

Тема дипломной работы: **Сетевая модель двухфазной фильтрации в неоднородных пористых средах**

Шаббир Кафи Ул, М03-3046

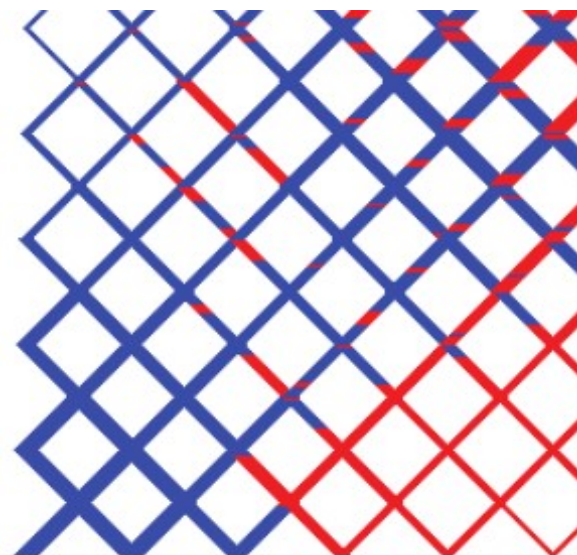
Центр образовательных программ ФАКТ, МФТИ

Научный руководитель: Извеков О. Я.

ГК-211, 11:00, 19.05.2025

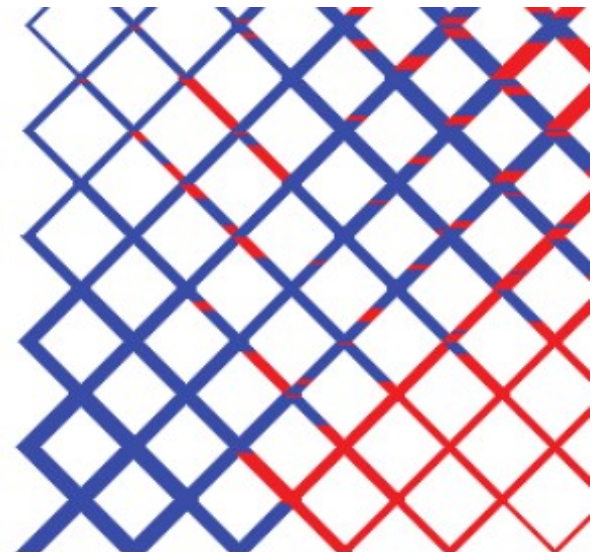
Содержание

1. Мотивация и цель
2. Способы моделирования
3. Наша сетевая модель
4. Задачи
 1. пропитки (imbibition)
 2. течение с периодической неоднородностью
 3. постоянная пористость
 4. модель Кондаурова
5. Выводы



1. Мотивация и цель

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



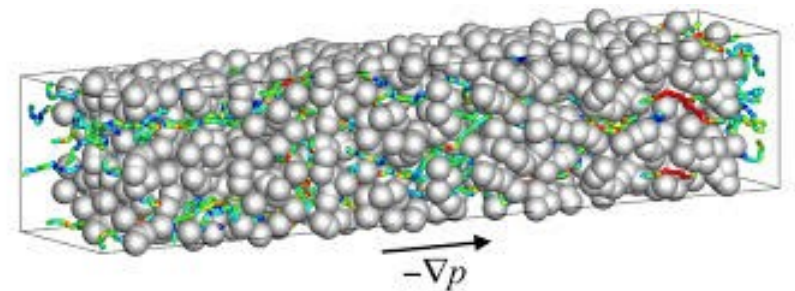
2.1 Классический подход (Дарси)

- Поток происходит в состоянии равновесия.
- Достаточно времени для перераспределения жидкости в капиллярах.
- Перестает работать в средах с неоднородностями, когда время установления равновесия велико.

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

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

$$K = K(S)$$

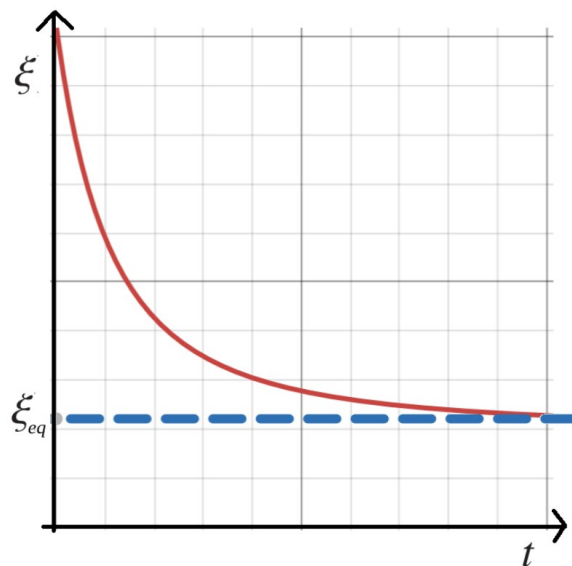


2.2 Усложненные модели

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

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

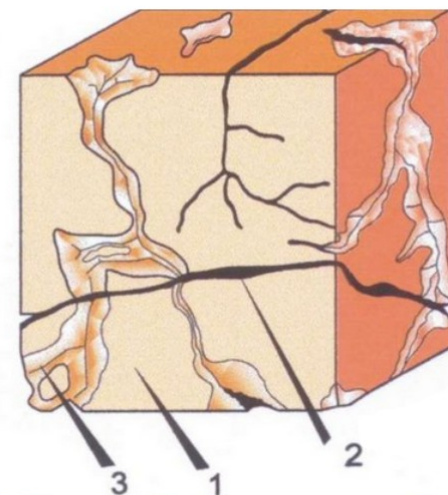
Hassanizadeh S. Continuum description of thermodynamic processes in porous media: Fundamentals and applications // 2004.



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

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

**Модель
неравновесности
Кондаурова**

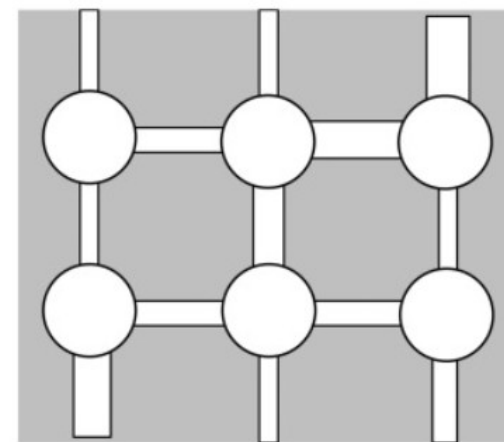
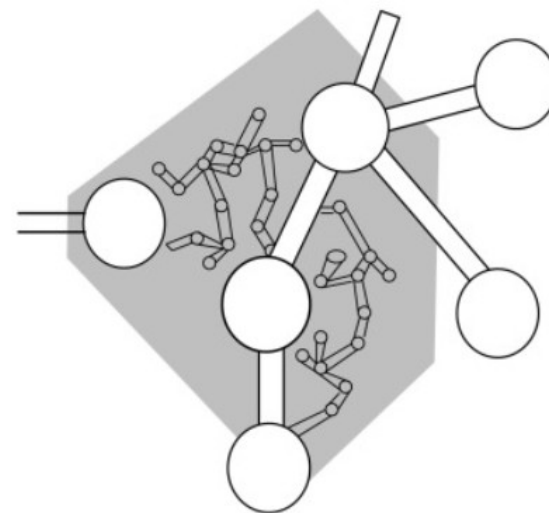


1 - Матрица
2 - Макротрещины
3 - Измененная часть
породы с кавернами
и микротрещинами

**Подход двойной
пористости**

2.3 Сетевая модель

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



2.3 Разные сетевые модели

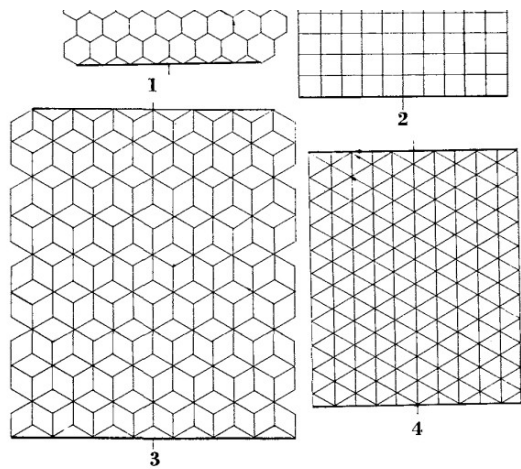
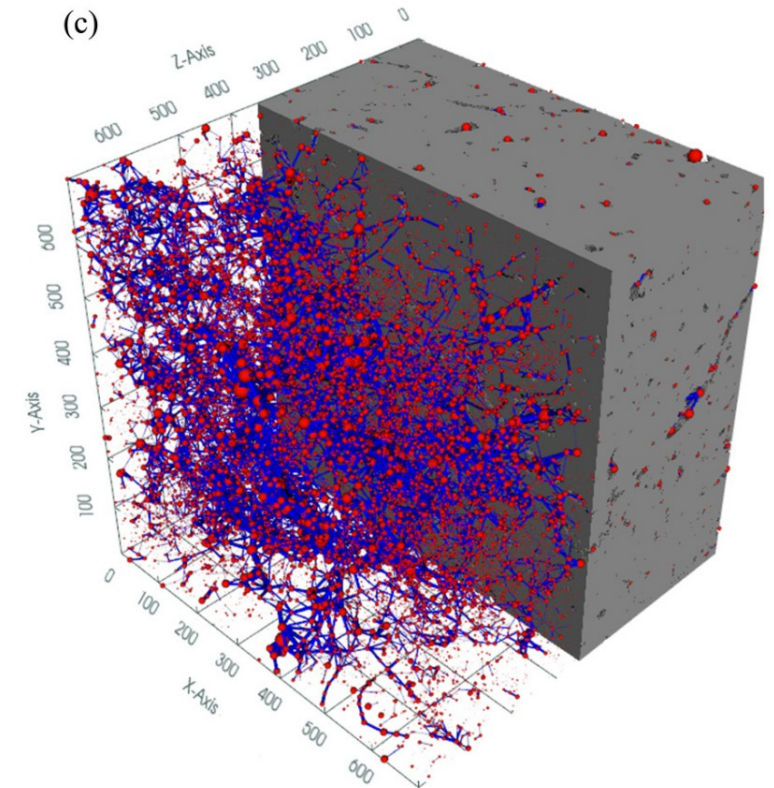
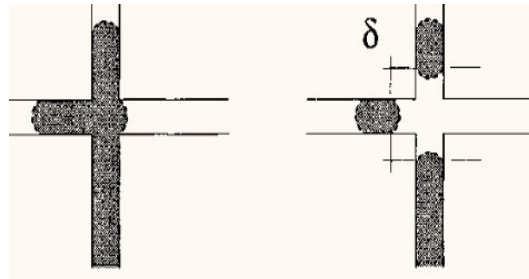
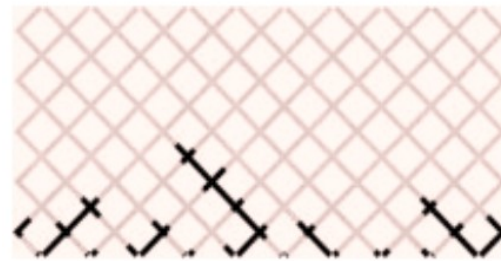


FIG. 1—SINGLE HEXAGONAL NETWORK.
FIG. 2—SQUARE NETWORK.
FIG. 3—DOUBLE HEXAGONAL NETWORK.
FIG. 4—TRIPLE HEXAGONAL NETWORK.



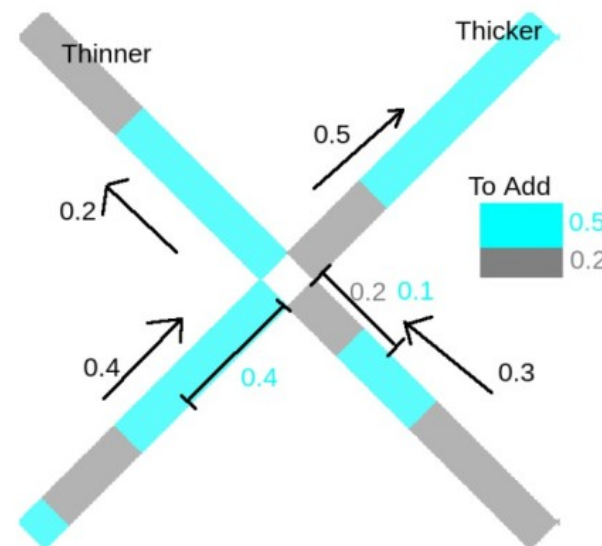
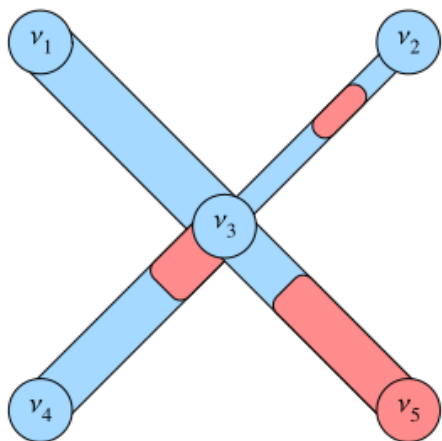
Fatt I // 1956, USA

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

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

3. Наша 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.

3 Алгоритм

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

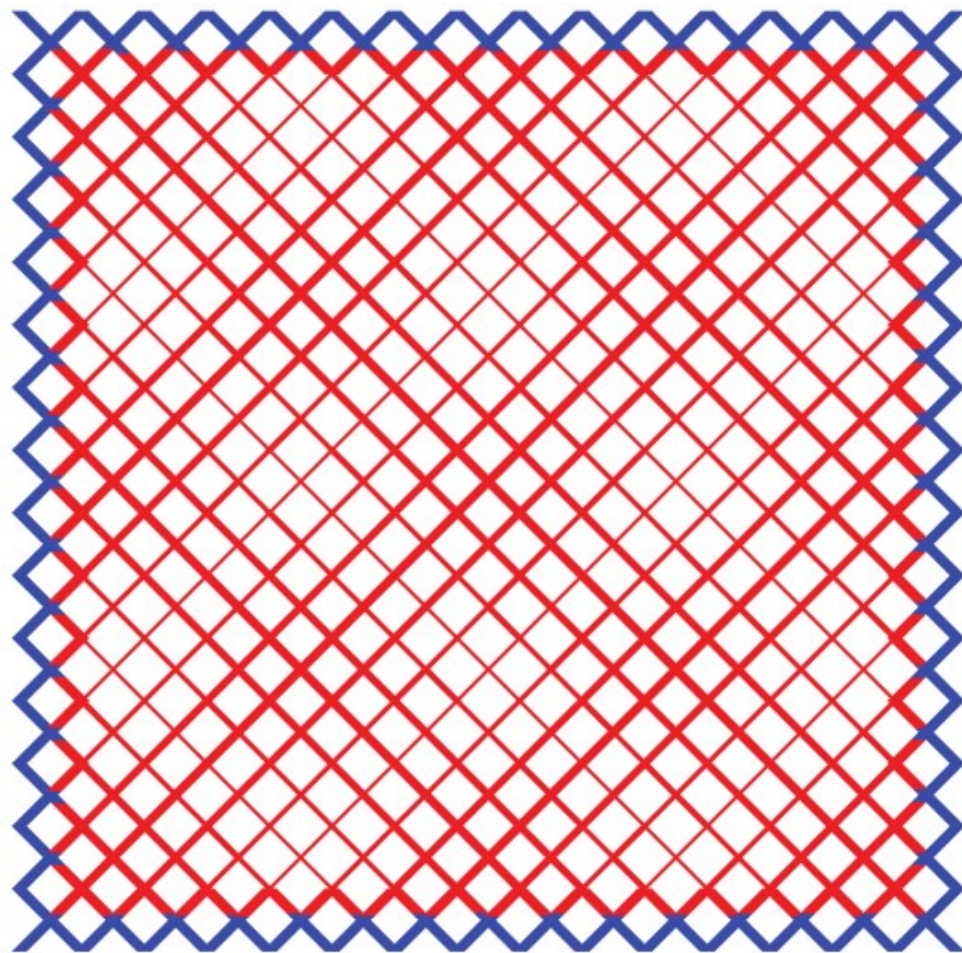
$$Q_{ij} = A_{ij} \Delta P_{ij} + B_{ij},$$

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

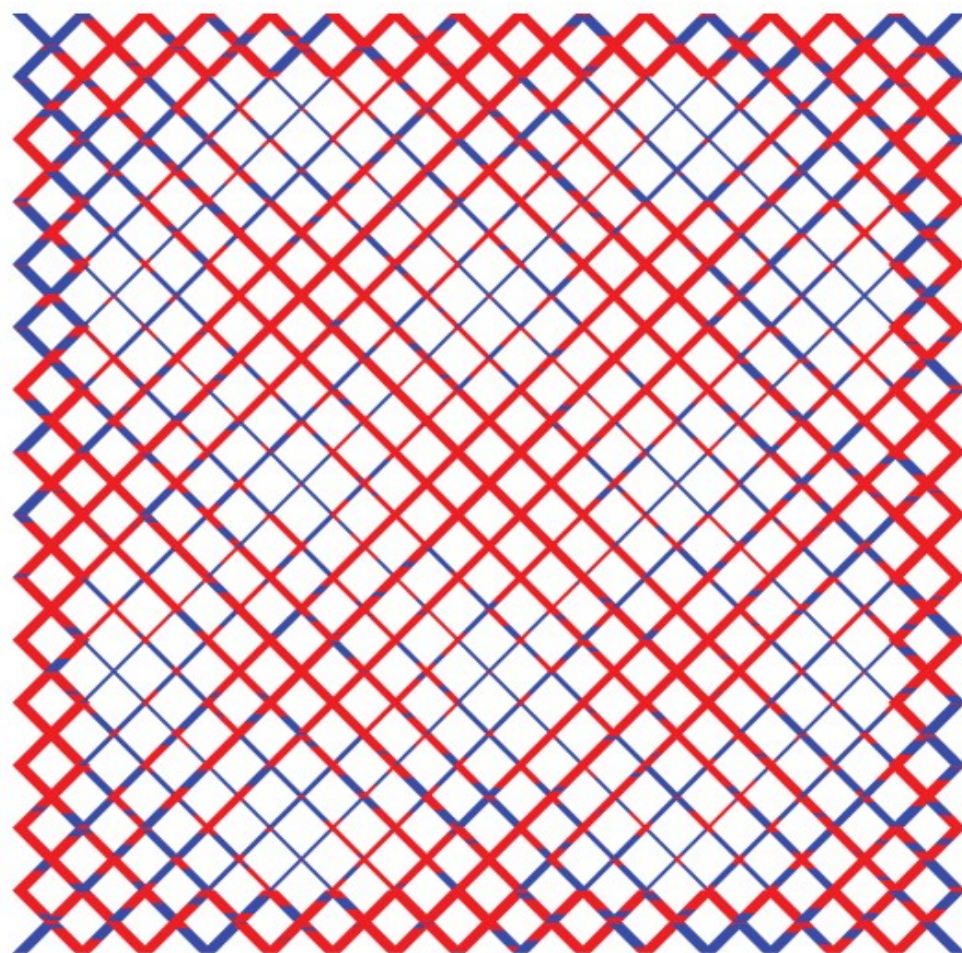
$$B_{ij} = \frac{\pi R_{ij}^4}{8 M_{ij} l} \frac{2 s_{ij} \sigma}{R_{ij}},$$

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

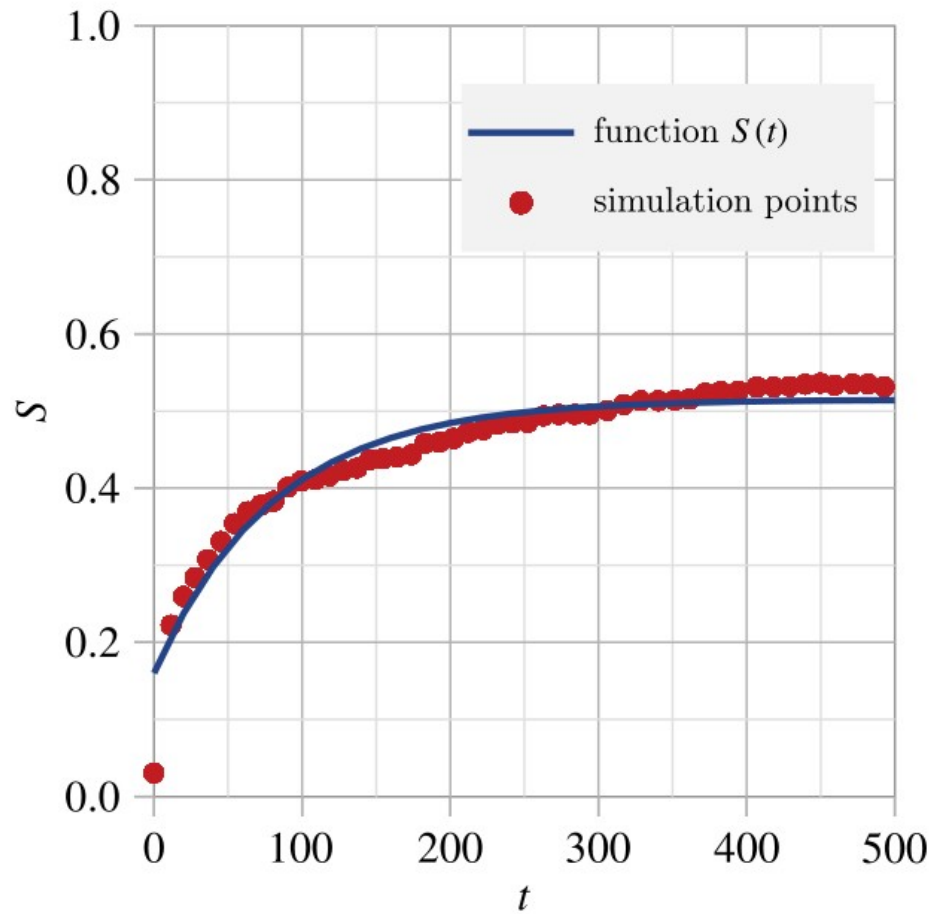
Задача-1: Моделирование пропитки (imbibition)



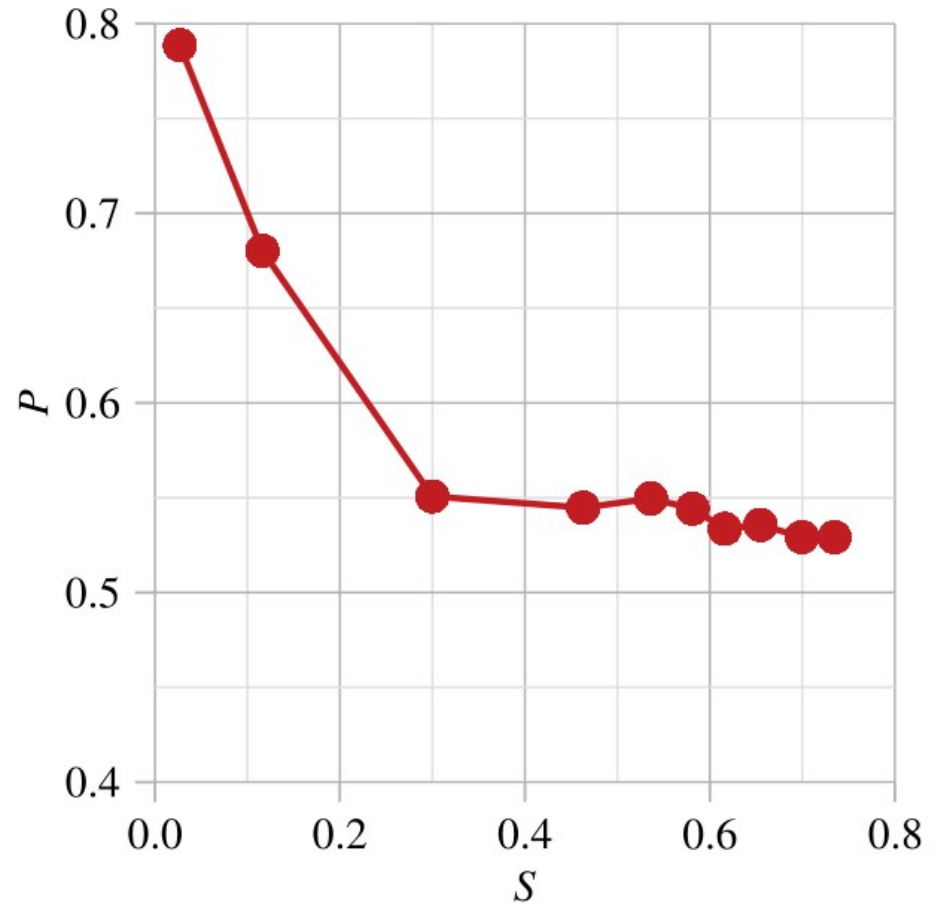
(a) $S_{\text{sys}} = 0.29, S_{\text{inner}} = 0$



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



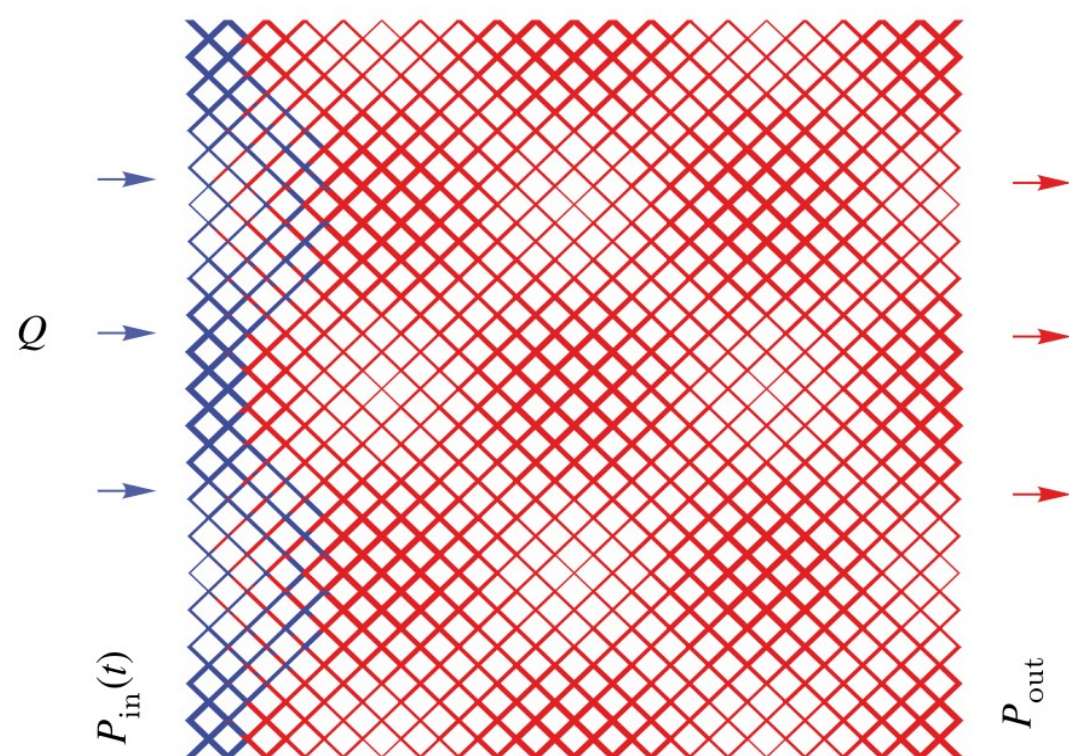
(a) Saturation vs time



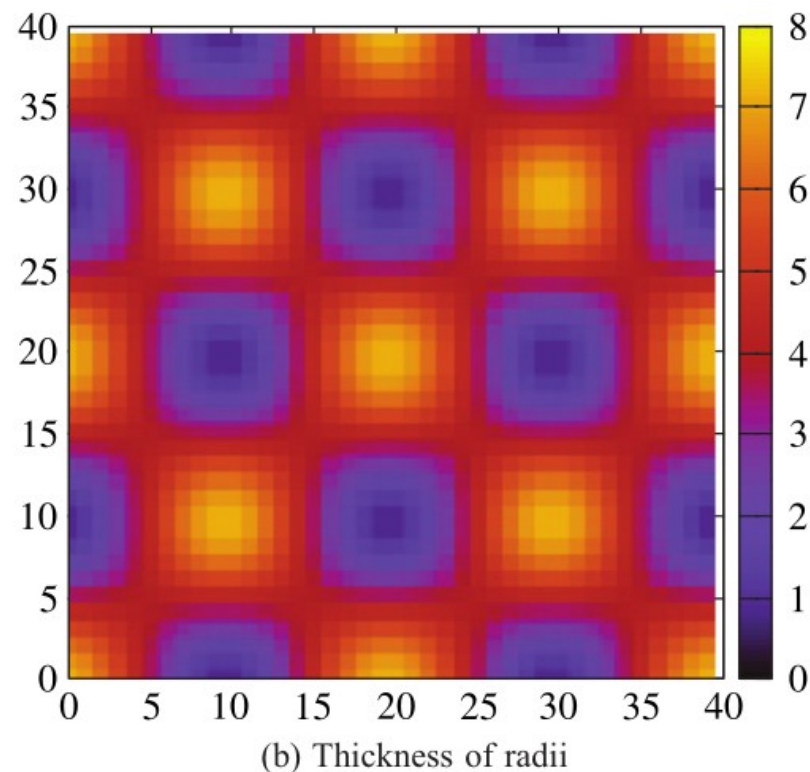
(b) Capillary pressure vs saturation

S, P, t — безразмерные величины

Задача-2: Модель с периодической неоднородностью

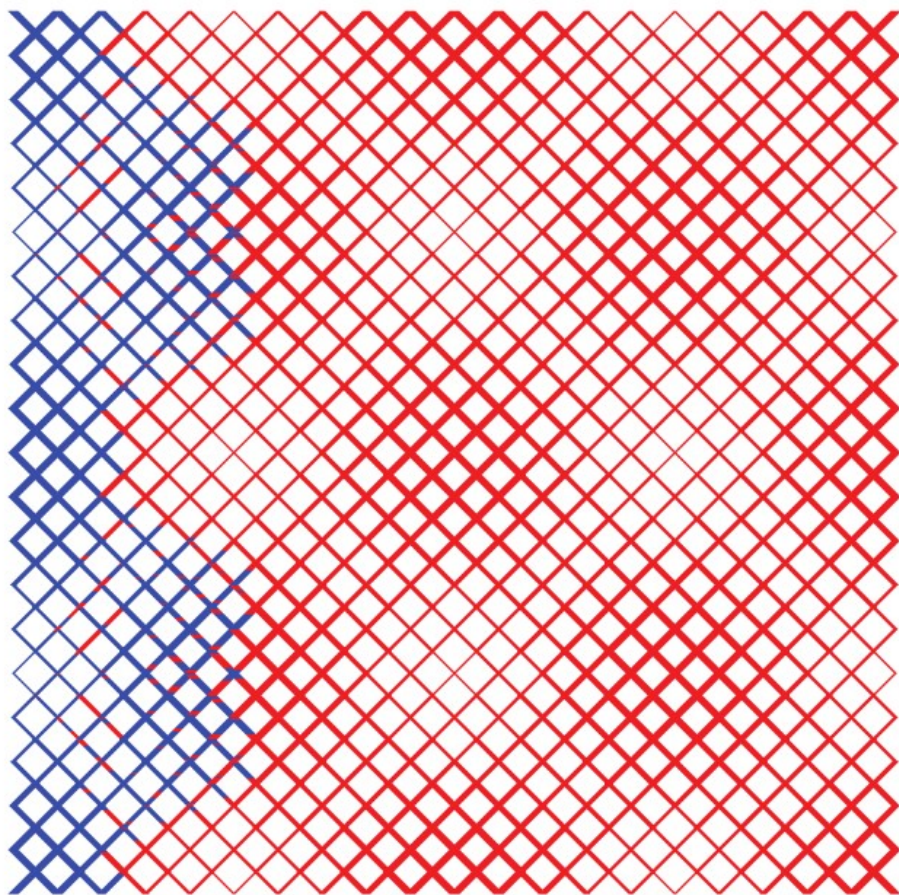


Расчетная область, состоящая из 21x21 узлов. Смачивающая жидкость (обозначена синим цветом) вводится с постоянной скоростью в систему капилляров, первоначально насыщенных несмачивающей жидкостью (обозначена красным цветом)

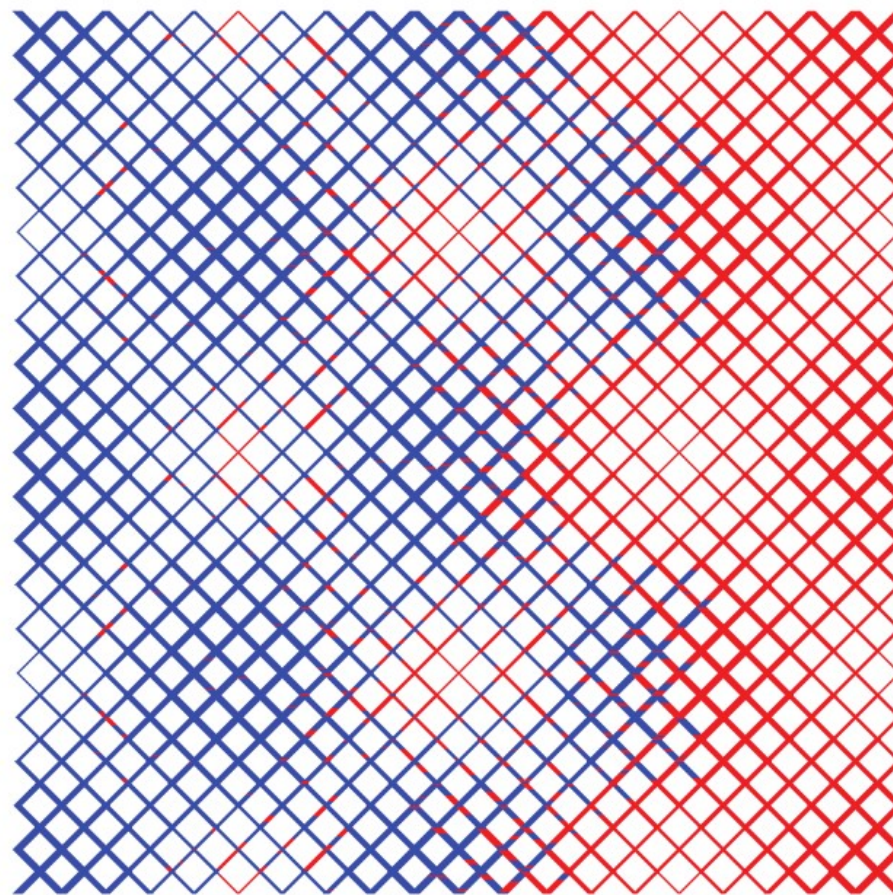


$$R(x, y) = A(1 + B \cos(k_x x) \cos(k_y y)),$$

Потока с трубками одинаковой длины и различного радиуса



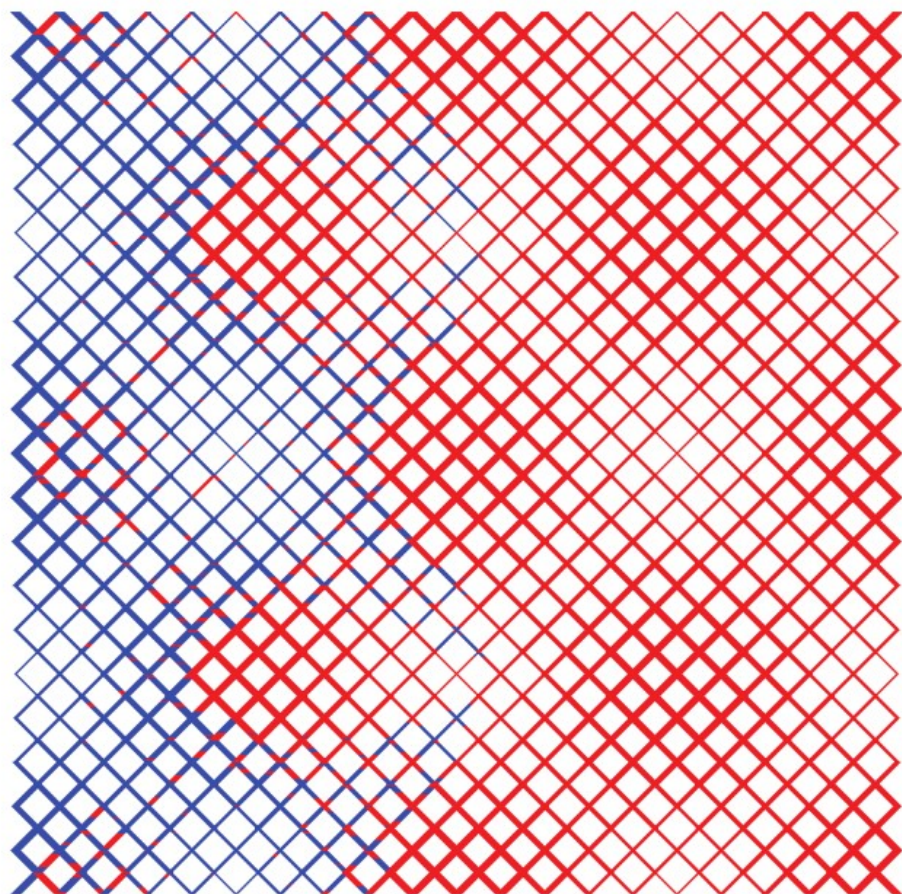
(a) $t = 2000$



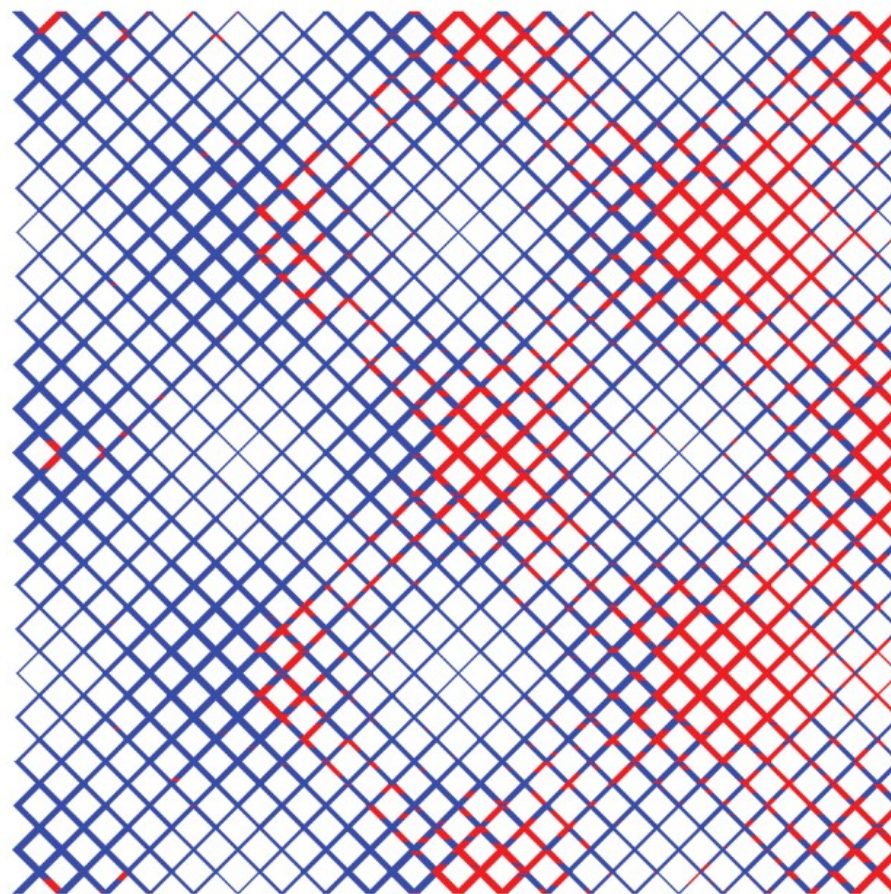
(b) $t = 6000$

Низкое поверхностное натяжение

Потока с трубками одинаковой длины и различного радиуса



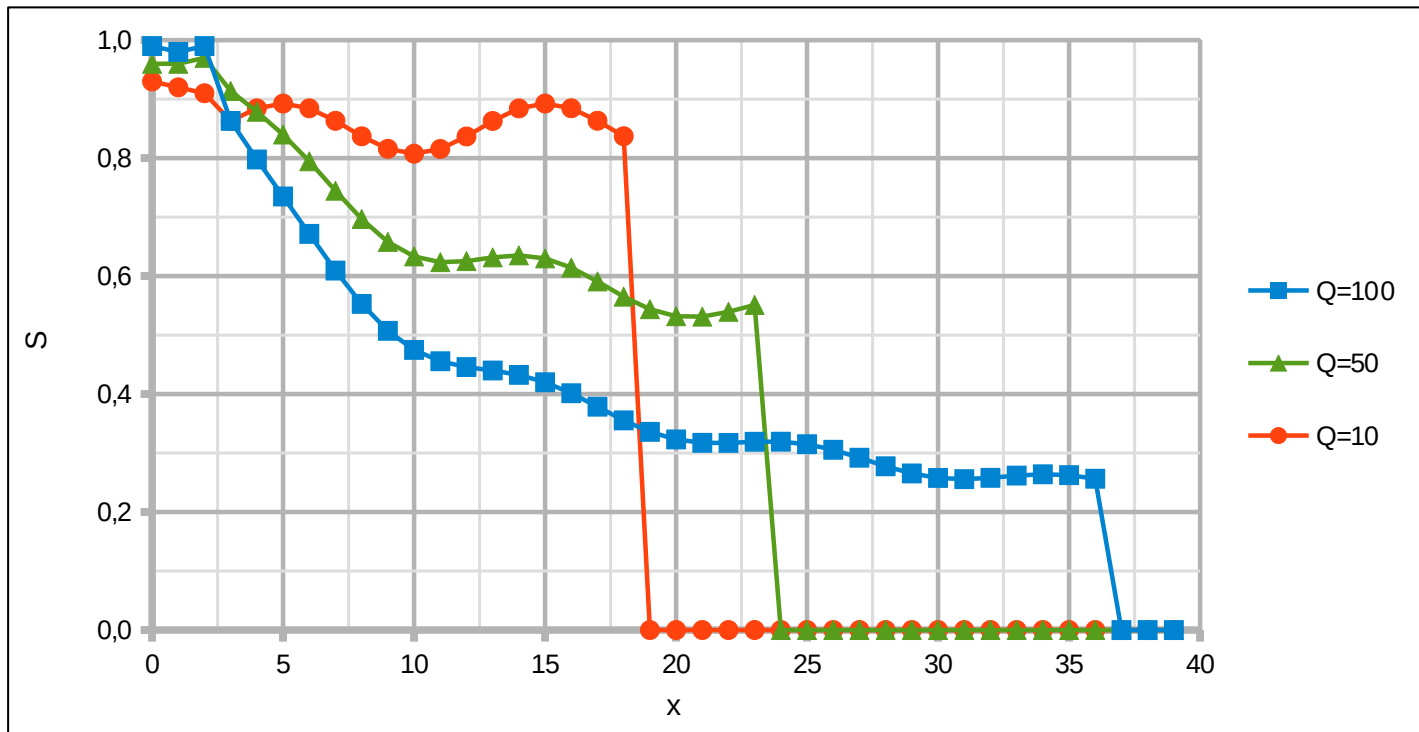
(a) $t = 2000$



(b) $t = 6000$

Высокое поверхностное натяжение

Задача-3: Потока с трубками одинакового объёма и различного радиуса (среда с однородной пористостью и переменной проницаемостью)



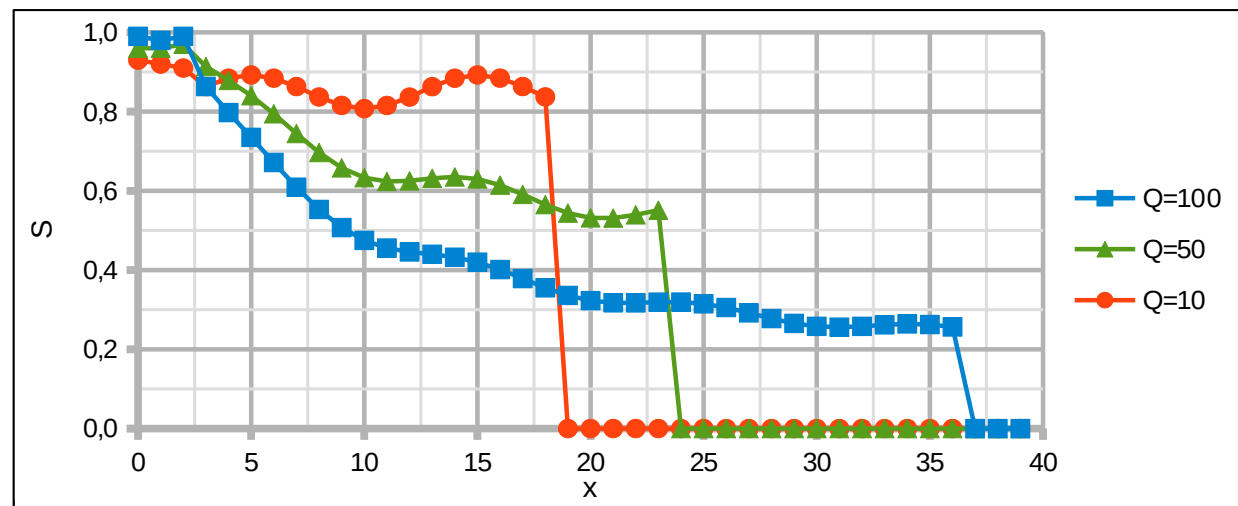
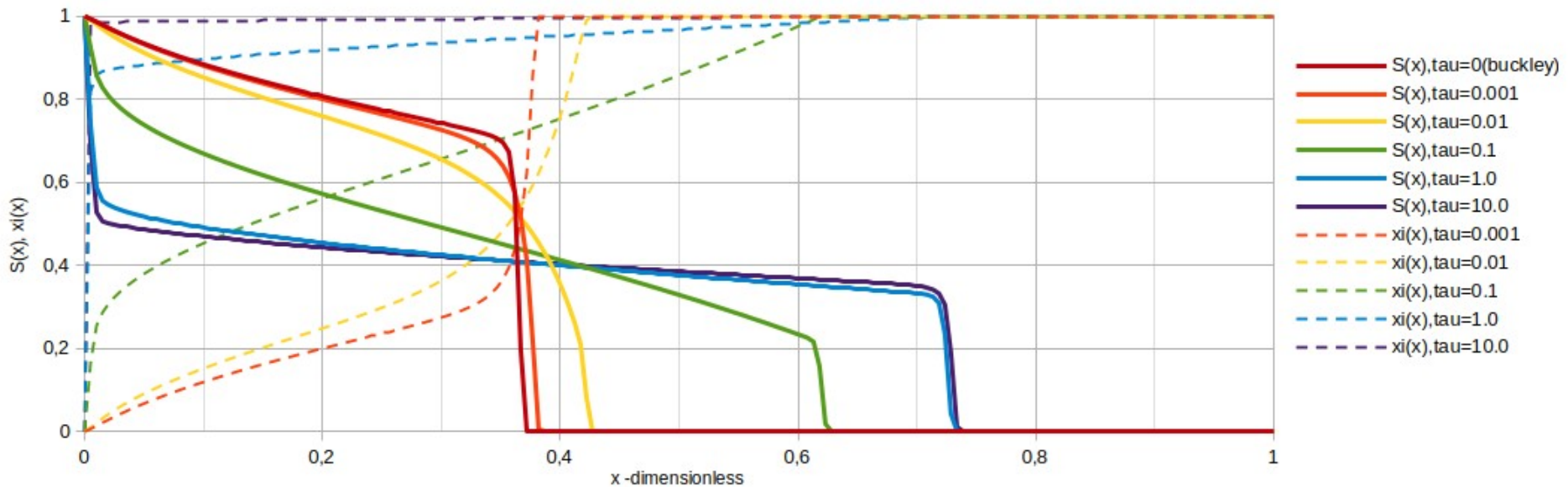
$$l_i = \frac{A}{r_i^2}$$

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

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

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

Задача-4: Аналитическое решение на основе модели Кондауровой



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

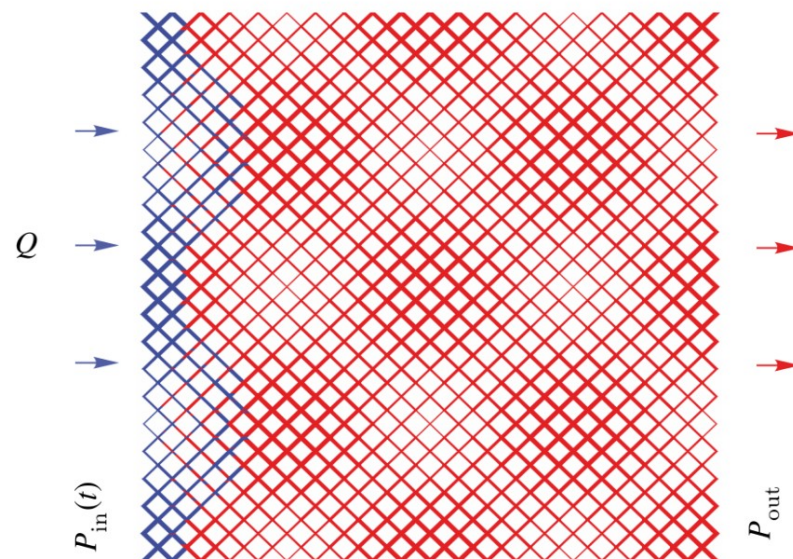
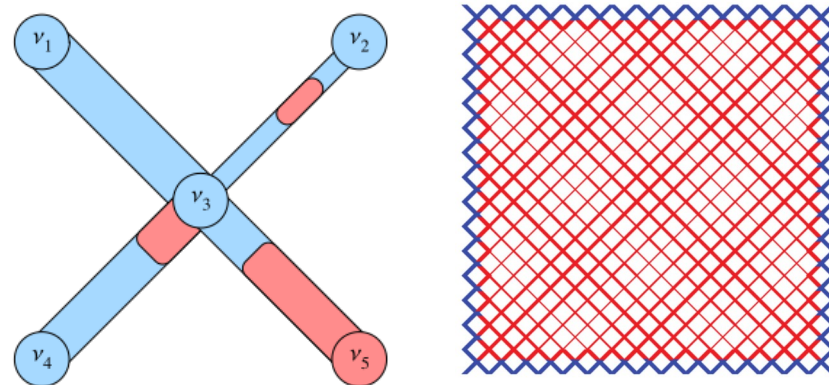
$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \Omega(S, \xi).$$

5. ВЫВОодЫ

Та же сетевая модель смогла объяснить процесс пропитки, а полученные кривые течения подтвердили адекватность континуальных моделей.

Таким образом, наша сетевая модель пригодна для моделирования и других явлений.

Работа будет продолжена в аспирантуре.



Достижения

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! Вопросы пожалуйста.

