

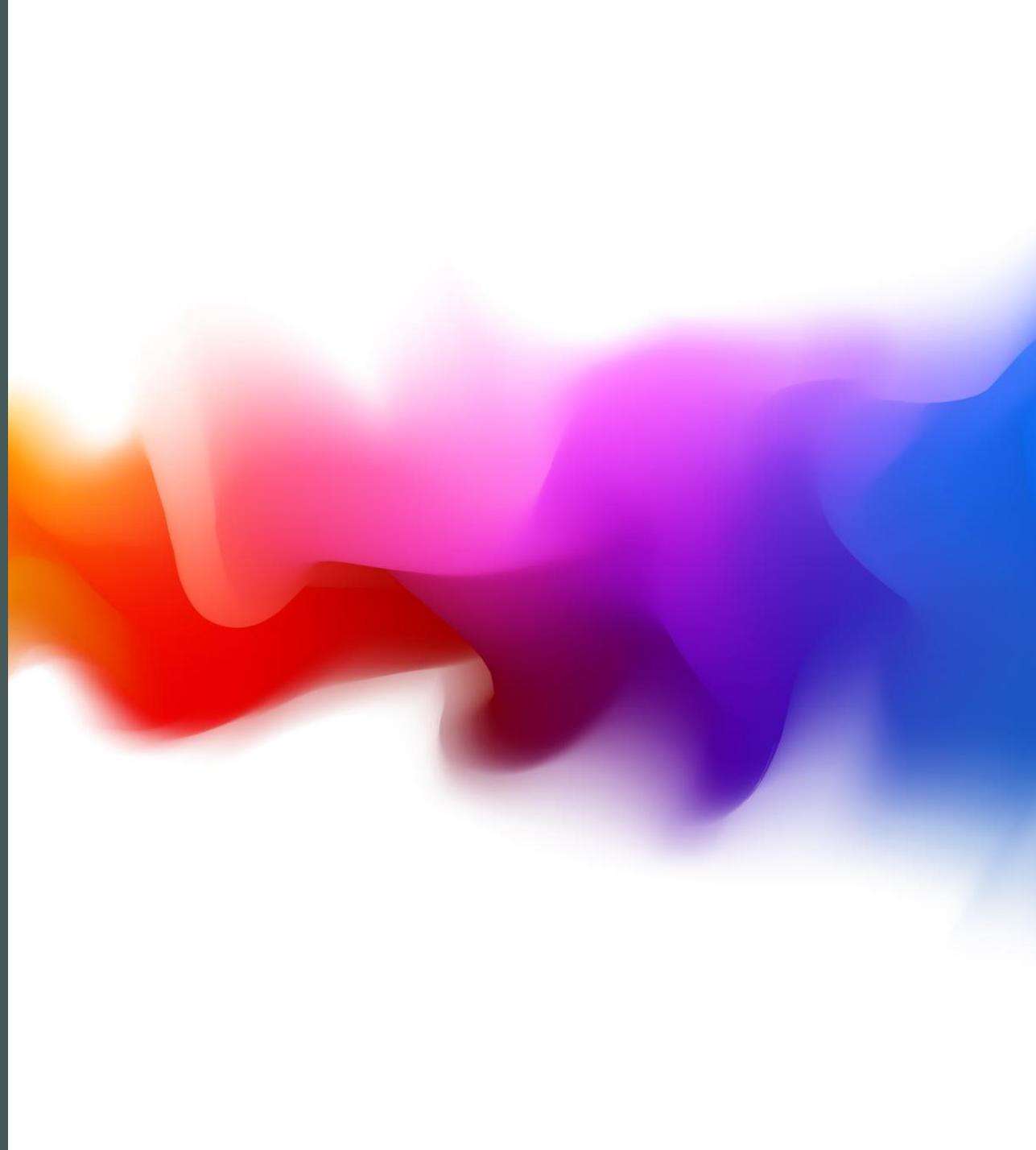
Капиллярная модель пористой среды, построенная на основании данных томографического исследования керна

Тюменский научный центр СО РАН

Симонов Олег Анатольевич – заместитель
директора ТюмНЦ СО РАН

Ю. Ю. Ерина – аспирант ТюмГУ

Снежинск - 2025



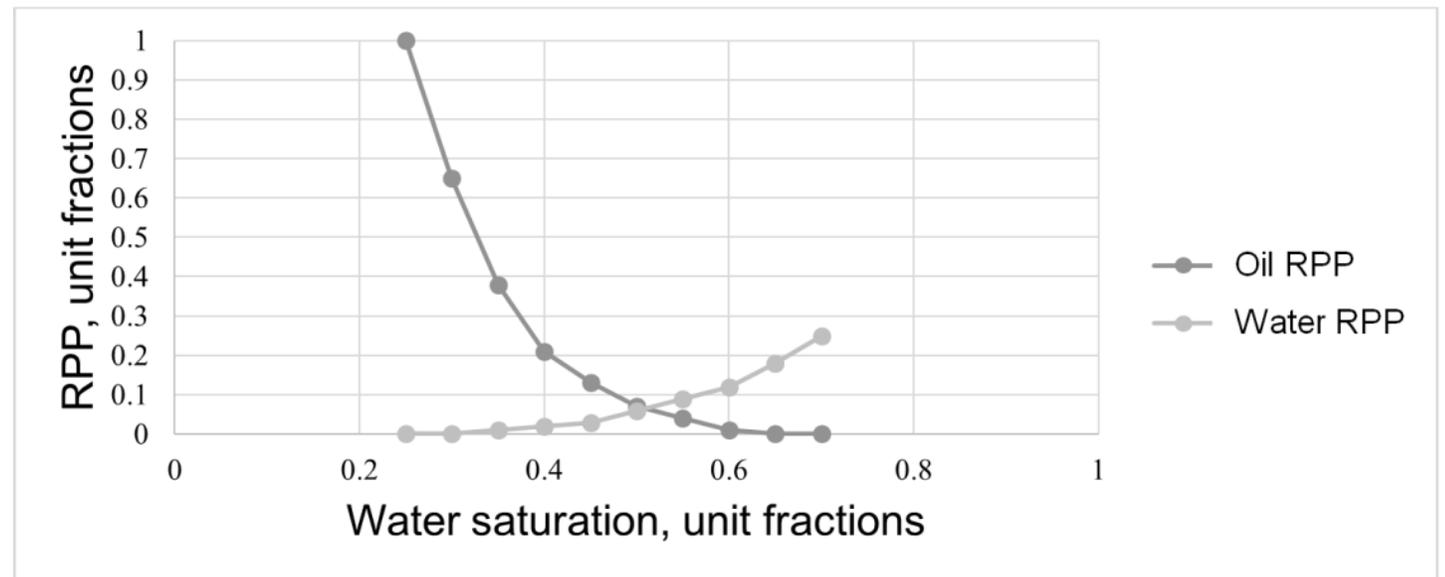
Многофазная фильтрация: классическая, нерешенная задача

В настоящий момент основа гидродинамического моделирования в нефтегазодобыче – закон Дарси.

$$\vec{w}_i = -k \frac{k_i}{\eta_i} \vec{\text{grad}} P,$$

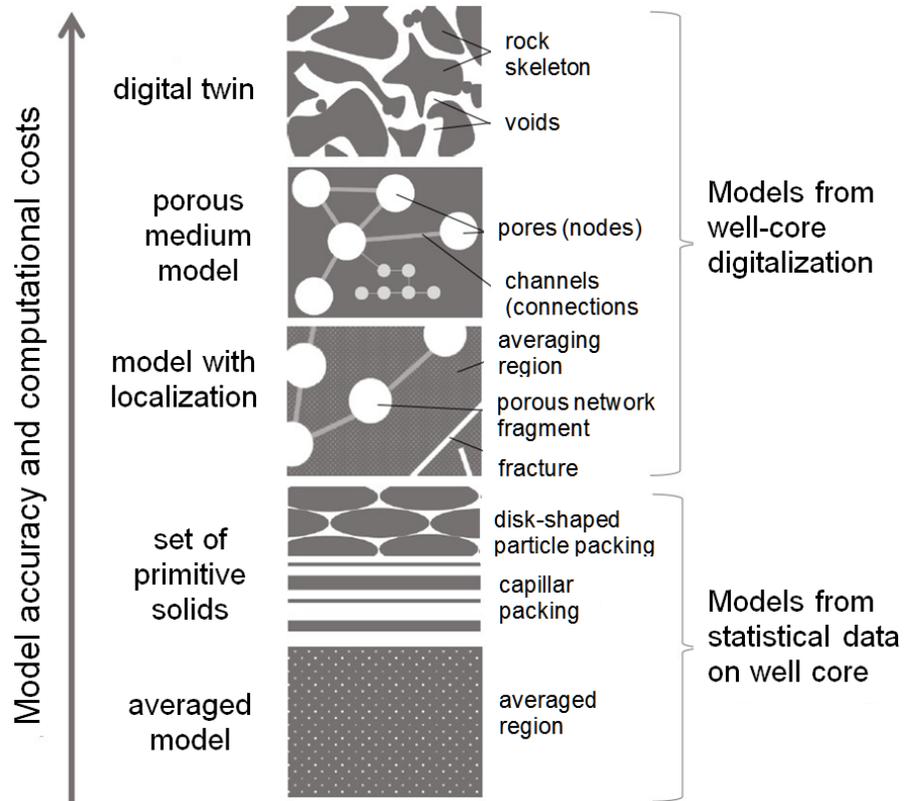
Результат - КИН (коэффициент извлечения нефти) 30-50% от возможного.

При применении закона Дарси предполагается, что инерция, абсорбция, капиллярные явления учитываются в относительной фазовой проницаемости. Методика их определения не учитывает нестационарные эффекты.



Нет: 1) Инерции; 2) Капиллярных сил; 3) Диффузии; 4) Взаимодействия с поверхностью; 5) Растворимости; 6) ...

Классификация моделей пористых сред



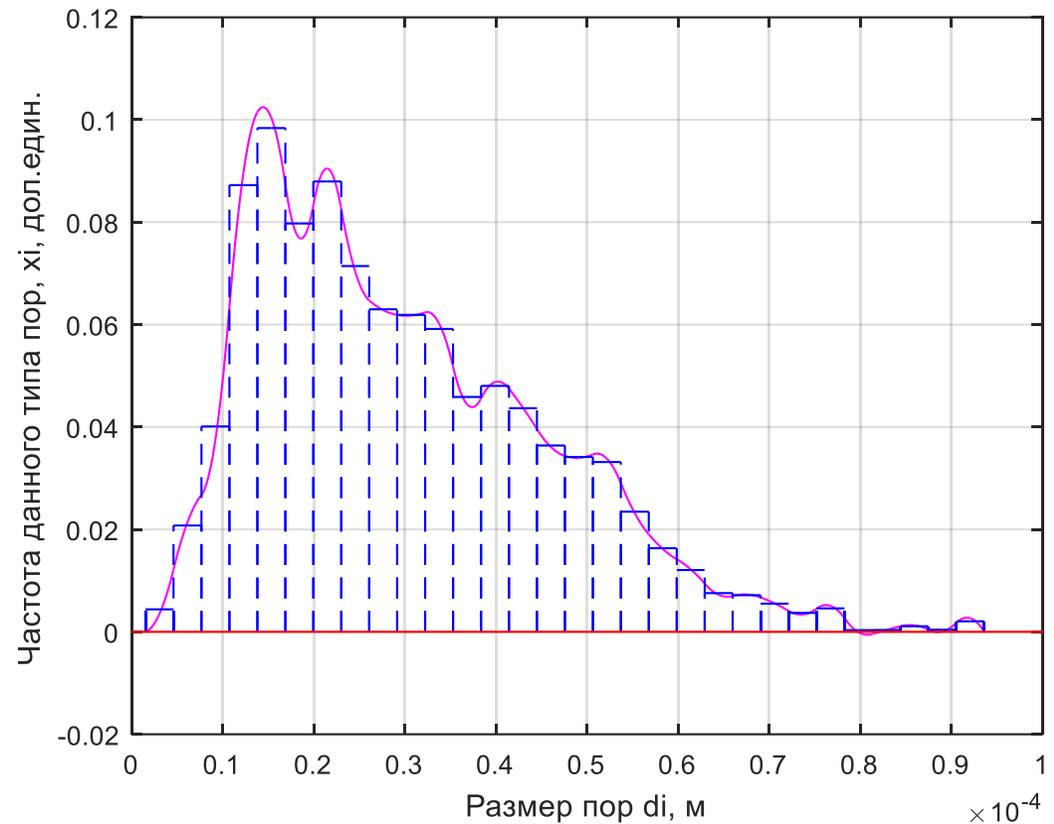
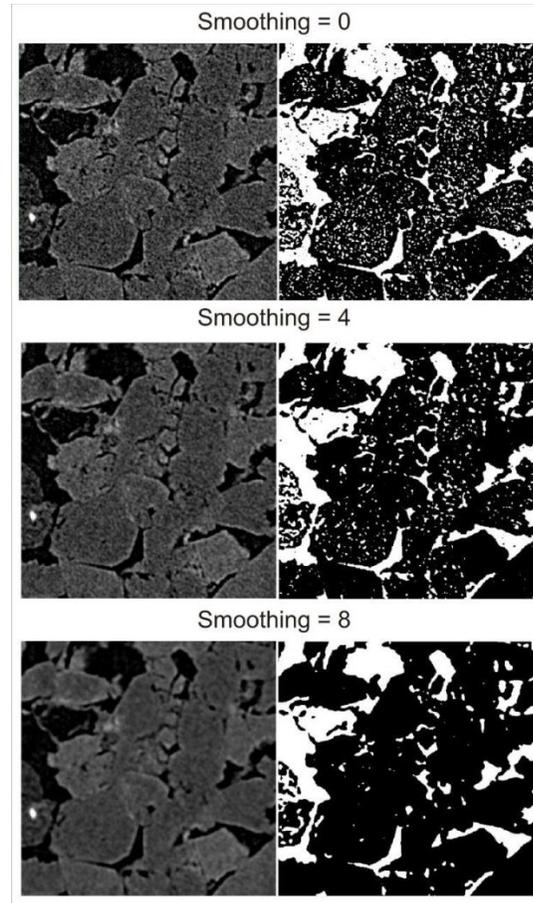
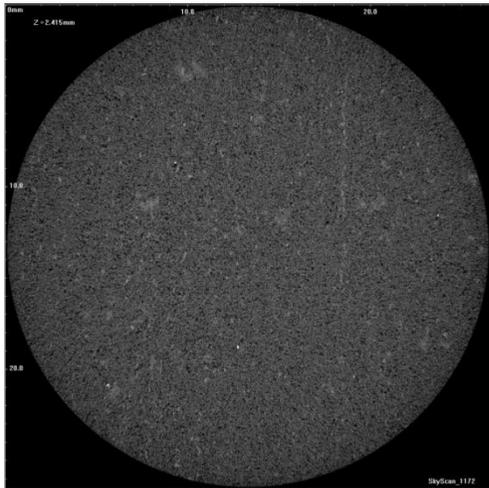
Прямое численное моделирование многофазного фильтрационного движения флюидов в пористой среде («цифровой керн») – задача, которая не может быть корректно решена:

- отсутствие «точной» информации о пористой среде;
- недостаточные знания о физических процессах, определяющих движение флюидов на микроуровне;
- проблема микро- и макро- масштабов задачи;
- отсутствие достоверной информации о фильтрационном пласте;
- недостаточные вычислительные мощности для расчётов.

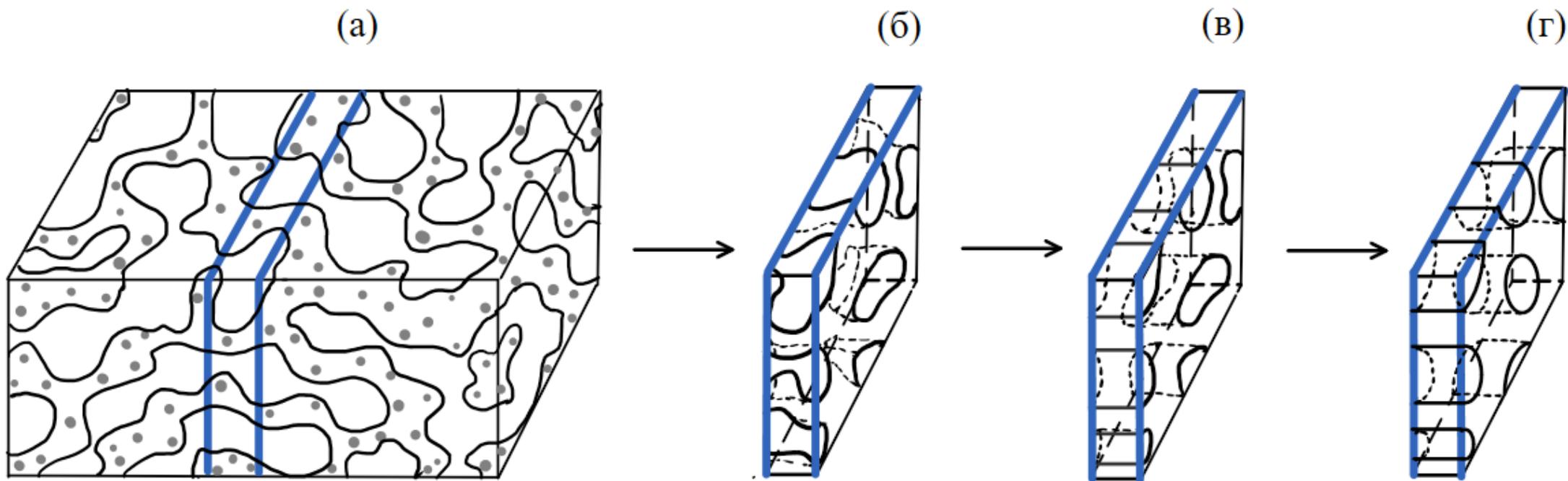
Необходимы модельные пористые среды, основанные на физике происходящих в пористой среде процессов, позволяющие решать практические задачи в применении к конкретным случаям.

Исходная информация о пористой среде

Геофизическая структура пласта. Местоположение скважины. Данные каротажа. Керновые исследования. Шлифы керна. Томографические исследования.



Построение капиллярной модели пористой среды. Образование капиллярных слоев.



Капиллярные слои пористой среды: (а) – реальная пористая среда; (б) – шлиф из пористой среды; (в) – упрощенная модель шлифа, в которой поры заменены на параллельные каналы; (г) – упрощенная модель шлифа, в которой поры заменены на параллельные цилиндры круглого сечения.

Объединение капиллярных слоев.

Матрица пористой среды PM (Pore Model):

$$PM = \begin{pmatrix} s_1 & x_1 n_1 \\ s_2 & x_2 n_2 \\ \dots & \dots \\ s_r & x_r n_r \end{pmatrix} = (\mathbf{s}, \mathbf{x}, \mathbf{n}),$$

где \mathbf{s} – вектор площадей пор

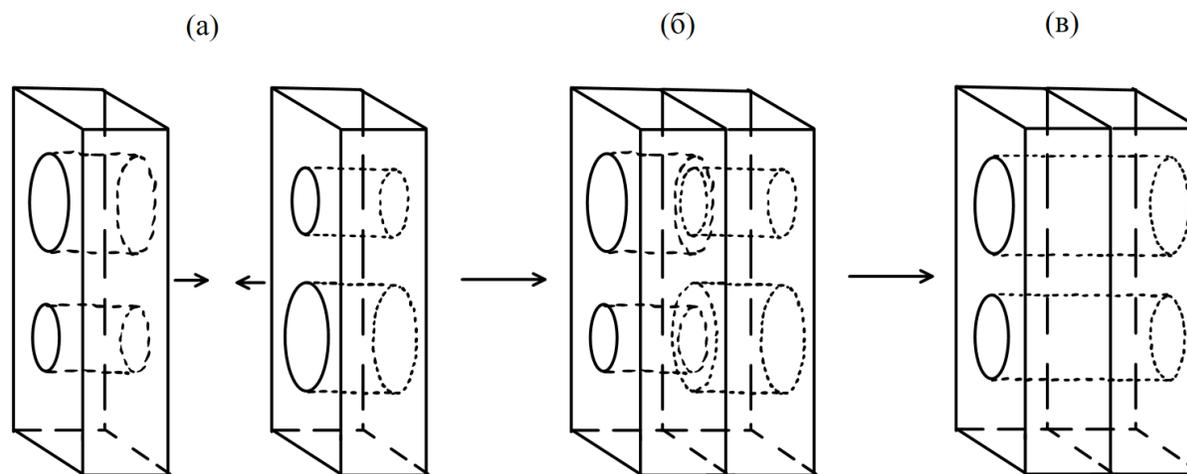
\mathbf{x} – вектор их доли в общей площади пор

\mathbf{n} – вектор количества пор площадью s

$$n_i = \frac{S_p \cdot x_i}{s_i},$$

просветность (пористость):

$$m = \frac{S_p}{S_0}.$$



Вероятность встречи капилляра s_i из одного слоя и s_j из второго $P_{i-j} = \frac{n_i}{N}$.

$$\frac{n_j}{N} = x_i \cdot x_j.$$

Доля объединенных каналов $n_{i-j} = x_i \cdot x_j \cdot N$.

Эффективный диаметр образованного капилляра $d_{i-j} = \sqrt[4]{\frac{2}{\frac{1}{d_i^4} + \frac{1}{d_j^4}}}$

Предположения: течение Пуазейля, постоянство расхода при заданном перепаде давления.

Итерации операции объединения капиллярных слоев.

После конечного числа итераций объединения капиллярных слоев, матрица пористой среды будет представлена пучком параллельных капилляров с одинаковым диаметром:

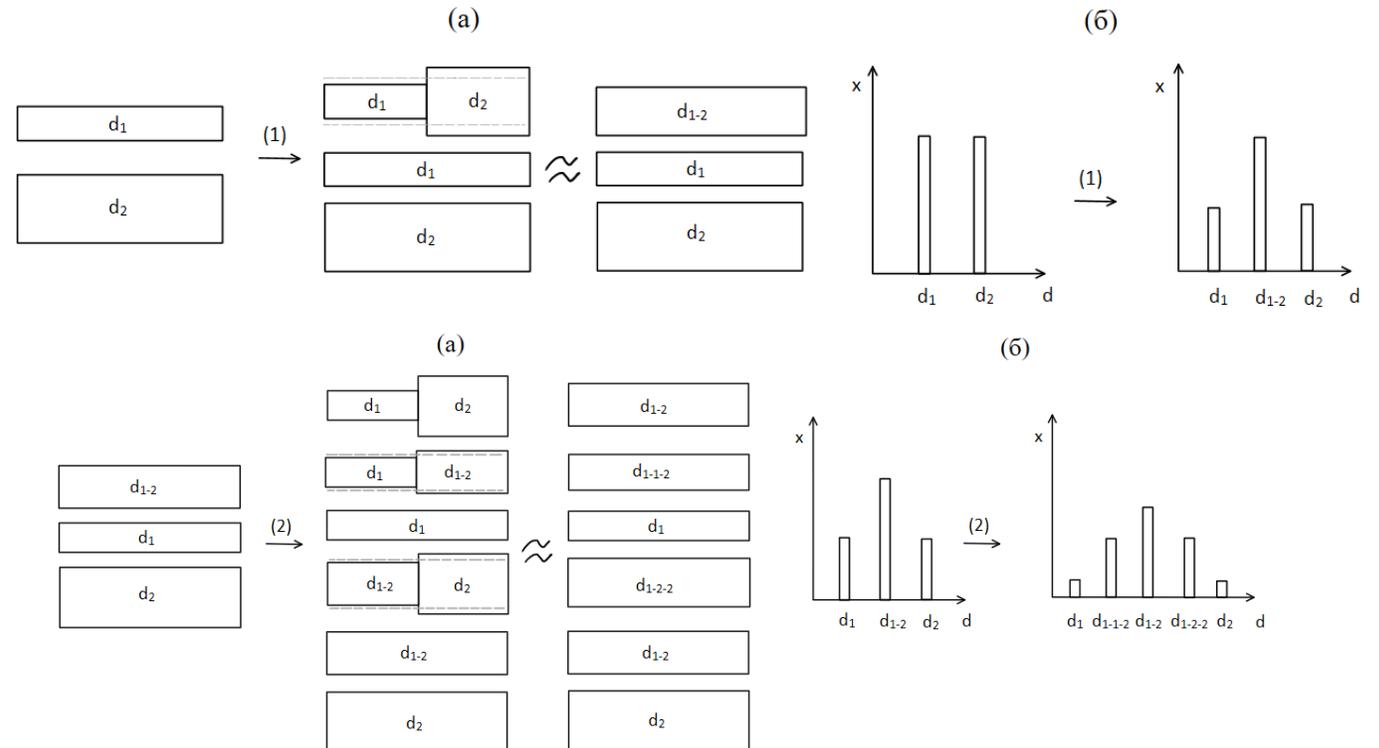
$$PM^{(k)} = (d_{lim}, 1, N).$$

Абсолютная проницаемость:

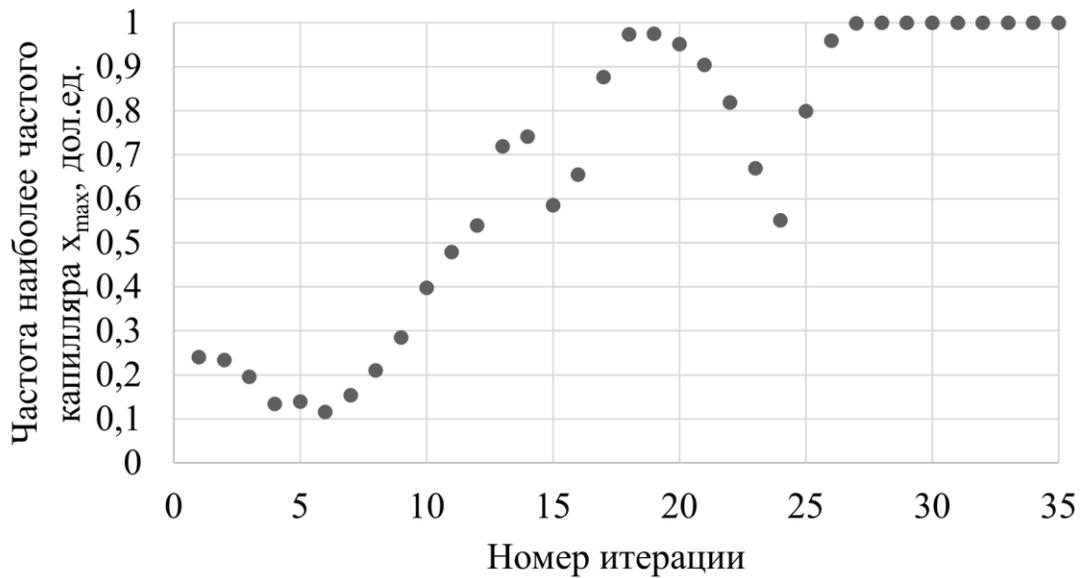
$$k_0 = \frac{S_{lim}}{S_p} \cdot N \cdot k_{lim}$$

где k_{lim} – проницаемость (m^2) капилляра диаметром d_{lim} , которая в приближении Пуазейля выражается через диаметр d_{lim} :

$$k_{lim} = \frac{d_{lim}^2}{32}.$$



Пример применения предлагаемого способа построения капиллярной модели пористой среды к реальному керну нефтеносного пласта.



Способ получения абсолютной проницаемости керна (распределение пор по размерам приведено на слайде №3)	Значение абсолютной проницаемости керна, мД
Экспериментально измеренный (эталон)	15
Рассчитанный для модели пористой среды, построенной по предлагаемой методике	30
Рассчитанный для классической капиллярной модели пористой среды	35 600

Ограничения для использования предлагаемой методики построения капиллярных моделей пористых сред.

Предлагаемая модель показывает лучшее соответствие с экспериментальными данными, но она ожидаемо дает завышенные результаты, что связано с рядом причин:

- 1) Недостаточная точность исходных данных. Если в исследовании керна по причине недостаточной точности применяемых методов исследования не зафиксированы низкопроницаемые поры, то полученное значение абсолютной проницаемости будет завышено.
- 2) Применение «идеального» профиля скорости Пуазейля для оценки потери давления на состыкованных капиллярах.
- 3) Допущение о том, что каждый капилляр из одного слоя соединяется с одним капилляром из другого капиллярного слоя. Возможны тупиковые капилляры. $P_{i-j} = (x_i \cdot m) \cdot (x_j \cdot m) = x_i \cdot x_j \cdot m^2$.
- 4) Допущение об отсутствии разветвлений капилляров.

Возможности развития предлагаемой методики построения капиллярных моделей пористых сред.

Применение коэффициента открытой пористости, полученного экспериментально по стандартной методике.

$$k_0^* = \frac{S_{lim}}{S_p} \cdot N \cdot k_{lim} \cdot m$$

Подход даст идеальное совпадение полученных при применении предлагаемой капиллярной модели данных с экспериментальными, но требуется (опубликованное) теоретическое обоснование его применения.

Учет возможности ветвления капилляров.

Учет гидромеханических явлений для корректного вычисления эффективного диаметра модельного капилляра.

Корректный учет фактора формы при представлении капилляра модельным капилляром.

Выводы.

Основная цель предложенной методики построения моделей пористых сред – создать достаточно простую, но более точную теоретическую основу для моделирования фильтрации. Построенная с применением предлагаемой методики капиллярная модель пористой среды сохраняет важные преимущества классической капиллярной модели, что позволяет использовать спектр как аналитических, так и численных подходов в исследовании фильтрации. Методика построения капиллярной модели пористой среды готова к практическому применению, так как ее концепция понятийно завершена. Однако для нашего исследования она является промежуточным, но необходимым шагом к более сложному объекту моделирования – многофазному течению в пористых средах.

СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ !!!

