На правах рукописи

Бобренёва Юлия Олеговна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В КОЛЛЕКТОРАХ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРОВОГО ТИПА

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва-2022

Работа выполнена в Институте нефтехимии и катализа – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Научный руководитель:	**Губайдуллин Ирек Марсович** доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математической химии ИНК УФИЦ РАН
Официальные оппоненты:	**Колдоба Александр Васильевич** доктор физико-математических наук, профессор МФТИ, заведующий лабораторией флюидодинамики и сейсмоакустики Московского физико-технического института (МФТИ)
	Чистяков Александр Евгеньевич доктор физико-математических наук, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета (ДГТУ)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 8 декабря 2022 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.237.01 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и на сайте www.keldysh.ru.

Автореферат разослан «   » _______________2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук — Корнилина М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Представляемая работа посвящена разработке вычислительных алгоритмов и комплексов программ для математического моделирования массопереноса в среде с двойной пористостью при проведении гидродинамического исследования скважин на неустановившемся режиме течения.

На сегодняшний день в карбонатных коллекторах сосредоточено до 60% запасов нефти, поэтому изучению продуктивных пластов и развитию методов добычи углеводородов в трещиновато-поровых коллекторах уделяется много внимания. Интерес и сложность изучаемого объекта заключается в наличии пустотного пространства в виде трещин и каверн, которые требуют новых подходов к разработке. Процесс фильтрации в таких средах не описывается с достаточной точностью классическими моделями фильтрации и требует использования более сложных моделей двойной пористости и т.д.

Для рациональной разработки нефтяных и газовых залежей важным является наличие информации высокого качества о фильтрационно-емкостных свойствах коллектора, что напрямую связано с изучением особенностей фильтрации жидкостей в пластах. Одним из самых эффективных инструментов, позволяющим изучить свойства пласта, на сегодняшний день являются гидродинамические исследования скважин (ГДИС). Гидродинамические исследования скважин – система мероприятий, проводимых на скважинах по специальным программам и предназначенных для изучения продуктивных пластов при их испытании, освоении и эксплуатации с целью получения данных об их продуктивности, фильтрационных параметрах, границах пласта и особенностях зон дренирования, типа пласта-коллектора.

Для традиционных моделей фильтрации типа «одинарной среды» разработаны эффективные алгоритмы как прямые для моделирования процесса фильтрации, так и методы интерпретации данных ГДИС для идентификации параметров моделей. Однако, ситуация сильно усложняется в случае применения моделей типа «двойной среды».

Существующие как в России, так и за рубежом программы для анализа и интерпретации результатов ГДИС не позволяют проводить полный спектр расчетов и не всегда вычислительно эффективны, что ограничивает круг решаемых с их помощью технико-экономических задач по разработке.

Поэтому возникает необходимость в создании быстросчетного инструмента, который позволит решать задачи оперативного планирования, формирующиеся при разработке месторождения, куда относится проведение экспресс-оценки требуемой длительности остановки перед исследованием, а также тщательное изучение поведения процессов флюидодинамики при различных параметрах пласта.

Как следствие, создание вычислительных основ, комплексов программ для моделирования массопереноса в трещиновато-поровых коллекторах при проведении гидродинамических исследований является актуальной задачей.

Целью работы является разработка математической модели, численного алгоритма и создание программного комплекса для моделирования фильтрации жидкости при проведении гидродинамического исследования в коллекторе трещиновато-порового типа.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Построение математической модели массопереноса в случаях однофазной и двухфазной фильтрации для описания гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа с учетом скважины.
2. Построение разностных схем для двухфазной модели фильтрации типа двойной пористости на основе алгоритма расщепления по физическим процессам, обеспечивающего корректность и согласованность потоков в системе трещин и поровом коллекторе.
3. Разработка программного комплекса для моделирования фильтрации жидкости в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа.
4. Проведение вычислительных экспериментов в случаях однофазной и двухфазной фильтрации жидкости при проведении гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления в добывающих скважинах в коллекторе трещиновато-порового типа. Апробация реализованных численных схем и проверка на адекватность полученных результатов.

Научная новизна результатов исследования заключается в

1. построении новой флюидодинамической модели в трещиновато-поровых коллекторах в рамках модели двойной пористости для описания гидродинамических исследований методом кривой восстановления давления в добывающей скважине с учетом влияния процессов, которые возникают при закрытии скважины на исследование;
2. разработке новых эффективных вычислительных алгоритмов для решения полученных систем уравнений модели, обеспечивающих корректность и согласованность потоков в системе трещин и поровом коллекторе;
3. разработке программного комплекса для моделирования гидродинамического исследования на неустановившемся режиме течения в добывающей скважине в случае однофазной и двухфазной фильтрации жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа;
4. выполнении параметрических исследований динамики давления и насыщенности в зависимости от значений проницаемости, влияния ствола скважины и скин-фактора, расчёте оптимального времени длительности остановки скважины с минимальными потерями по добыче, необходимого для проведения гидродинамического исследования на неустановившемся режиме.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в создании программного комплекса для моделирования процесса фильтрации жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа при планировании гидродинамических исследований на неустановившихся режимах. Разработанный программный комплекс применим для изучения флюидодинамических процессов и оценки оптимального времени остановки скважины при гидродинамическом исследовании методом кривой восстановления давления в среде с двойной пористостью в коллекторе трещиновато-порового типа. Данный программный комплекс может быть использован для прогноза дебитов, добычи и расчета оптимальных режимов работы скважин. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664711).

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач применялись методы механики сплошной среды, методы вычислительной математики. Реализация программы выполнена на языке C++.

Положения, выносимые на защиту:

- Предложена математическая модель массопереноса в случаях однофазной и двухфазной фильтрации для описания гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа для системы «скважина-пласт».

- Предложены разностные схемы с временными весами на основе метода расщепления модели по физическим процессам и обладающие улучшенными свойствами в части учета пространственных потоков флюида, а также между системой трещин и поровым коллектором.

- Разработан программный комплекс, реализующий математическую модель и предложенный численный алгоритм. Этот комплекс применим для изучения флюидодинамических процессов и решения задач оперативного планирования при разработке месторождений. Выполнены параметрические исследования динамики давления и насыщенности в зависимости от значений проницаемости, влияния ствола скважины и скин-фактора, рассчитано оптимальное время длительности остановки скважины с минимальными потерями по добыче, необходимое для проведения гидродинамического исследования на неустановившемся режиме.

Достоверность результатов подтверждается сравнением результатов численного моделирования с промысловыми данными, полученными во время проведения натурного эксперимента, а также воспроизведением известных результатов других исследователей, использованием обоснованных методов построения математических моделей и алгоритмов.

Личный вклад автора. Автор непосредственно участвовал в постановке цели и задач диссертационной работы. Лично автору принадлежит описание математических моделей, разработка алгоритмов и разработка программного комплекса для решения поставленных задач и его верификации путем сравнения с аналитическим решением и промысловыми данными, а также проведение вычислительных экспериментов, формирование выводов и подготовка научных публикаций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах Института нефтехимии и катализа УФИЦ

РАН, Уфимского государственного нефтяного технического университета, Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, а также на 16 всероссийских и международных конференциях. Некоторые конференции, где были представлены результаты работы: III Межрегиональная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах» (Уфа, 2017-2021гг.); XIII Международная научная конференция «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании (DEAMM)» (Саранск, 2016, 2017, 2021г.); IV International conference on information technology and nanotechnology (ITNT), (Самара, 2018, 2019 г.); Международная конференция «Вычислительная математика и математическая геофизика», посвященная 90-летию со дня рождения академика А.С. Алексеева (Новосибирск, 2018 г.); Международная конференция «Суперкомпьютерные дни в России» (RuSCDays) (Москва, 2019, 2021 г.); Международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ) (2016, 2020, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные информационные технологии и математическое моделирование 2021» (ИИТ&ММ-2021) (пос. Дивноморское, 2021 г.) и т.д.

Связь с научными программами. Работа выполнена при поддержке следующих научных программ:

1. Проект РФФИ №19-37-50025 (2019 г.) «Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа с применением параллельных технологий». Исполнитель Бобренёва Ю.О.

2. Проект РНФ №21-71-20047 (2021-2024 гг.) «Разработка теоретических основ и создание высокопроизводительных алгоритмов для двухфазных математических моделей фильтрации жидкости в коллекторах трещиновато-порового типа». Основной исполнитель Бобренёва Ю.О.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научных работы, из них 3 – в изданиях, включенных в перечень ВАК, 7 – в изданиях, индексируемых в Scopus, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664711.

Структура и объем работы. Материал диссертационной работы изложен на 129 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 138 наименований и содержит 4 таблицы и 47 рисунков.

Благодарность. Автор выражает искреннюю благодарность за помощь в выборе темы научного исследования и участие в обсуждении результатов научному руководителю д.ф.-м.н. Губайдуллину И.М., признательность за плодотворное обсуждение результатов работы на различных этапах ее выполнения к.ф.-м.н. Давлетбаеву А.Я., д.ф.-м.н. Повещенко Ю.А., д.ф.-м.н. Савенкову Е.Б., д.ф.-м.н. Подрыге В.О., к.ф.-м.н. Рагимли П.И.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научные результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен литературный обзор отечественных и зарубежных источников по теоретическим и экспериментальным работам, посвященных изучению однофазной и двухфазной фильтрации жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа. Рассмотрены модели двойной пористости различных авторов, изучены существующие подходы и современные программные комплексы для решения задачи фильтрации жидкости в карбонатных коллекторах при проведении гидродинамических исследований в добывающих скважинах. В ходе анализа выявлено, что основное развитие темы направлено на построение сложных гидродинамических моделей всего месторождения, которые не эффективны при решении оперативных производственных задач в рамках мониторинга месторождения. Существующие программные комплексы не позволяют анализировать все параметры, актуальные с точки зрения разработки в рамках гидродинамических исследований скважин. Приведены актуальность и обзор существующих методов гидродинамических исследований скважин на неустановившихся режимах течения.

Во второй главе представлены физическая и математическая модели процесса фильтрации однофазной жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа для моделирования гидродинамического исследования на неустановившемся режиме течения в добывающей скважине, где учтены все основные влияющие на исследование процессы.

Процесс фильтрации жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа рассматривается на основе модели двойной пористости Уоррена-Рута. В данной модели для оценки параметров системы используется геометрическая модель среды, которая определяется множеством блоков. Существуют разные геометрические модели блоков, представляющие поровую часть коллектора (матрицу). В рамках диссертации блоки будут представлены параллелепипедами. При этом матрица, обладает высокой пористостью и низкой проницаемостью и разделена сетью естественных трещин, которые в свою очередь имеют низкую пористость и высокую проницаемость. Фильтрация жидкости в пласте осуществляется по сети трещин, а матрица рассматривается как емкость, непрерывно подпитывающая сеть естественных трещин. Распределение давления описывается уравнениями пьезопроводности в осесимметричной постановке, которые являются следствиями законов сохранения массы и закона Дарси:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial P^m}{\partial t} = \alpha \frac{k_m}{\mu \varphi_m c_{tm}} \left(P^f - P^m\right), \\ &\frac{\partial P^f}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k_f}{\mu \varphi_f c_{tf}} r \frac{\partial P^f}{\partial r} \right) - \alpha \frac{k_m}{\mu \varphi_f c_{tf}} \left(P^f - P^m\right). \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь φ_f – пористость сети трещин, φ_m – пористость матрицы, c_{tf} – сжимаемость сети трещин (1/Па), c_{tm} – сжимаемость матрицы (1/Па), k_f – проницаемость сети трещин (м^2), k_m – проницаемость матрицы (м^2), μ – вязкость нефти (Па·с), P^f – пластовое давление в сети трещин (Па), P^m – пластовое давление в матрице (Па), α – коэффициент трещиноватой породы (1/м^2).

Пространственно-временной интервал, в котором задана система уравнений, представлен в виде:

$$r_w \le r \le r_e, \qquad 0 \le t \le t_k, \tag{2}$$

где r_w – радиус скважины (м), r_e – радиус контура питания (м), t – время (с), t_k – заданный конечный момент времени (окончание исследования) (с).

Размеры блоков матрицы определяются следующим образом и задаются как:

$$\alpha = \frac{180}{L^2}, \qquad L = \frac{3abc}{ab + bc + ca}, \tag{3}$$

где L – размер блоков (м), a – длина стороны блока матрицы (м), b – ширина стороны блока матрицы (м), c – высота стороны блока матрицы (м).

При проведении ГДИС важно учитывать процессы, которые протекают в призабойной зоне пласта и стволе скважины при ее закрытии на исследование. Два основных фактора, которые вносят корректировку в модель, – это дополнительный перепад давления (или скин-фактор) и процесс расширения/сжатия жидкости в стволе скважины (или эффект влияния объема ствола скважины). Эти эффекты моделируются специального вида граничными условиями для задачи (1), заданные на стенке скважины при $r = r_w$.

$$\begin{gathered} P^m\big|_{t=0} = P_0, \qquad P^f\big|_{t=0} = P_0, \qquad \left.\frac{\partial P^f}{\partial r}\right|_{r=r_e} = 0, \\ 2\pi h_m \frac{k_f}{\mu}\left(r\frac{\partial P^f}{\partial r}\right)_{r=r_{wa}} = -qB + \mathrm{C}_s\left(\frac{\partial P^f}{\partial t}\right)_{r=r_{wa}}, \quad r_{wa} = r_w \exp(-S), \end{gathered} \tag{4}$$

где h_m – эффективная мощность пласта (м), q – дебит жидкости (м^3/сут), $\pi \approx 3.14$, B – объемный коэффициент (м^3/м^3), C_s – влияние ствола скважины (м^3/Па), S – скин-фактор, остальные параметры представлены в уравнениях (1) – (3).

Для системы дифференциальных уравнений (1) известны асимптотические решения, которые не всегда могут быть применены для решения практически значимых задач[1]. В связи с этим будет рассматриваться численное решение задачи.

В третьей главе описываются разностные схемы, метод численного решения и вычислительные эксперименты массопереноса однофазной жидкости при гидродинамическом исследовании на неустановившемся режиме в добывающей

---

[1] **Т.Д., Голф-Рахт.** *Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов.* [ред.] Ковалева А.Г. [перев.] Голованова П.К., Власенова В.В., Покровский В.В. Бардина Н.А. Москва : Недра, 1986. стр. 608.

скважине в коллекторе трещиновато-порового типа. Представлены результаты тестовых расчётов, которые демонстрируют работоспособность предложенной разностной схемы.

При решении дифференциальных уравнений в частных производных (1) – (4) используется метод конечных разностей. Для построения разностной схемы вводится равномерная сетка, как по пространству, так и по времени:

$$\overline{W}_h = \{r_i = ih, i = 0, 1 \ldots N, Nh = r_e\}, \overline{W}_\tau = \{t_j = j\tau, j = 0, 1 \ldots M, M\tau = t_k\}, \quad (5)$$

где h – шаг сетки по радиусу, τ – шаг сетки по времени, N и M – число узлов по радиусу и времени, соответственно.

К конечно-разностной схеме решения уравнений пьезопроводности предъявляются особые требования, главными из которых являются обладание свойством консервативности и устойчивости. В работе с целью создания численного алгоритма, обладающего указанными свойствами, строится неявная конечно-разностная схема на основе дивергентной формы уравнения пьезопроводности с первым порядком точности по времени и вторым по пространственной координате:

$$\begin{gathered}
\frac{P_{mi}^{j+1} - P_{mi}^{j}}{\tau} = \alpha \frac{k_m}{\mu\varphi_m c_{tm}}\left(P_{mi}^{j+1} - P_{fi}^{j+1}\right), \\
\frac{P_{fi}^{j+1} - P_{fi}^{j}}{\tau} = \frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2}\left(r_{i+\frac{1}{2}} P_{fi+1}^{j+1} - \left(r_{i+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}}\right) P_{fi}^{j+1} + r_{i-\frac{1}{2}} P_{fi-1}^{j+1}\right) + \\
+\alpha \frac{k_m}{\mu\varphi_f c_{tf}}\left(P_{mi}^{j+1} - P_{fi}^{j+1}\right).
\end{gathered} \quad (6)$$

Построенная неявная разностная схема (6) является устойчивой, то есть позволяет проводить интегрирование краевой задачи с любым разностным шагом по времени. Выбор неявной схемы обосновывается большим разбросом входных параметров модели (так в реалистичных ситуациях проницаемость варьируется в диапазоне от $5 \cdot 10^{-17}$ до $5 \cdot 10^{-10}$). Использование же явной схемы требует выполнение условия устойчивости $\tau \leq h^2 \varphi_f \mu c_{tf} / 2k_f$, что значительно увеличивает объем вычислений.

Разностная схема (6) может быть записана в виде следующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$A_i P_{i-1} - C_i P_i + B_i P_{i+1} = -F_i. \quad (7)$$

Для решения СЛАУ с блочной трехдиагональной матрицей использовался метод матричной прогонки. Элементами полученной трехдиагональной матрицы являются матрицы с размерностью 2×2:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2} r_{i-\frac{1}{2}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_m c_{tm}} & -\frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_m c_{tm}} \\ -\frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_f c_{tf}} & 1 + \frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2}\left(r_{i+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}}\right) + \frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_f c_{tf}} \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2} r_{i+\frac{1}{2}} \end{bmatrix},$$

$$F_i = \begin{bmatrix} P_m \\ P_f \end{bmatrix}.$$

Представленная выше разностная схема была реализована в виде программного модуля, написанного на языке C++, который позволяет получить решение задачи (1) - (4) с заданными начальными и граничными условиями.

Представлены результаты численного моделирования гидродинамических исследований на неустановившемся режиме для добывающей скважины. Выполнены расчеты для фильтрации жидкости при различных размерах блоков матрицы и проведен анализ производных Бурде по давлению для проницаемости, скин-фактора, влияния ствола скважины и параметров двойной пористости.

Для верификации численного алгоритма на первом этапе получены решения массопереноса в виде динамик давления около скважины. На рис. 1 представлено сравнение численного решения с аналитическим в безразмерных переменных, на рис. 2 сравнение численного решения с экспериментальными данными. Отмечается хорошее совмещение кривых, относительная погрешность расчета составляет не более 7%, что является приемлемым на практике.

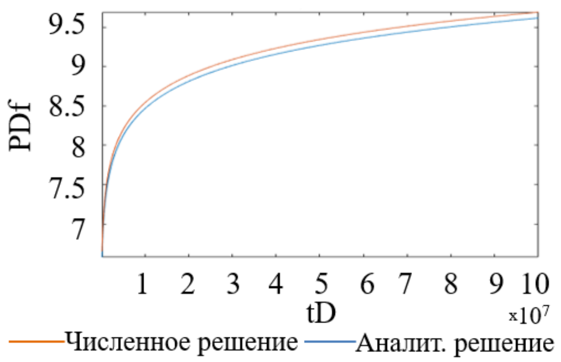

Рис.1 Сопоставление результатов численного расчета с аналитическим решением

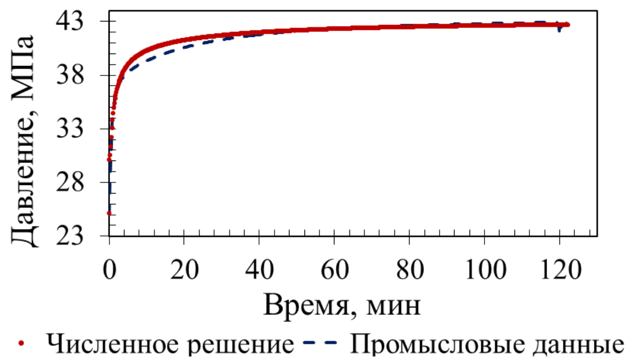

Рис.2 Сопоставление результатов численного расчета с промысловыми данными

Проведены вычислительные эксперименты для следующей задачи: пусть в начальный момент времени добывающая скважина, эксплуатирующая один пласт, запущена в работу с дебитом жидкости 80 м^3/сут. После отработки 1 суток скважина закрывается на забое для исследования методом кривой восстановления давления. В момент остановки, при $q = 0$ м^3/сут, давление в пласте начинает восстанавливаться. Предполагается, что на границе пласта поддерживается постоянное давление, и влияние соседних работающих скважин не наблюдается. Необходимо смоделировать динамику изменения давления во время работы и остановки скважины на гидродинамическое исследование и оценить влияние некоторых параметров на процессы течения. Для пласта, скважины и сети трещин заданы следующие начальные параметры: φ_f = 0.01, φ_m = 0.1, c_{tf} = $3\cdot10^{-9}$ (1/Па), c_{tm} = $3\cdot10^{-10}$ (1/Па), k_f = 10^{-12} (м^2), k_m = 10^{-16} (м^2), μ = $2.2\cdot10^{-3}$ (Па·с), P^f = 25 (МПа), P^m = 25 (МПа), h_m = 10 (м), q = 100 (м^3/сут), $\pi \approx 3.14$, a = 1 (м), b = 1 (м), c = 0.5 (м), r_w = 0.1 (м), r_e = 20 (м), t_k = 1 (сут).

Для более детального анализа полученных кривых давления в ГДИС используется производная Бурде. Она определяется как производная давления по логарифму времени и на графике представляется в двойных логарифмических координатах. Производная Бурде более чувствительна к изменениям давления, чем сама функция. Она позволяет идентифицировать стационарный режим течения, характер перераспределения жидкости между матрицей и трещинами и т.д.

Варьируя такие параметры как влияние ствола скважины, скин-фактор и параметры двойной пористости, получен ряд кривых, на которых наблюдается перераспределение жидкости между матрицей и трещинами, а именно в начальный момент времени приток идет из трещин, затем, в зависимости от выбранных свойств трещин и матрицы, через некоторое время начинается приток из матрицы в трещины, который называется «подключение матрицы в работу».

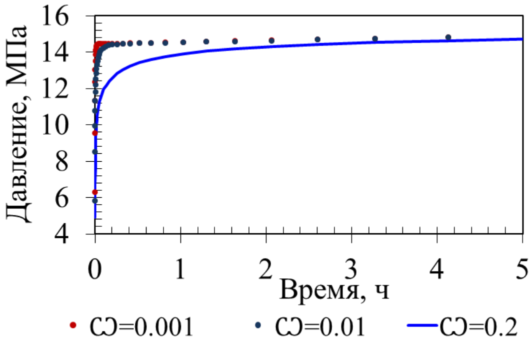

Рис.3 Динамики давления при различных значениях параметра коэффициента доли трещинно-кавернозной емкости

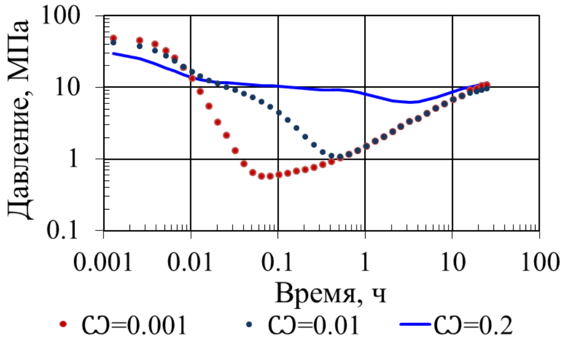

Рис.4 Графики производных давления в двойных логарифмических координатах при различных значениях параметра коэффициента доли трещинно-кавернозной емкости

Изменяя параметр коэффициента доли трещинно-кавернозной емкости (ω) (рис.3), который отвечает за долю связанного порового объема, занятого трещинами, по построенным производным Бурде (рис.4) видим, как меняется глубина и размер скачка. А именно, чем скачок глубже и больше размером, тем трещин в пласте меньше, давление просаживается быстрее, и тем быстрее происходит отдача флюида из матрицы. Для рассматриваемой задачи при увеличении доли трещин в 200 раз время, через которое произойдет подключение матрицы в работу, увеличится в 100 раз.

Варьируя коэффициент удельной проводимости λ (рис.5), который описывает возможность фильтрации жидкости из матрицы в трещины, наблюдаем на производных Бурде (рис.6), что глубина и размер скачков одинаковые, но они смещены друг от друга по оси времени. Положение скачка говорит о проницаемости матрицы, чем раньше проявляется скачок, тем проницаемость у матрицы выше, и она раньше подключается в работу.

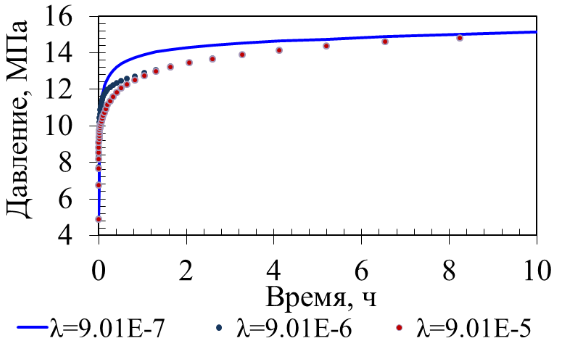

Рис.5 Динамика давления при различных значениях параметра коэффициента удельной проводимости

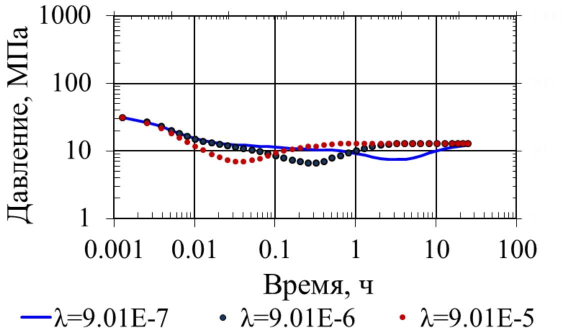

Рис.6 График производной давления в двойных логарифмических координатах при различных значениях параметра коэффициента удельной проводимости

Для рассматриваемого примера при уменьшении λ в 100 раз, время подключения матрицы в работу увеличивается в 80 раз.

Изменяя скин-фактор (рис.7), положение скачка производной (рис.8) меняться не будет.

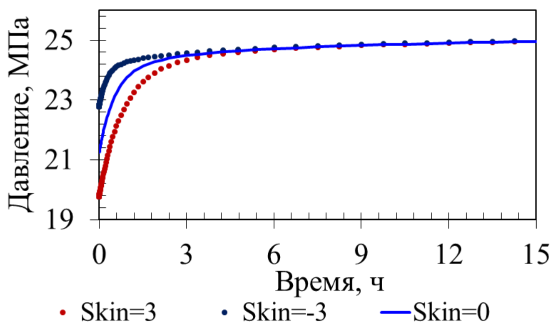

Рис.7 Динамика давления при различных значениях скин-фактора

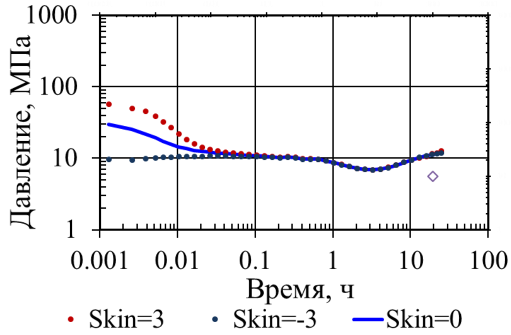

Рис.8 График производной давления в двойных логарифмических координатах при различных значениях скин-фактора

Отсутствие изменений связано с тем, что скин-фактор определяет лишь степень загрязнения призабойной зоны скважины. На перераспределение жидкости между матрицей и трещинами он не влияет, поэтому изменения давления отмечаются только на начальных временах (до 0.1 ч).

На рис. 9 представлены кривые давления для влияния ствола скважины. По диагностическому графику производной Бурде (рис. 10) наблюдаем, что при увеличении параметра влияния ствола скважины (ВСС) возникает риск перекрытия скачка. То есть, если ВСС будет длительным, то мы не увидим этого скачка и можем ошибиться в коллекторе, признав его однородным.

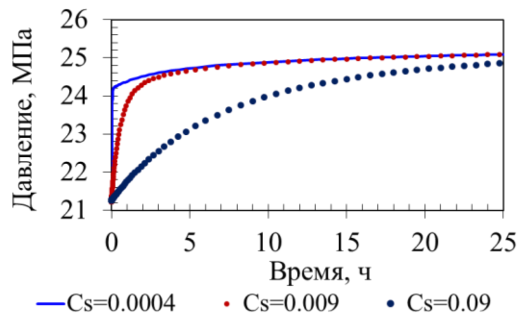

Рис.9 Динамика давления при различных значениях коэффициента влияния ствола скважины

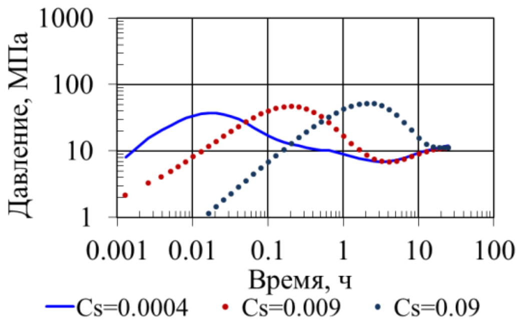

Рис.10 График производной давления в двойных логарифмических координатах при различных значениях коэффициента влияния ствола скважины

Далее представлены графики (рис. 11) для различных значений проницаемости пласта. Здесь под проницаемостью понимается общая проницаемость, т.е. $k_f + k_m$.

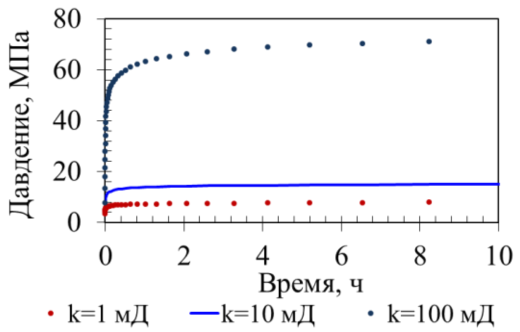

Рис.11 Динамика давления при различных значениях проницаемости

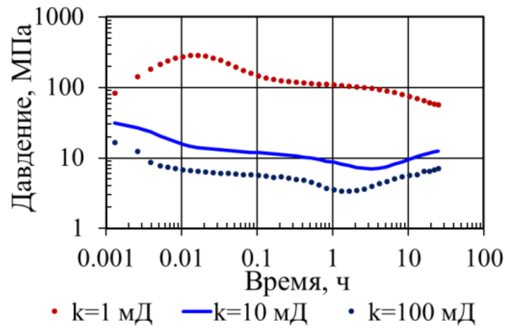

Рис.12 График производной давления в двойных логарифмических координатах при различных значениях проницаемости

Чем выше значение проницаемости в трещинах, тем быстрее подключается в работу матрица (рис. 12). Для рассматриваемой задачи при увеличении проницаемости скачок на производной сдвигается влево по времени и спускается вниз, а точнее при увеличении проницаемости в 100 раз, время подключения матрицы в работу уменьшается в 200 раз.

В четвертой главе на основе рассмотренной во второй главе модели (1) – (4) представляется математическая модель, описывающая двухфазное течение в трещиновато-пористой среде. Определяется исходная система уравнений, приводится алгоритм расщепления по физическим процессам для дальнейшего применения эффективных алгоритмов решения. Исследуются свойства уравнений, описывается метод их решения.

В настоящей работе математическое описание процессов фильтрации основано на законе сохранения массы компонент с учетом взаимодействия фаз.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\varphi^\alpha \rho_o^\alpha S_o^\alpha)}{\partial t} + \nabla(\rho_o^\alpha U_o^\alpha) - q_o^\alpha = 0, \\ &\frac{\partial(\varphi^\alpha \rho_w^\alpha S_w^\alpha)}{\partial t} + \nabla(\rho_w^\alpha U_w^\alpha) - q_w^\alpha = 0, \end{aligned} \tag{9}$$

где $\alpha = f, m, f -$ система трещин, $m -$ матрица, $i = o, w$, где $o -$нефть, w –вода, φ^{α} – пористость (д.ед), ρ_i^{α} – плотность (г/м^3), S_i^{α}– насыщенность фазы, U_i^{α} – скорость течения фазы, q_i^{α} – функция перетока.

$$\sum_i S_i^{\alpha} = 1. \qquad (10)$$

Для скорости фильтрации используется обобщенный закон Дарси. Согласно этому закону скорости фильтрации нефти и воды соответственно равны:

$$U_o^{\alpha} = -\frac{k^{\alpha} k_{ro}(S_o^{\alpha})}{\mu_o} grad\ P^{\alpha}, \qquad U_w^{\alpha} = -\frac{k^{\alpha} k_{rw}(S_w^{\alpha})}{\mu_w} grad\ P^{\alpha}, \qquad (11)$$

где k^{α} – абсолютная проницаемость (м^2), k_{ro}, k_{rw} – относительные фазовые проницаемости, μ_i – вязкость (Па·с).

В качестве функций перетока применяются классические функции, предложенные в работах Уоррена-Рута:

$$\begin{aligned} q_o^m &= -q_o^f = -\frac{\sigma \rho_o k^m k_{ro}(S_o^m)}{\mu_o}\left(P^f - P^m\right), \\ q_w^m &= -q_w^f = -\frac{\sigma \rho_w k^m k_{rw}(S_w^m)}{\mu_w}\left(P^f - P^m\right), \end{aligned} \qquad (12)$$

$$\text{или} \quad q_i^{\alpha} = \sigma \lambda_i^{\alpha}\left(P^f - P^m\right), \ \text{где} \ \lambda_i^{\alpha} = \frac{k^m k_{ri}(S_i^m)}{\mu_i}. \qquad (13)$$

Здесь P^f – пластовое давление в сети трещин (Па), P^m – пластовое давление в матрице (Па), σ – коэффициент трещиноватой породы (1/м^2).
Флюид считается слабосжимаемым, коэффициент сжимаемости и вид кривой зависимости относительной фазовой проницаемости, которые представлены в виде $k_{ro}(S_o^m)$ и $k_{rw}(S_w^m)$ в уравнениях (12) и (13), являются заданными функциями.

Уравнения (9) – (13), дополненные начальными и граничными условиями, представляют собой математическую модель, описывающую движение двухфазной жидкости в коллекторе трещиновато-порового типа. Граничные условия, которые будем использовать, имеют вид:

$$\begin{aligned} &P^m|_{t=0} = P_0; \qquad P^f\big|_{t=0} = P_0; \qquad P^f\big|_{r=re} = P_{\text{к}}; \qquad P^m|_{r=re} = P_{\text{к}}; \\ &\left(\frac{\partial P^f}{\partial r}\right)_{r=r_w} = 0. \end{aligned} \qquad (14)$$

Начально-краевая задача (9) – (14) является квазилинейной и достаточно сложной системой уравнений математической физики смешанного типа. Система решается методом конечных разностей. При решении такой системы возникает ряд трудностей, которые, во-первых, связаны с большим количеством переменных, и, во-вторых, характер нелинейности уравнений таков, что соответствующая линеаризованная система в ряде случаев уже не обладает свойством самосопряженности пространственных дифференциальных операторов. Для решения системы исходных уравнений (9) применяется метод расщепления по физическим процессам, который представлен следующими шагами:

1. На первом шаге модель (9) запишем в виде системы уравнений (15) – (16) эквивалентной исходной.

Система (15) получается путем исключения функций S_i^f и S_i^m из-под знака производной по времени в системе уравнений (9). В результате имеем систему уравнений пьезопроводности.

$$\begin{gathered}\left(\frac{S_o^f}{\rho_o^f}\frac{\partial(\varphi^f\rho_o^f)}{\partial t}+\frac{S_w^f}{\rho_w^f}\frac{\partial(\varphi^f\rho_w^f)}{\partial t}\right)+\frac{div\left(\rho_o^f U_o^f\right)}{\rho_o^f}+\frac{div\left(\rho_w^f U_w^f\right)}{\rho_w^f}+\\+\sigma\left(P^f-P^m\right)\left(\frac{\rho_o^m}{\rho_o^f}\lambda_o^m+\frac{\rho_w^m}{\rho_w^f}\lambda_w^m\right)=0,\\\left(\frac{S_o^m}{\rho_o^m}\frac{\partial(\varphi^m\rho_o^m)}{\partial t}+\frac{S_w^m}{\rho_w^m}\frac{\partial(\varphi^m\rho_w^m)}{\partial t}\right)+\sigma\left(P^f-P^m\right)(\lambda_o^m+\lambda_w^m)=0.\end{gathered}\tag{15}$$

Система уравнений (16) записывается на основе (9) с учетом, что $S_o+S_w=1$, и отвечает за перенос насыщенностей.

$$\begin{gathered}\frac{\partial(\varphi^f\rho_w S_w^f)}{\partial t}+\nabla\left(\rho_w U_w^f\right)+\frac{\sigma\rho_w k^m k_{rw}(S_w^m)}{\mu_w}\left(P^f-P^m\right)=0,\\\frac{\partial(\varphi^m\rho_w S_w^m)}{\partial t}-\frac{\sigma\rho_w k^m k_{rw}(S_w^m)}{\mu_w}\left(P^f-P^m\right)=0.\end{gathered}\tag{16}$$

2. На втором шаге решаем полученную систему уравнений (15) методом прогонки на каждом временном слое при фиксированных насыщенностях и определяем давление в трещинах и матрице (на s-итерации).

3. Далее на основе полученных давлений (на s-итерации) из системы (15) решаем систему (16) методом прогонки и определяем водонасыщенность на $s+1$ -итерации. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность по давлению и водонасыщенности.

Предложенный алгоритм необходим потому, что система уравнений пьезопроводности (15) является параболической, а система переноса насыщенностей флюидов (16) – гиперболической, поэтому применение расщепления даст возможность реализовать эффективный численный алгоритм для решения системы уравнений (9) и позволит производить расчеты с крупным шагом по времени с меньшим количеством неизвестных параметров.

В пятой главе описывается разностная схема для решения преобразованной системы (9), представленная уравнениями (15) – (16). Предлагается численная схема, которая обладает рядом свойств, обеспечивающая устойчивость решения задачи. Отметим, что полученная расщепленная модель эквивалентна консервативной разностной аппроксимации для уравнений (9), записанных в дивергентной форме, благодаря введению специальной аппроксимации сеточных функций по времени. При этом по сравнению с полностью неявной схемой решаются две системы уравнений меньшей размерности (по давлениям и насыщенностям) вместо одной. Представлены вычислительные эксперименты задачи массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа при работающей добывающей скважине.

Рассматривается одномерная постановка задачи (9). Для решения дифференциальных уравнений в частных производных используется метод конечных разностей. Строится равномерная пространственно-временная сетка.

$$\bar{W}_h = \{x_i = ih, i = 0, 1 \dots N, x_0 = 0, x_N = L\}, \ \bar{W}_\tau = \{t_j = \tau k, k = 0, 1 \dots M\}, \quad (17)$$

где x_i – координаты узлов, h – шаг сетки по радиусу, τ – шаг сетки по времени, N и M – число узлов по пространству и времени, соответственно. В x_i определяются сеточные величины (давление и насыщенности). Под $i + 1/2$-ой ячейкой одномерной сетки Ω_i понимается отрезок $[x_i, x_{i+1}]$. $h_{i+\frac{1}{2}} = x_{i+1} - x_i$, $\bar{h_i} = 1/2(h_{i+1/2} + h_{i-1/2})$.

Разностная аппроксимация расщепленной модели эквивалентна разностной аппроксимации для уравнений (9), записанных в дивергентной форме. При этом на временных слоях t и $\hat{t} = t + \tau$ вводятся производные по времени и специальным образом пространственно-точечные временные интерполяции: $a_t = (\hat{a} - a)/\tau$, $a^{(\delta_1)} = \delta_1 \hat{a} + (1 - \delta_1)a$. Интерполяционный вес δ_1 может зависеть от узла пространственной сетки ω и будет представляться как:

$$\delta_1 = \frac{\sqrt{(\bar{\varphi})^\wedge}}{\left(\sqrt{(\bar{\varphi})^\wedge} + \sqrt{(\bar{\varphi})}\right)}. \quad (18)$$

Выражение (18) представляется как доля объема пор, предназначенного для свободного движения флюида. Здесь $\bar{\varphi} = h\varphi$, φ – пористость, $(\bar{\varphi})^\wedge$ – значение на временном слое $\hat{t}$.

Такой выбор аппроксимации позволяет производить дискретные преобразования уравнений, которые связаны с их расщеплением по физическим процессам, близкие к континуальным.

Дифференциальные уравнения (15), (16), граничные и начальные условия (13) аппроксимируются их сеточными аналогами. Соответствующие разностные уравнения представляют собой систему нелинейных алгебраических уравнений, для которых проводится линеаризация по методу хорд. Для расщепленных уравнений пьезопроводности в трещинах (15) получаем:

$$\frac{\left(S_w^f\right)^{(\delta 1 f)\approx}}{\left(\rho_w^f\right)^{(\delta 1 f)\approx}} \left(\bar{\varphi}^f \rho_w^f\right)'^{s}_{Pf} \delta P^f + \frac{\left(1 - S_w^f\right)^{(\delta 1 f)\approx}}{\left(\rho_o^f\right)^{(\delta 1 f)\approx}} \left(\bar{\varphi}^f \rho_o^f\right)'^{s}_{Pf} \delta P^f + \quad (19)$$
$$+ \tau \delta\left(DIG^{f\sim}\right) = 0 - F^{fs},$$

$$\tau\delta\left(DIG^{f\sim}\right) =$$
$$= \frac{-\tau}{\left(\rho_w^f\right)^{(\delta 1f)\approx}} DIN\left[\left(\frac{\rho_w^f k_f}{\mu_w^f}\right)^s k_{r_w}^{ups} GRAN\delta P^f\right] +$$
$$+ \frac{-\tau}{\left(\rho_o^f\right)^{(\delta 1f)\approx}} DIN\left[\left(\frac{\rho_o^f k_f}{\mu_o^f}\right)^s k_{r_o}^{ups} GRAN\delta P^f\right] -$$
$$- \frac{-\tau}{\left(\rho_w^f\right)^{(\delta 1f)\approx}} (\rho_w^m \bar{\sigma}\,\lambda_w^m)^s\left(\delta P^f - \delta P^m\right) - \frac{\tau}{\left(\rho_o^f\right)^{(\delta 1f)\approx}} (\rho_o^m \bar{\sigma}\,\lambda_o^m)^s\left(\delta P^f - \delta P^m\right).$$

Здесь F^{fs} – разностная аппроксимация левой части уравнения (умноженная на шаг по времени τ), a' – производная по давлению, δP – невязка по давлению, разностная операция $DIN: (\Omega) \to (\omega)$ обозначает аппроксимацию дивергенции $dv \cdot div$, действующую на функции в ячейках (Ω), $GRAN: (\omega) \to (\Omega)$ обозначает аппроксимацию градиента $grad$ в ячейках (Ω), действующую на сеточные функции в узлах (ω), $k_{rw\Omega}^{up\wedge}$ – относительная фазовая проницаемость воды в ячейке Ω, взятая из узла $\omega(\Omega)$ этой ячейки, расположенного вверх по потоку (up) с неявного слоя по времени $(\wedge)$. В сеточных аппроксимациях $a^{\approx}$ значения на неявном слое по времени $\hat{t}$ берутся на $s+1$ уже вычисленной итерации, если они связаны с давлением (P^{s+1}), и s-й итерации, если они связаны с водонасыщенностью (S_w^s).

Для расщепленных уравнений пьезопроводности в матрице (15) получим:

$$\frac{(S_w^m)^{(\delta 1m)\approx}}{(\rho_w^m)^{(\delta 1m)\approx}} (\bar{\varphi}^m \rho_w^m)'^s_{P^m} \delta P^m + \frac{(1 - S_w^m)^{(\delta 1m)\approx}}{(\rho_o^m)^{(\delta 1m)\approx}} (\bar{\varphi}^m \rho_o^m)'^s_{P^m} \delta P^m +$$
$$+ \tau\delta(DIG^{m\sim}) = 0 - F^{ms},$$
$$\tau\delta(DIG^{m\sim}) = \tag{20}$$
$$= \frac{-\tau}{(\rho_w^m)^{(\delta 1m)\approx}} (\rho_w^m \bar{\sigma}\,\lambda_w^m)^s\left(\delta P^f - \delta P^m\right) -$$
$$- \frac{\tau}{(\rho_o^m)^{(\delta 1m)\approx}} (\rho_o^m \bar{\sigma}\,\lambda_o^m)^s\left(\delta P^f - \delta P^m\right).$$

Здесь $\overline{\sigma} = h\sigma$, F^{ms} – разностная аппроксимация левой части уравнения (умноженная на шаг по времени τ).

Таким образом, систему уравнений (20) можно переписать в следующем виде:

$$-A_{pk}\delta P_{k-1}^f + C_{pk}\delta P_k^f - B_{pk}\delta P_{k+1}^f = \Phi_{\mathrm{Pk}}\,. \tag{21}$$

Коэффициенты для системы уравнений (21) в полном виде приведены в тексте диссертационной работы, в силу их громоздкости.

Для решения системы (21) использовался метод скалярной прогонки. Уравнение пьезопроводности решается на каждом временном слое при фиксированных насыщенностях, итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность. Решение для давлений в матрице находится на основе вычисленных значений по давлению в трещинах, которые имеют линейную зависимость. В результате получаем δP^f и δP^m.

Рассчитав давления на s-й итерации для обеих систем, переходим к решению уравнений относительно переноса насыщенностей, который считается на ($s+1$)-й итерации. Аналогично уравнениям пьезопроводности проводится аппроксимация дифференциальных уравнений (16) их сеточными аналогами. Для полученной системы уравнений проводится линеаризация по методу хорд. В результате получаем:

$$\left(\overline{\varphi^f}\rho_w^f\right)^{s+1}\delta S_w^f + \tau\delta\left[DIN\left(\rho_w^f U_w^f\right)^{\sim}\right] + \tau\delta q_w^{f\sim} = 0 - L^{fs,s+1}, \tag{22}$$

$$(\overline{\varphi^m}\rho_w^m)^{s+1}\delta S_w^m + \tau\delta q_w^{m\sim} = 0 - L^{ms,s+1}, \tag{23}$$

где:

$$\left(\rho_w^f U_w^f\right)_\Omega^{\sim} = -\left(\frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f}\right)_\Omega^{\wedge} k_{rw\Omega}^{up\wedge} GRANP_f^{\wedge}. \tag{24}$$

L^f, L^m– разностная аппроксимация левой части уравнения (умноженная на шаг по времени τ).

В узле k обозначим:

$$C_{swk}^m \delta S_{wk}^m = 0 - L_k^{m\approx}, \tag{25}$$

$$C_{swk}^m = (\overline{\varphi^m}\rho_w^m)_k^{s+1} - \tau\left[\rho_w^m\bar{\sigma}\left(P^f - P^m\right)\frac{k^m}{\mu_w^m}\right]_k^{s+1}\left[(k_{rw})'_{S_w^m}\right]_k^s, \tag{26}$$

$$(S_{wk}^m)^{s+1} = (S_{wk}^m)^s + \delta S_{wk}^m. \tag{27}$$

Далее определим насыщенности для трещин. С учетом вышеизложенного (22) – (27) можно записать в виде:

$$-A_{swk}^f\delta S_{wk-1}^f + C_{swk}^f\delta S_{wk}^f - B_{swk}^f\delta S_{k+1}^f = 0 - L^{fs,s+1}. \tag{28}$$

Коэффициенты для системы уравнений (28) в полном виде приведены в тексте диссертационной работы.

Полученное уравнение (28) аналогично системе уравнений пьезопроводности (21) решается с помощью скалярной прогонки на каждом временном слое. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность по насыщенности. Для решения данной системы используются полученные значения по давлению из системы уравнений (21).

Обратим внимание на преимущества предложенного алгоритма по сравнению с полностью неявной схемой: решаются две системы уравнений меньшей размерности (по давлениям и насыщенностям), вместо одной. Во всех дальнейших расчетах выявлено, что такой подход, когда система расщепляется по физическим процессам и обе группы уравнений решаются неявно, обеспечивает надежность расчета в исследованном диапазоне параметров и приемлемое быстродействие, что вполне устраивает при решении практических задач.

Представленная выше разностная схема была реализована в виде программного модуля, написанного на языке C++. Результаты численного моделирования представлены ниже.

Рассматривается следующая задача: пусть в начальный момент времени добывающая вертикальная скважина, эксплуатирующая один пласт, остановлена. В коллекторе установлен стационарный режим и давление около скважины равно пластовому давлению всего объекта разработки. Затем скважина запускается в работу на частоте, поддерживающей постоянное забойное давление, которое создает депрессию для притока жидкости к скважине. На границе пласта поддерживается постоянное давление, влияние соседних работающих скважин не наблюдается. Заданы следующие начальные и граничные параметры: P_0^f=25 (МПа), P_0^m=25 (МПа), P^f=20 (МПа), P^m=20 (МПа), φ^f=0.01, φ^m=0.1, ρ_o=730 (кг/м^3), ρ_w=1118 (кг/м^3), S_i^f=0.36, S_i^m=0.36, μ_w^f, μ_w^m=0.67E-3 Па·с, μ_o^f, μ_o^m=0.86E-3 Па·с, σ=0.12, k^f=200.0E-12 м^2, k^m=200.0E-15 м^2, k_{ro}^{ups}=7.7S_w^4-12.07S_w^3+6.9S_w^2-1.8S_w +0.2, k_{rw}^{ups}=0.03S_w^2+0.002S_w +0.0002.

На графике (рис. 13) представлены динамики изменения давления в матрице и системе трещин вблизи скважины.

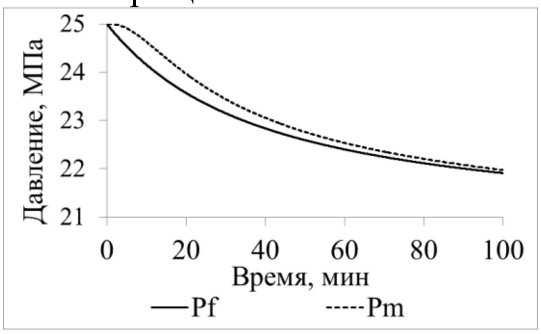

Рис.13 Динамика давления в трещинах (P^f) и матрице (P^m)

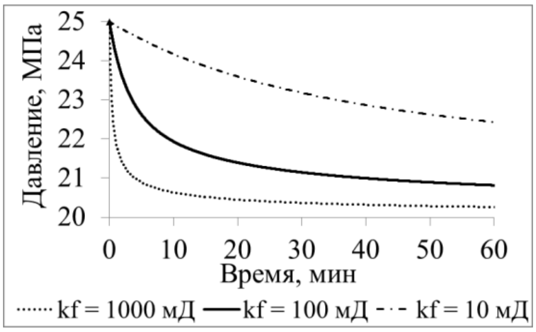

Рис.14 Динамика давления в трещинах при проницаемостях k^f=10 мД, k^f=100 мД, k^f=1000 мД

Наблюдается на рис.13, что после запуска скважины в работу, в первое время течение жидкости идет по трещинам, затем в работу включается матрица. Это хорошо прослеживается на графике на временах от 0 до 60 минут, затем после 60 минут давления в обеих системах стремятся к воссоединению, то есть начинается выравнивание давления для всех систем. Далее, на рис. 14 продемонстрированы изменения давления в зависимости от времени при различных значениях проницаемости в трещинах вблизи скважины. Отмечается, что чем проницаемость выше, тем скорость падения давления во время работы скважины увеличивается.

На рис. 15 построены динамики давления на разных расстояниях от скважины. Рассматривалась точка вблизи скважины – 0.01 м, а также 0.25 м и 0.5 м. Отмечено, что чем дальше расстояние от скважины, тем возмущения давления становятся меньше. Таким образом, можно посчитать, насколько изменится давление в любой точке от скважины в определенный момент времени.

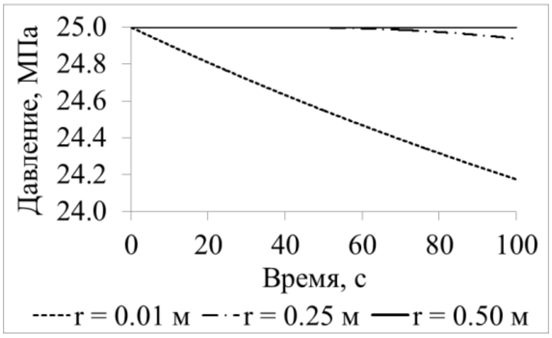

Рис.15 Динамика давления на расстояниях 0.01 м, 0.25 м и 0.5 м от скважины

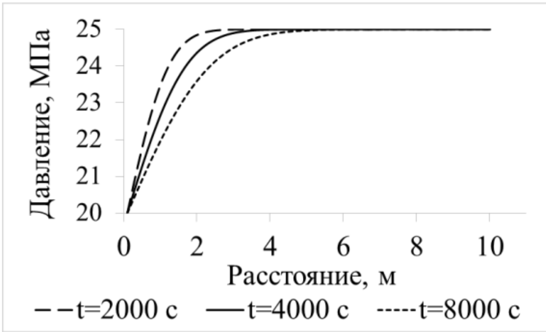

Рис.16 Динамика давления по пространству для 2000 с, 4000 с, 8000 с

На рис. 16 изображено распределение давления по пространству в разные моменты времени: 2000 с, 4000 с, 8000 с. Выявлено, что с увеличением времени работы скважины также увеличивается воронка депрессии, это объясняется тем, что происходит постоянный отбор жидкости из пласта.

В шестой главе проведено тестирование математических моделей на примере реального карбонатного месторождения трещиновато-порового типа – им. Р. Требса. На основании начальных параметров, характерных для рассматриваемого месторождения, была простроена математическая модель для гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления на добывающей скважине. Построена пространственно-временная динамика процессов изменения давления для скважины для различных промежутков времени исследования и расстояниях от скважины. Определена оптимальная длительность остановки скважины на исследование методом кривой восстановления давления с помощью идентификации стационарного режима течения после перераспределения жидкости между матрицей и трещинами, выявленного на графике в двойных логарифмических координатах. Данные результаты позволяют определить корректное время проведения исследования и сократить потерю по добыче.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, приведены выводы и рекомендации.

Основные результаты

1. Построена математическая модель массопереноса в случаях однофазной и двухфазной фильтрации для описания гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа.

2. Построены разностные схемы с временными весами на основе алгоритма расщепления модели по физическим процессам, обеспечивающие корректность и согласованность потоков в системе трещин и поровом коллекторе.

3. Разработан программный комплекс, реализующий построенные модели и алгоритмы, который позволяет моделировать фильтрацию жидкости в рамках модели двойной пористости в коллекторе трещиновато-порового типа с учетом практических особенностей, возникающих при проведении гидродинамических исследований.

4. Выполнены вычислительные эксперименты, которые показали хорошую согласованность с промысловыми данными. На примере месторождения

им. Р. Требса проведены исследования процессов при различных фильтрационно-емкостных свойствах пласта, условиях загрязнения призабойной зоны, на разных удаленностях от скважины. Для проведения гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления рассчитано оптимальное время остановки скважины с минимальными потерями по добыче.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации автором опубликовано 24 печатных работы, оформлено 1 свидетельство о регистрации программы [24]. Из них 3 [1-3] – в изданиях, включенных в перечень ВАК, 7 [1, 3-8] – в изданиях, индексируемых в Scopus.

1. Бобренёва Ю.О. Моделирование процесса пьезопроводности двухфазной жидкой системы в коллекторе трещиновато-порового типа // Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34, № 1. – С. 33-46. (ВАК, RSCI, РИНЦ).
   Перевод: Bobreneva Yu.O. Modeling the Piezoconductivity Process of a Two-Phase Fluid System in a Fractured-Porous Reservoir. Mathematical Models and Computer Simulations. – 2022. V. 14, № 4. – P. 645-653. (Scopus)
2. Бобренёва Ю.О., Рагимли П.И., Подрыга В. О., Бажитова С.С., Бакир А.Э., Абу-Наб А.К. Об одном методе численного моделирования двухфазной жидкой системы в коллекторе трещиновато-порового типа // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2021. – № 38. – 20 с. (ВАК, РИНЦ).
3. Иващенко Д.С., Бобренёва Ю.О., Гимранов И.Р., Давлетбаев А.Я., Сергейчев А.В., Щутский Г.А. Комплексирование результатов гидродинамических исследований и геомеханико-гидродинамического моделирования для прогнозирования зон аномально высокого пластового давления // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 66-70. (ВАК, Scopus, RSCI, РИНЦ).
4. Bobreneva Yu.O., Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. Researching the mechanisms of fluid flow in the fracture-porous reservoir based on mathematical modeling // Computational Mathematics and Information Technologies. – 2018. – V. 2, № 2. – P. 133-143. (Scopus, РИНЦ).
5. Bobreneva Yu.O., Mazitov A.A. and Gubaydullin I.M. Mathematical modelling of fluid flow processes in the fracture-porous reservoir // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1096. – 012187. (Scopus, РИНЦ).
6. Bobreneva Yu.O., Gubaidullin I.M. Mathematical simulation of a pressure field exemplified by dual porosity reservoir // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1368– 042067. (Scopus, РИНЦ).
7. Bobreneva Yu.O., Rahimly P.I., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Enikeeva L.V. On one method of numerical modeling of piezoconductive processes of a two-phase fluid system in a fractured-porous reservoir // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2131. – 022001. (Scopus, РИНЦ).
8. Bobreneva Yu.O., Rahimly P.I., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Enikeeva L.V. Numerical modeling of multiphase mass transfer processes in fractured-porous reservoirs // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2131. – 022002. (Scopus, РИНЦ).

9. Бобренёва Ю.О., Давлетбаев А.Я., Губайдуллин И.М. Исследование процессов массопереноса в коллекторах с двойной пористостью // «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании» XIII Международная научная конференция, [материалы]. Изд-во Средне-Волжского математического общества. – 2017. – С. 232-235. (РИНЦ).
10. Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М. Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа // Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – 2018. – С. 1775–1780. (РИНЦ).
11. Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Математическое моделирование процесса теплопереноса в трещиноватом коллекторе // Тезисы Международной конференции «Вычислительная математика и математическая геофизика». Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск: Академиздат. – 2018. – С. 17-18. (РИНЦ).
12. Мазитов А.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Моделирование процесса массопереноса жидкости в коллекторах с двойной пористостью // Актуальные проблемы науки и техники – 2018: сборник материалов конференции. – 2018. – Т. 1. – С. 143-144. (РИНЦ).
13. Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М. Исследование механизмов фильтрации в коллекторе трещиновато-порового типа на основе математического моделирования // Computational Mathematics and Information Technologies. – 2018. – V. 2, № 2. – P. 133-143. (РИНЦ).
14. Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Исследование процесса теплопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа // Сборник трудов ИТНТ-2019. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – 2019. – С. 189-192. (РИНЦ).
15. Мазитов А.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Моделирование полей давления в трещиноватых коллекторах // Тезисы Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики». Ин-т вычислительной математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск. – 2019. – С. 32. (РИНЦ).
16. Бобренёва Ю.О., Черных И.Г., Губайдуллин И.М. Параллельный алгоритм моделирования полей давления в коллекторах с двойной пористостью // Тезисы Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики». Ин-т вычислительной математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск. – 2019. – С. 107. (РИНЦ).
17. Куликов И.М., Черных И.Г., Протасов В.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Численное моделирование массопереноса в трещиноватых коллекторах с применением высокопроизводительных вычислений // Труды международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России». Москва. – 2019. – С. 146-151. (РИНЦ).

18. Смирнов Д.Д., Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Марченко М.А., Губайдуллин И.М., Черных И.Г. Параллельный алгоритм численного метода моделирования массопереноса в трещиновато-поровом коллекторе на суперкомпьютере // В сборнике: Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2020). Короткие статьи и описания плакатов. – 2020. – С. 255-264. (РИНЦ).
19. Мазитов А.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Математическое моделирование нестационарного течения многофазного потока в пористой среде // Сборник материалов IX Международной научной молодежной школы-семинара имени Е.В. Воскресенского. – 2020. – С. 94-95. (РИНЦ).
20. Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Разностная схема для решения задачи массопереноса в системе «сеть трещин – матрица» // Материалы Международной научной конференции Уфимская осенняя математическая школа. – 2020. – С. 177-179. (РИНЦ).
21. Бобренёва Ю.О., Еникеева Л.В., Мазитов А.А., Узянбаев Р.М., Губайдуллин И.М. Численное моделирование массопереноса двухфазной жидкости в трещиновато-поровом коллекторе // Материалы Международной конференции Воронежская весенняя математическая школа Понтрягинские чтения — XXXII. – 2021. – С. 29-30. (РИНЦ).
22. Бобренёва Ю.О., Узянбаев Р.М., Губайдуллин И.М. Численное моделирование пьезопроводных процессов двухфазной жидкости в трещиновато-поровом коллекторе // Материалы Международной научной конференции Уфимская осенняя математическая школа – 2021. – Т2. – С. 156-158. (РИНЦ).
23. Еникеева Л.В., Узянбаев Р.М., Мазитов А.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М. Параллельный алгоритм численного метода моделирования массопереноса двухфазной жидкости в трещиновато-поровом коллекторе // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции. – 2021. – С. 171-172. (РИНЦ).
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664711 от 13.11.2019. «Программный модуль для построения полей давления в коллекторах трещиновато-порового типа». Авторы: Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М.