

ГРНТИ 30.51.31

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.2.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРЕЩИННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТРИЦЫ И ТРЕЩИН

© Я. В. Евлампиев^{1,2*}, А. А. Мусин¹, Л. А. Ковалева¹

¹Уфимский университет науки и технологий
Россия, республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

²ООО «Уфимский научно-технический центр»
Россия, республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Аксакова, 59.

Email: y.gormon@mail.ru

Разработка карбонатных отложений существенно отличается от разработки терригенных коллекторов в силу особенностей геологического строения и наличия развитой системы трещин. В работе показана необходимость применения нестандартных методов для контроля за энергетическим состоянием таких коллекторов. Выполнен расчет поля пластового давления в модели дискретной сети трещин (Discrete Fracture Network – DFN). Проведена серия численных экспериментов для различных значений отношения проницаемостей трещин и матрицы (k_f/k_m), а также отношения объемов трещин и матрицы (V_f/V_m). Установлено, что отношение проницаемостей выступает регулятором степени неравномерности выработки запасов коллектора. В рамках разработанной модели определены пороговые значения параметров: при $k_f/k_m < 20$ система ведет себя как квазиоднородная среда, при $20 \leq k_f/k_m \leq 10^5$ реализуется режим двойной пористости и проницаемости, а при $k_f/k_m > 10^5$ доминирует течение по трещинам. Полученные результаты могут быть использованы для экспресс-оценки типа коллектора на ранних этапах разработки месторождений.

Ключевые слова: трещиноватые коллекторы, DFN, пластовое давление, численное моделирование, двойная пористость, классификация Нельсона, карбонатные отложения.

Введение

Современная нефтегазовая отрасль все чаще уделяет внимание изучению трудноизвлекаемых запасов, сосредоточенных в нетрадиционных коллекторах. Специфика таких объектов обусловлена высокой неоднородностью их фильтрационно-емкостных характеристик, что связано со сложной морфологией пустотного пространства и присутствием естественных трещин [1–2]. Матрица породы в этих условиях обычно обладает низкой проницаемостью, поэтому доминирующую роль в процессах фильтрации играет именно трещинная система, которая существенно влияет на характер подземного течения [3].

Применение традиционных методов разработки для интенсификации притока и поддержания пластового давления (ППД) в таких коллекторах часто не дает ожидаемого эффекта и характеризуется слабой прогнозируемостью результатов геолого-технических мероприятий (ГТМ) [4–5]. Это существенно затрудняет проектирование разработки, снижает достоверность прогнозов добычи и качество мониторинга выработки запасов, что в конечном итоге негативно отражается на экономической эффективности эксплуатации месторождения.

Ключом к эффективному управлению разработкой сложных коллекторов является понимание закономерностей распределения пластового давления во взаимосвязи с параметрами матрицы и трещин. Наиболее информативным инструментом для решения этой задачи выступает численное моделирование [6–7], позволяющее проводить виртуальные эксперименты и анализировать различные сценарии без значительных финансовых затрат.

Цель настоящей работы заключается в изучении влияния фильтрационно-емкостных свойств трещиноватого коллектора на характер распределения пластового давления. Для достижения поставленной цели была построена численная модель дискретной сети трещин (Discrete Fracture Network – DFN). В ходе исследования выполнена серия расчетов для различных соотношений проницаемости трещин и матрицы k_f/k_m , а также отношения объемов трещин и матрицы V_f/V_m . Проведена количественная оценка влияния этих параметров на перепад давления между матрицей и трещинами, а также сопоставление полученных данных с классификацией Нельсона [8] для прогнозирования характера выработки запасов.

Таким образом, разработка адекватной модели трещиновато-пористого коллектора представляет собой актуальную задачу, имеющую важное значение для мониторинга и оптимизации разработки месторождений.

Подходы к моделированию трещиноватости

Для исследования различных сценариев разработки нетрадиционных коллекторов в практической деятельности задействуется целый арсенал методов моделирования. Базовым принципом построения таких моделей выступает концепция двух сосуществующих сред. Данный подход подразумевает разбиение порового пространства

на обособленные элементы, каждый из которых характеризуется собственными значениями пористости и проницаемости. При этом трещинная система отвечает за максимальную проводимость коллектора, тогда как матрица аккумулирует преобладающую часть запасов углеводородов. Важнейшей характеристикой является наличие массообмена между средами, интенсивность которого лимитирует скорость перетока флюида из матрицы в трещины и обратно.

Основополагающая работа в данном направлении принадлежит Баренблатту [1], который описал фильтрационные процессы в трещиноватой породе через механизм взаимодействия двух самостоятельных систем. Развивая эту идею, Уоррен и Рут [2] предложили концепцию двойной пористости, согласно которой фильтрация реализуется преимущественно по трещинам, а матрица подключается к процессу за счет обмена флюидом с трещинной системой. Дальнейшая эволюция модели Уоррена–Рута связана с работами исследователей [3–5], которые адаптировали ее для условий многофазной фильтрации.

Модификация, известная как модель двойной пористости и двойной проницаемости (DKDP), дополнительно учитывает возможность фильтрационных перетоков непосредственно между блоками матрицы. Наличие такой возможности расширяет спектр регулируемых параметров, определяющих характер потоков между средами. Однако платой за детализацию выступает высокая вычислительная сложность, обусловленная комбинаторной структурой модели и значительным количеством варьируемых переменных.

Когда объектом исследования выступают изолированные трещины, тектонические разломы или техногенные трещины гидроразрыва, требуется построение согласованных сеток и прямое моделирование течения в каждом проводящем элементе. Метод дискретного моделирования позволяет полностью воспроизвести геометрию трещинной сети, где каждая трещина рассматривается как индивидуальный объект (рис. 1). Поскольку течение флюида моделируется непосредственно по трещинам, исследователь получает возможность детального контроля и мониторинга траекторий его движения внутри системы.

В ситуациях, характеризующихся высокой степенью неоднородности трещинной сети, а также в случаях, когда выработка запасов контролируется преимущественно конвективным переносом, а не межсредовым взаимодействием, применяется модель единой эффективной среды. В рамках этой концепции фильтрационные характеристики матрицы и трещин осредняются и интегрируются в единый параметр проницаемости для каждой ячейки расчетной сетки.

Следует подчеркнуть, что универсального подхода, пригодного для всех геологических ситуаций, не существует. Выбор конкретной модели диктуется спецификой коллекторских свойств и задачами, которые ставит перед собой исследователь. Когда приоритетом является анализ локальных полей пластового давления и изучение механизмов взаимодействия между матрицей и трещинами, наибольшей информативностью обладает дискретный подход. В отличие от моделей двойной пористости, оперирующих осредненными характеристиками, модель DFN обеспечивает возможность прямого задания геометрических параметров каждого трещинного элемента и детального отслеживания траекторий флюидных потоков. Это открывает путь к более детальному и всестороннему анализу влияния параметров трещиноватости на фильтрационные процессы в коллекторе.

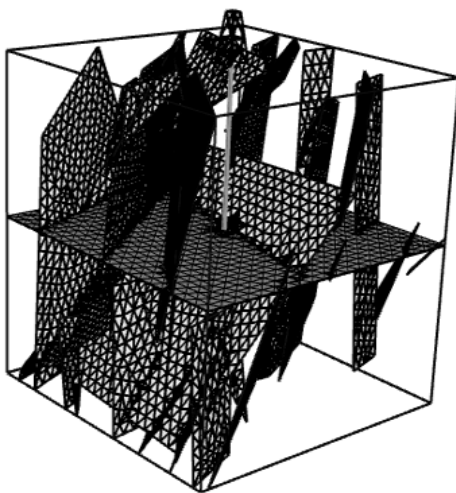


Рис. 1. Пример дискретной сети трещин.

Учитывая практическую направленность настоящего исследования на решение задач мониторинга и проектирования разработки месторождений, в качестве инструмента моделирования была выбрана модель DFN, позволяющая напрямую учитывать геометрию трещинных систем и их влияние на фильтрационные процессы.

Формирование модели дискретной сети трещин базируется на интеграции разнородной геолого-геофизической информации, включающей лабораторные исследования кернового материала, данные геофизических исследований скважин (ГИС) и результаты интерпретации сейсморазведки. Комплексование указанных источников

обеспечивает возможность корректного задания геометрических характеристик трещин: их пространственной ориентации, раскрытости (апертуры), а также статистических параметров распределения трещиноватости в объеме пласта. На построенной сетке задаются вариации фильтрационно-емкостных свойств сред: значения проницаемости, пористости и сжимаемости как для матрицы, так и для трещин. Завершающим этапом выступает проведение численного расчета, в результате которого получается искомое распределение пластового давления в исследуемой области.

Распределение давления в трещиновато-пористом коллекторе

Моделирование процессов фильтрации однофазного слабосжимаемого флюида в трещиновато-пористой среде основывается на решении уравнения пьезопроводности. В предположении малости гравитационных сил и изотропии фильтрационно-емкостных свойств в пределах локального объема, распределение пластового давления описывается следующим уравнением [6–7]:

$$S \frac{\partial P}{\partial t} - T \nabla^2 P = q, \quad (1)$$

где P – давление флюида, T – трансмиссивность среды, S – коэффициент упругоэластичности, отнесенный к единице площади, q – интенсивность источника, отнесенная к единице площади, t – время, ∇^2 – оператор Лапласа.

Для трещины и матрицы трансмиссивности определяются через проницаемость и геометрические параметры:

$$T_f = \frac{k_f w_f}{\mu}, T_m = \frac{k_m w_m}{\mu}, \quad (2)$$

где k_f и k_m – абсолютная проницаемость трещины и матрицы, w_f – раскрытость трещины, w_m – мощность пласта (раскрытость матричного блока), μ – динамическая вязкость флюида.

В двумерной постановке (течение в плоскости трещины) упругоэластичность определяется как произведение объемной упругоэластичности на раскрытость (или мощность пласта). Это связано с тем, что объем трещины или матричного блока в расчете на единицу площади равен w . Для трещины и матрицы коэффициенты упругоэластичности (отнесенные к единице площади) имеют вид:

$$S_f = w_f(c_l + c_f), S_m = w_m(\varphi c_l + c_m), \quad (3)$$

где φ – пористость, c_l – сжимаемость флюида, c_f – сжимаемость трещин, c_m – сжимаемость матрицы. Для трещины $\varphi = 1$ (трещина полностью заполнена флюидом).

Уравнение (1) справедливо как для элементов матрицы, так и для элементов трещин с подстановкой соответствующих значений трансмиссивности T_f или T_m и коэффициента упругоэластичности S_f или S_m .

В начальный момент времени $t = 0$ во всей расчетной области устанавливается однородное распределение давления:

$$P(x, y, z, 0) = P_i. \quad (4)$$

На внешних границах расчетной области Γ задается условие непроницаемости (замкнутости):

$$\left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0, \quad (5)$$

где n – вектор внешней нормали. Данное условие соответствует отсутствию фильтрационного потока через границы моделируемой области.

Граничные условия на скважине задаются путем моделирования ее в виде источника или стока с фиксированным суммарным дебитом. Поскольку скважина пересекает несколько узлов конечно-элементной сетки, то используется условие группового потока [7]. Интенсивность источника q в уравнении (1) связана с дебитом соотношением:

$$\sum_{j \in \Gamma_w} q_j = Q_w(t), q_j = \int_{R_j} q dR, \quad (6)$$

где Γ_w – множество узлов, принадлежащих скважине, $Q_w(t)$ – заданный объемный дебит (в данном случае постоянный), q_j – узловой расход, распределяемый между узлами пропорционально их вкладу в общий поток, R_j – площадь области, связанной с j -м узлом.

Взаимодействия между матрицей и системой трещин определяется условиями на поверхности Γ_{mf} . Предполагается, что на границе контакта выполняется непрерывность давления:

$$P_m|_{\Gamma_{mf}} = P_f|_{\Gamma_{mf}}, \quad (7)$$

а также баланс масс (непрерывность нормального потока):

$$T_m \left. \frac{\partial P_m}{\partial n_{mf}} \right|_{\Gamma_{mf}} = T_f \left. \frac{\partial P_f}{\partial n_{mf}} \right|_{\Gamma_{mf}}, \quad (8)$$

где n_{mf} – нормаль к поверхности раздела, направленная от матрицы к трещине.

Для решения уравнения (1) в областях со сложной геометрией, обусловленной наличием дискретной сети трещин, используется метод конечных элементов. Данный подход обеспечивает высокую точность аппроксимации благодаря минимизации невязки решения на системе базисных функций и широко применяется для задач фильтрации в неоднородных средах [6–7]. Расчетная область (матрица и трещины) дискретизируется сеткой конечных элементов. Аппроксимируя искомую функцию давления P через узловые значения P_m и функции формы ξ , слабая форма уравнения (1) для двумерного случая (течение в плоскости трещины или в срединной поверхности пласта) приводится к следующему виду:

$$\sum_{m=1}^N \left[\int_R (T \bar{\nabla} \xi_n \cdot \bar{\nabla} \xi_m) dR \cdot P_m \right] + \sum_{m=1}^N \int_R \left[(S \xi_n \xi_m) dR \cdot \frac{dP_m}{dt} \right] = \int_R q \xi_n dR, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

где N – общее количество узлов в конечно-элементной сетке, ξ – функция формы (линейная или квадратичная), R – площадь конечного элемента.

Уравнение (9) может быть записано в компактной матричной форме, удобной для численной реализации:

$$\sum_{m=1}^N \left[A_{nm} P_m + D_{nm} \frac{dP_m}{dt} \right] = Q_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

где A_{nm} – матрица проводимости (жесткости), учитывающая фильтрационное сопротивление среды, D_{nm} – матрица емкости, учитывающая способность среды к накоплению флюида, Q_n – вектор узловых источников.

Элементы матриц A_{nm} и D_{nm} вычисляются путем интегрирования по площади каждого конечного элемента:

$$A_{nm} = \int_R T \bar{\nabla} \xi_n \cdot \bar{\nabla} \xi_m dR, \quad (11)$$

$$D_{nm} = \int_R S \xi_n \xi_m dR, \quad (12)$$

$$Q_n = \int_R q \xi_n dR. \quad (13)$$

Для интегрирования уравнения (10) по времени применяется полностью неявная схема, которая обеспечивает безусловную устойчивость вычислительного процесса. Аппроксимация производной давления по времени приводит к следующей системе линейных алгебраических уравнений для определения поля давления на новом временном слое $k + 1$:

$$\left[A + \frac{D}{\Delta t} \right] P^{k+1} = \left[Q^{k+1} + \frac{D}{\Delta t} P^k \right], \quad (14)$$

где k – номер временного шага, Δt – величина шага по времени, P^k – вектор узловых давлений в начале текущего шага, P^{k+1} – искомый вектор узловых давлений в конце шага.

Важно отметить, что вектор узловых источников вычисляется по заданному режиму работы скважины на момент времени. Поскольку дебит скважины является известной функцией времени (в данной работе задается постоянным), значение может быть определено до решения системы уравнений. Таким образом, правая часть уравнения (14) полностью известна, а неизвестным остается лишь вектор давлений, который находится из решения системы линейных алгебраических уравнений.

Решение уравнения (14) на каждом временном шаге позволяет получить динамику распределения пластового давления как в системе трещин, так и в матричной среде с учетом их гидродинамического взаимодействия на поверхностях раздела сред.

Численное моделирование выполнялось с использованием метода конечных элементов на треугольных сетках, аппроксимирующих систему трещин. Реализация алгоритма соответствует подходу, используемому в специализированных программных комплексах для моделирования трещиновато-пористых сред, таких как MAFIC [7]. Это обеспечивает корректность применяемой вычислительной схемы и воспроизводимость полученных результатов.

Результаты численного моделирования

Для интерпретации результатов численного моделирования и классификации исследуемой среды по характеру фильтрации флюида целесообразно использовать классификацию, предложенную Нельсоном [8] (рис. 2). Данная классификация выделяет четыре типа коллекторов в зависимости от вклада матрицы и трещин в емкость и проницаемость:

I тип – проницаемость и емкость обусловлены исключительно системой трещин; матрица практически непроницаема и не содержит запасов.

II тип (двойная пористость, одинарная проницаемость) – основные запасы сосредоточены в матрице, но фильтрация происходит преимущественно по трещинам.

III тип (двойная пористость и двойная проницаемость) – и матрица, и трещины вносят значимый вклад как в емкость, так и в проницаемость.

IV тип – коллектор представляет собой единую пористую среду; трещины играют роль только в создании анизотропии свойств.

В рамках данной работы сопоставление полученных зависимостей распределения давления с типами по Нельсону позволяет количественно определить границы перехода между режимами течения.

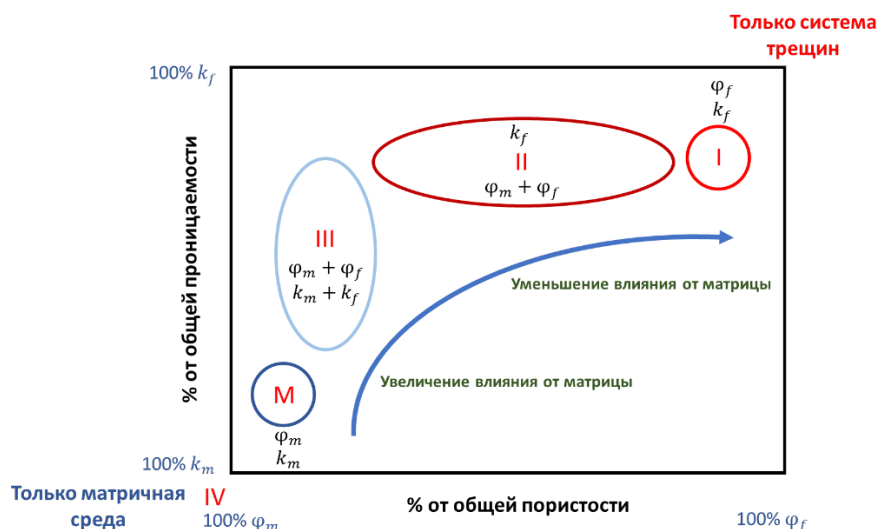


Рис. 2. Классификация Нельсона.

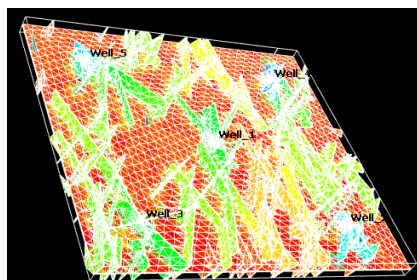
Далее приведены результаты численного моделирования модели дискретной сети трещин для фильтрации однофазного потока жидкости в системе трещин. Создание численной модели проводилось при следующих значениях гидродинамических характеристик (табл. 1):

Таблица 1

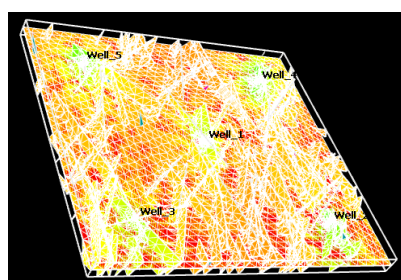
Исходные параметры численной модели

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Начальное пластовое давление	P_i	$490 \cdot 10^5$	Па
Дебит скважины	Q_w	30	м ³ /сут
Время работы скважины	t	1000	ч
Раскрытость трещин	w_f	0,01	м
Проницаемость системы трещин	k_f	$10 \cdot 10^{-12}$	м ²
Сжимаемость трещин	c_f	$1 \cdot 10^{-9}$	Па ⁻¹
Раскрытость матричной среды	w_m	20	м
Проницаемость матричной среды	k_m	$0,01 \cdot 10^{-15}$	м ²
Сжимаемость матрицы	c_m	$1 \cdot 10^{-10}$	Па ⁻¹
Сжимаемость флюида	c_l	$1 \cdot 10^{-9}$	Па ⁻¹
Вязкость флюида	μ	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Па·с
Пористость	φ	0,2	-
Размер области построения	$L_x \times L_y \times L_z$	$3\,000 \times 3\,000 \times 200$	м

На рис. 3 представлены карты распределения давления для серии модельных значений отношения проницаемостей системы трещин и матричной среды k_f/k_m при фиксированном отношении объемов трещин и матрицы. При высоком отношении проницаемостей (рис. 3а) воронка депрессии глубокая и локализована в призабойной зоне, что обусловлено высокой проводимостью трещинной сети при слабом участии матрицы в процессе фильтрации. При малых значениях k_f/k_m (рис. 3г) воронка депрессии расширяется, а распределение давления становится более равномерным по области. За счет хорошо развитой системы трещин вовлечение матрицы в процесс выработки происходит эффективно, что проявляется в общем падении давления в системе и росте минимального значения давления, указывающем на возрастание подпитки трещин со стороны матрицы.



(а)



(б)

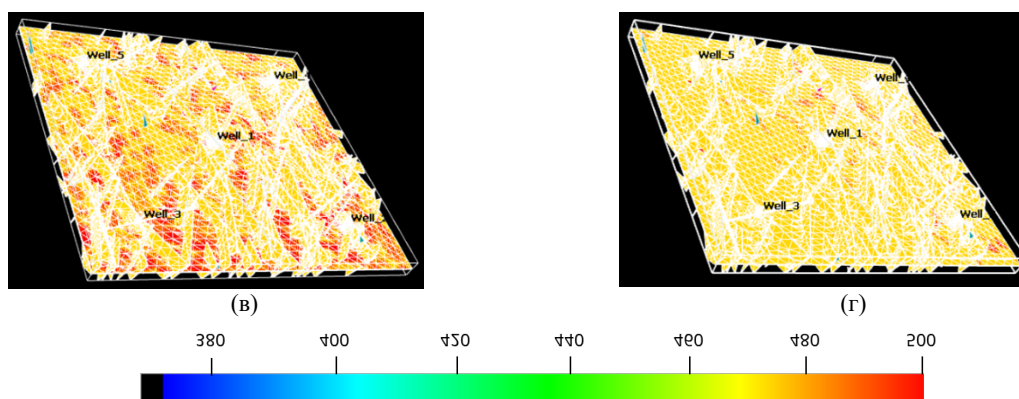


Рис. 3. Карта давлений в момент времени $t = 1\,000$ ч в зависимости от отношения проницаемостей системы трещин и матричной среды: (а) $k_f/k_m = 1\,000\,000$, (б) $k_f/k_m = 1\,000$, (в) $k_f/k_m = 100$, (г) $k_f/k_m = 1$.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) позволяет выделить три характерных режима течения, соответствующих классификации Нельсона:

При $k_f/k_m < 20$ разница давлений между матрицей и трещинами не превышает 1 атм. В этом диапазоне матрица успевает полностью «подпитывать» трещину, давления в средах выравниваются, и система ведет себя как квазиоднородная среда (IV тип по Нельсону).

В диапазоне $20 \leq k_f/k_m \leq 10^5$ наблюдается резкий рост перепада давлений от 1 до 100 атм. Это связано с тем, что при увеличении проницаемости трещин флюид из матрицы не успевает поступать в трещину с той же скоростью, с которой он отбирается через скважину. Данный диапазон соответствует режиму двойной пористости и двойной проницаемости (III тип по Нельсону).

При $k_f/k_m > 10^5$ рост перепада давлений замедляется, и система переходит в режим, где течение происходит преимущественно по трещинам, а матрица практически не участвует в фильтрации. Это соответствует режиму двойной пористости и одинарной проницаемости (II тип по Нельсону).

Физически отношение проницаемостей выступает в роли регулятора степени равномерности выработки запасов. Чем больше этот параметр, тем значительнее разница в степени выработки между матрицей и трещинами.

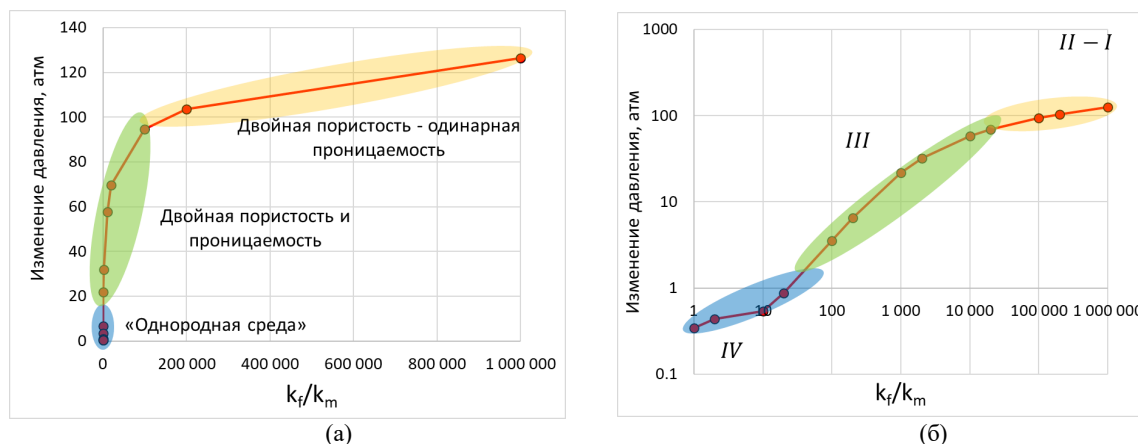


Рис. 4. Разница давлений в матрице и трещинах в зависимости от отношения проницаемостей системы трещин и матричной среды: (а) линейная шкала, (б) логарифмическая шкала.

На рис. 5 представлены карты распределения давления для серии модельных значений отношения объемов системы трещин и матричной среды V_f/V_m при фиксированном отношении проницаемостей k_f/k_m . Как видно из карт, при малых значениях (рис. 5а) воронка депрессии сосредоточена в призабойной зоне, что обусловлено недостаточным количеством трещин для эффективного дренирования матрицы. С увеличением V_f/V_m (рис. 5в, 5г) воронка депрессии расширяется, а распределение давления становится более равномерным по области. Равномерная выработка запасов при больших значениях V_f/V_m достигается за счет увеличения числа трещин, которое обеспечивает эффективную гидродинамическую связь между матрицей и трещинной сетью.

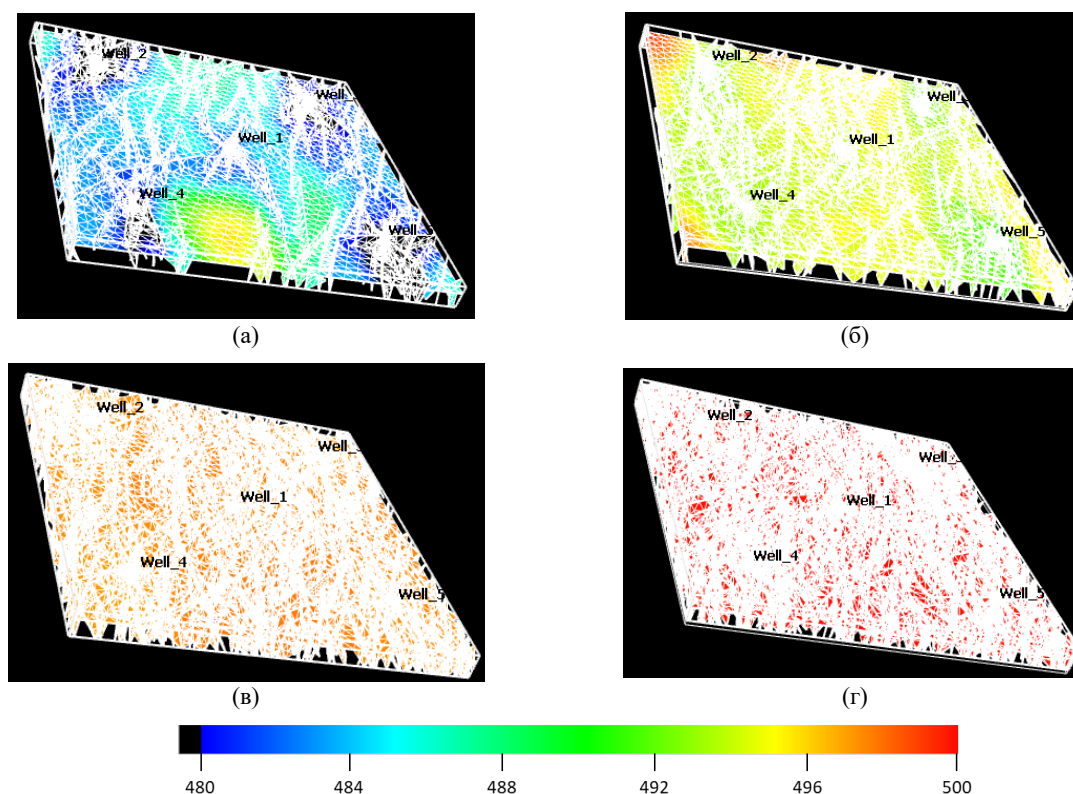


Рис. 5. Карта давлений в момент времени $t = 1000$ ч в зависимости от отношения объемов системы трещин и матричной среды:
(а) $V_f/V_m = 0,01$, (б) $V_f/V_m = 0,05$, (в) $V_f/V_m = 0,1$, (г) $V_f/V_m = 0,2$.

Анализ зависимостей (рис. 6) также позволяет выделить три характерных режима:

При $V_f/V_m < 0,03$ наблюдается наибольший перепад давлений (более 15 атм). Малое количество трещин не способно обеспечить эффективную гидродинамическую связь, и основная часть флюида остается в матрице. Это соответствует переходной зоне между II и III типами по Нельсону.

В диапазоне $0,03 \leq V_f/V_m \leq 0,1$ перепад давлений стабилизируется в диапазоне 1–2 атм. Система трещин уже достаточно развита, чтобы обеспечить дренирование, но матрица продолжает отдавать флюид. Это соответствует режиму двойной пористости и одинарной проницаемости (II тип по Нельсону).

При $V_f/V_m > 0,1$ перепад давлений практически отсутствует, и система ведет себя как квазиоднородная среда с доминированием течения по трещинам (переход от II к I типу по Нельсону).

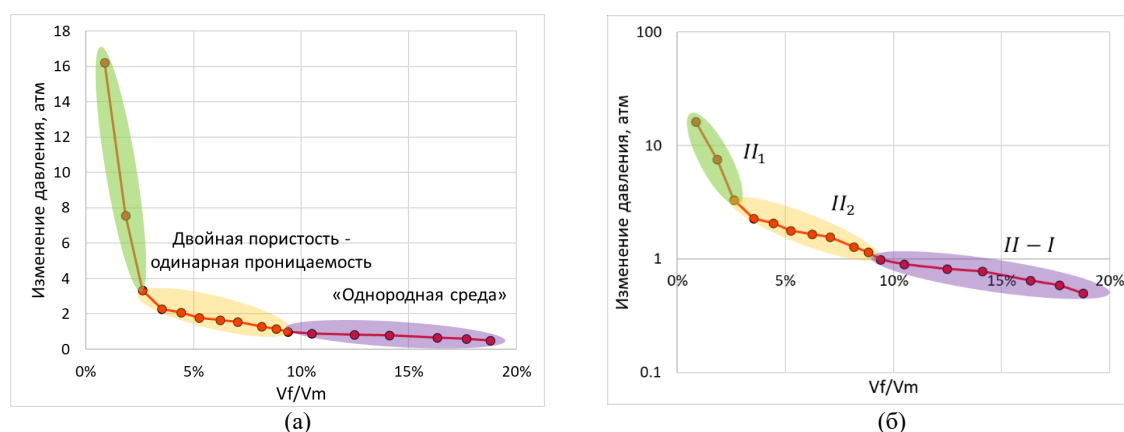


Рис. 6. Разница давлений в матрице и трещинах в зависимости от отношения объемов системы и матричной среды:
(а) линейная шкала, (б) логарифмическая шкала.

Интересно отметить, что влияние отношения объемов трещин и матрицы противоположно влиянию отношения проницаемостей: увеличение объема трещин снижает градиент давления и способствует более равномерной выработке запасов.

Полученные зависимости изменения давления от отношения проницаемостей и отношения объемов (рис. 3–6) двух сред демонстрируют физически ожидаемые закономерности: увеличение отношения проницаемостей k_f/k_m приводит к росту градиента давления в призабойной зоне и повышению перепада между матрицей и трещинами, тогда как рост отношения объемов трещин и матрицы V_f/V_m способствует выравниванию давления и более равномерному дренированию. Наблюдаемые зависимости качественно соответствуют физическим представлениям о фильтрационных процессах в трещиновато-пористых средах.

Заключение

В рамках данной работы выполнено численное моделирование распределения пластового давления в трещиновато-пористом коллекторе с использованием модели DFN. Исследовано влияние отношения проницаемостей k_f/k_m и отношения объемов трещин и матрицы V_f/V_m на перепад давления между матрицей и системой трещин. Для заданного набора исходных параметров модели (фильтрационно-емкостных свойств, геометрии трещинной сети, свойств флюида и режиме работы скважины) в ходе анализа полей давления были установлены пороговые значения исследуемых величин, соответствующие смене режимов течения по классификации Нельсона: малые значения $k_f/k_m < 20$ характеризуют «однородную зону». Несущественные изменения давления между средами – около 1 атм. Диапазон k_f/k_m от 20 до 10 000 представляет область двойной пористости и проницаемости. Резкий рост изменения давлений – от 1 до 100 атм. Большие значения $k_f/k_m > 10^5$ характеризуют двойную пористость и одинарную проницаемость. Продолжается плавный рост давления. Малые значения $V_f/V_m < 0,03$ представляют «смешанную зону». Наибольший перепад давления более 15 атм. Область $0,03 \leq V_f/V_m \leq 0,1$ характеризуется наличием двойной пористости и одинарной проницаемости. Незначительное изменение давления в диапазоне 1–2 атм. Превышение параметра V_f/V_m более 0,1 демонстрирует однородную область – практически отсутствует перепад давления.

Полученные пороговые значения отношения проницаемостей k_f/k_m и отношения объемов трещин и матрицы V_f/V_m могут быть использованы для экспресс-оценки типа коллектора по классификации Нельсона на ранних этапах разработки месторождений, свойства которых соответствуют рассмотренному в работе диапазону параметров. В частности, при известных значениях проницаемости керна (матрицы) и эффективной проницаемости пласта, определенной по результатам гидродинамических исследований скважин, отношение этих величин позволяет сделать предварительный вывод о преобладающем типе фильтрационной среды и выбрать оптимальную стратегию разработки еще до проведения детальных геофизических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barenblatt G. I., Zheltov I. P., Kochina I. N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata] // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1960. Vol. 24. No. 5. P. 1286–1303.
2. Warren J. E., Root P. J. The behavior of naturally fractured reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal. 1963. Vol. 3. No. 03. P. 245–255.
3. Kazemi H., Merrill L. S. Jr, Porterfield K. L., Zeman P. R. Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal. 1976. Vol. 16. No. 06. P. 317–326.
4. Arbogast T., Douglas J. Jr, Hornung U. Derivation of the double porosity model of single phase flow via homogenization theory // SIAM Journal on Mathematical Analysis. 1990. Vol. 21. No. 4. P. 823–836.
5. Douglas J. Jr, Arbogast T., Paes-Lemme P. J., et al. Immiscible displacement in vertically fractured reservoirs // Transport in Porous Media. 1993. Vol. 12. P. 73–106.
6. Bear J., Braester C. On the flow of two immiscible fluids in fractured porous media // Developments in Soil Science. 1972. Vol. 2. P. 177–202.
7. Miller I., Lee G., Dershowitz W. MAFIC – matrix/fracture interaction code with heat and solute transport. User documentation, version 2.0. Redmond, USA: Golder Associates Inc., 2001.
8. Nelson R. A. Evaluating fractured reservoirs. In: Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Houston, USA: BP Amoco, 2001. P. 1–100.

Поступила в редакцию 31.03.2026 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.2.2

**NUMERICAL SIMULATION OF RESERVOIR PRESSURE DISTRIBUTION
IN FRACTURED RESERVOIRS TAKING INTO ACCOUNT
THE STORAGE AND TRANSMISSIBILITY PROPERTIES
OF THE MATRIX AND FRACTURES**

© Ya. V. Evlampiev^{1,2*}, A. A. Musin¹, L. A. Kovaleva¹

*Ufa University of Science and Technology
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*LLC "Ufa Science-Technical Center"
59 Aksakov st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

**Email: y.gormon@mail.ru*

The development of carbonate reservoirs differs significantly from that of terrigenous reservoirs due to their geological structure and the presence of a developed fracture system. This study demonstrates the necessity of applying non-standard methods to monitor the energy state of such reservoirs. A reservoir pressure field was calculated using a Discrete Fracture Network (DFN) model. A series of numerical experiments were conducted for various values of the fracture-matrix permeability ratio (k_f/k_m) and the fracture-matrix volume ratio (V_f/V_m). It was established that the permeability ratio acts as a regulator of the degree of heterogeneity in reservoir depletion. Within the framework of the developed model, threshold values of the parameters were determined: at $k_f/k_m < 20$, the system behaves as a quasi-homogeneous medium; at $20 \leq k_f/k_m \leq 10^5$, a dual porosity and dual permeability regime is realized; and at $k_f/k_m > 10^5$, fracture-dominated flow prevails. The obtained results can be used for the rapid assessment of reservoir type at the early stages of field development.

Keywords: fractured reservoirs, DFN, reservoir pressure, numerical modeling, dual porosity, Nelson's classification, carbonate deposits.

Received 31.03.2026.

Об авторах / About the authors

ЕВЛАМПИЕВ Ярослав Вячеславович

Аспирант, кафедра прикладной физики,
физико-технический институт.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: y.gormon@mail.ru

МУСИН Айрат Ахматович

Кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной физики, физико-технический
институт.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: mus-airat@yandex.ru

КОВАЛЕВА Лiana Ароновна

Доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной физики, физико-технический институт.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: liana-kovaleva@yandex.ru
Web of Science Researcher ID: B-7463-2018.

EVLAMPIEV Yaroslav Vyacheslavovich

Postgraduate Student, Department of Applied Physics,
Institute of Physics and Technology.
Ufa University of Science and Technology.
Email: y.gormon@mail.ru

MUSIN Airat Akhmatovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Docent, Associate Professor of the Department of Applied
Physics, Institute of Physics and Technology.
Ufa University of Science and Technology.
Email: mus-airat@yandex.ru
Scopus Author ID: 36778696600.

KOVALEVA Liana Aronovna

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Applied Physics, Institute of Physics and Technology.
Ufa University of Science and Technology.
Email: liana-kovaleva@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-8953-6490.
Web of Science Researcher ID: B-7463-2018.
Scopus Author ID: 7102990107.