

Особенности моделирования сложного нетрадиционного карбонатного коллектора на примере залежей Ближнего Востока

Н.А. Шевко¹,

¹Газпромнефть Бадра Б.В.

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

Ключевые слова: плотные коллектора, нетрадиционные залежи, численное моделирование, ускорение расчетов, разработка залежей, графические карты

Целью работы является улучшение прогностической способности традиционного гидродинамического моделирования для разработки низкопроницаемого коллектора, осложненного как естественной трещиноватостью, так и множественными техногенными трещинами гидроразрыва (ГРП). Рассмотрены геологические, фильтрационные и технологические особенности моделирования плотных нефтенасыщенных (tight oil) карбонатных коллекторов на примере залежей Ближнего Востока.

Разработка плотных коллекторов требует применения современных технологий бурения, протяженных горизонтальных скважин и многостадийного ГРП. Показано, что для воспроизведения процессов закачки жидкостей ГРП, очистки, восстановления давления в таких комплексных скважинах, а также прогноза выработки запасов из низкопроницаемых коллекторов, требуются высокая детализация расчетной сетки и обязательный учет ряда физических эффектов.

Задача решалась в рамках модели фильтрации «черной нефти» при учете ключевых факторов: естественная трещиноватость, динамическое поведение трещин ГРП, гистерезис фазовых проницаемостей и уплотнения породы. Для повышения устойчивости численных расчетов использованы многоуровневые сетки и соответствующие мультисеточные методы решения. Высокая эффективность расчетов на задачах большой размерности достигнута использованием параллельных методов, реализованных на графических процессорах (GPU).

На базе детального анализа промысловых данных и применения усовершенствованных численных алгоритмов, реализованных на инновационной архитектуре графических процессоров, стало возможным аккуратно настроить модели на историю добычи скважин и выполнить многовариантные расчеты по прогнозу показателей разработки и выработки запасов сложного нетрадиционного карбонатного коллектора.

Modeling features of a complex unconventional carbonate reservoir in the Middle East

N.A. Shevko¹,

¹Gazprom Neft Badra B.V.

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

Keywords: tight oil, unconventional reservoirs, numerical modeling, CPU run time reduction, reservoir development, graphics cards

The paper presents a novel approach to enhance the accuracy of conventional dynamic modelling, specifically for the development of low-permeable reservoirs that are complicated by both natural and induced hydraulic fractures. The geological, filtration, and technological characteristics of modeling tight oil-saturated carbonate reservoirs are examined in the Middle Eastern deposits as a case study.

The development of tight reservoirs requires the use of modern technologies, including the drilling of extended horizontal wells and the implementation of multistage hydraulic fracturing. It has been shown that for such complex wells, the modeling of fluid injection processes, cleaning, pressure build up and the prediction of reservoir depletion require a high detailed numerical mesh and the obligatory consideration of several physical effects.

The problem was solved using a "black oil" model while considering key factors such as natural fracturing, dynamic behaviour of hydraulic fractures, hysteresis of relative phase permeabilities, and rock compaction.

Multilevel grids and corresponding multigrid solution methods were employed to enhance the stability of numerical computations on fine grids. The efficiency of computations for high-dimensional problems was achieved by using parallel solution methods implemented on graphics processing units (GPU).

Using detail field data analysis and advanced numerical algorithms implemented on innovative GPU architecture, it became feasible to accurately match models to well production history and perform multi-scenario calculations to predict field development and the recovery of reserves in a complex unconventional carbonate reservoir.

Доклад публикуется в авторской редакции

Введение

В рамках оценки потенциала добычи одного из Ближневосточных месторождений рассматривался нетрадиционный трещиноватый карбонатный коллектор с нанопроницаемостью, приуроченный к нефтематеринским (НМ) породам сеноманского возраста.

На участке геологоразведочных работ находится 20 скважин, 4 из них протяженные горизонтальные скважины (ГС) с множественными гидроразрывами пласта (МГРП). Горизонтальные скважины с МГРП показали наибольшую успешность, поэтому анализ истории эксплуатации и прогнозирование поведения этих скважин осуществлялся с применением гидродинамического моделирования. В качестве набора исходных данных использовались: керн, геофизические исследования скважин, включая FMI, гидродинамические исследования (КВД, потокометрия), промысловые замеры (устьевые, забойные давления, расходы по закачке жидкостей разрыва, дебиты нефти, воды, газа) на всех этапах эксплуатации скважины.

В ходе выполнения работы возникла проблема – невозможность прогнозирования в реалистичные сроки с приемлемой точностью поведения скважин и коллектора с применением стандартных опций коммерческих программных продуктов по гидродинамическому моделированию.

В связи с этим целью настоящей работы является улучшение прогностической способности фильтрационного моделирования в условиях нано-коллектора, осложненного естественной и техногенной трещиноватостью. Детально описаны поведение скважин и свойства коллектора, отличающиеся от традиционных и трудноизвлекаемых коллекторов других регионов, рассмотрены подходы, улучшающие качество настройки модели, реализованы эффективные численные алгоритмы и получены адекватные прогнозные результаты с существенным ускорением расчетов.

Сравнение объекта моделирования с коллекторами других регионов

Сравнение изучаемого НМ пласта с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ) других регионов показало, что прямые разрабатываемые аналоги отсутствуют. Имеется схожесть пласта с некоторыми геолого-физическими характеристиками пластов ТРИЗ других регионов – Бакен (США), Баженовская свита (ГПН), но основным различием является ухудшенная проницаемость – на 1–2 порядка ниже Баженовской свиты (табл.1).

Таблица 1. Сравнение геолого-физических характеристик ТРИЗ

Пласт	Мишриф, НМП- КС_{ТРИЗ}	Бакен (США)	Бажен. свита (Пальян)	Доманик (Оренбург)
Насыщение	Нефть	Нефть	Нефть	Нефть
Глубина, км	2,9	2,0–3,5	2,4	3,0–3,2
Эф. толщина, м	11,2	21.3	9	80
Кпор, %	4–4,5	6–8	5	4
Кпр, мД	0,0004–0,005	0,005–0,01	0,04	< 0,01
Пластовое давление, МПа	40–59	22–38	25	30–32
Литология	Трещиноватый, Карбонатный	Карбонатный	Терригенный	Карбонатный

Особенностью изучаемого пласта является также интенсивная естественная трещиноватость, которая обеспечивает высокие пусковые дебиты до 1000 м³/сут жидкости и 400 м³/сут нефти с последующим их резким снижением (рис. 1). Продуктивность и накопленная добыча таких скважин зависят от суммарной площади поверхности трещин, которая определяется технологией вскрытия (МГРП, СКО-ГРП), длины ГС. По причине большой поверхности контакта скважин с пластом и значительных объемов закачки технических жидкостей ГРП, критически важным для прогнозирования показателей эксплуатации скважин становится настройка модели на

фактические данные полного цикла воздействия – стимуляция, очистка и первичная добыча скважины.

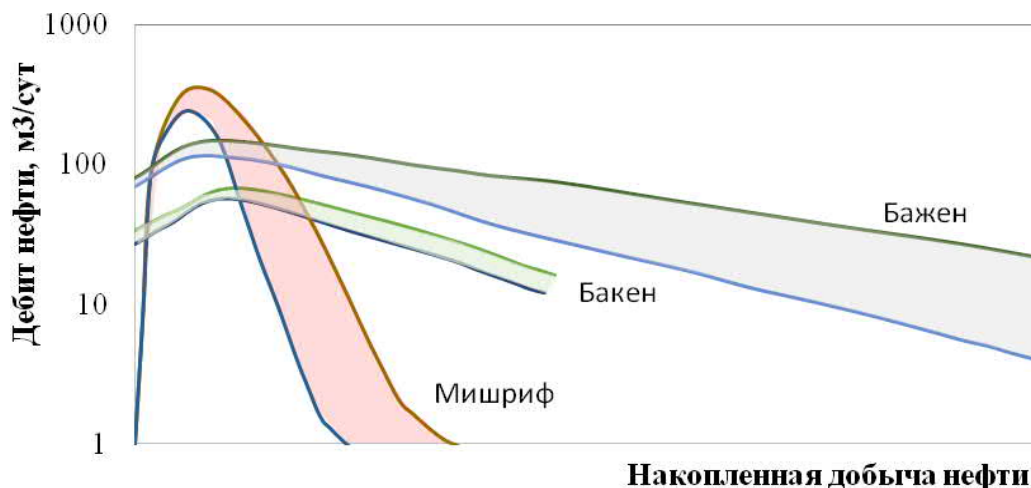
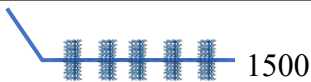
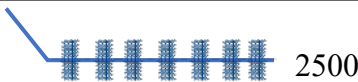






Рис. 1. Динамика дебитов нефти ГС с МГРП ТРИЗ различных регионов

На месторождении применяются современные, продвинутое технологии бурения и заканчивания скважин – ГС с длиной горизонтальных участков 1300–1600 м, содержащие 30–39 стадий МГРП с 3–4 кластерами и закачкой до 100 т проппанта. Как показывает оценка технического предела возможностей бурения, заканчивания и стимуляции скважин в условиях месторождения (см. табл.2), технические показатели могут значительно превысить достигнутые, что усложняет оценку потенциала скважин на основе моделирования из-за более сложных (с вычислительной точки зрения) максимально нагруженных конструкций.

Таблица 2. Достигнутые показатели и технический предел

Показатели	Текущие	Технический предел
Длина ГС, м	 1500	 2500
Количество МГРП	39	50
Средний расход, м ³ /мин	 9	 14-16
Количество кластеров	 3	 4-5
Тип жидкости	Hybrid	ПАА, HVFR + Fiber + Diverters
Масса проппанта, т	80–100	150

Особенности плотных коллекторов

На основании практического изучения геолого-геофизических материалов, процессов закачки жидкостей ГРП, очистки и динамики работы скважин можно обозначить основные отличия изучаемого объекта от известных ТрИЗ.

Так плотные низкопроницаемые коллектора ТрИЗ Бакена и Бажена характеризуются: микро-проницаемостью, высокими градиентами давлений, нелинейным законом фильтрации, влиянием геомеханики на фильтрацию, применением комплексных конструкций скважин с МГРП, динамическим, нелинейным поведением трещин ГРП.

Для нетрадиционного карбонатного коллектора изучаемого месторождения ключевыми характеристиками и признаками поведения становятся:

- нано-проницаемость пород, физико-химические эффекты, десорбция газа;
- существенное влияние естественной трещиноватости, включая закрытые при начальном пластовом давлении трещины;

- сильная зависимость свойств трещинной среды от давления: приемистость выше продуктивности на 3 порядка; открытие, закрытие трещин при росте и снижении пластового давления ($P_{пл}$) в районе скважины; высокие остаточные давления после ГРП из-за смыкания трещин с эффектом появления «захороненной воды»;
- динамика добычи газа может отличаться от традиционной по причинам неравновесного состояния распределения флюидов в объеме пласта и наличия «нано» пор, которые не позволяют течь крупным молекулам нефти, а легкие компоненты нефти (газовые фракции) доходят до скважины быстрее даже при пластовом давлении выше давления насыщения нефти газом;
- длительность очистки скважин – технические жидкости выходят практически всю историю эксплуатации скважины;
- сопоставимость величины объемов жидкостей ГРП и объемов добычи флюидов, т.е. сколько закачано объемов – столько и добыто, после этого скважина останавливается и далее фонтанировать не может;
- необходимость интерпретации гидродинамических исследований скважин (ГДИ) в условиях многофазного потока; с учетом потокометрии этот вид исследования является ключевым для настройки параметров трещин и пласта.

Для плотных и сверхнизкопроницаемых коллекторов имеется большое число факторов, влияющих на продуктивную работу скважин, а в условиях сложной структуры порового пространства, агрессивного воздействия на околоскважинную зону пласта (ОЗП), ограниченного количества и недостаточного качества геофизических, керновых и гидродинамических исследований, требуется учитывать все данные и показатели реакции скважины и пласта на применяемые технические воздействия. Таким образом, для прогноза поведения скважины и настройки параметров ОЗП и пласта, в отличие от рассмотренных ТриЗ и традиционных карбонатных пластов, требуется моделировать следующие технологические процессы.

1. Закачка жидкостей ГРП – для создания начального состояния ОЗП с повышенным $P_{пл}$ и распределением технических жидкостей, влияющих на начальное

содержание воды и ее последующую динамику (закачка 2 часа, оставление интервала до окончания обработки всей скважины).

2. Очистка скважины (flowback) – для получения параметров продуктивности с учетом изменения состояния ОЗП (продолжительность 1–2 мес.)
3. КВД в условиях многофазного притока флюидов (остановка на 1–2 мес.)
4. Механизированный отбор – повторный запуск скважин после прекращения фонтанирования с применением газлифта или насосной эксплуатации.

Детали и особенности строения околоскважинной зоны пласта

Схема строения, выявленная по данным анализа и исследований, околоскважинной зоны в условия естественной и техногенной трещиноватости представлена на рис. 2. Основные геометрические и численные параметры, важные для последующего моделирования, следующие:

- число натуральных трещин (по данным FMI) – 1 трещина на 10 м, всего 148 трещин на горизонтальный участок ствола 1500 м;
- число трещин ГРП – 4 трещины на 50 м, всего 120, полудлина (X_f) по дизайну равна 150 м, по данным ГДИ – до 70 м.
- натуральные трещины по данным геомеханики при начальном пластовом давлении ($P_{нач}$) полностью закрыты, при $1,7P_{нач}$ – 50 % трещин открыты полностью, остальные – частично, а при $2,5P_{нач}$ – все открыты. $P_{нач}$ равно 40 МПа, давление закачки более 100 МПа;
- зона проникновения жидкостей 20–30 м (оценка объемным методом) от каждой трещины;
- пластовое давление в районе скважины перед очисткой равно 70 МПа, что близко к давлению смыкания трещин ($P_{ст}$);
- зона (радиус) исследования по ГДИ не превышает 20 м;
- зона дренирования при отчистке 6–10 м.

Описанные параметры в результате приводят к следующим наблюдаемым процессам и соответствующему поведению скважин.

- 1) При высоком давлении закачки жидкостей и пропанта ГРП происходит раскрытие естественных трещин и создание сверхвысокой приемистости.
- 2) Жидкости уходят по системе трещин и частично в породу от трещин на расстояние до 20 м, при этом полностью оттесняется нефть из ближней зоны.
- 3) После прекращения закачки начинается снижение давления (распределение по пласту), но при достижении давления смыкания трещин оно стабилизируется и остается выше, чем $P_{нач}$ на 70 %.
- 4) После запуска скважины на фонтанном режиме работы – до 1 мес. идет выход 100 % жидкостей закачки, затем появляется нефть.
- 5) Начальная продуктивность отличается на 2 порядка от приемистости, а при последующем снижении дебита падает еще на 1 порядок при приближении к начальному пластовому давлению.

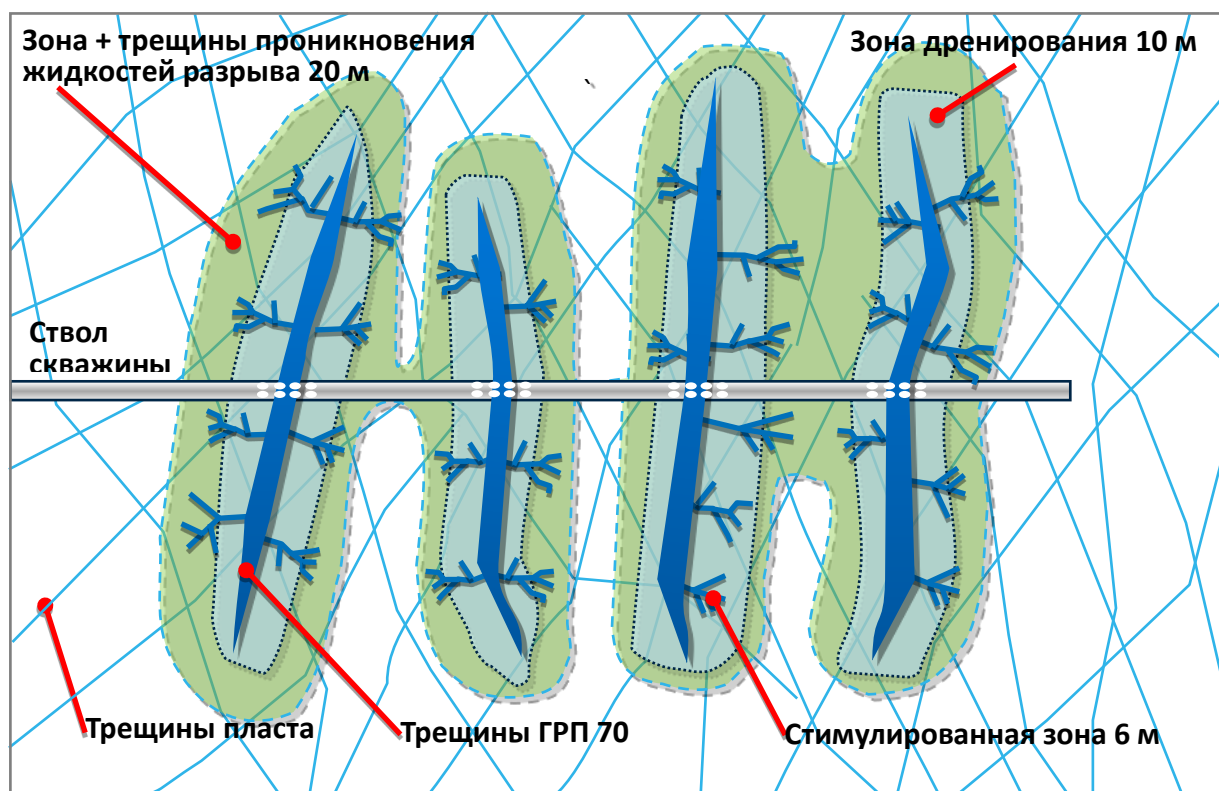


Рис. 2. Схема строения околоскважинной зоны пласта

Стандартные решения по моделированию

Исходя из схемы строения и параметров ОЗП с целью воспроизведения описанных процессов в стандартных, известных симуляторах очевидным является использование следующих опций:

- локальное измельчение сетки (LGR) в районе каждой трещины, мелкая и неравномерная сетка – для описания высоких градиентов давлений;
- двойная среда (DPDP) и тройная среда (добавляются несвязанные между собой поры) – для учета естественных трещин;
- стимулированный объем (RSV) – существенно отличающаяся ближняя зона по продуктивным и упругоэластическим характеристикам;
- проводимость и сжимаемость от давления (ROCKTAV) – нелинейное поведение фильтрационно-емкостных свойств породы;
- гистерезис сжимаемости – неупругая деформация, уплотнение;
- гистерезис фазовых проницаемостей (ФП) – изменение смачиваемости при закачке сторонних жидкостей в пласт;
- нелинейный Дарси и градиент сдвига – ограничение зоны дренирования при малых градиентах фильтрации;
- модель поведения ствола скважины (WBS эффект) при закачке и очистке;
- течение в трещинах – наряду с трещинами гидроразрыва, система естественных трещин значительно влияет на распределение по пласту давления и жидкостей закачки;
- композиционные модели для газонасыщенных интервалов (tight gas).

Результаты использования опций для изучаемой задачи удивили своими ограничениями и проблемами, связанными с численной устойчивостью расчетов.

Краткое описание проблем по опциям на этапе адаптации модели:

- LGR 5x5 на базовой сетке 50x50 м – нет устойчивого расчета, несмотря на крупный (10 м) размер ячеек;
- мелкая равномерная и неравномерная сетка (1 м) – приводит к большой размерности модели, мелким временным шагам, необходимым для обеспечения

устойчивости схемы, что не позволяет считать скважину целиком, а только одну трещину ГПП;

- SRV зона – проницаемость, упругоёмкость отличаются на 3 порядка из-за чего нет устойчивости решения, но даже этой разницы недостаточно для воспроизведения истории отдельных скважин; улучшение порового пространства близ трещин позволяет настроить давление, но завышает извлечение нефти и не позволяет воспроизвести динамику выноса воды;
- двойная среда – недостаточно для настройки модели, требуется более резкое отличие в поведении двух сред;
- комбинация опций DPDP и SRV для каждой среды – не позволяет воспроизвести динамику воды, длительного отсутствия нефти;
- комбинация опций DPDP, SRV и гистерезиса ФП – достаточно близко воспроизводит фактические данные, однако сопровождается неустойчивостью решения и длительным временем расчета.

В итоге получилось лишь частично настроить историю активностей на скважинах, при этом появилось множество настроечных параметров, которые на каждой скважине значительно отличались, что снижало достоверность прогнозов, как для проектных скважин на новых участках, так и для пробуренных скважин с усовершенствованной конструкцией на уже адаптированном участке.

При моделировании технологических воздействий и реакции пласта на них имеются общие трудности, возникающие на всех скважинах месторождения, в части приведения в соответствие прогноза и факта. При настройке ОЗП и параметров трещин только на КВД, остальные временные участки или активности не настраиваются, что и показывает на наличие особенностей в поведении по сравнению с традиционным коллектором (рис. 3):

1) несоответствие давления закачки при ГПП из-за раскрытия естественных трещин;

2) после закачки распределение (снижение) давления по пласту до уровня давления закрытия трещин, далее давление практически стабилизируется, при этом

остается зона «передавленная» (overcharged), в традиционном коллекторе давление продолжает снижаться до $P_{нач}$;

3) SRV в виде увеличенной проницаемости и сжимаемости в заданном радиусе от каждой трещины на 2–4 порядка позволяет лишь частично настроить снижение давления после запуска, в традиционной модели снижения давления значительно, не хватает объемов на небольшом расстоянии от трещин, увеличивать радиусы не позволяет настройка на КВД;

4) КВД характеризует ближнюю зону с радиусом исследования до 20 м; интерпретация КВД настраивается приемлемо на факт множеством способов, однако это не позволяет сбить остальные участки; интерпретация осложнена наличием сильно меняющегося многофазного потока, т.е. если учитывать все флюиды, то получается некорректные значения проницаемости, очевидно, что поток идет не из удаленных участков пласта, а просто выдавливается из трещин и коллектора (около трещин) под высоким давлением передавленной зоны; близкие к корректным значения получаются, если использовать приток только нефти, а иногда еще и газа;

5) потенциал SRV уменьшается – при последующих запусках скважины наблюдается более резкое снижение давления;

6) деградация трещин во времени при последующей эксплуатации скважины, подтверждается повторными КВД;

7) добыча технической воды длительное время (до 1 мес) без следов нефти, что связано с выходом воды только из трещин, из которых ранее вытеснена подвижная нефть; по мере выноса технических жидкостей происходит рост дебита нефти с последующим снижением из-за продолжающегося падения давления;

8) динамика газа зависит от особенности распределения флюидов в пласте с учетом возможной их неравновесности или распределения флюидоупоров для жидких, но не для газообразных флюидов; как правило, при очистке первым появляется газ, иногда появление достаточно быстрое, далее динамика газа либо снижается до уровня газового фактора, либо увеличивается в случае разгазирования пласта.

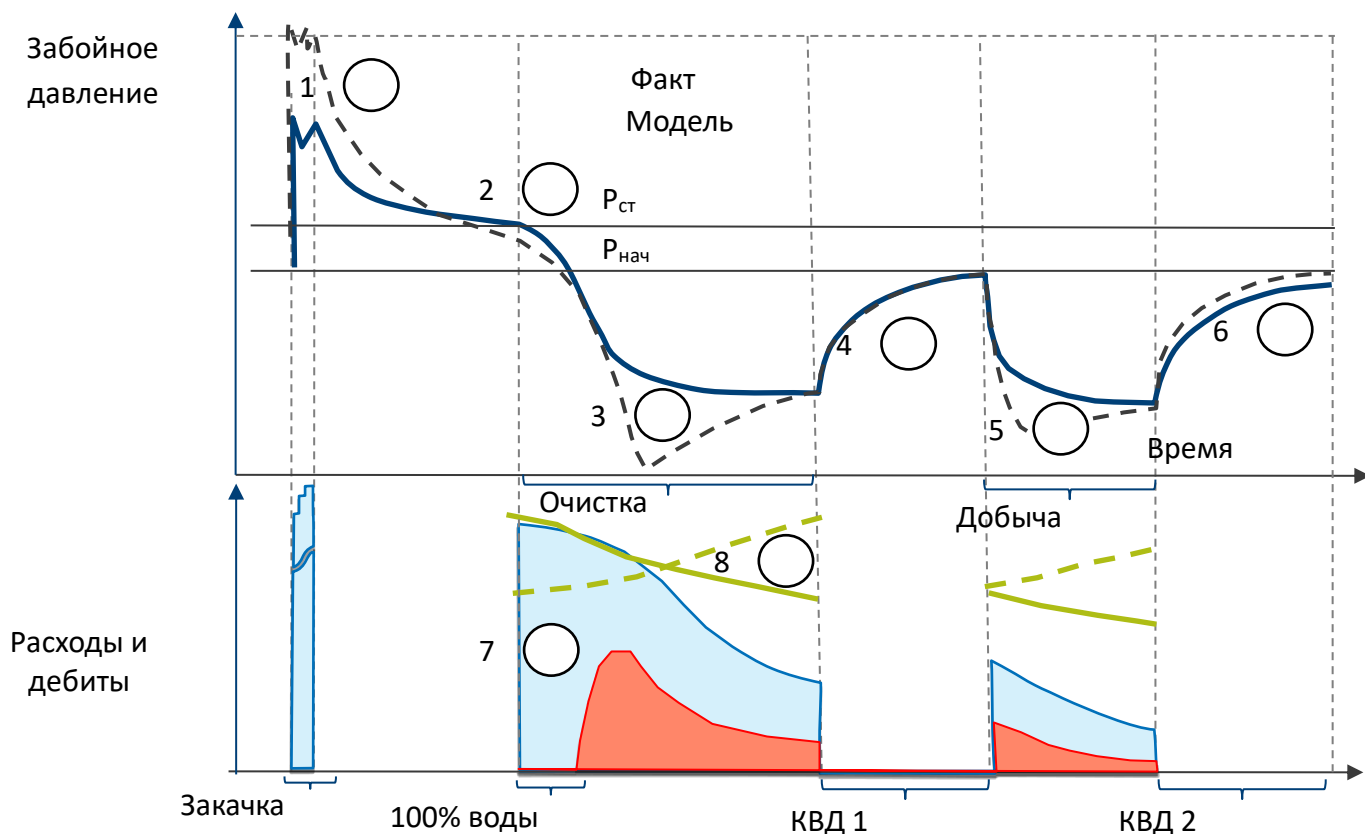


Рис. 3. Типичная динамика фактических и моделируемых показателей эксплуатации скважин

После этапа адаптации моделей прогнозирование показателей разработки выполнялось крайне медленно и неустойчиво – шаг по времени для обеспечения устойчивости не превышал 0,001 сут, время расчета – более недели. Часть настроенных на историю моделей не смогли просчитаться на прогноз, в результате чего приходилось решать задачу «поиска компромисса» – между приемлемым качеством адаптации с учетом ключевых эффектов и просто возможностью выполнить прогноз.

На базе стандартных опций требуемые расчеты по оценке потенциала изучаемого месторождения были выполнены с существенным перерасходом временных ресурсов и слабо допустимой точностью решения. На основании вышесказанного был сделан вывод о необходимости применения альтернативных подходов моделирования НМ коллектора как более сложного, чем известные ТРИЗ.

Предлагаемые решения

Для улучшения качества моделирования, в дополнение к учету основных эффектов, необходимы детальные сетки с размерами ячеек до десятков сантиметров и более устойчивые численные схемы совместного моделирования разномасштабных объектов и процессов. Для реализации такой задачи рассмотрим следующую стратегию:

1. ввод новых объектов моделирования;
2. иерархическая детализация регулярной сетки;
3. применение нелинейного многосеточного метода (Full approximation scheme, FAS) [1];
4. реализация алгоритмов на GPU.

Рассмотрим кратко предлагаемые подходы.

Новые объекты моделирования

Реализация детального представления объектов и описания сложного их поведения, а также обеспечение устойчивости численной схемы, возможны при использовании следующих новых объектов и подходов их решения.

- Явное моделирование дискретных трещин (DFN): адресное задание свойств, открытие и закрытие участков трещины от давления; экономичнее по памяти и точнее, чем двойная среда, т.к. фактическая плотность сети естественных трещин равна ниже (1 трещина на 10 м), чем размер ячеек пласта (0,3–0,7 м); отдельная система уравнений и решатель;

- Явное моделирование трещин ГРП: при протяженных трещинах (100–500 м) требуется учет деградации трещин во времени; базовая проводимость трещин считается статичной из-за наличия пропанта; совместное моделирование скважины, всех вскрытых и связанных трещин; отдельная система уравнений и решатель.

На рис. 4 показаны стохастически распределенные в объеме естественные трещины на основе скважинных данных FMI (рис. 4, б), адресные трещины ГРП (рис. 4, а), формат задания трещин (или высокопроводящих разломов) (рис.4, в) и пример дискретизации трещин на сетку (рис. 4, г).

Численная модель фильтрации через высокопроводящие длинные трещины DFN описана в статьях [2, 3].

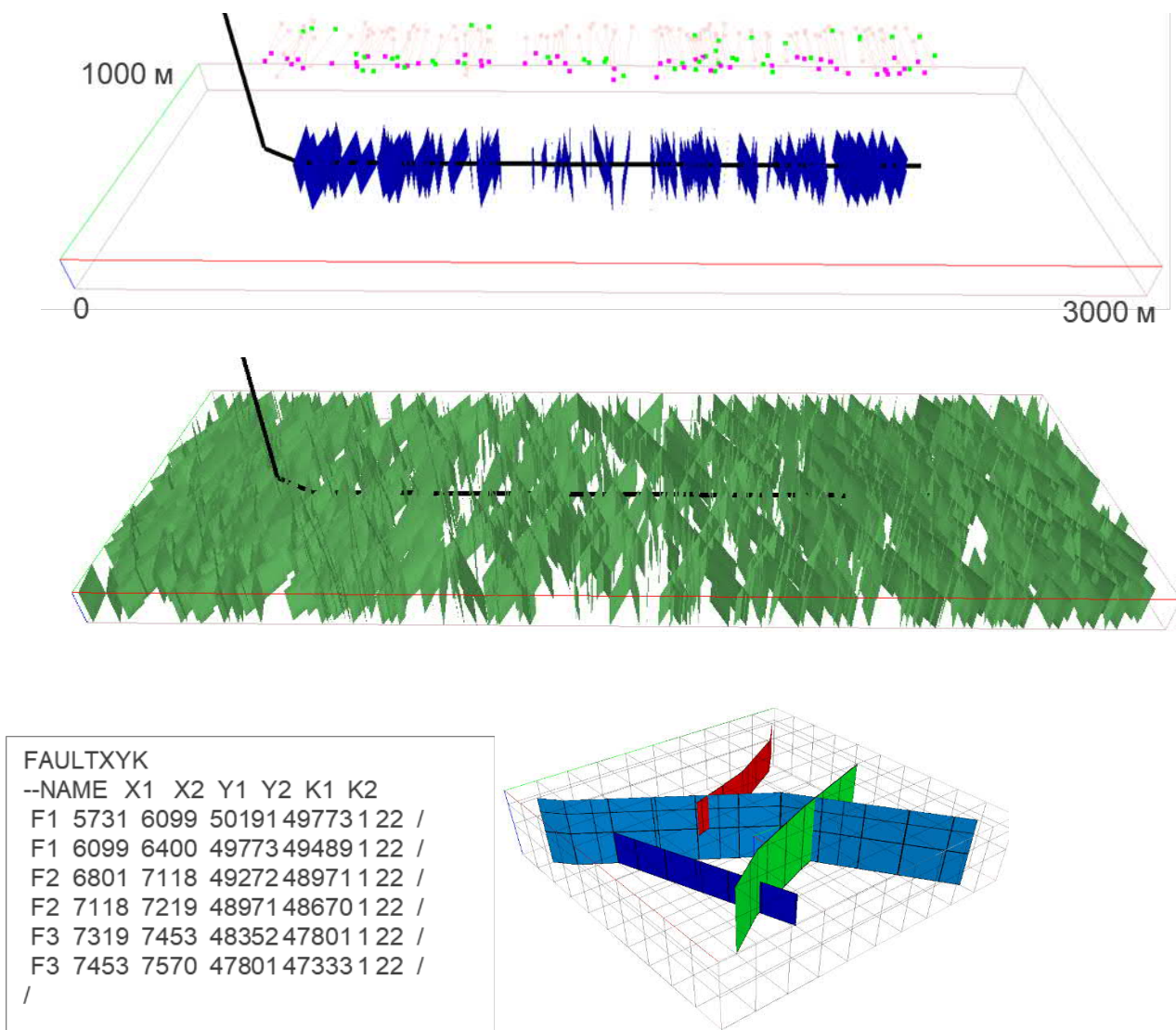


Рис. 4. Новые объекты моделирования: а) траектория скважины с горизонтальным участком 2000 м и 150 трещин ГРП; б) сеть естественных трещин; в) формат задания естественных трещин; г) распределение дискретных трещин в объеме пласта [2]

Иерархическая детализация сетки

Для адекватной аппроксимации градиентов давлений с учетом сверхнизкой проницаемости на 3–4 порядка меньшей, чем традиционные коллектора, требуются сверхдетальные сетки с размером ячеек в 5–10 см в районе каждой трещины. Некоторые преимущества такой сетки – это отсутствие необходимости использовать

для описания каких-либо границ нерегулярную сетку и для моделирования естественных трещин модель двойной среды.

Несложные расчеты показывают, что в районе одной скважины (рис. 4, зона моделирования – 1 x 3 км) требуется порядка 300 млн. ячеек сверхдетальной равномерной сетки.

Предлагается использовать иерархическую или композитную **сетку**, которая позволяет существенно сократить размерность задачи, детализируя сетку только в отдельных зонах, уменьшить число дескрипторов и требования к памяти за счет вложенности ячеек.

Используем следующую схему построения иерархической, многоуровневой сетки (рис. 5):

- 1) формируем совместную сеть естественных и техногенных трещин (рис. 5, а);
- 2) принимаем за заданную детализацию базовую модель, например, 50x50 м (рис. 5, б);
- 3) определяем требуемый уровень детализации (L), размер ячеек уменьшается до $50/2^L$, так при $L=7$ размер ячейки – 0,39 м, всего 19,7 млн. ячеек;
- 4) формируем укрупнение в плане ячеек объединяя 2x2 ячейки в одну ячейку следующего ($L-1$) уровня, и так до нулевого уровня, при этом соседние в плане ячейки прикасаются только с соседним уровнем (рис. 5, в).

Итоговая сетка (рис. 5, г) имеет в зависимости от плотности трещин существенно меньше ячеек, чем в равномерной сетке, т.е. для композитной (одна сетка с разными размерами ячеек) – 2,5 млн ячеек, что в 8 раз меньше, для многоуровневой (набор из 7 сеток) – 3,3 млн ячеек, – в 6 раз.

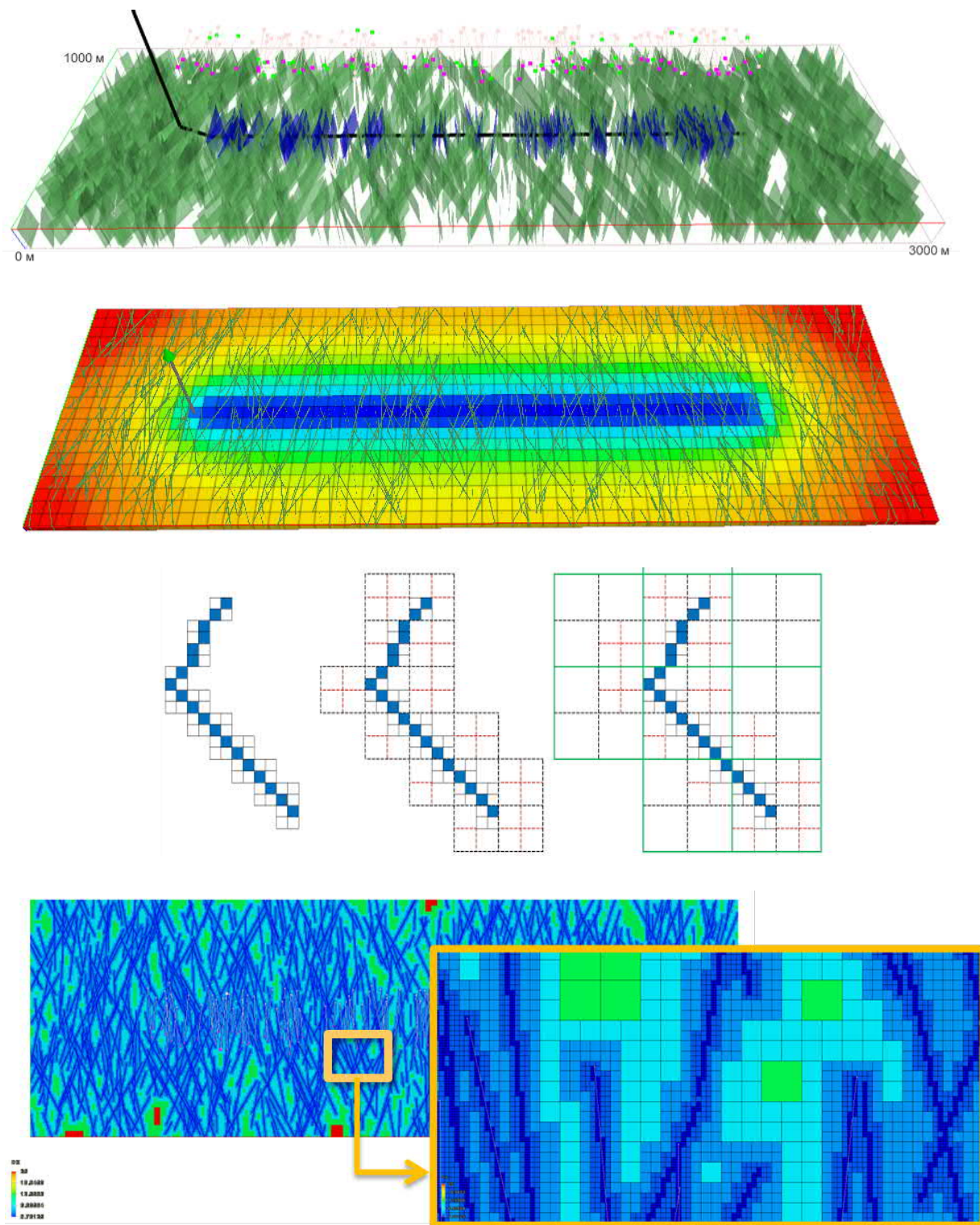


Рис. 5. Построение иерархической детализации сетки: *а)* сеть естественных трещин и трещин ГРП; *б)* базовая сетка; *в)* иллюстрация построения композитной сетки; *г)* итоговая композитная сетка (цветом – размер ячеек)

Применение нелинейного мультисеточного метода

По причине отсутствия в коммерческих симуляторах численной устойчивости расчетов при использовании мелких ячеек в данной работе рассматривались многоуровневые сетки и соответствующие мультисеточные методы решения нелинейной системы уравнений. Одним из таких методов является нелинейный мультисеточный метод (FAS). Он имеет преимущества известного «мультигрид» (multigrid) метода с линейной скоростью сходимостью при увеличении размеров модели, а также позволяет сократить затраты по памяти, поскольку не требуется формирование полной матрицы Якобиана на сетках детальных уровней.

Параметры использования и реализации метода FAS:

- на уровне 0 (базовая сетка) система нелинейных уравнений решается методом Ньютона;
- на всех остальных мелких уровнях сглаживание невязки осуществляется нелинейным Гаусса-Зейделя методом (2–3 итерации), матрица Якобиана не строится;
- шаг по времени выбирается на базе грубой или промежуточной сетки, т.е. сокращается число расчетных шагов (для L6 – около 4 раз, но погрешности дискретизации по времени возрастают);
- итерации выполняются по схеме V-цикла или Y-цикла в зависимости от числа уровней.

Псевдокод FAS метода представлен в работе [1].

Реализация алгоритмов на GPU

Графические ускорители в силу архитектурных особенностей, позволяют распараллеливать задачи на 10 тыс. ядер с высокой пропускной способностью оперативной памяти, обеспечивая ускорение расчетов до 2 порядков, особенно для задач большой размерности.

Эффективность реализации алгоритмов и расчетного модуля на GPU с учетом всех ограничений графического процессора – отдельная специфическая задача, требующая

множества реализаций каждого алгоритма разными способами и последующего выбора оптимального варианта по памяти и быстродействию.

В отличие от центрального процессора (CPU), на GPU применяются детальный параллелизм (fine-grained parallelism) и существенная оптимизация размеров задачи, чтобы разместить все данные задачи в памяти, ограниченной в настоящее время размером 24–32 Гб на один GPU. Применение графических кластеров с размещением на одной материнской плате 8–16 GPU снимает такие ограничения, но в рамках моделирования участка с единичной скважиной в данной работе не рассматривается.

Детали реализации алгоритмов решения задачи многофазной фильтрации на GPU представлены в [4], кратко сформулируем используемые здесь подходы:

- программная модель CUDA для NVIDIA;
- максимизация загрузки GPU, используя все доступные его аппаратные возможности, исключение узких мест – обмен данными CPU-GPU в процессе расчета;
- массивный параллелизм обеспечивается стратегией «поочередной цветовой нумерации»;
- специальный формат хранения матриц сеток разных уровней для ускорения выполнения матричных операций;
- итерационный метод BiCGstab с предобуславливателем за счет вложенной факторизации с «цветовой» нумерацией;
- расчет PVT, SCAL свойств и их производных, расчет Якобиана и невязок выполняется полностью на GPU.

Ожидаемое ускорение по опыту [4] использования графических карт может составить более 30 раз, в том числе и для нетрадиционных коллекторов.

Результаты расчетов

Для модели участка с одной скважиной (2000 м горизонтальный участок и 150 трещин ГРП), представленной на рис. 5, построена иерархическая многоуровневая сетка, начиная с базовой (50 м) до уровня 6 (0,78 м). Результаты построения представлены на рис. 6: сетка 0 – исходная базовая модель, далее 6 уровней измельчения. Поскольку построение сетки происходит от детального уровня с учетом

правил смежности граней сеток соседних уровней (две ячейки уровня L , прикасаются к 1 ячейке уровня $L-1$), то плотность сети трещин определяет какой будет максимальный размер ячеек, так в данном примере максимальный размер ячеек получился 25 м, т.е. сетка уровня 1 – заполняет всю площадь базовой модели, в отличие от остальных уровней, которые концентрируются только в районе трещин, существенно сокращая общее число ячеек в задаче.

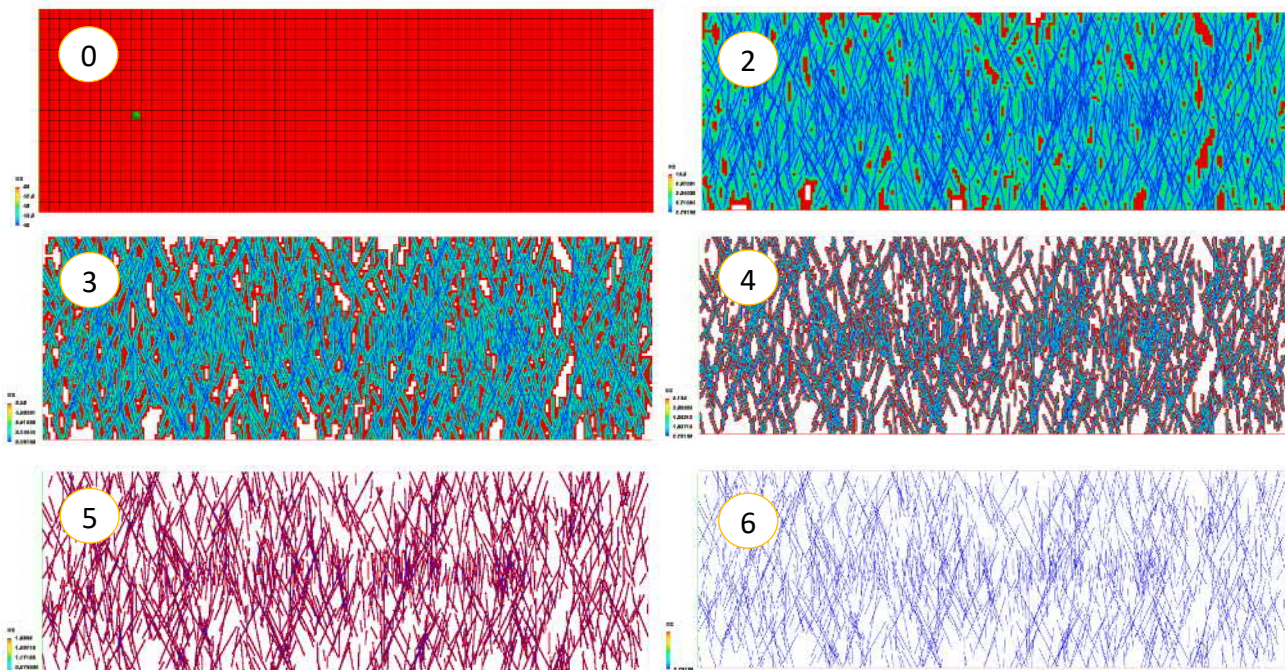


Рис. 6. Иерархическая 6-уровневая сетка

Иллюстрация воспроизведения процессов, протекающих в ОЗП и системе трещин в процессе закачки жидкостей ГРП и последующей очистки, показана на рис. 7. Из увиденного можно сделать несколько заключений, подтверждающих ранее сделанные наблюдения за фактическими параметрами скважин:

- при закачке жидкостей ГРП давление распространяется вдоль разветвленной системы существующих трещин на 300 и более метров, а поперек трещины в пласт – на 20 м (рис. 7, а);
- в конце периода закачки (рис. 7, б) давление распространяется на значительную часть пласта, обеспечивая высокую приемистость за счет раскрытых от давления закачки естественных трещин;

- перед освоением скважины происходит перераспределение давления (рис. 7, в), однако высокие значения в «перекаченной» зоне остаются длительное время, даже включая период очистки (рис. 7, г);
- насыщенность меняется только на расстоянии 1–6 м от трещины и продолжает продвигаться вдоль трещин в удаленных зонах даже после начала очистки (рис. 7, г).

Физика продвижения пропанта в трещинах в рассматриваемой модели не учитывается, поэтому трещины ГРП имеют статичные свойства в отличие от системы естественных трещин, которые могут полностью открыться, и частично или полностью закрыться обратно, в зависимости от давления.

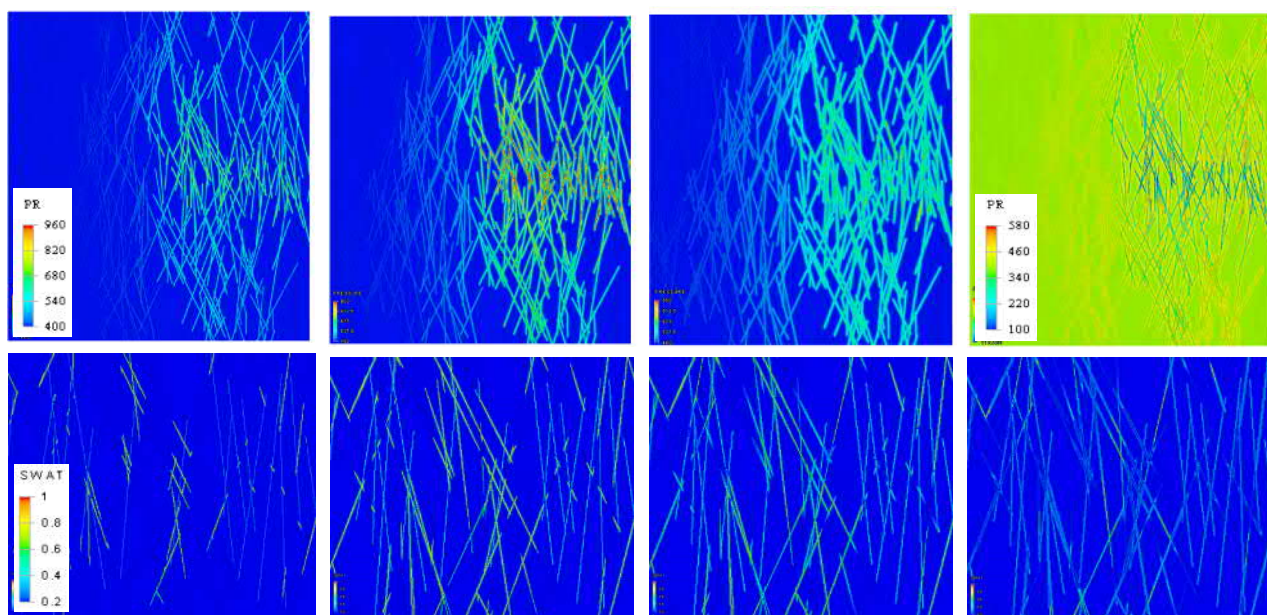


Рис. 7. Распределение пластового давления (верхний ряд) и водонасыщенности (нижний ряд, увеличенный масштаб 1:3): *а)* через 1 час от начала ГРП; *б)* в конце проведения ГРП; *в)* перед очисткой; *г)* при очистке скважины

Численные результаты

На основании выполненных численных расчетов подтверждены некоторые выводы:

- FAS имеет в 2–4 раза более низкие требования к оперативной памяти из-за отсутствия сборки матрицы Якобиана для сеток детального уровня;
- численная схема более устойчивая, что позволяет увеличивать шаги по времени в 2–4 раза;
- общее число итераций стандартного метода Ньютона на базовой сетке сокращается с ростом уровня вложенности;
- объем вспомогательных вычислений FAS выше, чем метода Ньютона из-за пре- и пост-сглаживания невязки, однако эта часть вычислений явная и хорошо распараллеливается на GPU.

Общий размер сетки 63,9 млн ячеек. При использовании иерархического подхода суммарное число ячеек всех 6 уровней составило 21 млн, а детального – 12 млн (табл. 3). Теоретически можно разместить на GPU аналогичную задачу на сетке с 9 уровнями, но, к сожалению, начиная с сетки 7-го уровня уже нет возможности визуализировать результаты в 2D или 3D, для этого требуется разработать оптимизированный визуализатор для сверхдетальной иерархической сетки.

Таблица 3. Требования к памяти при различном уровне детализации

Уровень	Размер ячеек, м	Общее число ячеек	Доля площади	Число ML ячеек	FAS, Гб	Ньютон, Гб	Предел, Гб
0	50	15,600	100 %	15,600	0,01	0,00	
1	25	62,400	95 %	59,280	0,02	0,00	
2	12,5	249,600	90 %	225,264	0,05	0,01	
3	6,25	998,400	86 %	856,003	0,17	0,13	
4	3,125	3,993,600	63 %	2,499,529	0,51	0,66	
5	1,562	15,974,400	38 %	6,098,852	1,35	2,31	
6	0,781	63,897,600	19 %	12,197,703	3,03	6,36	
7	0,390	255,590,400	7,4 %	18,792,136	5,62	11,94	
8	0,195	1,022,361,600	3,3 %	33,825,845	10,28	22,09	
9	0,097	4,089,446,400	1,5 %	60,134,835	18,57	38,74	24–32
10	0,048	16,357,785,600	0,7 %	117,262,928	34,74	102,08	

По причине отсутствия прямых аналогов предлагаемого подхода и алгоритмов на CPU для рассматриваемой задачи и невозможности провести расчеты в коммерческих симуляторах, будем считать, что ускорение составило около 30 раз (без учета ускорения за счет больших шагов по времени). В рамках развития подхода и реализации кода на CPU будут выполнены необходимые сравнения.

Совершенствование алгоритмов для такого сложного нетрадиционного коллектора будет продолжено. Остался ряд сложностей, требующих дальнейшего внимания, а именно, оптимальная реализация нерегулярной сети трещин на GPU, учет ряда геомеханических эффектов на течение флюидов в трещинах, трехфазная фильтрация и нелинейных закон фильтрации. Предстоит протестировать эффективность подхода для менее экстремальных случаев, например коллекторов ТРИЗ с микропроницаемостью.

Выводы

1. Предложена численная схема решения задач фильтрации в плотных карбонатных коллекторах с нано-проницаемостью в условиях естественной и техногенной трещиноватости.
2. Выполнена реализация алгоритмов на GPU, что существенно ускорило процесс решения, и снижены требования к памяти за счет FAS метода, что позволило использовать сверхдетальные сетки и повысить точность решения.
3. Получена адаптация модели поведения скважин на историю ее эксплуатации с небольшим набором настроечных параметров и выполнена оценка потенциала скважин согласно техническому пределу.
4. Улучшено качество моделирования технологических процессов и особенностей фильтрации флюидов, существенно влияющих на прогнозы выработки запасов и показателей разработки сложного нетрадиционного коллектора.

Список литературы

1. *Toft, R., Moynier, O., Lie, K.-A.* Full approximation scheme for reservoir simulation // Department of Mathematical Sciences, NTNU, Trondheim, Norway. –2018.
2. *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>.
3. *Шевко Н.А.* Численное моделирование залежей с высокопроводящими разломами // XIII 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.
4. *Шевко Н.А.* Ускорение численных расчетов моделирования разработки месторождений с использованием графических процессоров // Тезисы докладов XIV научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений нефти и газа», г. Москва, 14–15 апреля, 2021 г. – М.: Изд-во Нефтяное Хозяйство, 2021. – С. 55.