



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 49 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Блонский А.В., Савенков Е.Б.

Математическое
моделирование течений
двухфазного флюида в
трещиновато-кавернозной
среде

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Блонский А.В., Савенков Е.Б. Математическое моделирование течений двухфазного флюида в трещиновато-кавернозной среде // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 49. 18 с. doi:[10.20948/prepr-2018-49](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-49)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-49>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М. В. КЕЛДЫША

А.В. Блонский, Е.Б. Савенков

**Математическое моделирование течений двухфазного флюида
в трещиновато-кавернозной среде**

Москва, 2018

А.В. Блонский, Е.Б. Савенков. Математическое моделирование течений двухфазного флюида в трещиновато-кавернозной среде.

Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию влияния течения в кавернах на процесс вытеснения нефти водой в трещиноватой среде при различных типах смачиваемости породы. Исследование проведено методами численного моделирования течений в системе дискретных трещин, на пересечениях которых находятся каверны.

Ключевые слова: дискретные системы трещин, трещиновато-кавернозные коллектора, многофазное течение.

A.V. Blonsky, E.B. Savenkov. Two-phase flow modelling within fractured vuggy reservoir.

Abstract

The present work investigates the influence of the flow within vugs on the process of water-oil displacement in fractured media for various types of rock wettability. The study was carried out using numerical simulation of flow in the system of discrete fracture network which has vugs on their intersections.

Key words and phrases: discrete fracture network, fractured vuggy reservoirs, multiphase flow, reservoir simulation.

Содержание

1	Введение	3
2	Геометрическая модель среды	3
3	Двухфазное течение в системе трещин и каверн	4
4	Вычислительный алгоритм расчета двухфазного течения	7
5	Результаты моделирования	8
5.1	Влияние диаметра канала на течение	8
5.2	Влияние капиллярных сил в каверне на течение	9
5.3	Влияние течения в каверне на переток между трещинами	12
5.4	Влияние каверн на динамику течения в системе трещин	13
6	Заключение	17

1 Введение

В настоящее время чисто поровые коллектора практически исчерпали свой ресурс, а основным источником углеводородов стали запасы, отнесенные к категории трудноизвлекаемых. Значительная часть такого типа запасов содержится в трещиноватых коллекторах.

Предметом исследования данной работы являются трещиновато-кавернозные коллектора, в которых уровень добычи и продуктивность в значительной степени определяются системами гидродинамически связанных или несвязанных трещин, расположенных в проводящей или непроводящей вмещающей среде — матрице [1].

Ранее в работе [2] было проведен литературный обзор по современным подходам к моделированию течений в трещинах. В работах [2, 3] была разработана математическая модель двухфазного течения жидкости в системе трещин, на пересечениях которых расположены каверны. Предложенная модель учитывает: течение в трещинах и кавернах, переток между трещинами и кавернами, переменное раскрытие трещин, переменный диаметр каверн, капиллярные и гравитационные силы.

В настоящей работе рассматривается задача математического моделирования двухфазного течения в трещиноватой среде с кавернами на пересечениях трещин. Математическая модель, описывающая данный процесс, была ранее описана авторами в работе [3]. В данной работе приводятся краткое описание модели и результаты моделирования, демонстрирующие влияние течения вдоль каверн на динамику вытеснения нефти водой.

2 Геометрическая модель среды

В качестве геометрической модели среды будет рассматриваться локально двумерная связная область \mathcal{F} , которая представляет собой объединение некоторого числа (пересекающихся) трещин:

$$\mathcal{F} = \bigcup_{n=1}^{N_f} \mathcal{F}_n,$$

где N_f — число трещин. Каждая отдельная трещина \mathcal{F}_n представляет собой двумерное многообразие (поверхность) с краем. Пример множества \mathcal{F} для случая двух трещин показан на рисунке 1.

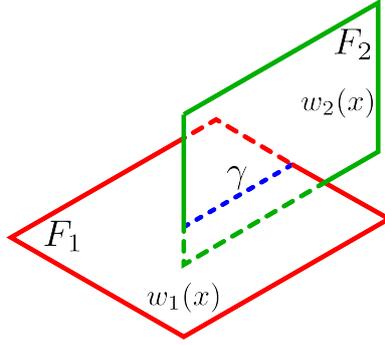


Рис. 1. Пример расчетной области: две трещины $\mathcal{F}_{1,2}$ и линия их пересечения γ .

Предполагается, что:

- трещины плоские либо слабо искривлены (то есть средний радиус кривизны существенно больше характерного линейного размера трещины);
- поверхности \mathcal{F}_n представляют собой срединные поверхности трещин, то есть математические поверхности, равноудаленные от берегов трещин. Раскрытие трещины является функцией точки срединной поверхности трещины,

$$w = w_0(\vec{x}), \quad \vec{x} \in \mathcal{F},$$

где \mathcal{F} — срединная поверхность трещины;

- любые две трещины \mathcal{F}_i и \mathcal{F}_j либо не имеют общих точек, либо пересекаются по отрезку $\gamma_{ij} = \mathcal{F}_i \cap \mathcal{F}_j$ конечной длины;
- два отрезка пересечения γ_{ij} и γ_{kl} имеют не более одной общей точки.

Отрезок γ_{ij} будем называть «каверной» или «каналом». Будем считать, что сечение канала переменное и является функцией точки канала $s \in \gamma_{ij}$ и имеет форму круга с диаметром $d = d(s)$. Обозначим $\mathcal{A} = \{\gamma_{ij} : \gamma_{ij} = \mathcal{F}_i \cap \mathcal{F}_j \neq \emptyset\}$ — множество всех отрезков пересечений.

Сформулированные выше ограничения являются естественными при представлении трещин в виде плоских полигонов в рамках модели дискретной системы трещин. Другие виды взаимного расположения трещин (например пересечение 3 отрезков γ_{ij} в одной точке) являются геометрически неустойчивыми, то есть исчезают при малых «шевелениях» срединной поверхности.

3 Двухфазное течение в системе трещин и каверн

Пусть $\gamma = \gamma(s)$ — каверна конечной длины $L_\gamma = |\gamma|$; s — координата вдоль линии, проходящей в центре каверны, $s \in [0, L_\gamma]$; $\vec{\tau} = \vec{\tau}(s)$ — касательный к линии $\gamma = \gamma(s)$ вектор единичной длины.

Далее предполагается, что справедливы следующие утверждения:

- течение в каверне существенно одномерное;
- число Рейнольдса $Re = d \cdot v / \nu \ll 1$, где v — характерная скорость течения, ν — кинематическая вязкость флюида.
- флюид состоит из двух несмешивающихся фаз, то есть каждая фаза $\alpha = W, O$ (« W » — жидкая водная фаза, « O » — жидкая углеводородная фаза) состоит из единственного (псевдо) компонента (« w » — вода, « o » — нефть). В дальнейшем фаза будет отождествляться с соответствующим компонентом;
- фазы являются сжимаемыми, массовая плотность фазы является функцией ее давления p_α : $\rho_\alpha = \rho_\alpha(p_\alpha)$, $\alpha = W, O$.

Дифференциальные уравнения законов сохранения масс воды и нефти в трещинах и кавернах в рассматриваемых допущениях имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha w S_\alpha) + \operatorname{div} \vec{Q}_{f,\alpha} = 0, \quad \vec{x} \in \mathcal{F}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_\alpha A S_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial Q_{v,\alpha}}{\partial s} = q_\alpha, \quad \vec{x} \in \gamma \in \mathcal{A}, \quad (2)$$

где $\alpha = W, O$ — водная и нефтяная фазы, q_α — член, отвечающий за массообмен между трещинами и кавернами (будет описан ниже), S_α — насыщенности фаз, такие, что $S_W + S_O = 1$, $\vec{Q}_{f,\alpha}$ — вектор плотности потока массы компонента в трещине, $Q_{v,\alpha}$ — плотность потока массы компонента в каверне, для которых справедливы следующие соотношения:

$$\vec{Q}_{f,\alpha} = -\rho_\alpha w \frac{k_f k_{r,\alpha}^{(f)}}{\mu_\alpha} (\nabla p_{f,\alpha} + \rho_\alpha \vec{g}_n), \quad (3)$$

$$Q_{v,\alpha} = -\rho_\alpha A \frac{k_v k_{r,\alpha}^{(v)}}{\mu} \left(\frac{\partial p_{v,\alpha}}{\partial s} + \rho_\alpha g_\tau \right), \quad (4)$$

где $k_{r,\alpha}^{(\beta)} = k_{r,\alpha}^{(\beta)}(S_w)$, $\beta = f, v$ — относительные фазовые проницаемости, $p_{f,\alpha}, p_{v,\alpha}$ — давления фаз в трещине и каверне, $\mu_\alpha = \mu_\alpha(p_\alpha)$ — вязкость фазы, $A = A(s)$ — площадь сечения канала в точке s , $\vec{g}_n = \Pi_n \vec{g}$ — проекция вектора ускорения свободного падения на плоскость трещины, $\Pi_n = I - \vec{n} \otimes \vec{n}$ — соответствующий проектор, I — единичная матрица, \vec{n} — единичный вектор нормали к трещине, \vec{g} — ускорение свободного падения, $g_\tau = \vec{g} \cdot \vec{\tau}$ — проекция вектора ускорения свободного падения на вектор $\vec{\tau}$, k_f, k_v — абсолютные проницаемости трещин и каверн, определяемые выражением:

$$k_f(\vec{x}) = \frac{w^2(\vec{x})}{12}, \quad \vec{x} \in \mathcal{F}, \quad k_v(\vec{x}) = \frac{d^2(\vec{x})}{32}, \quad \vec{x} \in \gamma \in \mathcal{A}.$$

Давления фаз не равны, они связаны капиллярным давлением, которое определяется локально (в точке пространства) моделью, учитывающей раскрытие (диаметр) трещины

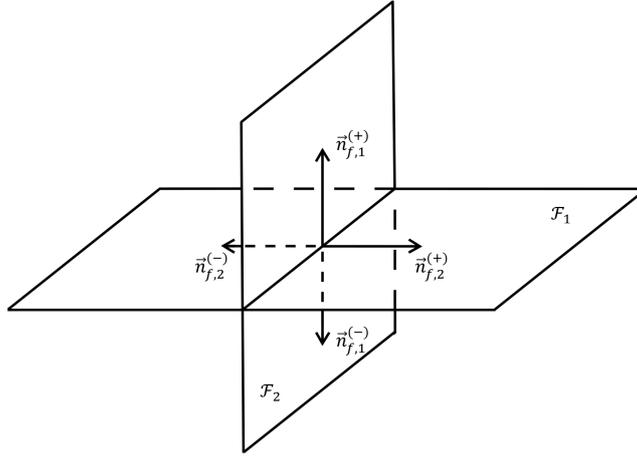


Рис. 2. Нормали $\vec{n}_{f,1}^{+}$, $\vec{n}_{f,1}^{-}$, $\vec{n}_{f,2}^{+}$, $\vec{n}_{f,2}^{-}$ к отрезку пересечения трещин.

(каверны) и эффекты смачиваемости:

$$p_{f,c}(\vec{x}) = (p_{f,O} - p_{f,W})(\vec{x}) = \frac{2\sigma \cos \theta(\vec{x})}{w(\vec{x})}, \quad \vec{x} \in \mathcal{F},$$

$$p_{v,c}(\vec{x}) = (p_{v,O} - p_{v,W})(\vec{x}) = \frac{4\sigma \cos \theta(\vec{x})}{d(\vec{x})}, \quad \vec{x} \in \gamma \in \mathcal{A},$$

где θ — контактный угол (является заданной функцией взаимных свойств флюидов и скелета), σ — поверхностное натяжение.

Условия согласования течений на пересечениях трещин имеют следующий вид:

- непрерывность потоков массы в точках отрезков γ_{ij} :

$$q_\alpha = \vec{Q}_{f,\alpha,i}^{(+)} \cdot \vec{n}_{f,\alpha,i}^{(+)} + \vec{Q}_{f,\alpha,i}^{(-)} \cdot \vec{n}_{f,\alpha,i}^{(-)} + \vec{Q}_{f,\alpha,j}^{(+)} \cdot \vec{n}_{f,\alpha,j}^{(+)} + \vec{Q}_{f,\alpha,j}^{(-)} \cdot \vec{n}_{f,\alpha,j}^{(-)}, \quad \forall \vec{x} \in \gamma \in \mathcal{A}, \quad \alpha = W, O;$$

- непрерывность давления в точках отрезков γ_{ij} :

$$p_{f,\alpha} = p_{v,\alpha}, \quad \forall \vec{x} \in \gamma \in \mathcal{A}, \quad \alpha = W, O.$$

Условие непрерывности давлений фаз в точках отрезков γ_{ij} означает, что капиллярные давления также должны быть равны. Будем считать, что капиллярное давление в точках отрезков γ_{ij} определяется капиллярным давлением в кавернах:

$$p_{f,c}(\vec{x}) = p_{v,c}(\vec{x}) = \frac{4\sigma \cos \theta(\vec{x})}{d(\vec{x})}, \quad \forall \vec{x} \in \gamma \in \mathcal{A}.$$

Для замыкания системы уравнений (1)–(4) необходимо задать зависимости относительных фазовых проницаемостей в трещинах и кавернах. Будем предполагать, что ОФП задаются линейной зависимостью (с нулевыми значениями остаточных насыщенныхностей).

В работе [2] параметрами геометрической модели среды являлись геометрия и рас-

крытие трещин. Для модели течения, предлагаемой в данной работе, дополнительным параметром является диаметр каверн. Диаметр каверн может быть определен двумя способами:

1. определен явно как входной параметр, наравне с раскрытием трещин;
2. задан как функция раскрытия трещин.

Таким образом, система уравнений (1)–(4) совместно с условиями согласования на границах трещина–каверна, начальными и граничными условиями для давления и насыщенности, а также уравнениями состояния для плотностей и вязкостей нефти и воды описывает двухфазное течение жидкости в системе трещин и каверн.

4 Вычислительный алгоритм расчета двухфазного течения

В данном разделе приведено краткое описание вычислительных алгоритмов. Подробное описание представлено в работах [3, 4].

На трещинах и кавернах, представленных набором полигонов и их пересечений, строится треугольная сетка, согласованная на пересечениях. Алгоритмы построения сетки описаны в работе [2]. Для пространственной дискретизации уравнений модели применяется метод Петрова—Галёркина [5]. Базисные и пробные функции относятся к узлам треугольной сетки. Для аппроксимации поля давления используются кусочно-линейные базисные функции, для поля насыщенности — кусочно-постоянные пробные функции. Для дискретизации уравнений по времени применяется полностью неявная схема.

Ключевым моментом с точки зрения вычислительного алгоритма является то, что переменные насыщенности и давления в кавернах совпадают с соответствующими переменными в трещинах. Таким образом в результате дискретизации получается система уравнений, которая может быть представлена в следующем виде:

$$A^f \vec{x} + A^v \vec{x} = 0,$$

где A^f, A^v — разностные операторы, соответствующие дифференциальным уравнениям (1)–(2), \vec{x} — вектор неизвестных. В данном случае, в отличие от модели трещиноватой среды без каверн, в системе уравнений в строках, соответствующих узлам сетки, которые лежат на пересечениях трещин, появляются дополнительные слагаемые, описывающие течение жидкости в кавернах.

5 Результаты моделирования

В данном разделе приведены результаты моделирования течений в трещиновато-кавернозной среде. При этом параметры жидкостей, использованные при моделировании, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры жидкостей

Плотность воды ρ_W , кг/м ³	1000
Плотность нефти ρ_O , кг/м ³	800
Вязкость воды μ_W , сПз	0.6
Вязкость нефти μ_O , сПз	2.4
Коэффициент поверхностного натяжения σ , Па·м	0.027

5.1 Влияние диаметра канала на течение

В данном тесте исследуется влияние отношения диаметра канала к раскрытию трещин на характер вытеснения нефти водой. Рассматриваются две пересекающиеся трещины (рисунок 3) размером 0.5×0.5 метров с постоянным раскрытием 10 мкм. При этом рассматриваются три случая, в которых диаметр каверны равен: $d = w$, $10 \cdot w$, $0.1 \cdot w$. Предполагается, что порода обладает нейтральной смачиваемостью ($\theta = 90^\circ$). В начальный момент трещины полностью заполнены нефтью. В качестве граничных условий заданы: постоянный поток 90 литров в час и постоянная водонасыщенность $S_W=1$ на верхней границе расчетной области, постоянное давление 3 бара на нижней границе.

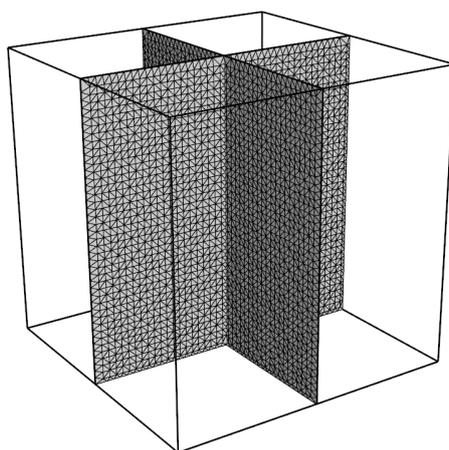


Рис. 3. Сетка для двух пересекающихся трещин.

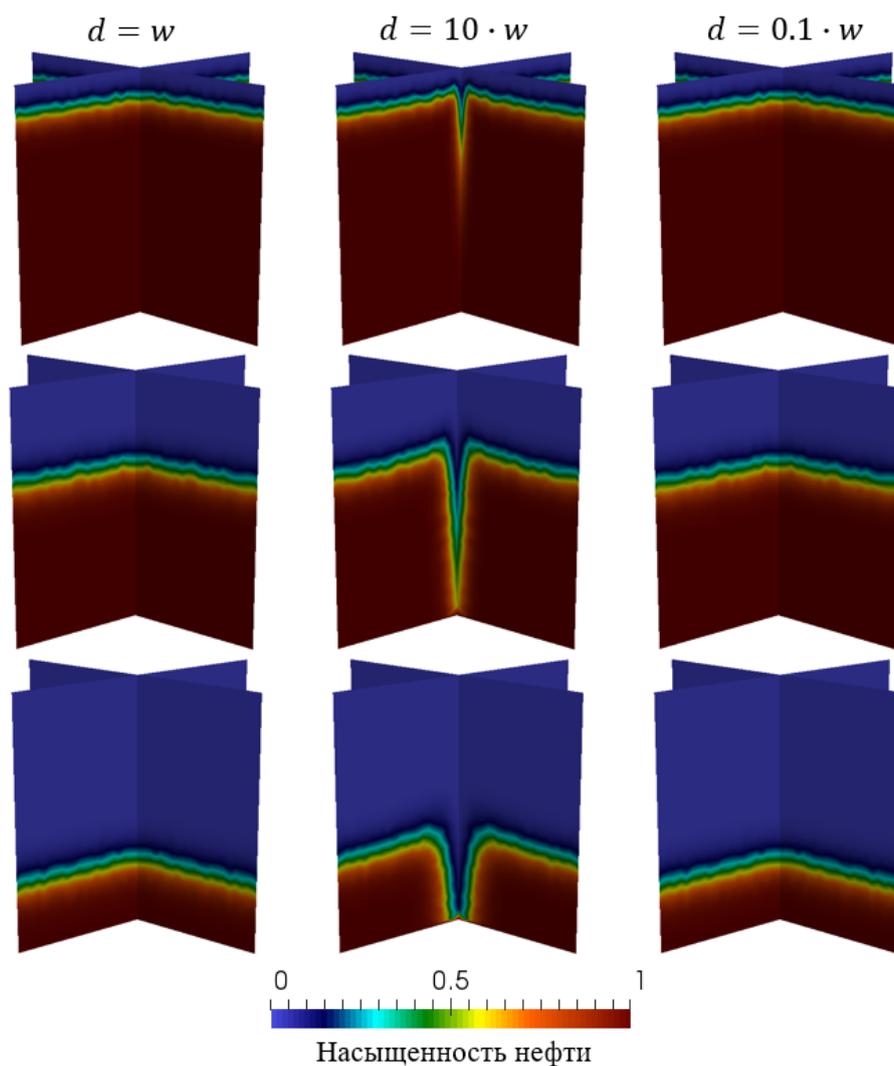


Рис. 4. Динамика вытеснения нефти водой в случае нейтральной смачиваемости.

Из представленных результатов (рисунок 4) видно, что в случае, когда диаметр канала равен или меньше раскрытия трещин, течение в каверне не оказывает влияние на процесс вытеснения. В случае, когда диаметр каверны больше раскрытия трещины, вытеснение в каверне происходит быстрее и влияет на фронт вытеснения в трещинах. Таким образом, в отсутствие капиллярных сил каверны большого размера могут оказывать влияние на время прорыва воды. В данном тесте для случая с большим диаметром каверны для прорыва воды потребовалось на 50% меньше времени.

5.2 Влияние капиллярных сил в каверне на течение

В данном тесте рассматриваются две пересекающиеся трещины из предыдущего теста и три случая, в которых диаметр каверны равен: $d = w, 10 \cdot w, 0.1 \cdot w$. При этом в каждом из случаев исследуется влияние смачиваемости на процесс вытеснения нефти водой ($\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 180^\circ\}$). Начальные и граничные условия полностью совпадают с условиями из предыдущего теста. На рисунках ниже представлены результаты проведен-

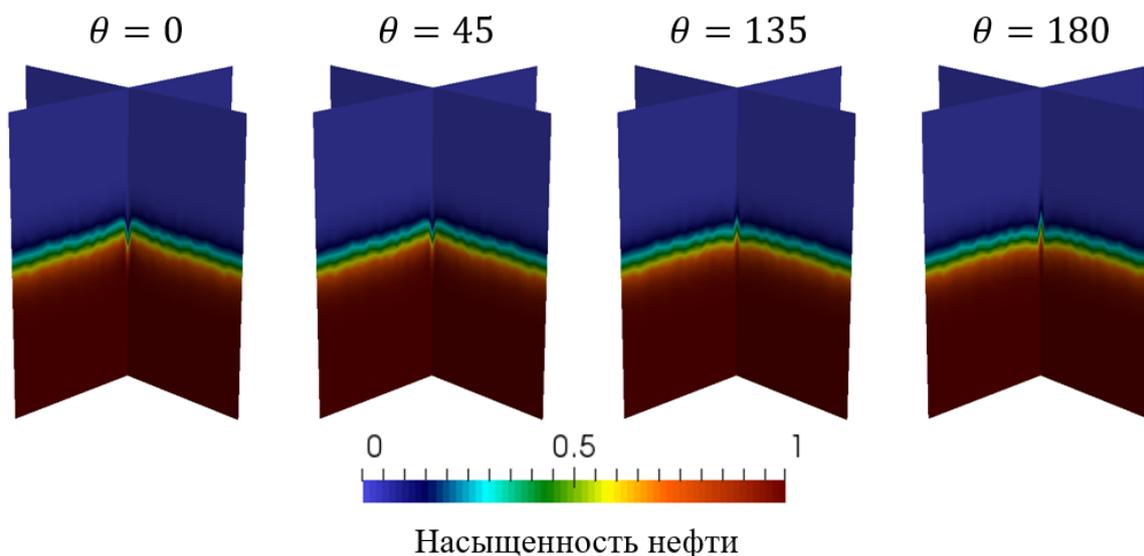


Рис. 5. Динамика вытеснения нефти водой для случая $d = w$ и различных значений угла смачиваемости.

ных расчетов.

Из рисунка 5 видно, что в случае, когда ширина трещин совпадает с диаметром каналов, капиллярные силы не оказывают существенного влияния на процесс вытеснения.

Из рисунка 6 видно, что в случае, когда диаметр каналов больше ширины трещин, капиллярные силы могут играть существенную роль в процессе вытеснения. Видно, что во всех случаях фронт вытеснения в каверне продвигается существенно быстрее, чем в трещинах. В случае гидрофильной породы вытеснение нефти водой в каверне происходит медленнее, чем в случае гидрофобной. Данное явление объясняется тем, что в случае, когда порода гидрофобна, капиллярные силы увеличивают скорость течения по пустотам большого размера, а в случае гидрофильной породы, наоборот, уменьшают. Таким образом в случае гидрофобной породы по каверне происходит более быстрый прорыв воды. По этой причине эффективность вытеснения в случае гидрофильной породы более высокая.

Из рисунка 7 видно, что в случае, когда диаметр каналов меньше ширины трещин, капиллярные силы также оказывают влияние на процесс вытеснения. В случае гидрофильной породы вода затекает в каверну, но при этом быстрого прорыва не происходит, поскольку проводимость каверны в данном случае очень низкая. В случае гидрофобной породы капиллярные силы и низкая проводимость каверн являются факторами, которые препятствуют проникновению воды в каверну.

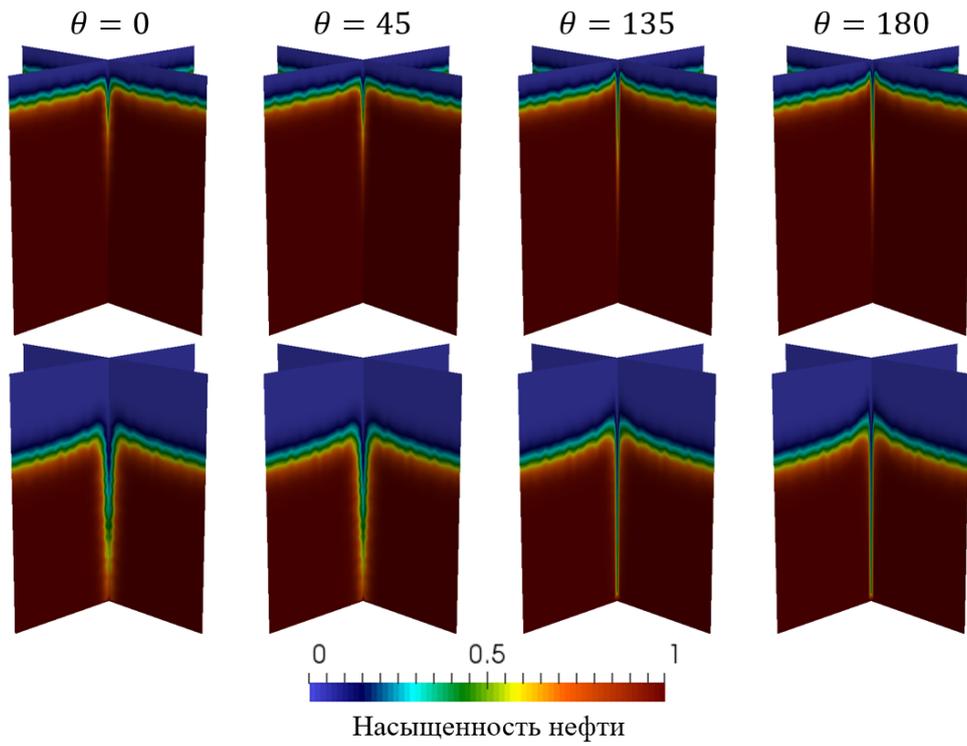


Рис. 6. Динамика вытеснения нефти водой для случая $d = 10 \cdot w$ и различных значений угла смачиваемости.

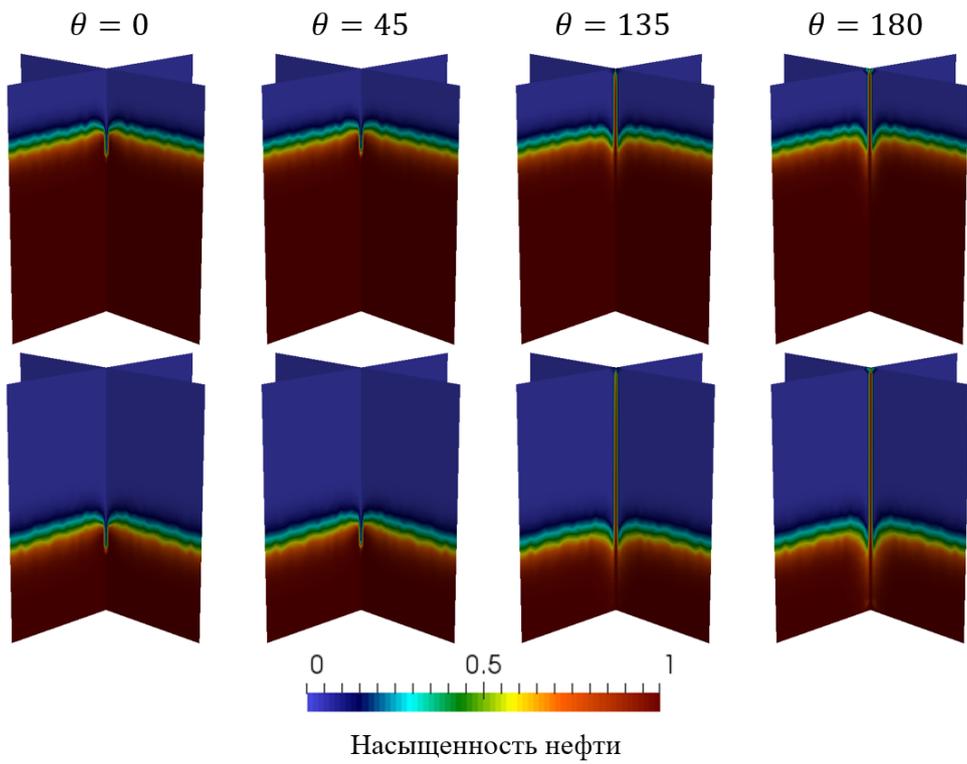


Рис. 7. Динамика вытеснения нефти водой для случая $d = 0.1 \cdot w$ и различных значений угла смачиваемости.

5.3 Влияние течения в каверне на переток между трещинами

В данном тесте рассматриваются две пересекающиеся трещины представленные на рисунке 8. Диаметр каверны 1 мм, раскрытие первой трещины 0.1 мм, раскрытие второй трещины 0.01 мм (трещины отмечены номерами на рисунке). Рассматривается два случая смачиваемости породы: $\theta \in \{0^\circ, 180^\circ\}$. Начальные условия совпадают с условиями из предыдущего теста. Граничные условия отличаются, вместо потока на верхней границе расчетной области задано постоянное давление 5 бар. На рисунках ниже представлены результаты проведенных расчетов.

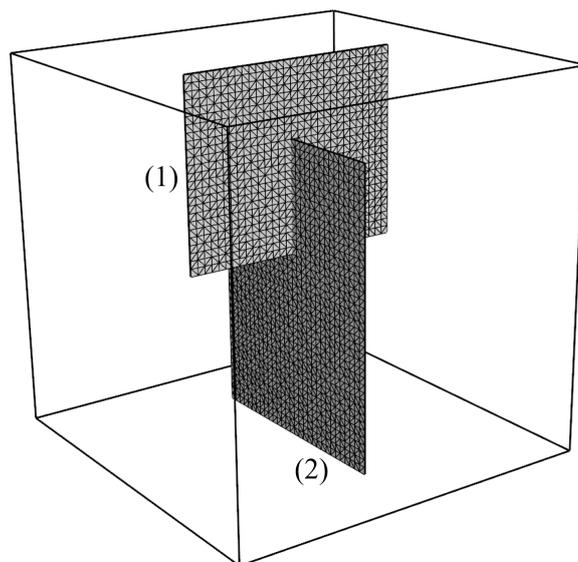


Рис. 8. Сетка для двух пересекающихся трещин.

Из представленных на рисунке 9 результатов видно, что динамика течения существенно отличается для случаев гидрофильной и гидрофобной породы. В случае гидрофильной породы, после того как фронт воды достиг каверны в первой трещине, в каверну начала вытесняться нефть из области вокруг каверны. Затем, после того как нефть вокруг каверны оказалась полностью вытесненной, то есть первая трещина оказалась по большей части заполнена водой, в каверну начала проникать вода и перетекать во вторую трещину. В случае гидрофобной породы, как только фронт воды достиг каверны в первой трещине, вода начала проникать в каверну и перетекать во вторую трещину. После того как вода прорвалась в каверну, вытеснение нефти из первой трещины в каверну прекратилось. Таким образом, в первой трещине осталась запертая нефть.

В результате, после установления течения получились различные коэффициенты извлечения нефти. Для случая гидрофильной породы коэффициент извлечения нефти (КИН) составил 98%, а для гидрофобной — всего 56%.

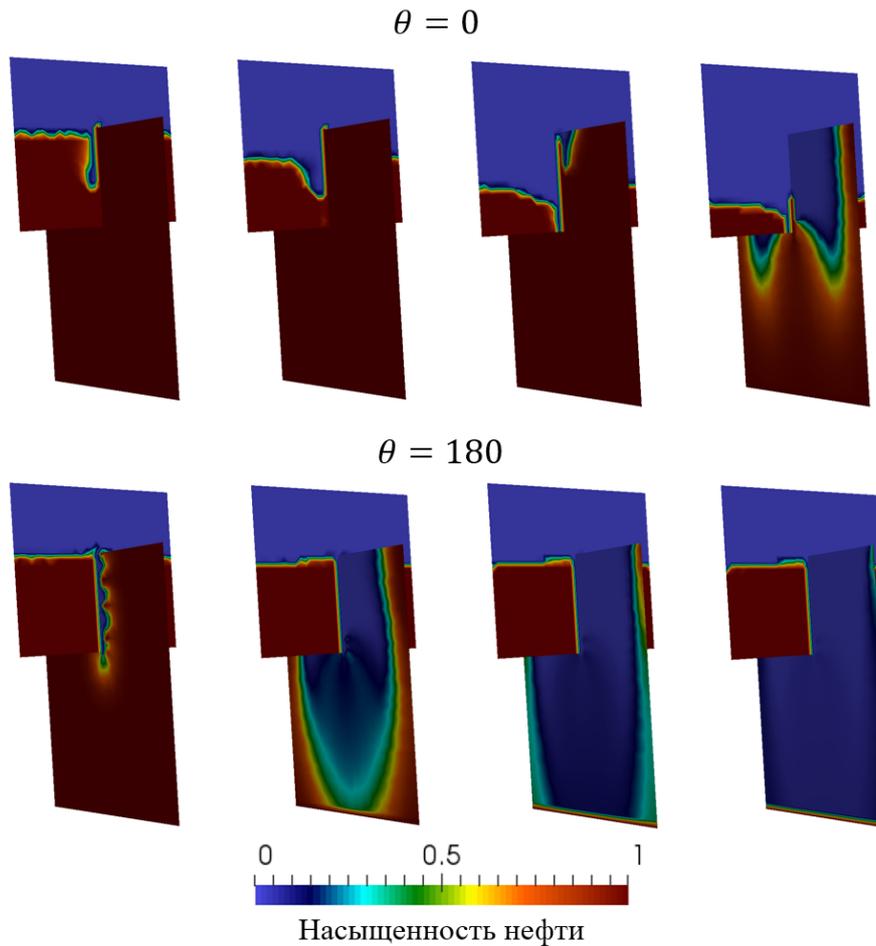


Рис. 9. Динамика вытеснения нефти водой.

5.4 Влияние каверн на динамику течения в системе трещин

В данном тесте рассматривается случайным образом сгенерированная система из 20 трещин, находящаяся внутри расчетной области размером $10 \times 10 \times 10$ метров (рисунок 10). Раскрытие трещин было задано с помощью равномерного распределения на интервале $[10, 100]$ мкм. Суммарный объём пустот в трещинах составил 27 литров. Диаметры каверн заданы равномерным распределением на трех различных интервалах: $d_1 = [30, 70]$ мкм, $d_2 = [450, 750]$ мкм, $d_3 = [2, 4]$ мкм. В данном тесте исследуется влияние размера каверн на динамику течения для случаев гидрофильной ($\theta = 0^\circ$), нейтральной ($\theta = 90^\circ$) и гидрофобной ($\theta = 180^\circ$) породы. Суммарный объём каверн пренебрежимо мал по сравнению с объёмом трещин для всех рассматриваемых случаев. Изначально трещины полностью заполнены нефтью. В качестве граничных условий заданы: постоянный поток 18 литров в час и постоянная водонасыщенность $S_W=1$ на верхней границе расчетной области, постоянное давление 3 бара на нижней границе. Время закачки жидкости: 4 часа.

Рассмотрим случай, когда порода гидрофильна ($\theta = 0^\circ$). Динамика вытеснения нефти водой для данного случая представлена на рисунке 11. Из представленных результатов видно, что в случаях, когда диаметры каверн заданы на интервалах d_1 и d_2 , фронт вы-

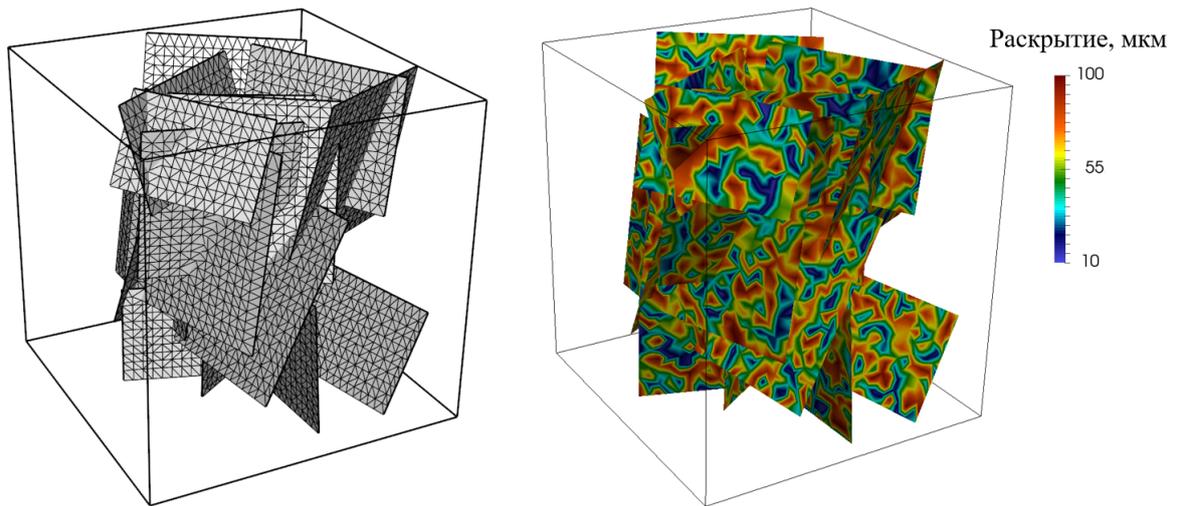


Рис. 10. Сетка для системы трещин и поле раскрытия.

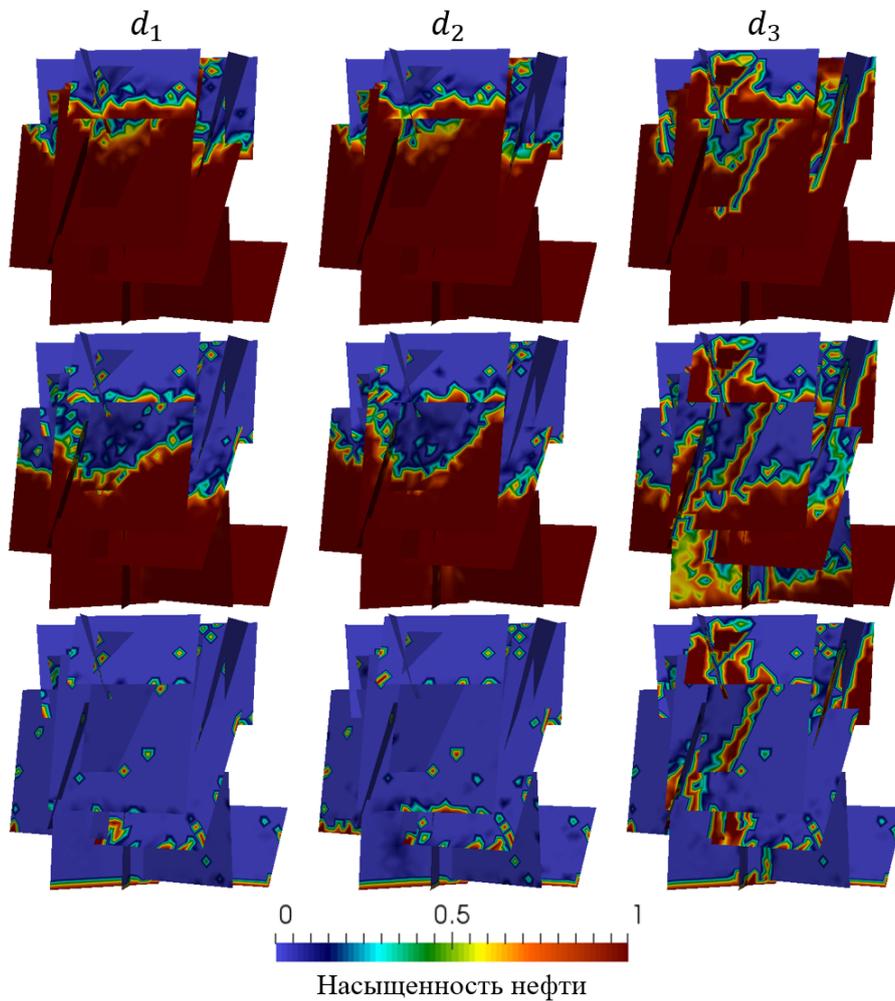


Рис. 11. Динамика вытеснения нефти водой для случая гидрофильной породы.

теснения одинаковый. В случае, когда диаметры каверн заданы в интервале d_3 , фронт вытеснения продвигается быстрее, но при этом в трещинах за фронтом остаётся значительное количество нефти. В данном случае, так как вода легче проникает в пустоты

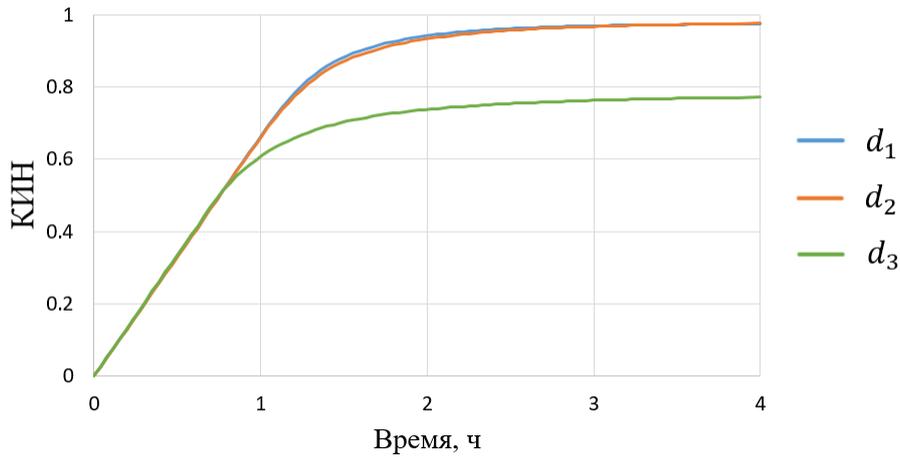


Рис. 12. Зависимость КИН от времени для случая гидрофильной породы.

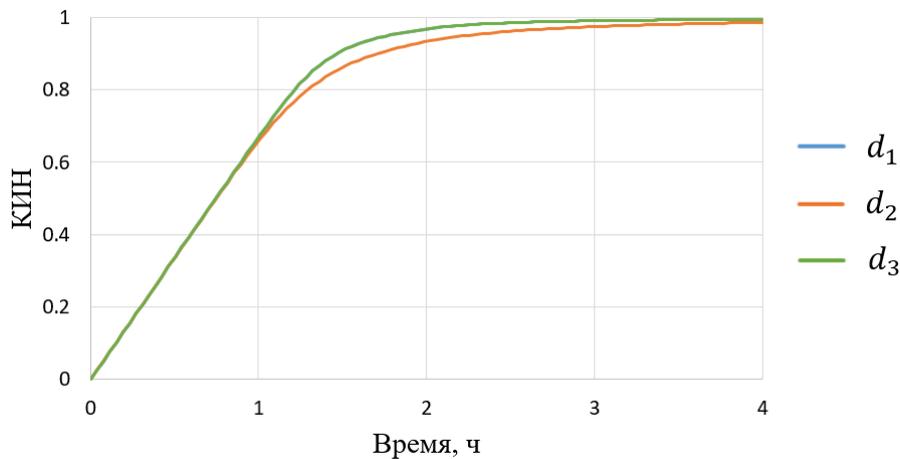


Рис. 13. Зависимость КИН от времени для случая породы с нейтральной смачиваемостью.

малого размера, система каверн образует путь наименьшего сопротивления для течения воды.

В процессе моделирования были рассчитаны зависимости коэффициента извлечения нефти от времени (рисунок 12). Из полученных зависимостей видно, что для случая каверн с малым диаметром итоговый КИН ниже на 21%. Более низкий КИН обусловлен тем, в трещинах, в пустотах большего размера, осталась невытесненная нефть.

В случае, когда порода нейтральна, динамика течения во всех случаях оказалась практически одинаковой. Из зависимостей КИН от времени, представленных на рисунке 13, видно, что итоговый КИН получился одним и тем же во всех случаях, но при этом в случае $d = d_2$ достижение максимального КИН происходило дольше, чем в остальных случаях (зависимости КИН от времени для случаев $d = d_1$ и $d = d_3$ полностью совпадают). Данный результат обусловлен тем, что каверны образовали высокопроводящую сеть каналов. После вытеснения нефти из каверн часть воды просто протекала через каверны, не вытесняя нефть, то есть расходовалась менее эффективно по сравнению со случаями меньших размеров каверн.

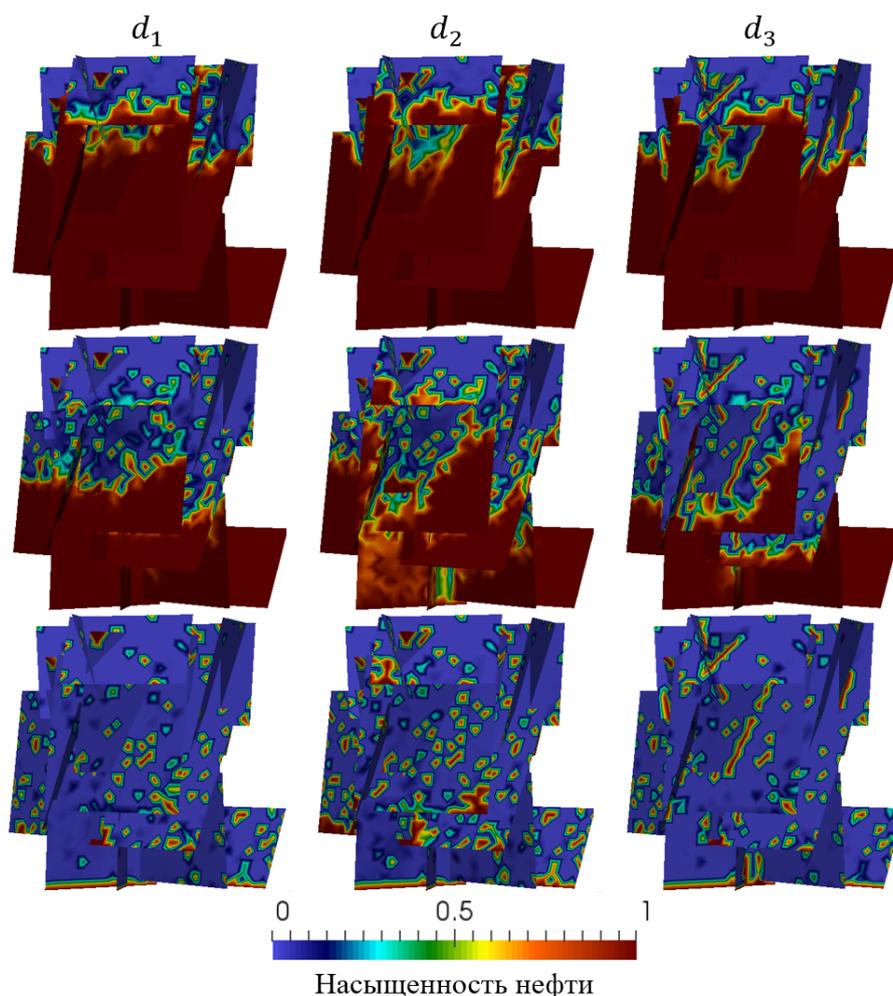


Рис. 14. Динамика вытеснения нефти водой для случая гидрофобной породы.

Рассмотрим случай, когда порода гидрофобна ($\theta = 180^\circ$). Из представленных на рисунке 14 результатов видно, что в случае $d = d_2$ фронт вытеснения продвигается быстрее. Вытеснение в первую очередь происходит в кавернах, так как в гидрофобной породе вода течет преимущественно по пустотам большего размера. В случае $d = d_3$ фронт преимущественно продвигается по трещинам (по пустотам большего размера) и за фронтом в кавернах остаётся запёртая нефть. В случае $d = d_1$ вытеснение происходит как в кавернах, так и в трещинах, фронт вытеснения движется с наименьшей скоростью.

Из представленных на рисунке 15 зависимостей КИН от времени видно, что в результате расчетов во всех случаях были получены различные значения итогового КИН. В случае $d = d_1$ было получено наибольшее значение КИН (96%), поскольку в данном случае вытеснение проходило более равномерно во всей области, чем в остальных случаях.

В случае $d = d_2$ вытеснение происходило преимущественно в пустотах большего размера (в первую очередь в кавернах, а затем и в трещинах). Так как по кавернам произошел прорыв воды, то в дальнейшем вода расходовалась менее эффективно, поэтому итоговый КИН (92%) получился меньше, чем в случае $d = d_1$.

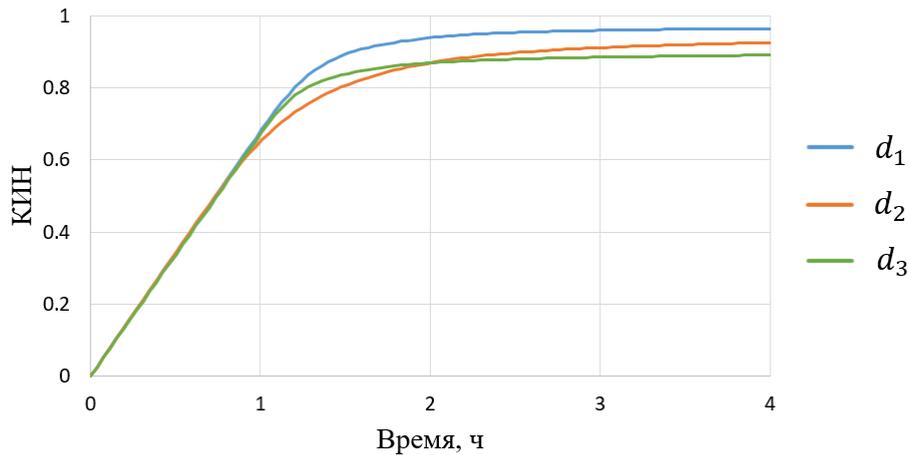


Рис. 15. Зависимость КИН от времени для случая гидрофобной породы.

В случае $d = d_3$ вытеснение происходило преимущественно в пустотах большего размера — в трещинах. Более высокая скорость роста КИН в случае $d = d_3$, чем в случае $d = d_2$, в промежутке времени между первым и вторым часом закачки обусловлена тем, что объём трещин значительно больше объёма каверн, а вытеснение в данном случае происходило преимущественно в трещинах. Соответственно, в указанном промежутке времени вода расходовалась более эффективно на больший суммарный объём пустот. Более низкое итоговое значение КИН в случае $d = d_3$ (89%), обусловлено тем, что в данном случае проводимость каверн очень низкая и капиллярные силы препятствуют течению по кавернам, то есть гидродинамическая связность трещин является наименьшей среди всех рассматриваемых случаев.

6 Заключение

В данной работе было проведено исследование влияния течения в кавернах на динамику вытеснения нефти водой в трещиновато-кавернозной среде. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы о характере влияния течения в кавернах:

- в случае когда порода гидрофобна и характерные размеры каверн меньше характерных размеров трещин, гидродинамическая связность трещин существенно снижается;
- в случае когда порода гидрофобна и характерные размеры каверн больше характерных размеров трещин, по кавернам может произойти быстрый прорыв воды;
- в случае когда порода гидрофильна и характерные размеры каверн меньше характерных размеров трещин, по кавернам может произойти быстрый прорыв воды;

- в случае когда порода обладает нейтральной смачиваемостью, а характерные размеры каверн совпадают либо меньше характерных размеров трещин, наличие течения в кавернах не оказывает влияния на общую динамику вытеснения нефти водой.

Необходимо отметить, что низкая гидродинамическая связность трещин и быстрый прорыв воды являются факторами, негативно сказывающимися на эффективности заводнения. В представленных примерах данные эффекты приводили к снижению КИН на 10-50%.

Каждый пример в данной работе был построен таким образом, что в нем были ярко выражены те или иные условия, в которых течение в кавернах могло бы играть существенную роль. В реальных трещиновато-кавернозных системах влияние течения в кавернах будет определяться совокупностью указанных условий.

Полученные в данной работе результаты говорят о том, что течение в кавернах может играть значительную роль в фильтрационных процессах, и поэтому при моделировании течений в трещиноватых коллекторах и построении на основе моделирования достоверных прогнозов добычи необходимо учитывать наличие каверн на пересечениях трещин.

Список литературы

- [1] Verga F. M. et al. Calibration of fractured reservoirs with dynamic data // SPE Reservoir Simulation Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [2] Блонский А.В., Митрушкин Д.А., Савенков Е.Б., Моделирование течений в дискретной системе трещин: физико-математическая модель // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 65. 27 с. doi:10.20948/prepr-2017-65.
- [3] Блонский А. В., Савенков Е. Б., Математическая модель и алгоритм расчета течения в дискретной системе трещин с кавернами // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2017. № 133. 18 с. doi:10.20948/prepr-2017-133
- [4] Блонский А.В., Митрушкин Д.А., Савенков Е.Б. Моделирование течений в дискретной системе трещин: вычислительные алгоритмы // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 66. 30 с. doi:10.20948/prepr-2017-66.
- [5] Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И. Вычислительные методы. Том II. М.: Наука, 400 с., 1977.