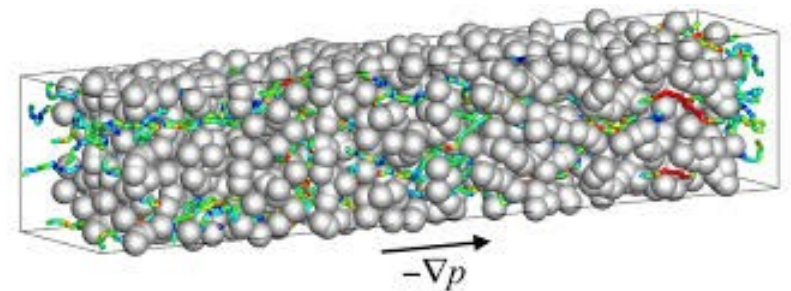
Классическое описание движения флюидов в пористой среде (Дарси)

- Поток происходит в состоянии капиллярного равновесия – в каждый момент времени успевает установиться равновесное распределение флюидов
- Перестает работать в средах с неоднородностями, когда время установления равновесия велико

$$Q = -\frac{K}{\mu} \nabla P,$$

$$S_k = \frac{V_k}{V_{\text{void}}}$$

$$K = K(S)$$

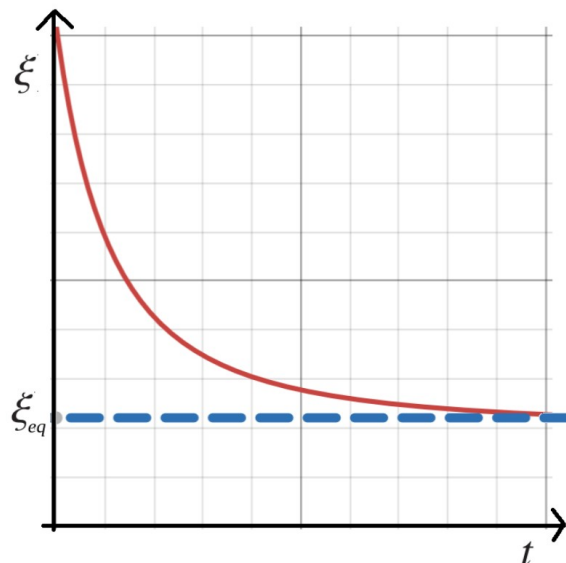


Усложненные континуальные модели

$$K = K\left(S, \frac{\partial S}{\partial t}\right).$$

Barenblatt G. et al. The mathematical model of nonequilibrium effects in water – oil displacement // 2003.

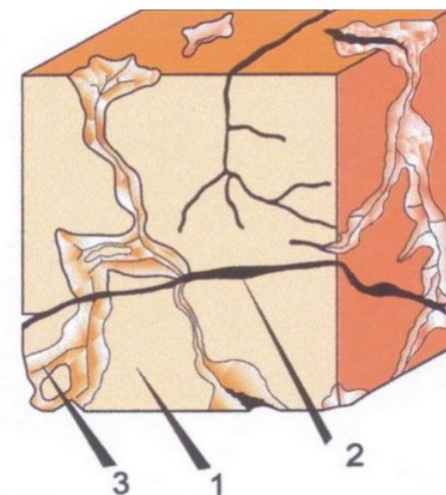
Hassanizadeh S. Continuum description of thermodynamic processes in porous media: Fundamentals and applications // 2004.



$$K_{\alpha} = K_{\alpha}(S, \xi),$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \Omega(S, \xi).$$

Модель
неравновесности
Кондаурова

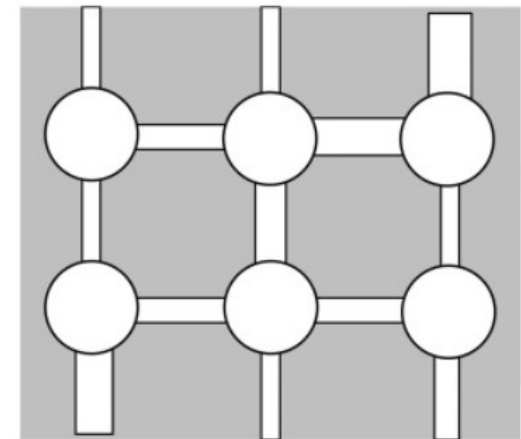
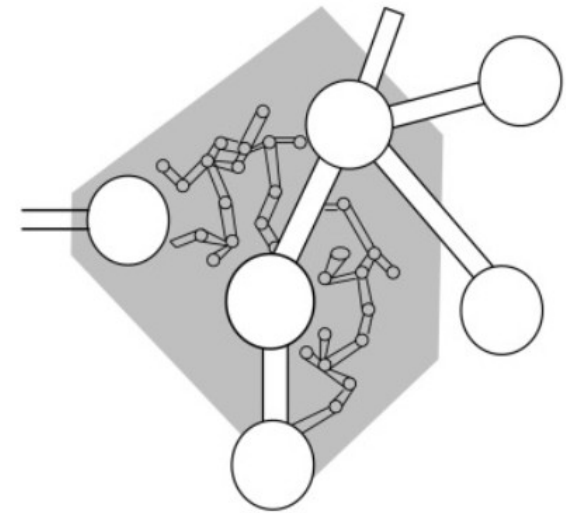


1 - Матрица
2 - Макротрещины
3 - Измененная часть
породы с кавернами
и микротрещинами

Подход двойной
пористости

Сетевые модели

- Сетевая модель - численный эксперимент
- Проверка выводов континуальных моделей
- Уточнение физического смысла параметров
- Дополнение континуальной модели



Разные сетевые модели

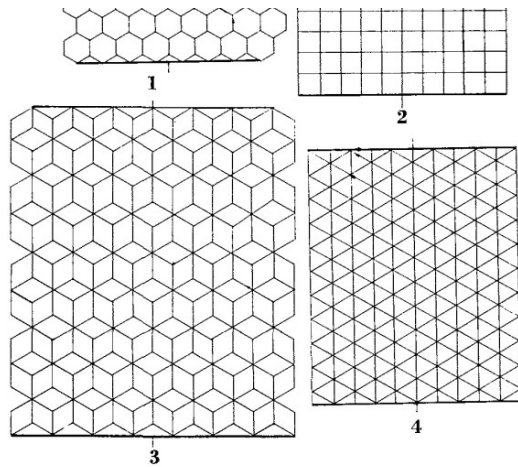
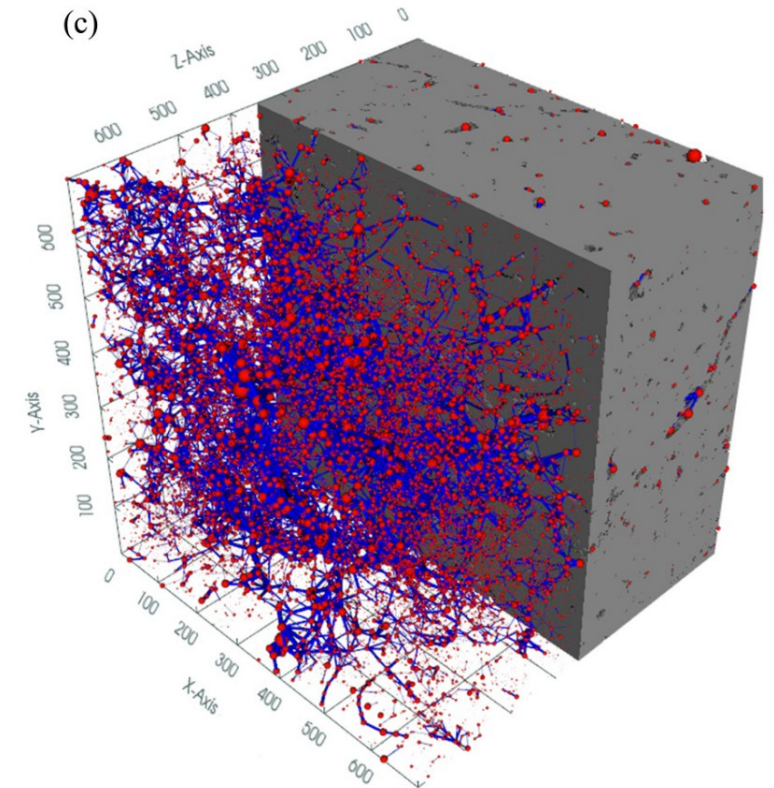
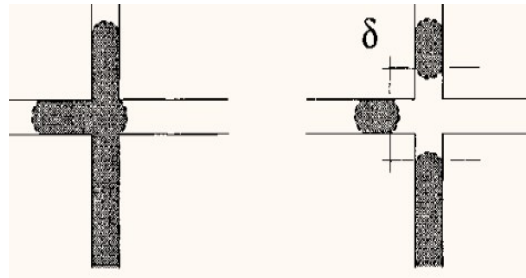
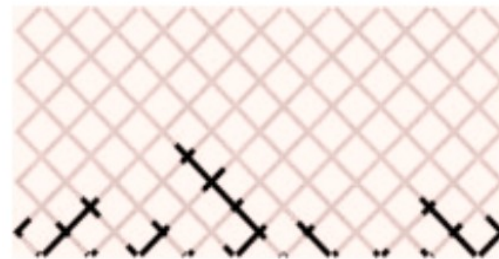


FIG. 1—SINGLE HEXAGONAL NETWORK.
FIG. 2—SQUARE NETWORK.
FIG. 3—DOUBLE HEXAGONAL NETWORK.
FIG. 4—TRIPLE HEXAGONAL NETWORK.



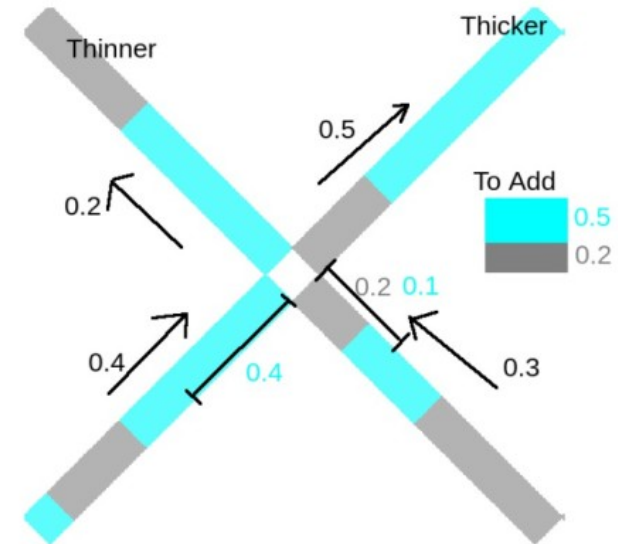
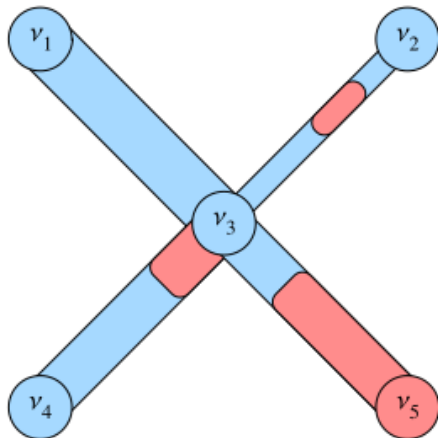
Fatt I // 1956, USA

**Aker E. et al. //
1998, Norway**

**Zubov A et al. Pore-network
extraction using discrete
Morse theory // 2022,
Russia**

Новая сетевая модель

- Капилляры представлены трубками, а поры — узлами
- 2D
- Разные радиусы
- Узлы не имеют объема
- Игнорируем гравитацию



Новый метод распределения жидкости в узлах: Когда смачивающая и несмачивающая жидкости поступают в узел на шаге интегрирования по времени, смачивающая жидкость поступает в более тонкие капилляры. Этот подход обеспечивает минимизацию поверхностной энергии.

Алгоритм решения

1. Генерация СЛАУ
2. Расчет скорости во всех капиллярах
3. Распределение различных жидкостей (новый метод)
4. Измерение насыщенности, капиллярного давления

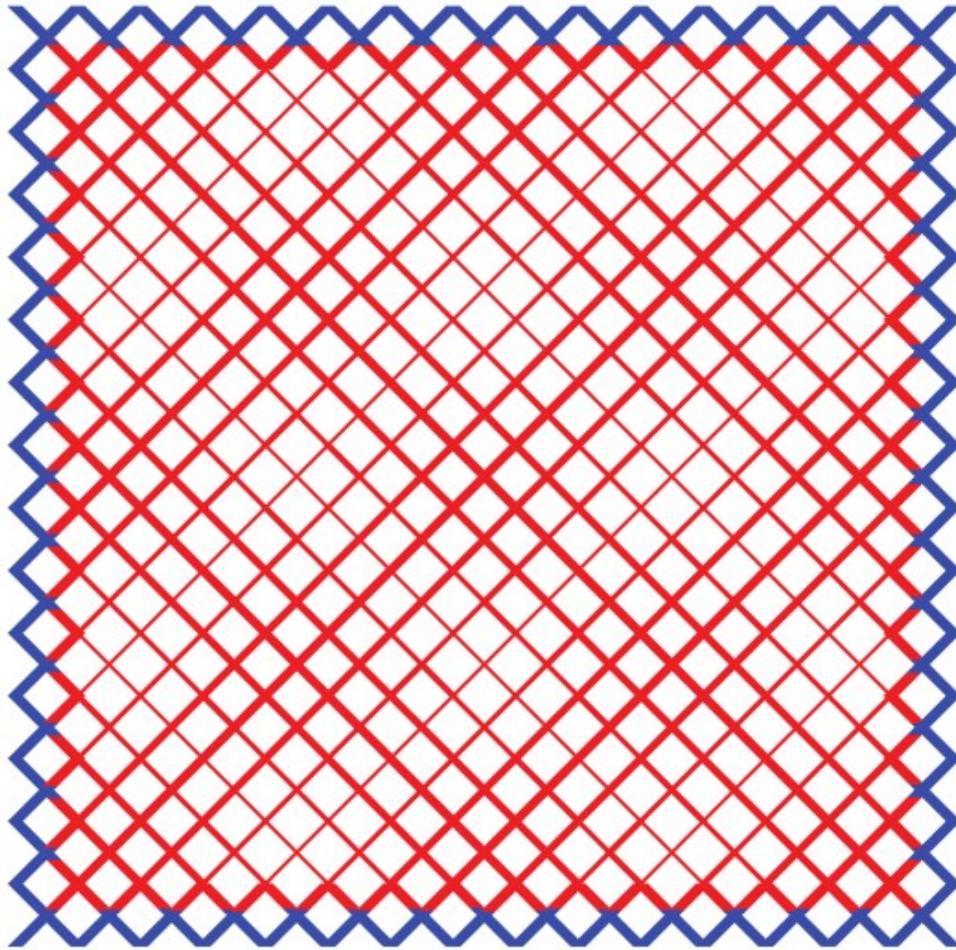
$$Q_{ij} = A_{ij} \Delta P_{ij} + B_{ij},$$

$$A_{ij} = \frac{\pi R_{ij}^4}{8 M_{ij} l};$$

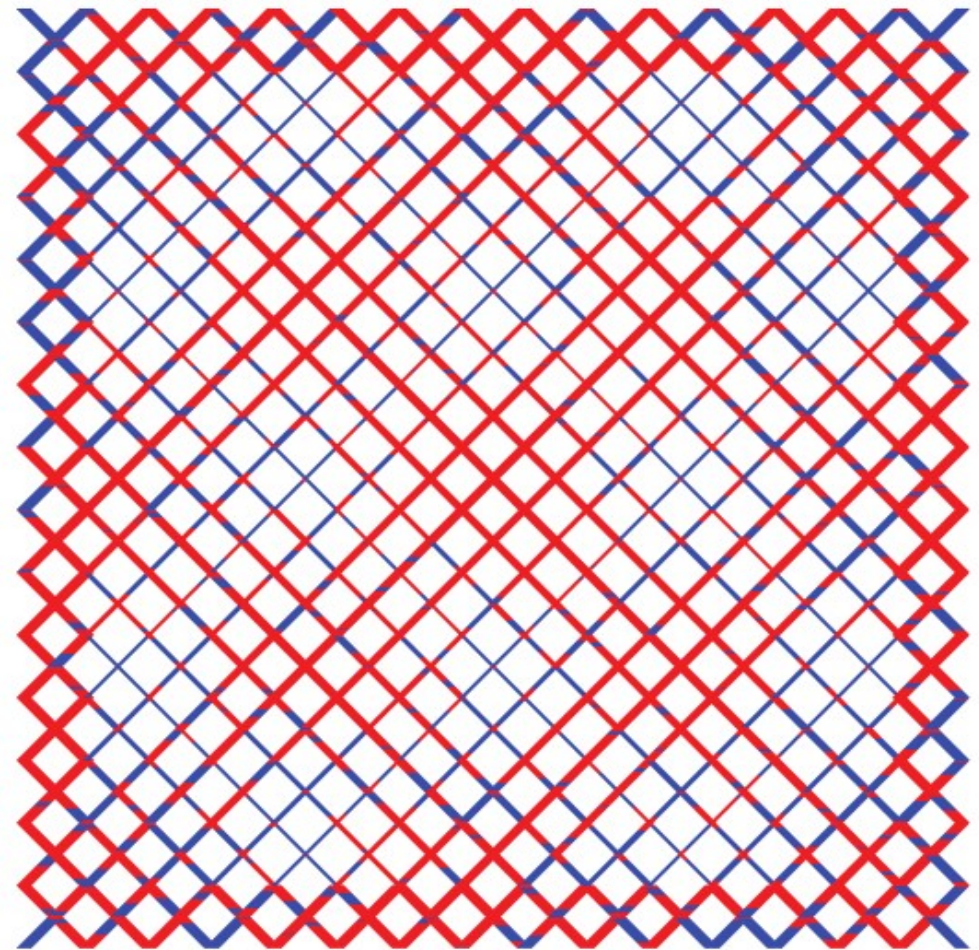
$$B_{ij} = \frac{\pi R_{ij}^4}{8 M_{ij} l} \frac{2 s_{ij} \sigma}{R_{ij}},$$

$$M = \sum_i \mu_i \frac{l_i}{l}$$

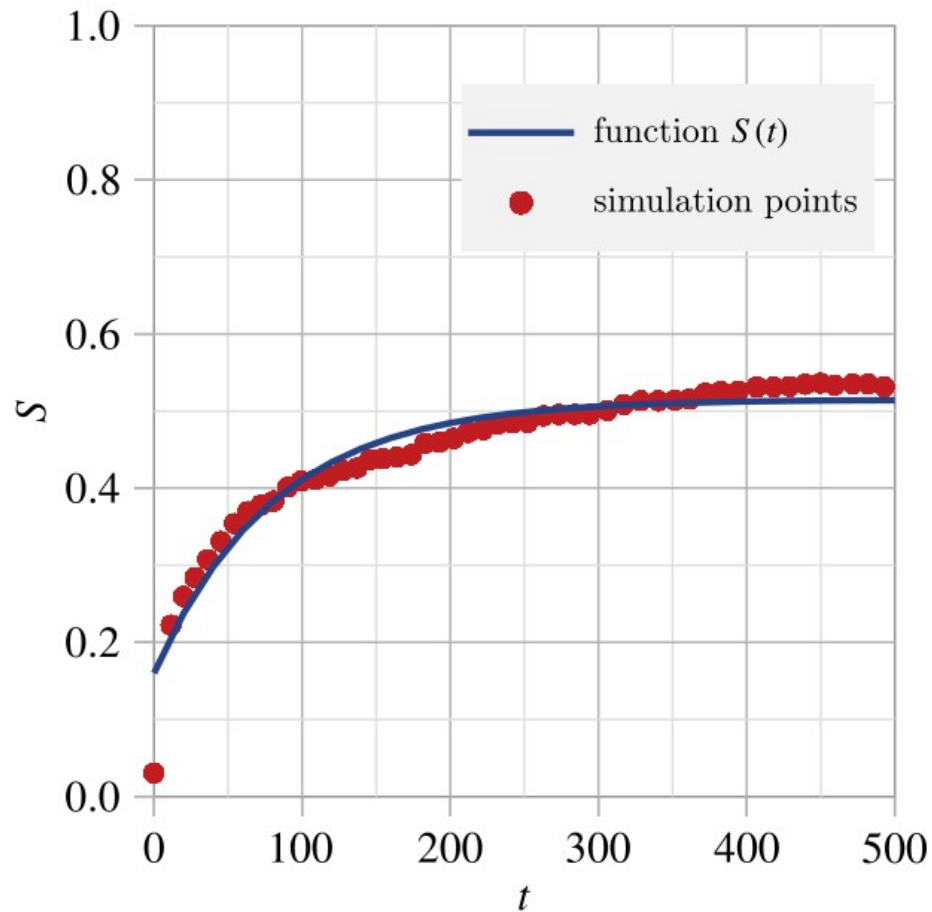
Задача-1: Моделирование пропитки (imbibition) в изолированной области



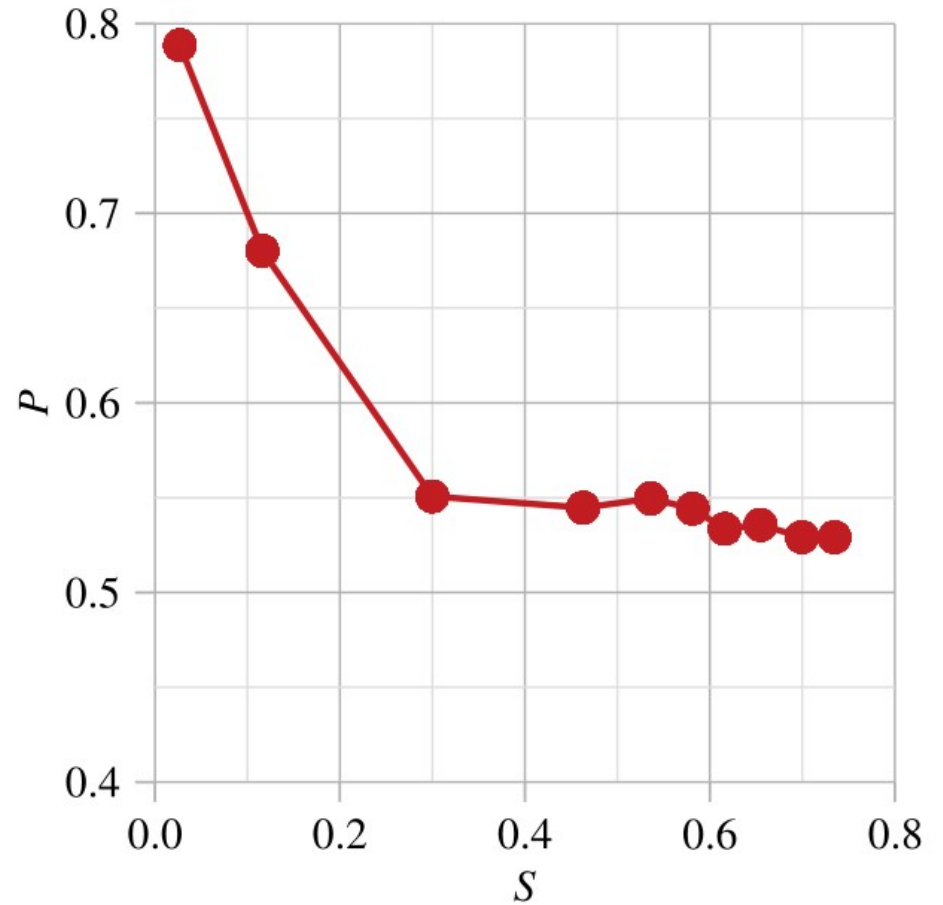
(a) $S_{\text{sys}} = 0.29$, $S_{\text{inner}} = 0$



(b) $S_{\text{sys}} = 0.29$, $S_{\text{inner}} = 0.30$



(a) Saturation vs time



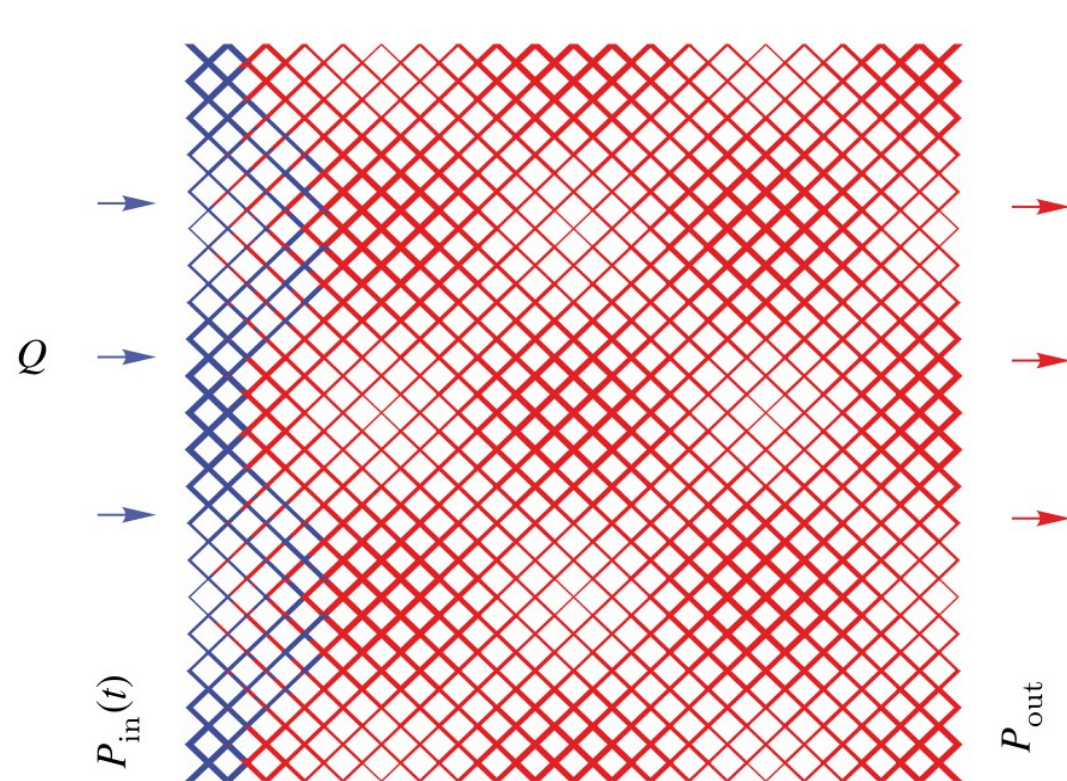
(b) Capillary pressure vs saturation

S , P , t — безразмерные величины

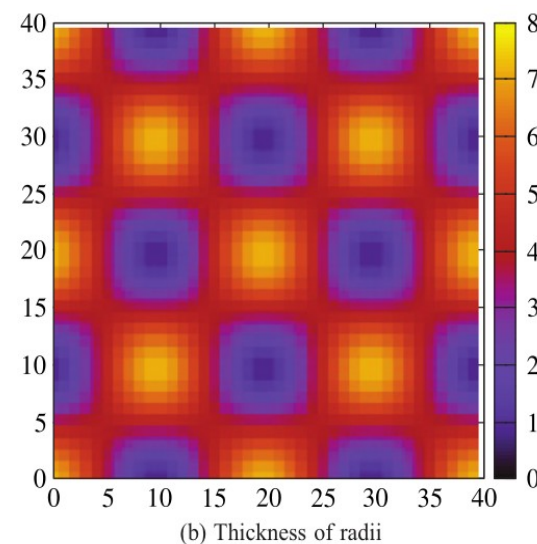
Предварительные выводы:

- 1) Насыщенность блока релаксирует к равновесному значению
- 2) Полученная равновесная капиллярная кривая имеет классический вид

Задача-2: Модель с периодической неоднородностью



Расчетная область, состоящая из 21x21 узлов. Смачивающая жидкость (обозначена синим цветом) вводится с постоянной скоростью в систему капилляров, первоначально насыщенных несмачивающей жидкостью (обозначена красным цветом)

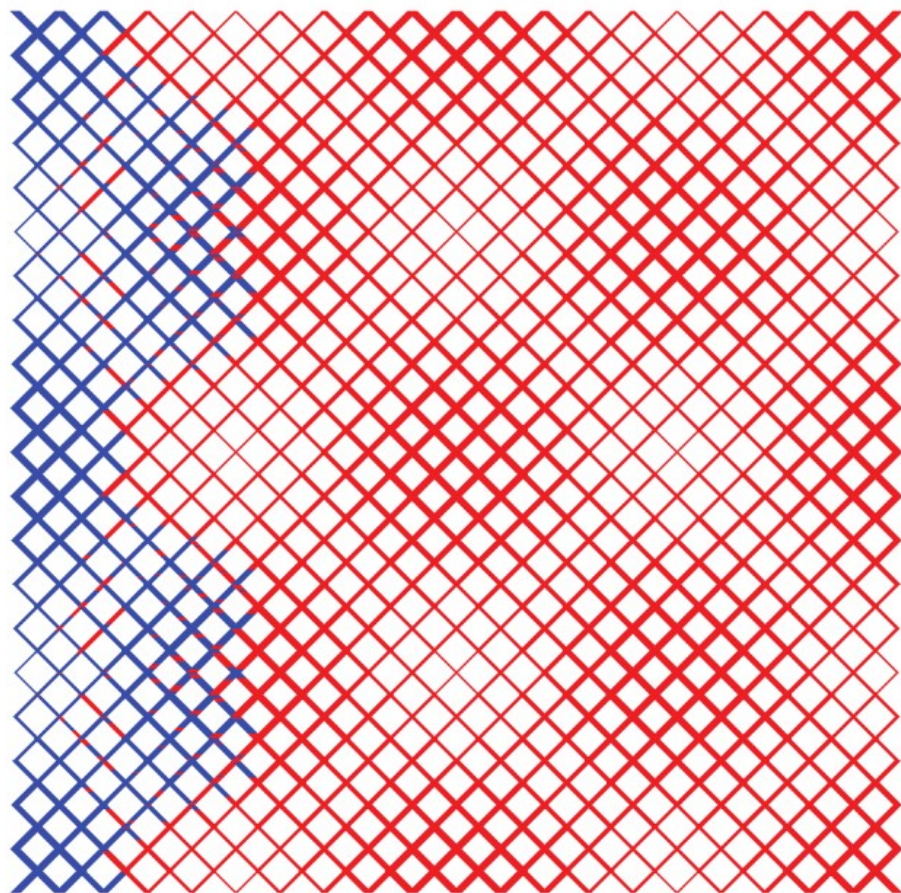


$$R(x, y) = A(1 + B \cos(k_x x) \cos(k_y y)),$$

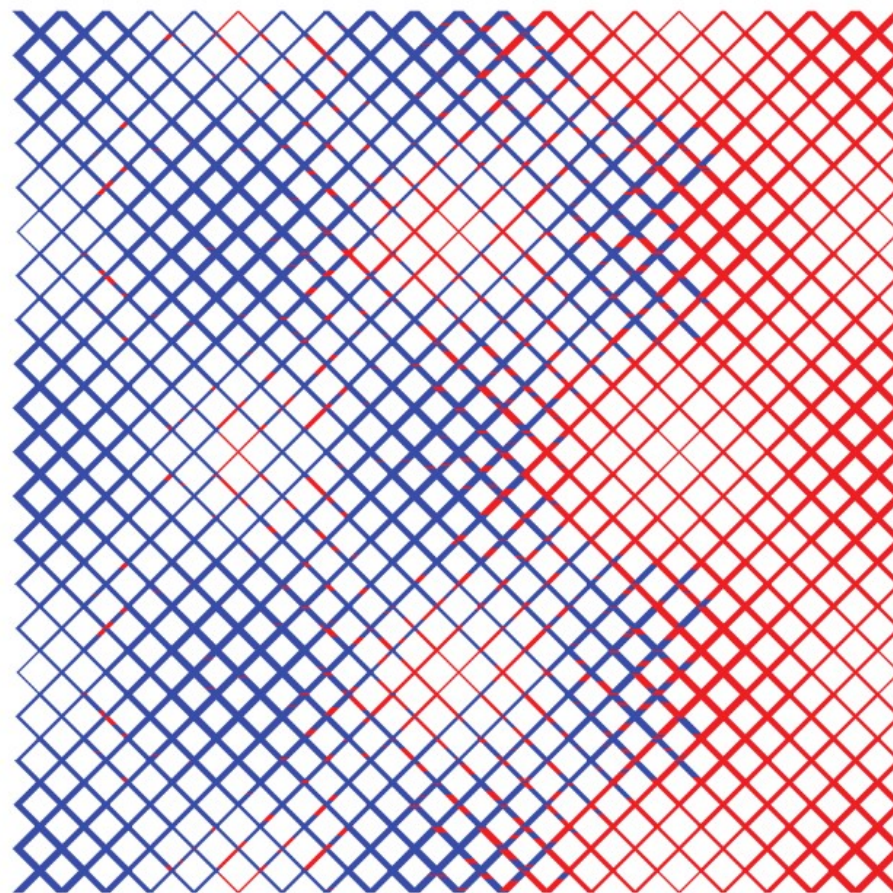
Условие постоянного объема трубок: длина капилляра согласованна с его радиусом

$$l_i = \frac{A}{r_i^2}$$

Низкое поверхностное натяжение



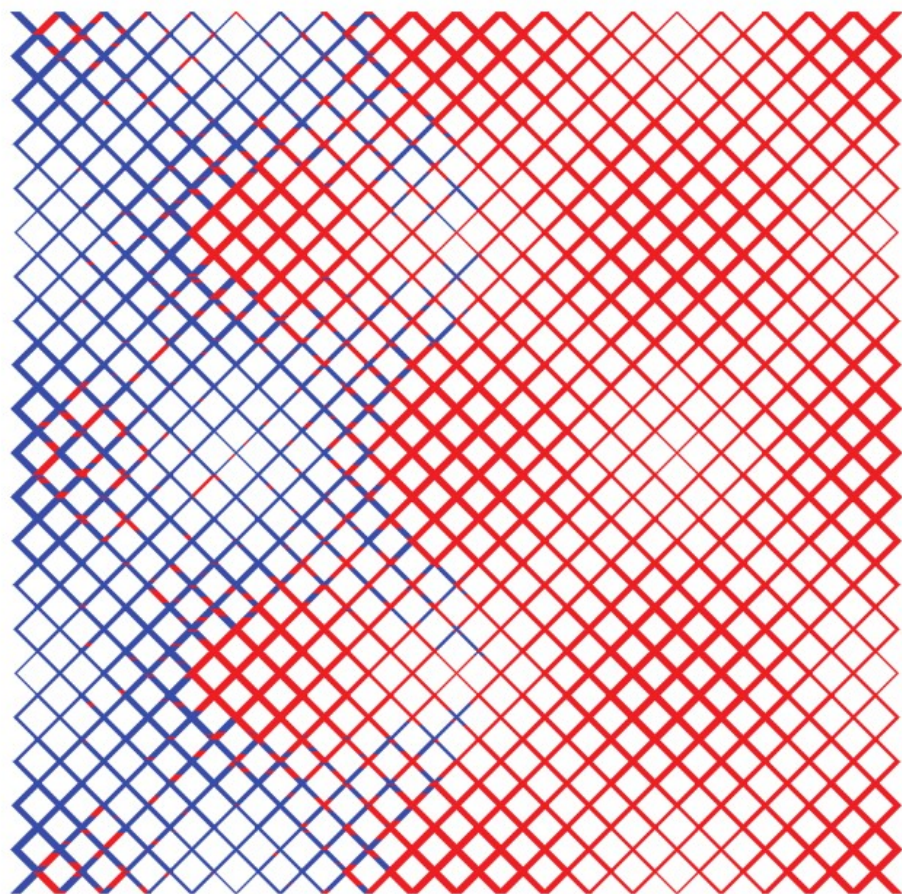
(a) $t = 2000$



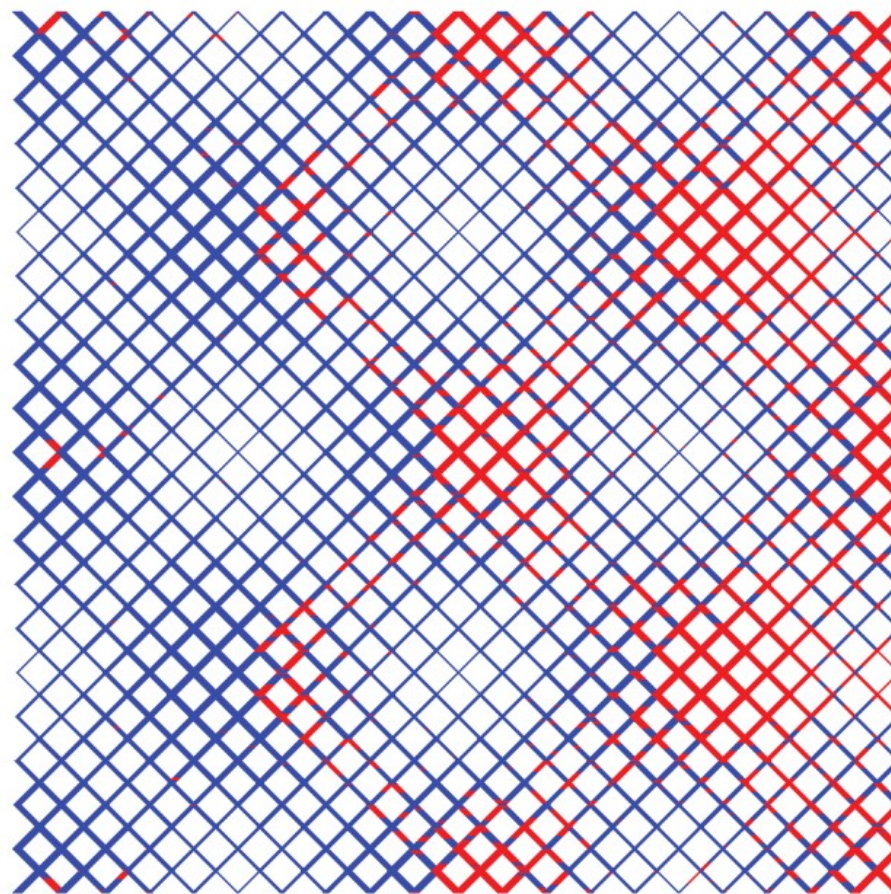
(b) $t = 6000$

Движение вытесняющей жидкости преимущественно по толстым капиллярам

Высокое поверхностное натяжение



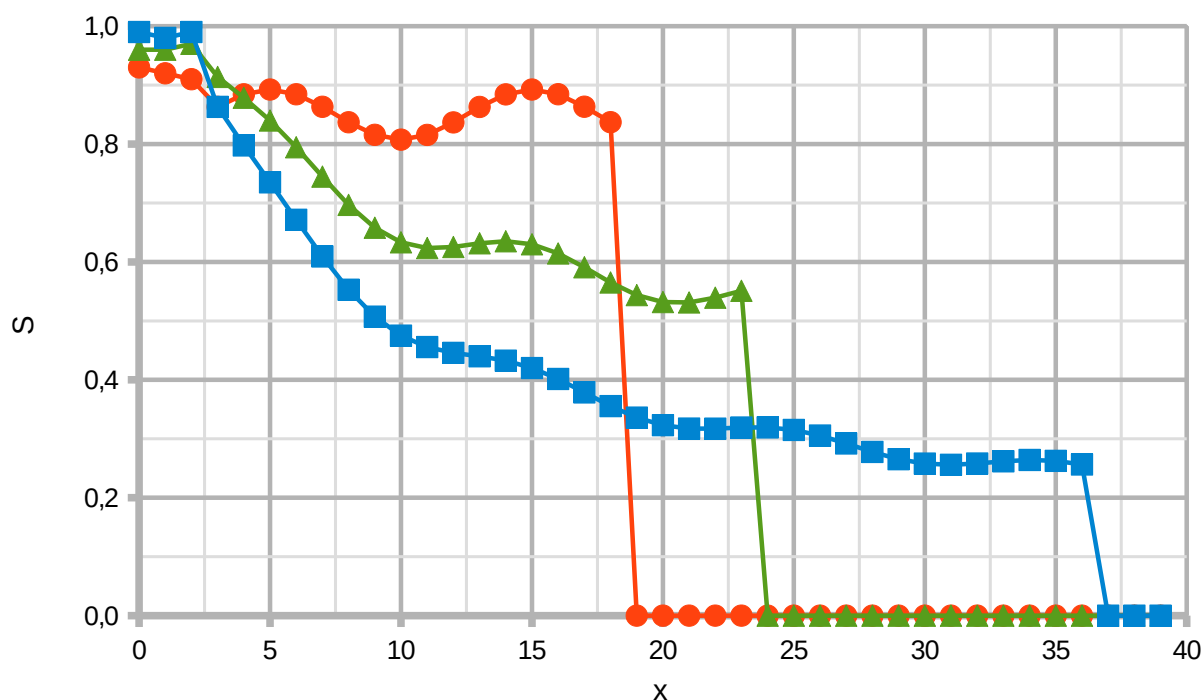
(a) $t = 2000$



(b) $t = 6000$

Движение вытесняющей жидкости преимущественно по тонким капиллярам

Моделирование вытеснения при различном расходе (различной степени неравновесности)



Чем выше расход, тем
выше неравновесность

—■— $Q=100$

—▲— $Q=50$

—●— $Q=10$

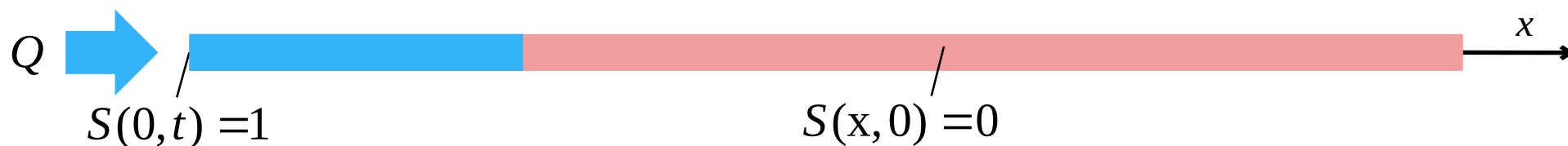
$Q = \{100, 50, 10\}$

$T = \{10, 20, 100\},$

Зависимость средней насыщенности
смачивающей жидкости S от x для различных
безразмерных объемных расходов Q в
разные моменты времени

Наблюдение: чем выше
неравновесность, тем
сильнее «убегает» скачок
насыщенности

Релаксационная модель капиллярной неравновесности Кондаурова



Неравновесная задача Баклея-Лeverетта (1D)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{Q}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} b(S, \xi) = 0$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\alpha}{\beta} (1 - S) - \xi \right)$$

$$b(S, \xi) = \frac{f_1 \left(2S + \frac{\beta}{\alpha} \xi - 1 \right)}{f_1 \left(2S + \frac{\beta}{\alpha} \xi - 1 \right) + \frac{\mu_1}{\mu_2} f_2 \left(2 - 2S - \frac{\beta}{\alpha} \xi \right)}$$

Равновесная задача Баклея-Лeverетта (1D)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{Q}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} b(S, \xi_e) = 0$$

$$\xi_e = \frac{\alpha}{\beta} (1 - S)$$

$$b_e(S, \xi_e) = \frac{f_1(S)}{f_1(S) + \frac{\mu_1}{\mu_2} f_2(1 - S)}$$

Релаксационная модель капиллярной неравновесности Кондаурова: предельные случаи

Мгновенная релаксация (равновесие)

$$\tau \rightarrow 0$$

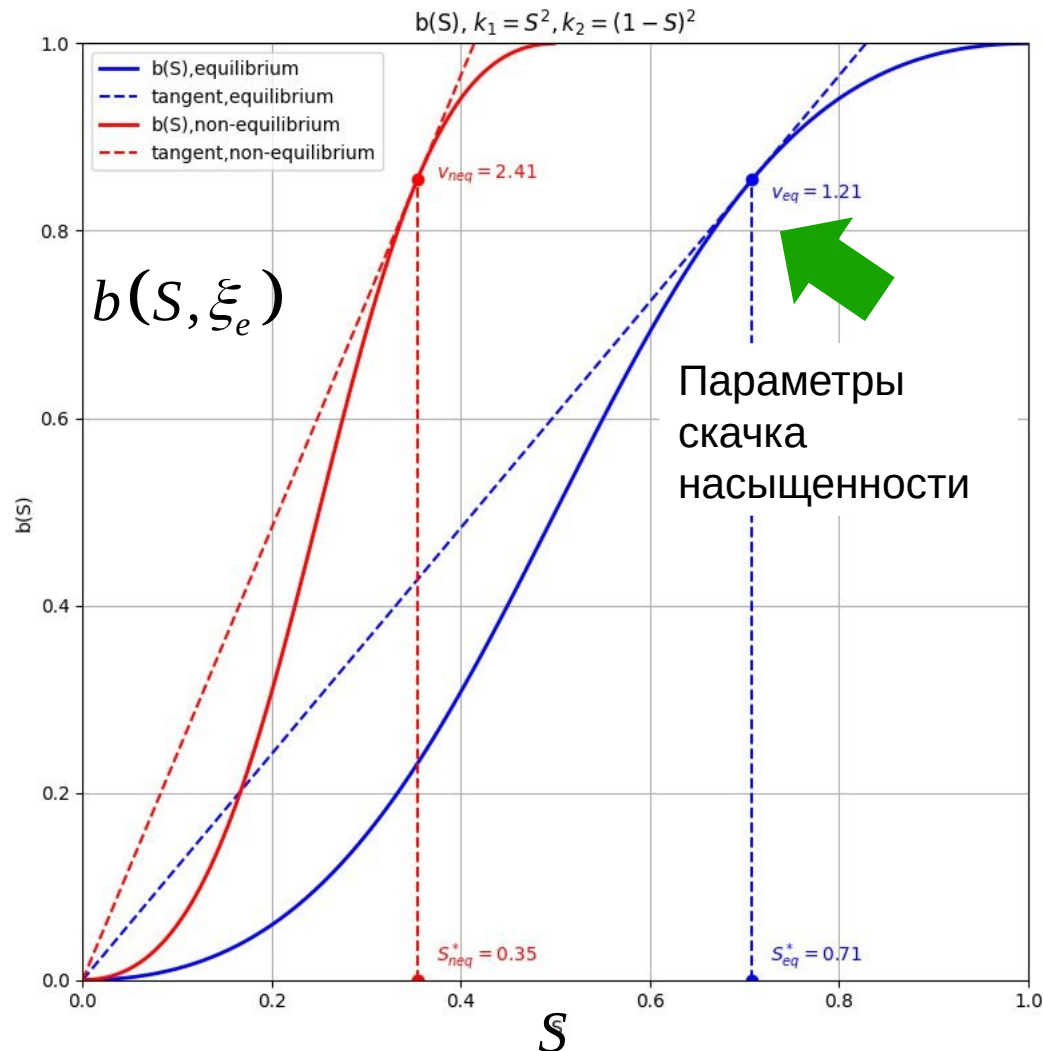
$$b_e(S, \xi_e) = \frac{f_1(S)}{f_1(S) + \frac{\mu_1}{\mu_2} f_2(1-S)}$$

$$f_1(S) = S^2 \quad f_2(S) = (1-S)^2$$

Отсутствие релаксации

$$\tau \rightarrow \infty$$

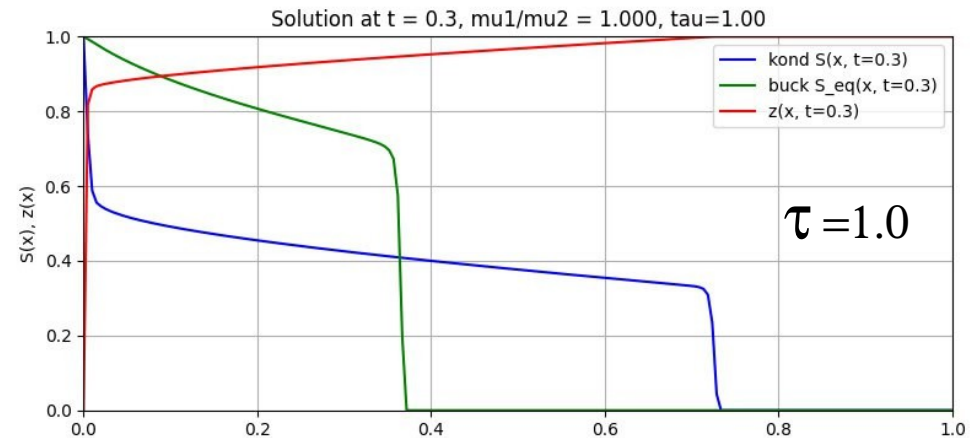
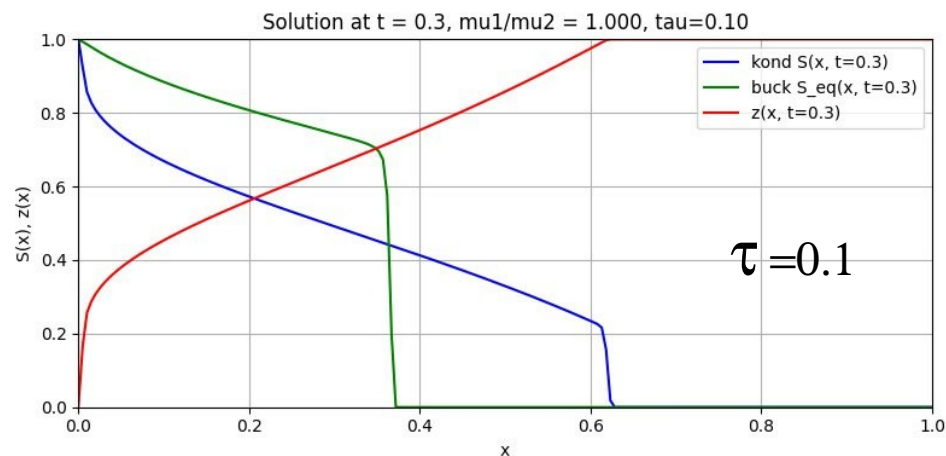
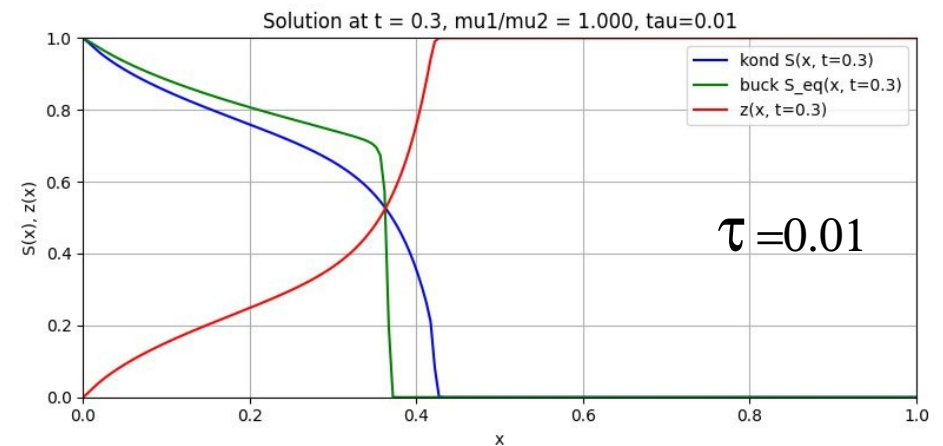
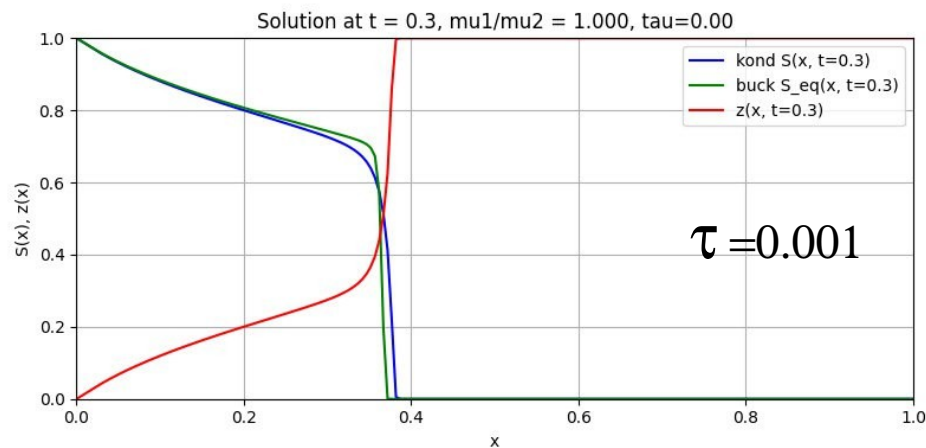
$$b_e(S, \xi_0) = \frac{f_1(2S)}{f_1(2S) + \frac{\mu_1}{\mu_2} f_2(2-2S)}$$



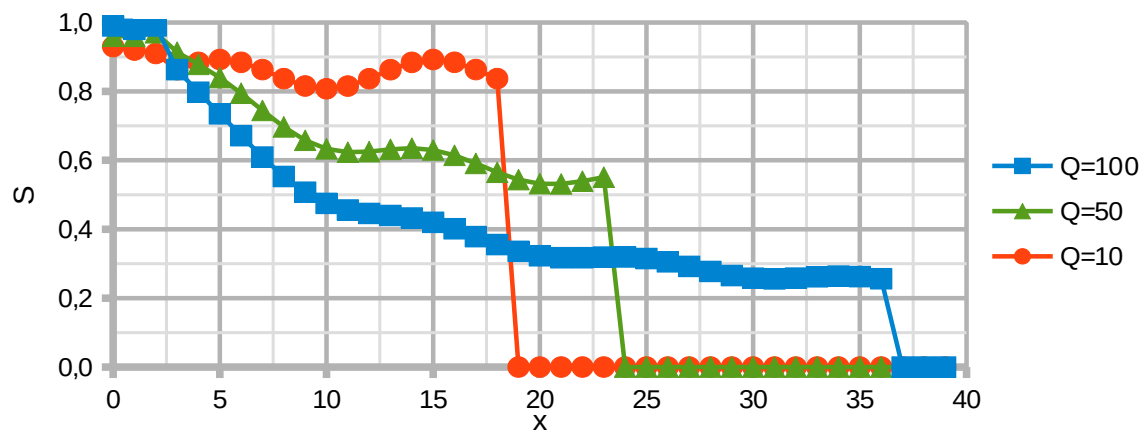
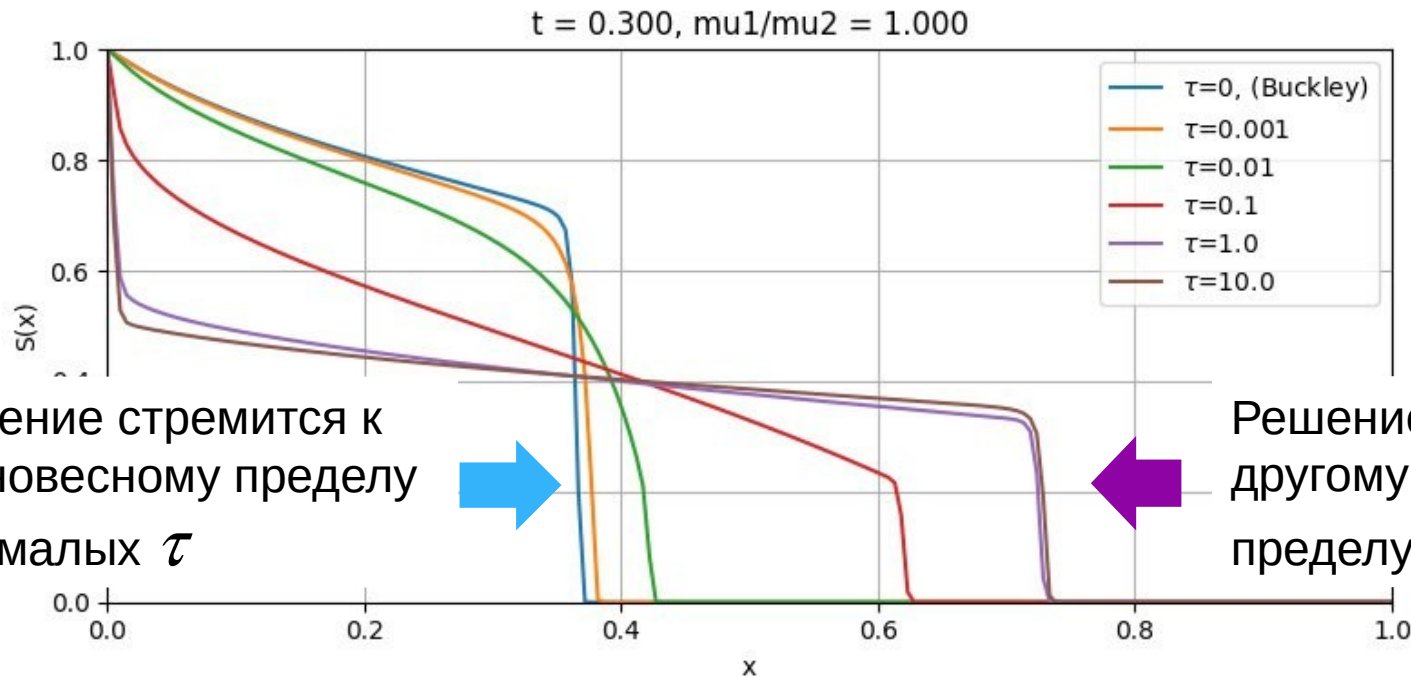
Релаксационная модель капиллярной неравновесности Кондаурова: $S(x, t)$ в определенный момент времени для различных τ

Зеленая линия – равновесная задача Баклея-Лeverетта ($\tau \rightarrow 0$)

Красная линия – параметр ξ



Релаксационная модель капиллярной неравновесности Кондаурова: сравнение с сетевой моделью



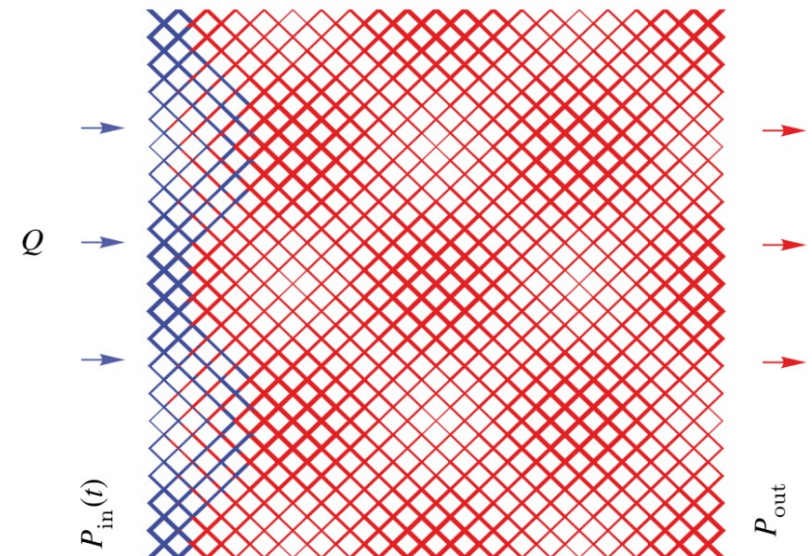
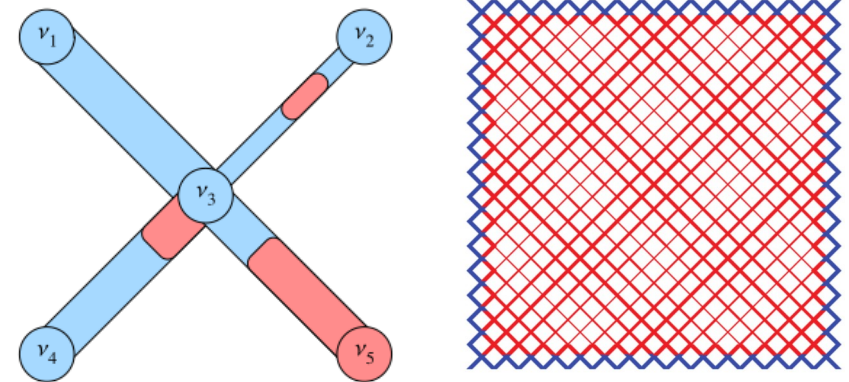
Сетевая модель с периодическими неоднородностями показывает существование скачка насыщенности и его «убегание» в неравновесном случае

Выводы

1. Предложена новая модель фильтрации на основе неоднородной сети капилляров.

2. С применением разработанной модели решены задачи о противоточной пропитке блока и о двухфазном вытеснении в неоднородной пористой среде.

3. Получено качественное соответствие результатов ($P_c(S)$, $S(x, t)$) известным теоретическим зависимостям и решениям на основе модели капиллярной неравновесности.



Публикации по результатам работы

1. Шаббир К., Извеков О. Я., Конюхов А. В., **Моделирование двухфазного течения в пористых средах с использованием неоднородной сетевой модели** // Компьютерные исследования и моделирование. 2024, Т. 16, № 4, С. 913–925.
2. Шаббир К., Извеков О. Я., Вамси Б., **Моделирование пропитки пористой среды с помощью двумерной сетевой модели** // Труды МФТИ. 2024, Т. 18, №. 2, С. 41–50.
3. Шаббир К., Извеков О. Я., Конюхов А. В. Моделирование процессов вытеснения в пористых средах с периодической неоднородностью // Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 1–5 апреля 2025 г. Аэрокосмические технологии. — М: Физматкнига. 2025
4. Шаббир К., Извеков О. Я., Конюхов А. В. Моделирование противоточной капиллярной пропитки на основе сетевой (network) модели // VII Международная Конференция Триггерные Эффекты В Геосистемах 2–5 Июля 2024 Г., Долгопрудный, Тезисы Докладов, С. 54.
5. Шаббир К., Извеков О., Конюхов А., Моделирование двухфазного потока в пористой среде с использованием двумерной сетевой модели // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 1–6 апреля 2024 г. Аэрокосмические технологии. — М: Физматкнига. 2024, С. 164–166, ISBN 978-5-89155-411-5.
6. Вамси Б., Шаббир К., Извеков О., Моделирование двухфазного течения в пористых средах с использованием трехмерной сетевой модели // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 1–6 апреля 2024 г. Аэрокосмические технологии. — М: Физматкнига, 2024, С. 159–161, ISBN 978-5-89155-411-5.
7. Shabbir K., Izvekov O., Konyukhov A., Simulation of Two-Phase Flow in Porous Media using a Two-Dimensional Network Model // The International Summer Conference on Theoretical Physics 03.07.2023.
8. Shabbir K., Simulation of Two-Phase Flow in Porous Media using a Two-Dimensional Network Model // Труды 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ в честь 115-летия Л. Д. Ландау, 3–8 апреля 2023 г. Аэрокосмические технологии. — М: Физматкнига, 2023, С. 205–206, ISBN 978-5-89155-388-0.

Спасибо!

