

Совершенствование фильтрационного моделирования сложнопостроенных карбонатных залежей на основе гибридных многосредных трещинных моделей

Н.А. Шевко¹, к.т.н.

¹Газпромнефть Бадра Б.В., Багдад

Адрес для связи: Shevko.NA@gazpromneft-badra.com

Ключевые слова: дискретная сеть трещин, проводящие разломы, длинные трещины, многосредные модели коллекторов

Целью исследования является разработка и внедрение эффективных методов и подходов фильтрационного моделирования сложных карбонатных залежей для улучшения точности согласования моделей с историческими данными эксплуатации скважин и увеличения надежности долгосрочных прогнозов показателей разработки.

Новейшие исследования в области моделирования данных залежей фокусируют внимание на применении так называемых гибридных моделей. Эти модели дополняют традиционные модели двойной пористости двойной проницаемости (DPDP) вложенными (embedded) средами, характеризующими особенности структуры порового пространства коллектора (например, несвязанную кавернозность) или высокопроводящие, длинные трещины, которые оказывают существенное влияние на фильтрацию флюидов пласта. Гибридные модели с двумя и тремя средами показали высокую численную эффективность при решении полномасштабных задач.

Учитывая разнообразие поведения и свойств системы разломов, естественных и техногенных трещин, использование их полного набора в виде дискретных объектов в рамках одной дополнительной или нескольких сред является крайне сложной вычислительной задачей. Для решения данной проблемы предлагается различать несколько типов высокопроводящих фильтрационных объектов, для каждого из которых имеется индивидуальные алгоритм представления объекта, способы дискретизации и методы решения системы уравнений. При этом предлагается выделять в отдельную дискретную систему разломов и трещин только ключевые динамические объекты, которые влияют на макро и мезо уровень фильтрации пласта.

На основе изучения карбонатных залежей Ближнего востока выявлены некоторые особенности поведения скважин и фильтрации флюидов, которые не могут быть воспроизведены традиционными программами гидродинамического моделирования. Основным инновационным элементом в работе является адресное использование высокопроводящих трещин и разломов, как дополнительных фильтрационных объектов гидродинамической модели, для чего реализованы ряд приемов и численных алгоритмов, обеспечивающих выполнение быстрых и точных расчетов в условиях более интенсивной трещиноватости коллектора.

Enhancement of dynamic modeling of complex carbonate reservoirs using hybrid multimedium fracture models

N.A. Shevko¹

¹Gazprom Neft Badra B.V., Baghdad

E-mail: Shevko.NA@gazpromneft-badra.com

Keywords: discrete fracture network, conductive faults, long fractures, multi-medium reservoir models

The goal of the study is to develop and implement effective methods and approaches for dynamic reservoir modeling of complex carbonate reservoirs to improve the accuracy of history matching and enhance the reliability of long-term production forecasts.

Recent research in the reservoir modeling focuses on the application of so-called hybrid models. These models extend traditional dual-porosity dual-permeability (DPDP) models with embedded environments, characterizing specific features of the reservoir's pore space (such as unconnected caverns) or highly conductive, long fractures that significantly influence fluid filtration in the reservoir. Hybrid models with two and three mediums have demonstrated high numerical efficiency in solving full-scale problems.

Given the diversity of behaviours and properties of the fracture system, natural and hydraulic fractures, using their complete set as discrete objects within one or several mediums is an extremely complex computational task. To address this issue, it is proposed to distinguish several types of highly conductive dynamic objects, each of which has individual algorithms for object representation, discretization methods, and solution methods for the system of equations. In this context, it is suggested that only key dynamic objects effecting on the macro and meso levels of reservoir filtration should be assigned into a separate discrete system.

Based on the study of carbonate reservoirs in the Middle East, certain features of well behaviour and fluid filtration have been identified that cannot be reproduced by traditional commercial dynamic modeling software. The main innovative element in the work is the targeted use of highly conductive fractures and faults as additional discrete objects in the dynamic model. To achieve this, a series of techniques and numerical algorithms have been implemented, ensuring the execution of fast and accurate calculations under conditions of more intense reservoir fracturing.

Введение

Прогнозирование поведения сложно-построенных карбонатных коллекторов, приуроченных к тектонически активным районам, представляет собой сложную задачу, обусловленную значительной неоднородностью свойств коллектора, низкими значениями проницаемости породы и наличием естественной высокопроводящей системы трещин. Решение данной задачи включает в себя ряд методологических, технических и вычислительных сложностей.

В последние годы успешным оказалось сочетание традиционных моделей двойной пористости и двойной проницаемости (DPDP) с инновационными подходами дискретного моделирования сети трещин (DFN). Это позволило достичь высокой численной эффективности и улучшения качества моделирования для различных сложных объектов. Однако интеграция этих подходов с переходом к моделям мультисред и учетом полной системы трещин создает значительные вычислительные сложности при проведении полномасштабного фильтрационного моделирования реальных месторождений.

Интеграция моделей мультисред с высокопроводящими и высокопроницаемыми "линейными" динамическими объектами фильтрации представляет собой оптимальное решение как для обеспечения приемлемого качества воспроизведения истории эксплуатации скважин, так и для уверенного долгосрочного прогнозирования поведения залежи. Особый интерес при разработке трудноизвлекаемых запасов в плотных нефтенасыщенных коллекторах представляют технологии бурения протяженных горизонтальных скважин с множественными гидроразрывами пласта. Важным аспектом при моделировании особенностей притока флюидов и оценке потенциала добычи таких скважин является учет взаимодействия естественной и техногенных систем трещин.

В данном исследовании, направленном на совершенствование традиционных методов гидродинамического моделирования карбонатных залежей, проведен анализ особенностей фильтрационного моделирования коллекторов сложной структуры. В работе предложено гибридное описание структуры трещиноватого коллектора и найдены эффективные методы численного решения гибридных моделей в условиях многофазной фильтрации. Указанные методы программно реализованы и протестированы, а результаты

их применения рассмотрены на примере различных месторождений в регионе Ближнего Востока.

Методы решения

Для интегрирования традиционной модели одинарной (PPM), двойной (DPDP) или тройной (TPDP) пористости с дискретной моделью трещин, и использовании объединенной модели для улучшения качества адаптации и повышения точности прогнозирования поведения залежи, необходимо пройти последовательно несколько ключевых этапов:

1. Создание геологической модели, основанной на геофизических, петрофизических и промысловых данных, которая обеспечивает детализированное распределение свойств матрицы (porous permeable media, PPM).

2. Идентификация и типизация структурных нарушений, таких как барьерные разломы (barrier faults, BF) и проводящие разломы (conductive faults, CF), а также выделение линеаментов, зон с повышенной трещиноватостью и длинных высокопроводящих трещин (long fractures, LF), определение распределения плотности диффузных трещин (implicit fault network, IFN) (рис.1).

3. Формирование начальной модели DFN с последующей оценкой параметров проницаемости различных элементов, с учетом данных ГДИ и анализа истории разработки.

4. Кластерный анализ идентифицированных трещин с целью классификации их по типам сред: неявные, явные и длинные трещины.

5. Сборка комплексной гибридной модели, ориентированной на задачи моделирования и учет особенностей фильтрации, объединяющей среды матрицы и набор объектов разломов и трещин (рис. 1).

6. Детальная адаптация модели на историю разработки с фокусом на корректировку параметров трещин.

7. Выполнение прогнозных расчетов с учетом возможных неопределенностей пористой и трещинной среды.

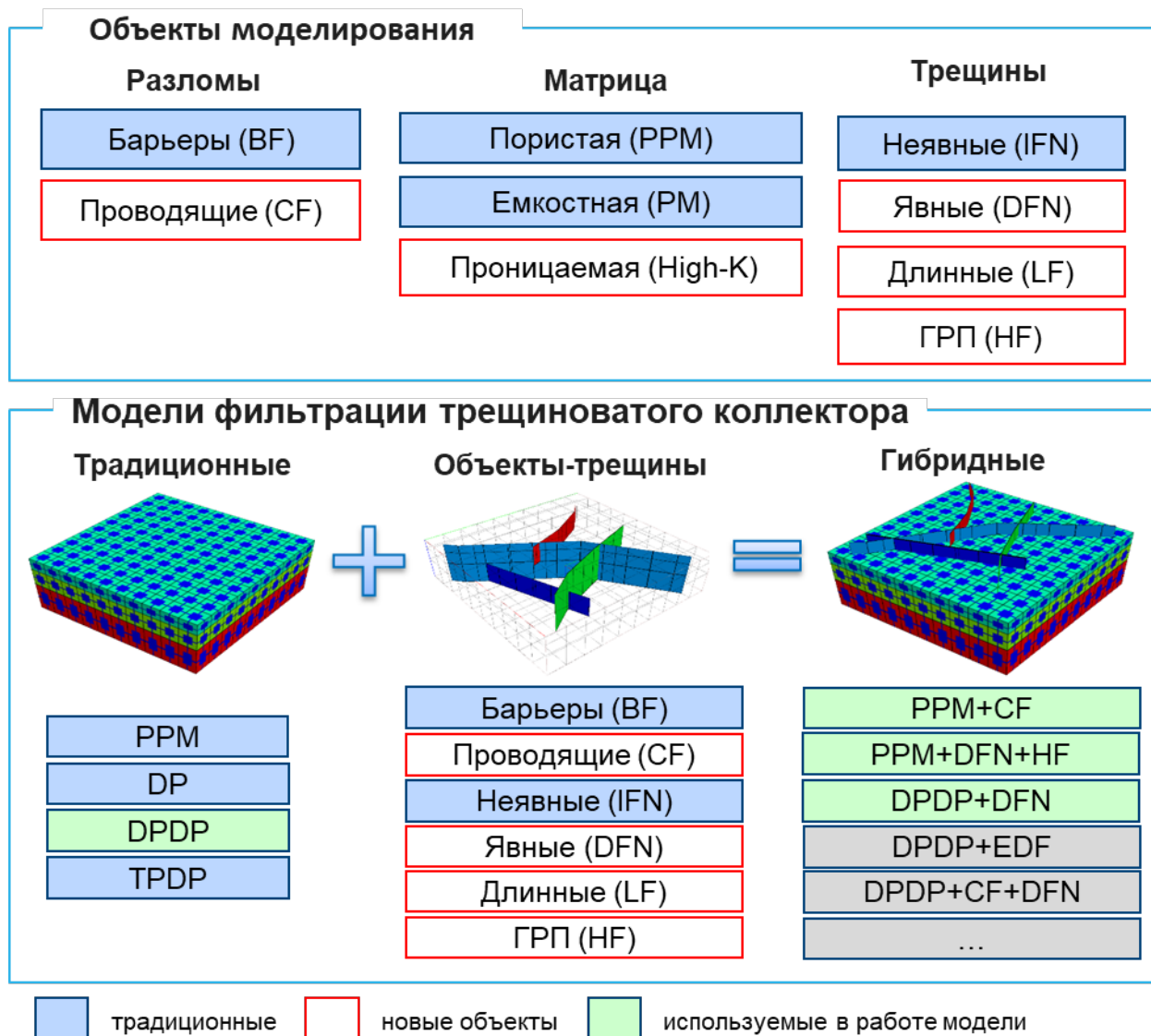


Рис. 1. Новые объекты явного моделирования трещинной среды и гибридные модели

Сложность строения трещиноватой части коллектора обуславливает различные подходы к ее моделированию для решения реальных прикладных задач. Неопределенность в отношении некоторых параметров трещиноватой среды, а также значительное отличие ее от матричной части, проявляющееся особенно в процессе разработки месторождений, предполагает множество подходов описания геометрии и свойств, расчета коэффициентов проводимости и объемов трещин, а также вариантов численных решений.

Традиционные методы, применяемые при моделировании трещин, включают использование статических барьеров, предотвращают переток; апскейлинг потоковых функций (фазовых проницаемостей) на модель одинарной проницаемости (PPM);

локальное измельчение сетки (LGR); дискретную 2,5D или PEVI модель сетки трещин и разломов. Однако использование этих стандартных опций в коммерческих программах для гидродинамического моделирования не позволяет полностью учесть сложность различных типов трещин, достигнуть качественной адаптации к историческим данным скважин, а также обеспечить прогноз разработки в разумные сроки с устойчивыми вычислениями.

В области моделирования карбонатных коллекторов, особенно в регионе Ближнего Востока, где присутствуют высокопроницаемые зоны (super-K intervals, fracture pathways), использование гибридных методов в специализированных симуляторах [5] становится перспективным. Эти методы предоставляют возможность улучшить точность моделирования, комбинируя двойную среду DPDP, состоящую из поровой матрицы, мелких и средних трещин, с третьей вложенной сеткой, где геометрия ячеек встроена в ячейки матрицы (embedded discrete fractures, EDF), описывающей длинные трещины и линеаменты (LF), критичные для учета фильтрации флюидов.

В работе [3], посвященной моделированию карбонатных коллекторов на Ближнем Востоке с учетом высокопроницаемых зон, предложено использовать более общую формулировку модели – трещиноватая многопористая среда (fractured multimodal porous media, FMPPM). Эта модель учитывает три среды: непроницаемую матричную пористую среду (PM), проницаемую матричную среду (PPM) и трещиноватую среду, описывающую высокопроницаемую и нерегулярную сеть каналов и зон.

В рамках единого вычислительного эксперимента для корректного сравнения точности и эффективности численного моделирования реализованы восемь описанных выше подходов, используемых как в традиционных, так и в специализированных симуляторах (рис. 2).

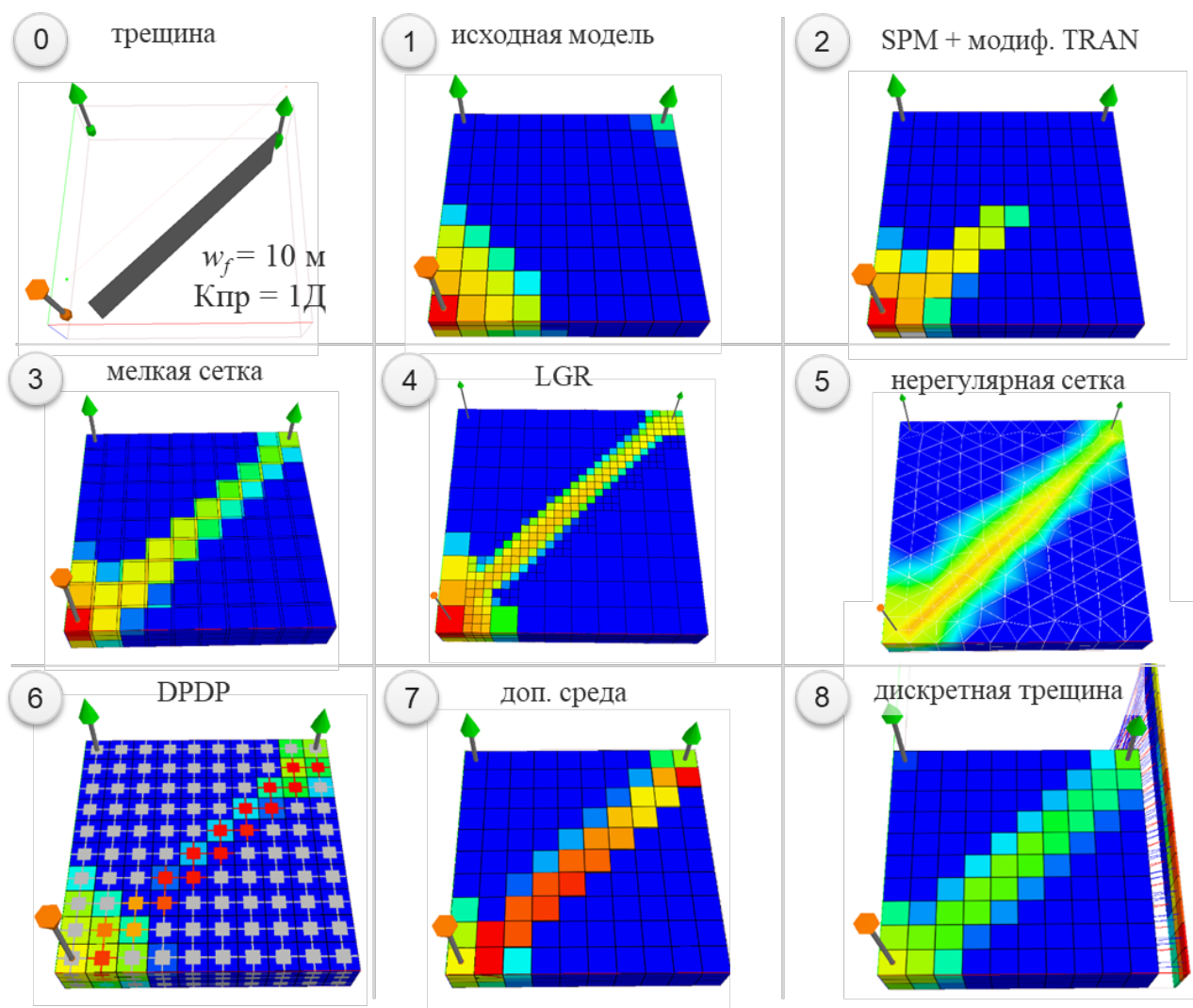


Рис. 2. Варианты моделирования высокопроводящих трещин: 0) положение трещины; 1) исходная модель без трещины; 2) модель одной среды с модифицированной проводимостью; 3) мелкая сетка, вдоль трещины; 4) LGR; 5) нерегулярная сетка; 6) DPDP; 7) гибридное моделирование, дополнительная среда с NNC порядок исключения по сильным связям; 8) отдельное моделирование дискретных трещин

Результаты расчетов привели к следующим выводам: учет трещины в одной матричной среде (рис. 2, 2) с измененными свойствами не обеспечивает достаточную точность решения; измельченные (3, 4) и нерегулярные (5) сетки менее эффективны из-за большого числа ячеек; традиционная DPDP с трещинами во второй среде (6) имеет средние характеристики численной эффективности; подход с дополнительной средой трещин на регулярной сетке (7), где уравнения исключаются в определенном порядке, представляет собой наиболее перспективный для вложенных (embedded) методов; подход с дискретными трещинами и нерегулярными связями (8) обладает большей гибкостью в

определении и управлении состоянием индивидуальных трещин, но требует значительной доработки численного алгоритма для повышения эффективности.

Основным и успешно примененным на месторождениях Ближнего Востока стал метод учета системы трещин введением дополнительной встроенной среды (EDF) в модель одной (PPM) или двойной среды (DPDP).

Более сложные случаи моделирования низкопроницаемых или нетрадиционных коллекторов, которые разрабатываются с использованием горизонтальных скважин с множественными трещинами гидроразрыва пласта (МГРП) (рис. 3), основываются на других принципах описания геометрии пласта и нерегулярной сети естественных и техногенных трещин [2]. Эти принципы определены на основе дополнительных численных экспериментов, которые показали, что для достижения приемлемой точности аппроксимации давлений и насыщенных требуется использование сверхдетализированных расчетных сеток с размерами, достигающими сотен миллионов ячеек при размерах ячеек в пределах 10–40 см в окрестности трещин.

В представленной работе предложены несколько новых решений, обеспечивающих оперативное решение задач высокой размерности в совместной нелинейной постановке моделирования скважин, трещин ГРП и естественных динамических трещин. Среди ключевых решений можно выделить: 1) использование иерархических сеток, которые локализуют детализацию вблизи особенностей фильтрации, при этом снижая потребление оперативной памяти в 4–30 раз; 2) внедрение нелинейного мультигрида (Full Approximation Scheme, FAS), который также менее требователен к использованию оперативной памяти и обладает линейной скоростью сходимости при увеличении размеров модели; 3) использование графических процессоров (GPU) для ускорения расчетов в параллельной версии алгоритмов.

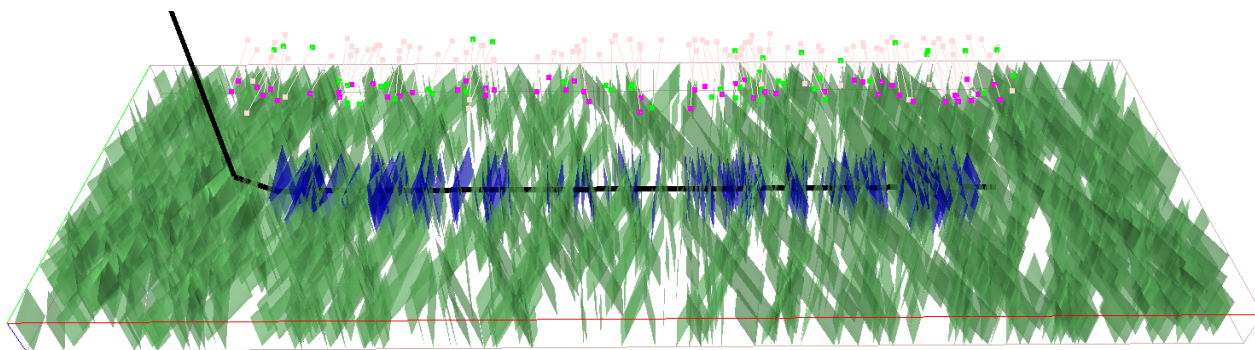


Рис.3. Модель участка залежи, разрабатываемая горизонтальной скважиной длиной 2000 м со 120 ГРП, при наличии естественной трещиноватости (DFN) коллектора

Результаты полномасштабного моделирования

Преимущества данного подхода, направленного на улучшение качества адаптации и последующего прогнозирования показателей, а также на ускорение расчетов и сокращение времени для принятия решений, проиллюстрированы на примере трех месторождений в регионе Ближнего Востока при решении разнообразных производственных задач.

Модель PPM+CF. Рассмотрено нефтяное месторождение [1], расположенное в Ираке в тектонически активном регионе и представленное традиционными карбонатными коллекторами формации Мауддуд. Анализ динамики работы фонтанного фонда скважин, начального пластового давления и интерференции между отдельными скважинами выявил несколько особенностей, которые не могут быть объяснены моделью одинарной пористости. Среди этих особенностей выделяются: существенное снижение начального пластового давления при вводе новых скважин, находящихся на большом расстоянии от зоны отбора; высокая межскважинная интерференция, не связанная с высокопроницаемыми пропластками; улучшенные продуктивные характеристики удаленной части пласта, выявленные по гидродинамическим исследованиям скважин (ГДИ); активное снижение давления в различных тектонических блоках несмотря на высокоамплитудные разломы.

Исследование керна и ГДИ не подтвердило наличие активной диффузионной трещинной среды, выявлены лишь отдельные интервалы кавернозности, которые не удалось точно картировать. Однако результаты интерпретации трехмерной сейсмике и анализа атрибутов выявили 49 разломов в пределах восьми пластов формации. На основе

этого проведено построение гидродинамической модели, которая включает трехфазную систему (нефть, газ, вода), имеет размерность $167 \times 99 \times 200$, содержит 1,5 млн активных ячеек и учитывает 22 скважины (рис. 4).

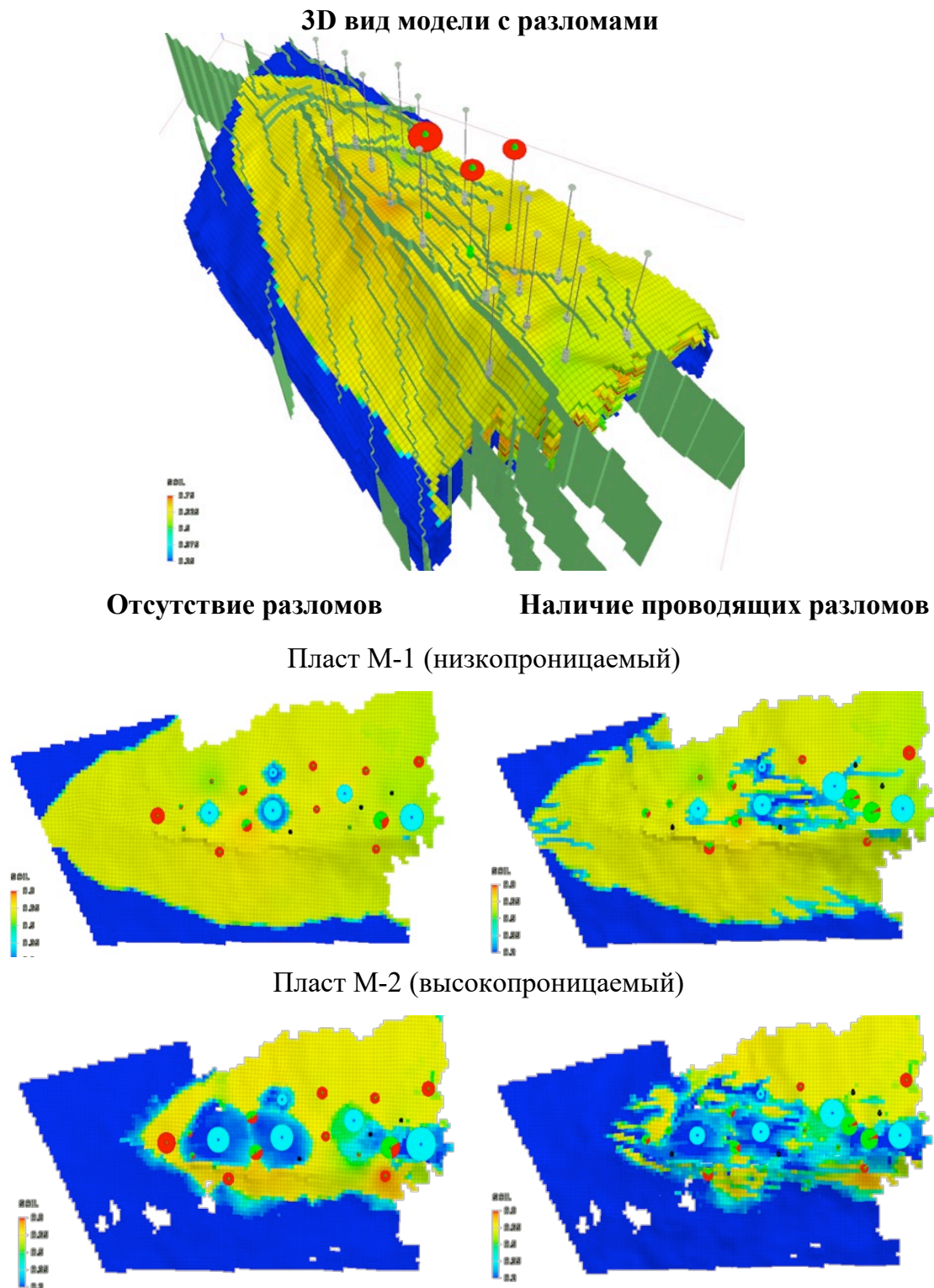


Рис. 4. Модель PPM+CF для традиционного коллектора с проводящими разломами: общий 3D вид модели и сети разломов (CFN); распределение нефтенасыщенности при закачке воды в пласт для модели без и с разломами для низко- и высокопроницаемого пласта

На основе предложенной методики индивидуального моделирования проводящих разломов, интегрированной в стандартный симулятор, в ходе адаптации модели к истории разработки выполнена калибровка фильтрационных параметров разломов. В результате оценены проводимости 9 высокопроводящих разломов, выделены два полупроводящих и 7 непроводящих разломов. Для оставшегося 31 разлома невозможна точная настройка по имеющимся данным, однако из них 16, вероятно, не влияют на разработку пласта в упругом режиме, в силу удаленности от зоны отборов. Неопределенности в параметрах разломов учтены при анализе рисков и проведении многовариантных прогнозных расчетов для планирования системы заводнения. Показано, что воздействие проводящих разломов повышает конечный коэффициент извлечения нефти в упругом режиме работы пласта, однако существенно снижает эффективность системы заводнения, уменьшая дополнительное добычу при неправильном выборе размещения нагнетательных скважин (см. рис. 4).

Улучшение стандартной численной схемы для моделирования проводящих разломов позволило снизить время расчета полномасштабной модели в 5 раз (с 125 до 22 ч).

Модель DPDP+DFN. Исследована нефтяная залежь в формации Джериби [4], характеризующаяся дизъюнктивными нарушениями и низкопроницаемым (~1 мД) карбонатным коллектором с развитой диффузионной трещиноватостью, обеспечивающей высокие фонтанные притоки нефти. Распределение трещин в пласте обусловлено тектоникой и процессами структурообразования. С использованием сейсмического атрибута – кривизны поверхности, геофизических данных и результатов испытаний определена плотность диффузионных трещин. По данным FMI трещины ориентированы вдоль оси структуры, образуя длинные коридоры (см. рис. 4, а). Внутри коридоров выявлены высокие коэффициенты продуктивности скважин от 7 до 35 м³/сут/бар, в то время как вне коридоров наблюдается практически полное отсутствие трещин с продуктивностью скважин 0.14 м³/сут/бар для матричного коллектора.

Несмотря на соответствие коллектора классическим параметрам двойной среды, позволяющим неявно учесть высокие продуктивные характеристики трещин, в процессе разработки залежи обнаружены эффекты в поведении скважин, которые нельзя точно воспроизвести. Основной проблемой является супер-интерференция между скважинами,

которые находятся на длительном расстоянии (более 2 км) друг от друга, с взаимной реакцией давления в течение 8–13 ч при изменении режима работы одной из них.

Построение геологической и гибридной фильтрационной модели DPDP+DFN отличается от традиционного подхода адресным выделением зон трещиноватости, разломов и линеаментов, их объединенной кластеризацией и отнесением к одной из трех сред. На основе этой процедуры выделены 8 разломов с разной проводимостью и 82 длинные высокопроводящие трещины (рис. 5, а).

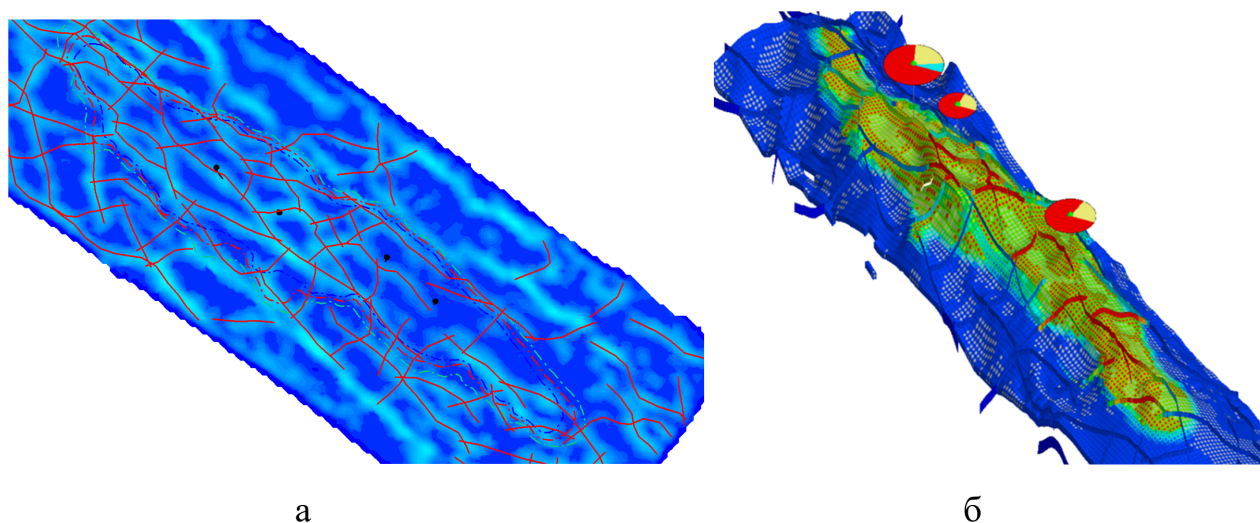


Рис.5. Модель DPDP+DFN для низкопроницаемого коллектора в период эксплуатации: адаптированное поле трещинной проницаемости DPDP и длинные высокопроводящие трещины (красным, DFN) (а); распределение нефтенасыщенности в трех средах: матрица, невидные трещины, явные длинные трещины(б)

В полномасштабной модели с крупными ячейками (100×100 м) размерностью 220×77×22 м не удалось с достаточной степенью детализировать сложную нерегулярную сеть длинных трещин для учета интенсивной интерференции в узком (метровом) и высокопроницаемом (до 1 Д) канале. Поэтому длинные трещины смоделированы явно в рамках дополнительной, третьей среды – DFN. Адаптация модели позволила уточнить диапазон проницаемости трещиноватой среды: для диффузионных трещин – 30–70 мД, для высокопроводящих трещиноватых зон шириной 1 м – 500–1000 мД.

При адаптации скважин на историю разработки адресное задание дискретных трещин позволило более точно учесть эффекты интерференции и динамики забойных давлений скважин.

На основе адаптированной модели проведена оценка эффективности и рисков закачки газа в приконтурные и законтурные скважины. Расчеты показали значительный диапазон достигаемых коэффициентов извлечения нефти (КИН) и возможный прорыв газа через 1–2 мес к добывающим скважинам в зависимости от расположения газонагнетательных скважин.

С целью эффективного полномасштабного моделирования проведена оптимизация численных алгоритмов совместного решения трех сред (DPDP+DFN), что позволило ускорить расчеты до 5 раз.

Модель PPM+DFN+HF. Для оценки эффективности способов заканчивания, уточнения дизайна гидроразрыва пласта (ГРП) и определения потенциала добычи участка нефтяной залежи, характеризующейся нетрадиционным трещиноватым нанопроницаемым карбонатным коллектором, разработана модель PPM+DFN+HF. Данная модель коллектора включала в себя слабопроницаемую пористую матрицу (~400 нД с пористостью 4,5 %), явно заданные естественные трещины (раскрытость около 0,1 мм, плотность 1/10 м), выявленные с использованием FMI, и явно заданные трещины ГРП (120 трещин с полудлинной 20-150 м).

Для построения иерархической сетки была использована базовая модель с ячейками $50 \times 50 \times 1,5$ м, а размер сектора составил 3000×1000 м с числом ячеек по направлениям IJK $120 \times 40 \times 6$. Затем применялся специальный алгоритм последовательного измельчения ячеек к границам трещин, что привело к получению сверхдетальной сетки с 8-ю уровнями и общей размерностью $30720 \times 10240 \times 6$ (1,9 млрд ячеек). Использование иерархического подхода позволило сократить общее количество участвующих в расчете ячеек всех 8 уровней до 82 млн, а последнего детализированного – до 26,9 млн. Это позволило выполнить расчет на графической карте (GPU) с ускорением на 2 порядка, при этом объем требуемой оперативной памяти был менее 24 Гб.

С использованием данной модели коллектора удалось успешно адаптировать скважины к историческим данным их эксплуатации, включая стадии закачки жидкостей

при ГРП, очистки, остановки для гидродинамических исследований и фонтанной работы, с минимальным набором настроечных параметров. Также проведен долгосрочный прогноз добычи флюидов по скважинам с учетом технических ограничений и геологических неопределенностей. Распределение водонасыщенности и давления в системе трещин и матрице в процессе эксплуатации горизонтальной скважины на участке залежи представлено на рис. 6.

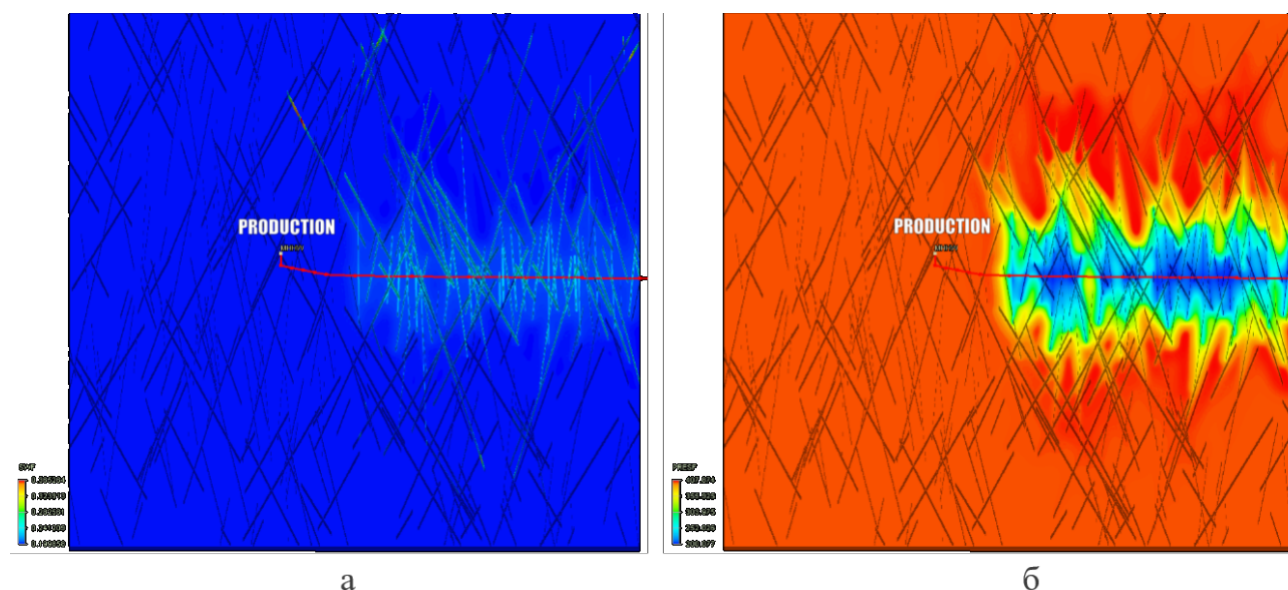


Рис.6. Модель PPM+DFN+HF для нанокolleктора в период эксплуатации горизонтальной скважины: распределение водонасыщенности и жидкостей закачки (а); распределение давления (б)

Новизна работы

На основе анализа фактической эксплуатации рассмотренных карбонатных залежей Ближнего востока продемонстрировано существенное разнообразие особенностей фильтрации флюидов, которые выходят за рамки традиционных подходов гидродинамического моделирования. Ключевым нововведением, предложенным в данном исследовании, являются явные высокопроводящие трещины и разломы, объединенные в единую гидродинамическую систему и численно решаемые с использованием оптимизированных алгоритмов. Эти инновации позволяют получать результаты расчетов для более сложных, интегрированных и гибридных моделей трещиноватого коллектора в относительно короткие временные рамки.

Выводы

1. Сложность и детальность геолого-гидродинамической модели, включая набор ключевых фильтрационных объектов, должны соответствовать объему и качеству первичной геолого-геофизической и промысловой информации. При доразведке и эксплуатации залежи целесообразно донастраивать модель, контролируя снятие неопределенностей, но лишь после появления невоспроизводимых эффектов приступать к ее усложнению и детализации особенностей фильтрации, что однако может привести к новым неопределенностям.
2. Коммерческие симуляторы ограничены традиционными математическими моделями карбонатного коллектора, не позволяют создавать комбинации гибридных моделей для учета требуемого многообразия трещиноватых коллекторов.
3. Ввод новых динамических объектов моделирования в математическую модель, в дополнение к комплексным моделям мультисред, является перспективным направлением улучшения качества фильтрационного моделирования и прогнозирования механизма вытеснения углеводородов в сложнопостроенных трещиноватых карбонатных залежах, осложненных проводящими тектоническими нарушениями, естественными и техногенными трещинами.
4. В рамках совершенствования традиционных симуляторов предложены способы моделирования дополнительных фильтрационных объектов, таких как проводящие разломы и длинные трещины, сеть естественных и техногенных трещин и нетрадиционная нерегулярная сеть трещин.

Список литературы

1. *Шевко Н.А.* Численное моделирование залежей с высокопроводящими разломами // XII научно-практическая конференция «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений», г. Санкт-Петербург, 23–25 апреля, 2019 г. – М.: Изд-во Нефтяное Хозяйство, 2019. – С. 76–87.
2. *Шевко Н.А.* Опыт численного моделирования нетрадиционного трещиноватого карбонатного коллектора с использованием графических ускорителей // Сборник материалов конференции «Российская отраслевая энергетическая конференция, РОЭК-2023», г. Москва, 3–5 октября, 2023 г. ISBN 978-5-9651-1489-4. – С. 766–797.

3. *A Next-Generation Parallel Reservoir Simulator for Giant Reservoirs* / A. Dogru, L. Fung, U. Middy, [et al.] // SPE-119272-MS, SPE Reservoir Simulation Symposium, 2-4 February, The Woodlands, Texas 2009.
4. *Shevko N., Shaislamov V., Savelev O. Application of Hybrid DPDP-DFN Modeling of Fractured Carbonate Reservoirs* // SPE-196885-MS. – 1993. –<https://doi.org/10.2118/196885-MS>.
5. *Weirong Li, Zhenzhen Dong, Gang Lei Integrating Embedded Discrete Fracture and Dual-Porosity, Dual-Permeability Methods to Simulate Fluid Flow in Shale Oil Reservoirs*, MDPI (Sep.2017).