

Гибридный гидродинамический симулятор на неструктурированной сетке для решения оперативных задач разработки

Н.А. Шевко¹, к.т.н.

¹Газпромнефть Бадра Б.В., Багдад

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

Ключевые слова: фильтрационное моделирование, мониторинг разработки, нерегулярные сетки, геолого-технические мероприятия, оперативная модель, объектная сетка

Целью работы является расширение возможностей фильтрационного моделирования для решения оперативных задач разработки: оценка энергетического состояния, распределение остаточных запасов, оптимизация закачки, мониторинг разработки и оценка геолого-технических мероприятий. Это достигается путем сокращения стандартных этапов построения и эксплуатации моделей (геологическое моделирование, огрубление сетки, адаптация гидродинамической модели, подбор скважин-кандидатов, измельчение сетки, оценка технологической эффективности) за счет использования единой гибридной геолого-гидродинамической модели и подходов объектного моделирования геологии.

Основная предлагаемая идея – это описание геологического строения и фильтрационных свойств залежи ограниченным количеством геологических объектов (пласт, пропласток, разлом, трещина), геометрия, свойства и взаимодействие которых заданы минимальным числом дескрипторов и функциональных связей, пропорциональным количеству исходных данных и «источников» информации. Дискретизация расчётной сетки при этом откладывается на более поздние этапы моделирования, когда известны конкретные особенности фильтрации.

Результатом построения единой модели является набор неструктурированных сеток, описывающих геологические объекты минимальным числом элементов и набор алгоритмов уточнения, автоизмельчения численных нерегулярных сеток под особенности фильтрации с учетом всей доступной геологической информации.

Разработан прототип симулятора, позволяющего решать задачи в рассматриваемой постановке. Использовалась модель «чёрной» нефти и специальные алгоритмы дискретизации уравнений фильтрации на неортогональные нерегулярные сетки. Выполнено тестирование алгоритмов на аналитических и эталонных задачах.

При полномасштабном моделировании получены обнадеживающие результаты – существенное сокращение времени построения и детализации модели под необходимую задачу фильтрации. Управляемый уровень детализации позволил получить кратное ускорение счета модели при сопоставимой с традиционным подходом точности решения.

Развитие данного подхода позволит популяризировать использование численного моделирования при решении рутинных задач разработки, используя единую геологическую и гидродинамическую основу со всей имеющейся геолого-промысловой информацией.

A hybrid numerical simulator on an unstructured grid for solving routine reservoir problems

N.A. Shevko¹

¹Gazprom Neft Badra B.V., Baghdad

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

Keywords: reservoir modeling, irregular mesh, well intervention, fast operative model, object mesh

The goal of the work is to expand the capabilities of dynamic modeling to address routine reservoir development problems: distribution of reservoir pressure and remaining reserves, water flooding optimization, reservoir monitoring, and well stimulation design. This is achieved by revising the traditional workflow of reservoir modeling (static modeling, upscaling, dynamic model history matching, selection of wells for intervention and stimulation, grid refinement, evaluation of incremental production), using object modeling to build a unified hybrid static-dynamic model.

The main proposed idea is to describe the geological features and filtration properties of a reservoir with a small number of geological objects (formation, layer, fault, long fracture). The geometry, properties, and interconnections of these objects are defined by the minimum number of descriptors and functional relationship proportional to the amount of input data as a “source” of information. Discretization of the numerical grid is postponed to later stages of modeling when specific fluid flow features are known.

A simulator has been developed that allows solving problems as per the proposed approach. A “black” oil model and special algorithms for grid refinement and discretization of filtration equations on non-orthogonal unstructured grids were used. Algorithms were tested on analytical and benchmark problems.

Full-scale modeling has yielded promising results, including a significant reduction in the time required to construct and refine the model for a required filtration problem. The controlled level of detail allowed for a multiple-fold acceleration in model calculations with the same level of accuracy as traditional approach.

The development of this approach will promote the use of numerical modeling in solving routine development tasks by utilizing a unified geological and hydrodynamic basis with all available geological and field data.

Введение

Численное моделирование нефтяных месторождений находится на высоком технологическом и программном уровне развития. Для эффективного решения сложных физически содержательных задач повышенной степени детальности, возникающих при моделировании производственных и проектных работ, привлекаются значительные вычислительные ресурсы, включая многопроцессорные рабочие станции, кластеры и облачные решения, применяются современные алгоритмы и методы решения, максимально учитывающие аппаратные возможности центральных и графических процессоров.

Неопределенность в данных, создание стохастических моделей с множеством реализаций, решение обратных задач по настройке модели на историю разработки и оптимизационные задачи приводят к необходимости выполнять многовариантные расчеты и работать с вероятностными прогнозами. Учитывая, что каждая модель проектируется, как правило, под все имеющиеся вычислительные ресурсы, время ее создания, настройки, обновления и выполнения расчетов, является критичным для принятия оперативных решений, особенно для залежей крупных размеров и длительной историей эксплуатации. Это ограничивает создание универсальной модели на все случаи и задачи разработки.

В оперативных задачах разработки, например, при планировании геолого-технических мероприятий (ГТМ), дополнительно необходимо учитывать весь набор исходных геологических данных по скважинам и околоскважинным зонам пластов (ОЗП) и создать высокую детализацию участка моделирования. Традиционные полномасштабные модели, выполненные для проектных целей или решения общих задач прогнозирования, не позволяют закрыть эти потребности и часто игнорируются специалистами. Для повышения качества принятия решений в таких ситуациях используют аналитические модели, фильтры баз данных по фильтрационно-емкостным свойствам пластов и пропластков, промысловые данные и результаты моделирования, в виде карт остаточных запасов, текущих пластовых давлений и прогнозов базовой добычи на среднесрочную перспективу.

Обозначим основные недостатки, ограничивающие применение традиционных моделей (рис. 1) для оперативных задач разработки:

- большая размерность, «тяжёлые» для получения быстрого решения;
- большие размеры ячеек, неподходящие для детальных задач – локализация остаточных запасов, ГТМ и гидродинамические исследования скважин (ГДИ);
- длительный процесс обновления готовых моделей при получении новых данных – геологическая модель (ГМ), огрубление сетки (upgridding), перенос свойств (upscaling), гидродинамическая модель (ГДМ), повторная адаптация;
- невозможность быстро поменять детализацию в ГДМ, учитывая весь исходный набор геолого-геофизических данных;
- ограничения на форму, тип ячеек в рамках гексаэдральной сетки с геометрией угловой точки (corner point).

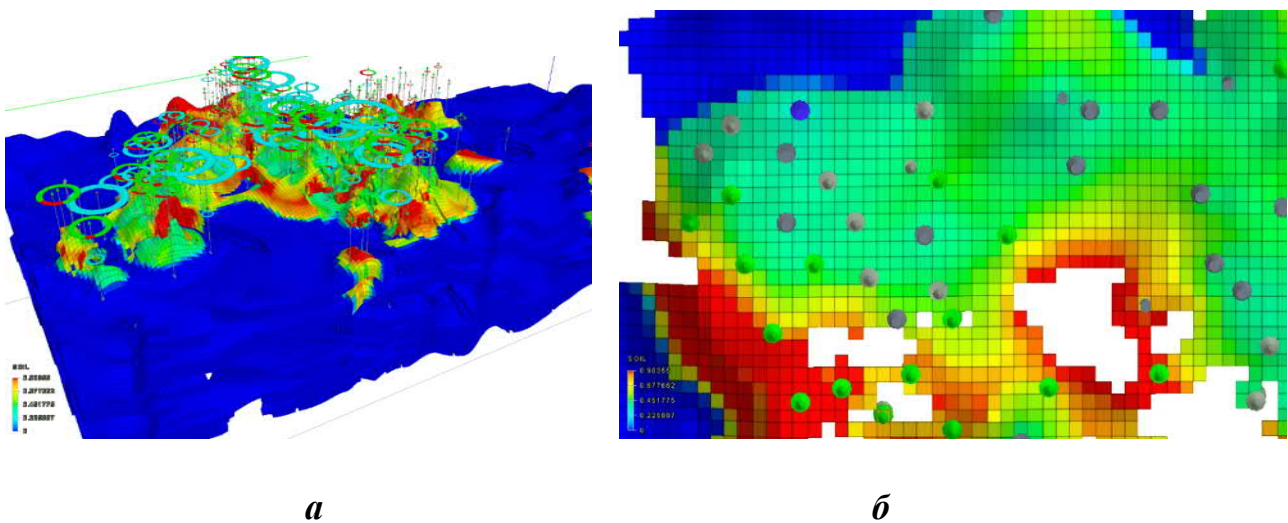


Рис. 1. Полномасштабная модель: общий вид с множеством скважин (а); стандартная дискретизация сетки при неравномерном разбурировании залежи (б)

Несмотря на развитие вычислительных мощностей и общее повышение детальности и размерности моделей в настоящее время во многих промышленных отраслях для привлечения большего числа специалистов, участвующих в оптимизации производственных процессах на основе моделирования, актуальным становится создание рабочих моделей в режиме реального времени, «на лету» (on-the-fly), с возможностью быстрого их обновления на новые данные, автоматической корректировкой на фактические измерения и гибкой настройкой под конкретную задачу моделирования.

Целью данной работы явилось расширение возможностей фильтрационного моделирования в решении оперативных задач разработки, таких как оценка энергетического состояния, распределение остаточных запасов, оптимизация добычи и закачки, мониторинг разработки, интерпретация ГДИ, подбор и оценка эффективности ГТМ.

Стандартные подходы

Существующие гидродинамические (фильтрационные) симуляторы имеют большое многообразие опций и способов, улучшающих традиционные подходы моделирования, в конкретных случаях учета геометрии и физики процессов. Опции и численные схемы постоянно дополняются по мере как развития технологий разработки залежей, бурения и заканчивания комплексных скважин, так и при появлении более сложных, неоднородных по структуре коллекторов, трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов нефти [1, 2, 3].

К ключевыми факторам, совершенствование которых существенно повысит качество и скорость моделирования, можно отнести следующие процессы.

1. Этапы построения и использования моделей, которые включают стандартный workflow, – это построение ГМ, ремасштабирование (upgridding, upscaling), построение ГДМ, ее адаптация, подбор скважин и составления дизайна ГТМ, измельчение сетки, оценка технологической эффективности мероприятия.

2. Дискретизация статической (геологической) модели под задачи подсчета запасов и стохастической их оценки. Это важнейший этап изначально фиксирует геометрию ячеек и размерности модели и влияет на точность последующих построений. Однако дискретизация геологических тел приводит к излишней детализации сетки, в основном из-за требований сокращения погрешности описания границ коллектора-неколлектора по вертикали, и реже из-за неоднородности свойств пласта между скважинами. Ценность таких детализаций теряется, когда выполняется огрубление сетки на порядок по вертикальному направлению (Z), тонкие пропластки «размазываются» по крупным ячейкам гидродинамической сетки, теряя свои индивидуальные свойства и адресность (не идентифицируются при необходимости), что делает такую модель не пригодной для оперативных задач: дополнительная перфорация, изоляция интервала, воспроизведение прорывов воды, газа и т. п.

На этапе гидродинамического моделирования имеется ряд подходов и индивидуальных решений управления детализацией сетки (рис. 2). Одно из первых решений – это локальное измельчение сетки (LGR) (рис. 2, п.1), позволяющее быстро внести изменения в готовую сетку со свойствами. Эффективным способом уменьшения размерности модели является огрубление сетки (Coarsening) (рис. 2, п.2) для не критично влияющих на точность расчетов участков залежи, к которым обычно относятся законтурные водонасыщенные зоны. Инновационным подходом в 80-е годы было применение 3D (рис. 2, п.3) и 2D (рис. 2, п.4) нерегулярных PEBI (perpendicular bisector) сеток, однако из-за большого числа дескрипторов, повышенные требования к памяти и несопоставимые вычислительные сложности в сравнении с обычными регулярными сетками, они не нашли широкого применения при полномасштабном моделировании. Следует отметить, что в настоящее время только в единичных программных продуктах используется этот тип сетки, и то, в основном, для однофазной фильтрации в 2.5D задачах.

Аналогичные приемы 3D детализации околоскважинных зон с дискретизацией уравнений методом опорных операторов при моделировании ГТМ (рис. 2, п.5) реализованы в работе [4]. Попытки построения на базе готовых ГДМ «оптимальных» сеток под конкретную задачу разработки (автоадаптация модели, мониторинг разработки, ГТМ) предпринимались в работах [5, 6], где использовались неструктурированные сетки с переменным размером ячеек, а именно триангуляционные сетки 2.5D (рис. 2, п.6) и сетки 3D, построенные методом улучшенного укрупнения ячеек (Advanced Coarsening, AC) (рис. 2, п.7).

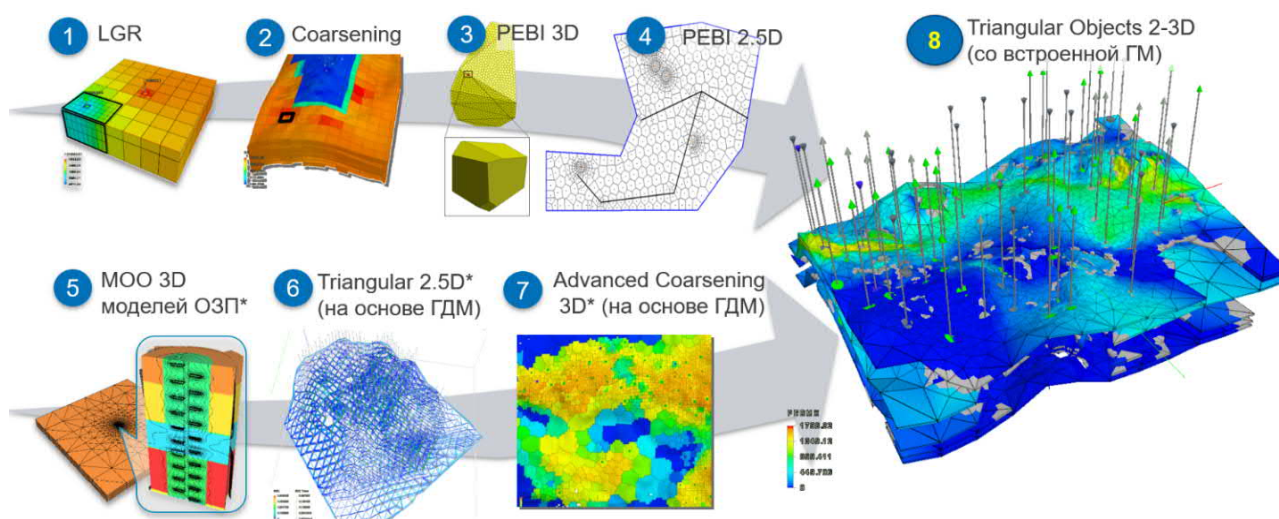


Рис. 2. Существующие подходы изменения детальности моделей

Опыт применения рассмотренных подходов показал, что поставленная в настоящей работе цель не решается в полном, комплексном, интегрированном подходе. Требуется рассмотрение возможных альтернатив, улучшение и развитие перспективных приемов, обеспечивающих быструю «сборку» геолого-гидродинамической модели с гибкой детализацией сетки.

Предлагаемые подходы и методы решения

Цель создания оперативных моделей заключается в том, чтобы быстро и точно решать задачи разработки нефтяных месторождений в режиме реального времени или без значительного ожидания получения результатов расчетов.

Основная идея возможной оптимизации ключевых процессов может заключаться в следующем: выполняется описание геологического строения и фильтрационных свойств залежи ограниченным количеством геологических объектов (пласт, пропласток, разлом, трещина), геометрия, свойства и взаимодействие которых заданы минимальным числом дескрипторов (узлы, ребра, грани, ячейки) и функциональных связей, пропорциональным количеству исходных данных и «источников» информации.

В рамках такого подхода геологические объекты воспринимаются как набор фильтрационных объектов, связанных между собой. Они описываются специальной «объектной сеткой», степень детализации которой определяется только набором исходных данных, сложностью геометрии и неоднородностью, полученной по прямым данным, и не зависит от промежуточных данных и методов интерполяции, которые вынесены в функциональные связи и алгоритмы восстановления свойств в новых узлах, ячейках сетки. Использование только исходных данных – это ключевой момент в минимизации размерности моделей. Детализация объектной сетки на этапе ее построения не выполняется, а откладывается до конкретной известной задачи фильтрации. Очевидным является то, что детализация будет низкая в местах с недостаточной или недостоверной геологической информацией (законтурная зона, межскважинные интервалы) и высокая – в районе скважин.

Исходя из описанной выше идеи, основными задачами на данной стадии изучения являются:

1. поиск подходов описания геологических объектов с минимальным числом дескрипторов;
2. выбор эффективных численных методов для нерегулярных дискретизаций объектов моделирования;

3. реализация алгоритмов и проверка расчетного модуля на реальных задачах.

Обозначим следующие направления поиска или варианты решения в общем виде.

1. Сокращение стандартных этапов построения и эксплуатации моделей, за счет использования:

- единой гибридной геолого-гидродинамической модели с общими данными и объединенным workflow построения геологической и гидродинамической модели;
- объектного моделирования геологических объектов, основанного на прямых данных (не алгоритмического восстановления свойств), и встроенных в симулятор алгоритмов интерполяции свойств на новые, появляющиеся при измельчении, ячейки дискретизации.

2. Использование объектной (первичной, скелетной) детализации геологических объектов, позволяющей гораздо меньшим числом ячеек описать геологическое строение залежи.

3. Создание сложных неравномерных расчетных сеток (включая иерархические, многоуровневые, вложенные), подходящих для гибкой детализации зон вблизи особенностей фильтрации без масштабных обновлений модели и повторного привлечения исходных данных.

4. Повышение степени «гибридности» симулятора по 4 аспектам: ГМ – ГДМ, регулярные – нерегулярные неортогональные сетки, полномасштабное – детальное моделирование, традиционные – оперативные задачи разработки.

Образ результата может быть представлен в виде (рис. 2, п.8):

- набора неструктурированных сеток, описывающих геологические объекты, минимальным числом элементов;
- набора алгоритмов автопостроения, детализации и заполнения свойствами численных нерегулярных сеток, описывающих конкретные особенности фильтрации с учетом всей доступной геологической информации;

- симулятора со встроенными функциями геологического пакета, способного считать на комплексных сетках задачи многофазной фильтрации;
- визуализатора, отображающего входные и выходные, расчетные данные.

Дискретизация сетки в плане

Для описания геологических объектов через объектную, первичную сетку в работе используется триангуляцию Делоне с ограничениями (строй, разбивая) [7].

Необходимые требования для построения сетки, в дополнение к стандартной триангуляции:

- учет отрезков со свойствами – линии разломов, длинных трещин, траектории горизонтальных скважин;
- выделение порядка вставки точек и ребер разного типа – стволы скважин, границы, разломы, точки заполнения объема;
- заполнение объема алгоритмами продвижения фронта и расположения точек по регулярной схеме (шаг, поворот, треугольная, прямоугольная укладка);
- измельчение ячеек, например, граничащих с точками заданного приоритета на несколько уровней;
- сглаживание узлов с учетом приоритетов.

В качестве неисчерпывающего примера работы алгоритма на участке залежи (рис. 3) можно рассмотреть последовательность детализации сетки под разные задачи:

1. построение первичной сетки, используя данные по скважинам, возможные задачи – оценка энергетического состояния, соответствия объема добычи-закачки и эффективности работы водоносной зоны (по аналогии с подходами использования материального баланса пласта, но только по зонам скважин);
2. измельчение сетки до равномерной между скважинами – решение традиционных задач прогнозирования;

3. детальное равномерное измельчение – выявление, локализация зон остаточных запасов;
4. измельчение в районе скважин – расчет отдельных ГТМ, планирование ГДИ, оценка интерференции;
5. добавление в сетку новых скважин – гибкое локальное измельчение без перестройки остальной части сетки.

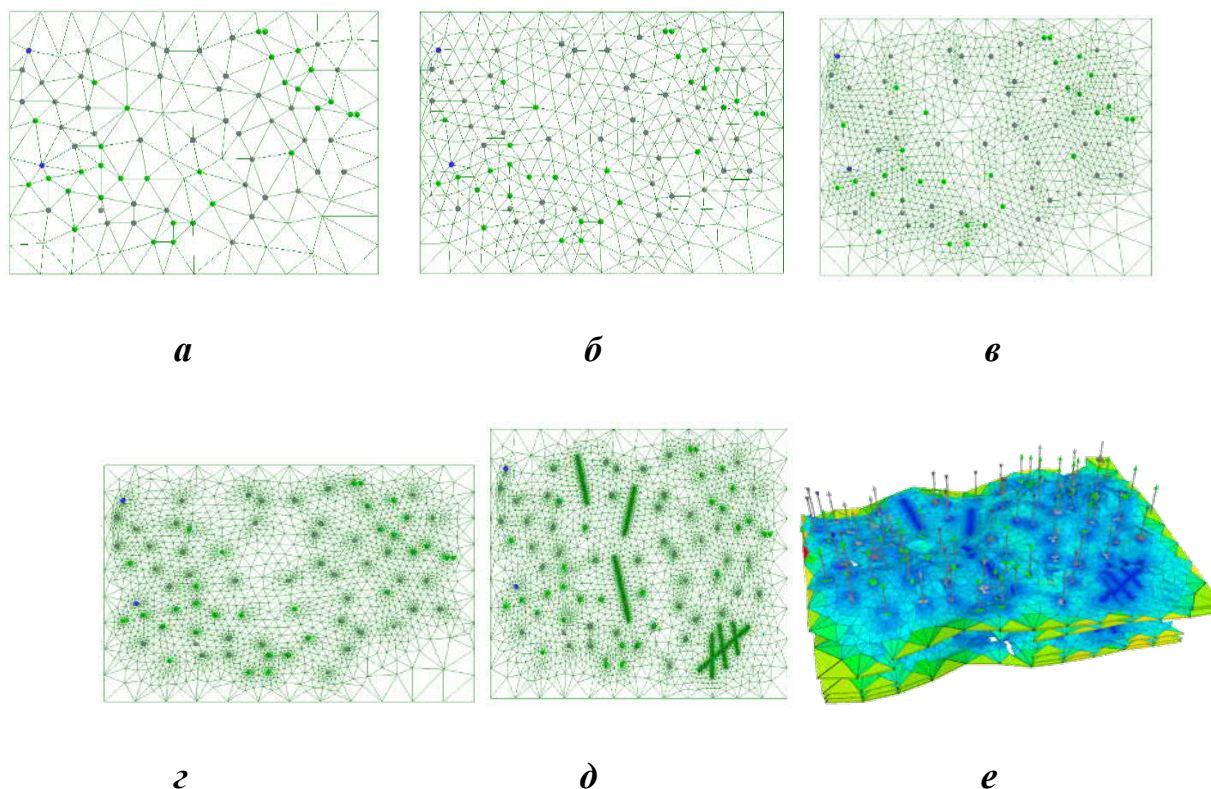


Рис. 3. Объектная сетка и ее гибкая настройка на задачи фильтрации: первичная сетка, построенная по скважинам(*a*); заполнение объема для решения обычных задач (*б*); вложенное измельчение в зоне разбуривания (*в*); измельчение 4-го уровня возле скважин (*г*); вставка новых горизонтальных скважин (*д*); 3D вид готовой модели участка (*е*)

Дискретизация объектов

В качестве основного геологического объекта моделирования выступают пропластки, определенные на базе РИГИС в каждой скважине. Дополнительно выделяются объекты, существенно влияющие на фильтрационные потоки независимо от детальности сетки и

других объектов, представляющие собой дополнительные каналы (длинные проводящие трещины и разломы) или барьеры для фильтрации (непроницаемые разломы).

В рамках дискретизации предлагается рассматривать:

- пропластки – как площадные объекты 2D, или послойные 3D;
- длинные проводящие трещины и разломы – плоские, вертикальные 2D объекты [1];
- трещины гидроразрыва пласта (ГРП) – плоские 2D объекты;
- непроницаемые разломы – в качестве барьеров, встраиваются в объектную сетку на этапе триангуляции с ограничением.

Важность выделения дополнительных объектов связана с тем, что требуется сохранить возможность учета такой специфической (линейной) неоднородности, которая при традиционном моделировании описывается только мелкими ячейками с резко отличающимися свойствами. Невозможно повторить такие эффекты как прорыв воды, газа на объектной сетке без указанных объектов, что приводит к существенной, иногда критической, потере точности. Трещины ГРП, как объекты, необходимы при переходе на сетки более мелкие, чем длина трещин.

Дискретизация пропластков по вертикали и в плане осуществляется следующим образом:

- создание дискретных слоев в скважинах и поиск связности пропластков между скважинами (процедура автокорреляции только на уровне пропластков);
- замещение или выклинивание пропластка между скважинами при наличии неколектора в соседней скважине.

При неудовлетворительных результатах корреляции пропластков проводится более детальная сиквенс (sequence) стратиграфия с вводом дополнительных отбивок подпластов.

Иллюстрация создания упрощенной геологических модели в виде набора объектов-пропластков показана на рис. 4.

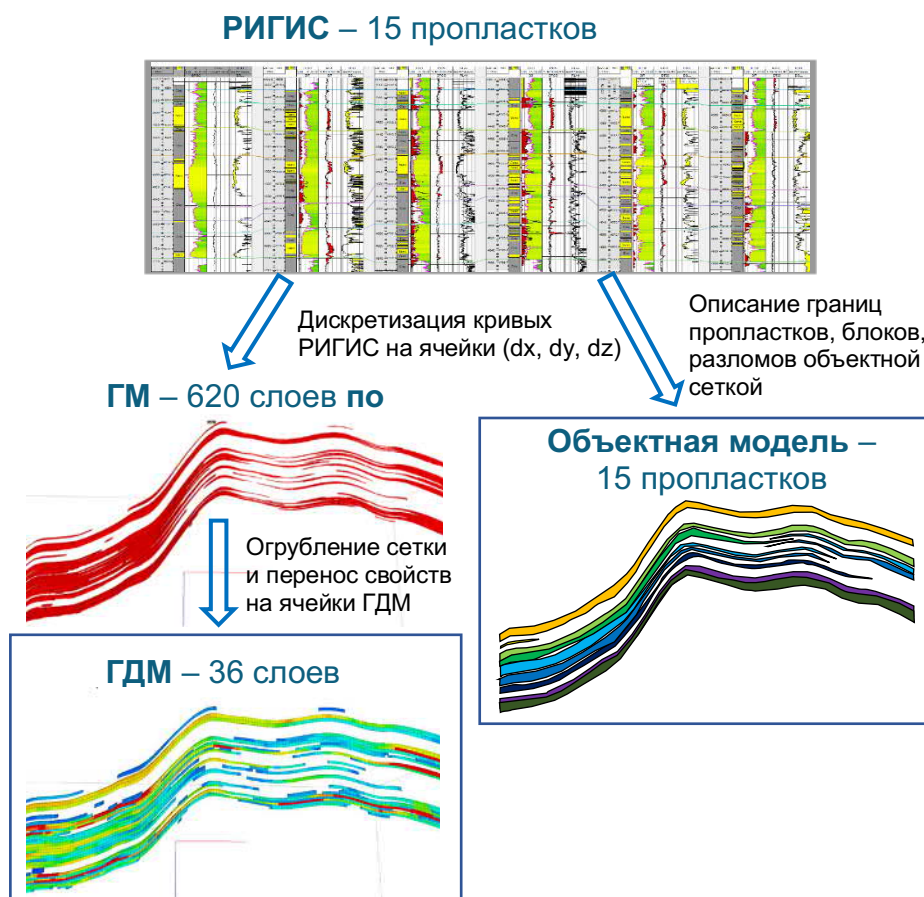


Рис. 4. Сравнение процесса создания слоев ГДМ и объектной модели коллектора

Сравнение распределения коллектора по индивидуальным пропласткам на базе традиционного подхода из ГДМ и из объектной модели приводится на рис. 5 (цветом показан коэффициент проницаемости). Объектная модель содержит меньшее число ячеек, особенно вдали от скважин, при этом достаточно приемлемо описывает распределение коллектора в объеме залежи.

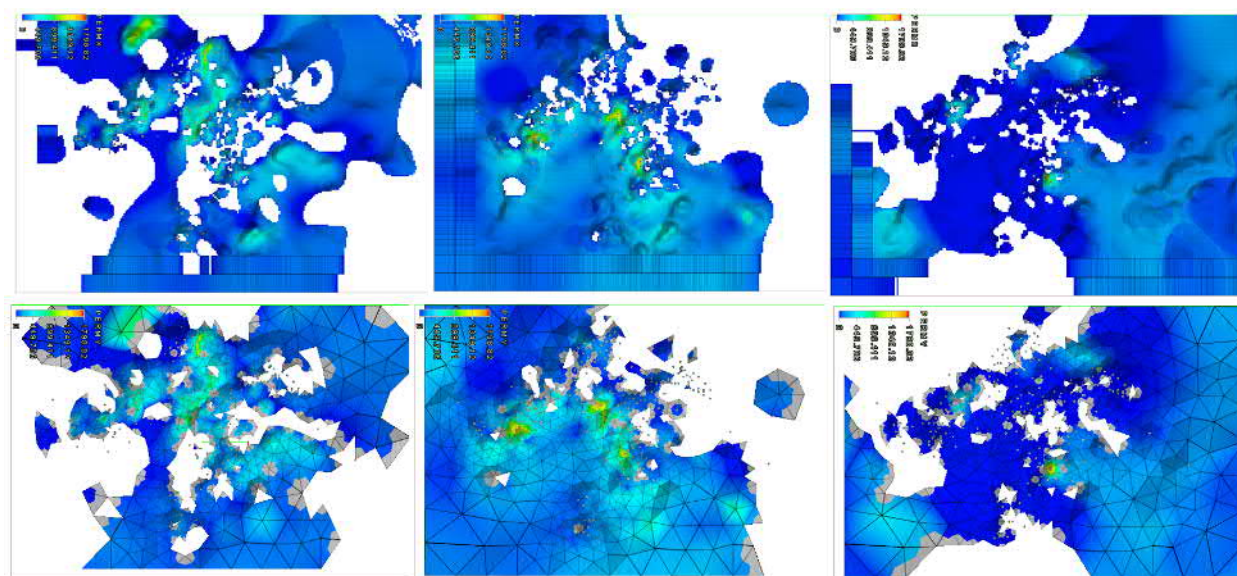


Рис. 5. Сравнение распределения коллектора по пропласткам объектной модели (нижний ряд) с соответствующими слоями ГДМ (верхний ряд)

Построение 3D сетки

При решении численных задач общего назначения очевидным кажется использование сетки с произвольными ячейками, позволяющими максимально геометрически эффективно подстраиваться под любую специфическую геометрию тел, потоков и неоднородностей. Известным вариантом такого решения в нефтяной индустрии является полностью трехмерная сетка с произвольными ячейками PEVI 3D и ее упрощенный вариант PEVI 2,5D (см. рис. 3, а). Однако, на практике такие сетки не получили широкого распространения, так как не являются эффективными для многомиллионных моделей, по причине множества дескрипторов произвольных ячеек сетки и множества соседних связей, что приводит к повышенным расходам памяти и вычислениям проводимостей. Кроме того, требуется построение первичной Делоне сетки, на базе которой строятся PEVI ячейки.

Менее гибкий, но более оптимизированный для большеразмерных моделей является вариант трехмерной сетки с фиксированным набором типов элементов (см. рис. 3, б), под которые сделаны необходимые оптимизации при вычислениях.

Предлагается использовать еще более эффективный вариант – сетка, построенная на базе одного элемента – треугольная призма (см. рис.3, в). За счет использования геометрии угловой точки получаем дополнительно экономию дескрипторов по Z (см. рис.3, з) для моделей с сотнями и тысячами слоев, приближаясь по эффективности расчетов к регулярной сетке.

При описании коллектора и неколлектора на объектной сетке во избежание добавления промежуточных точек внесена возможность задания свойств активности ячеек как в узлах (ACTNUM) (рис. 7, а), так и в треугольниках (T_ACTNUM) (рис. 7, б). Аппроксимация свойств между узлами, таким образом, возможна в двух вариантах: сетка с распределенными узлами (линейная интерполяция) и блочно-центрированная сетка.

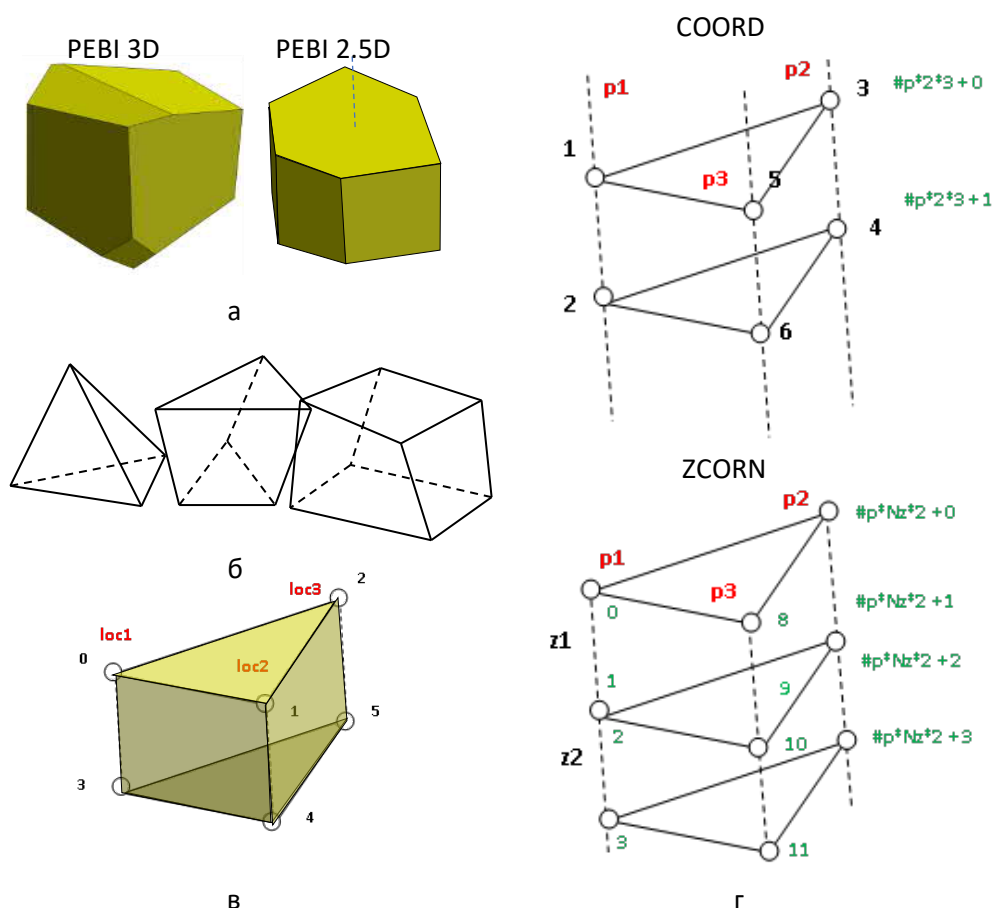


Рис. 6. Геометрия ячеек для разных типов сеток: PEVI 3D, 2.5D (а); фиксированный набор 3D элементов (б); треугольный призматический элемент (в); локальный порядок узлов и формат corner point (г)

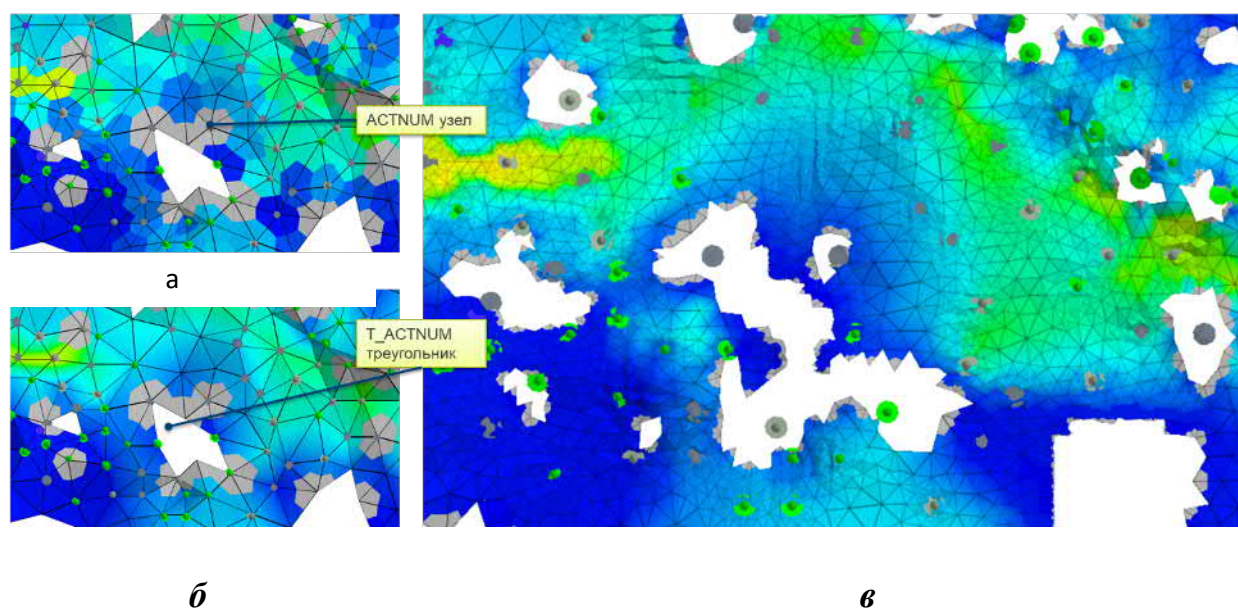


Рис. 7. Схемы аппроксимации свойств на сетке: блочно-центрированная (а); с распределенными узлами (б); детальная сетка с восстановленным свойством (в)

Последовательность построения сетки для залежи

Особенности построения и дискретизации объектов моделирования описаны ранее. Общий подход построения оперативной модели залежи имеет следующие этапы (рис. 8):

- 1) загрузка исходных геологических данных (границы области, разломы, скважины, структурный фактор);
- 2) триангуляция области моделирования на базе входных данных с автоматической подстройкой детальности сетки;
- 3) создание объектной модели – формирование слоев и построение структуры их связности между скважинами с учетом замещений и выклиниваний на базе РИГИС, перенос свойств коллектора на узлы, через которые проходят скважины, и восстановление (интерполяция) свойств для остальных узлов, где отсутствуют исходные данные;
- 4) детализация сетки, используя объектную модель и алгоритмы измельчения, в зависимости от конкретной задачи, установленных приоритетов и типов узлов, ребер, треугольников.

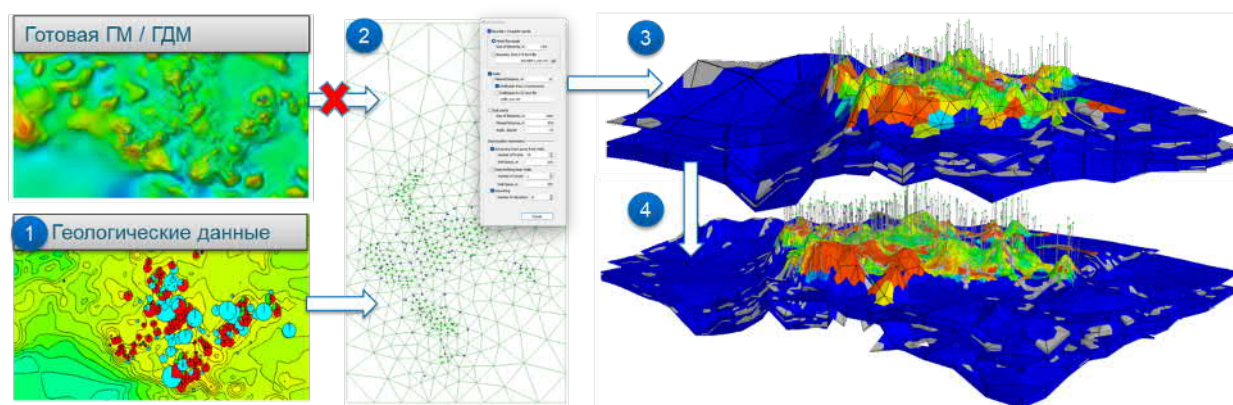


Рис. 8. Этапы создания оперативной модели

Математическая, численная и программная реализация

Для моделирования оперативных задач используется математическая модель многофазной фильтрации «черной» нефти. Численная модель основана на наиболее распространенных и апробированных подходах и алгоритмах. Дискретизация уравнения осуществляется по схеме Volume Balance (VB) с аппроксимацией потоков двухточечным (TPFA) и мультиточечным (MPFA) шаблоном, для неортогональных сеток – Control Volume Finite Element (CVFE) для блочно-центрированной аппроксимации, и метод опорных операторов (МОО) для аппроксимации с распределенными узлами.

Для задач средней сложности при решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) используются итерационные методы ORTHOMIN, (F)GMRES, BiCGStab с предобуславливателями MILU, ILU(0), а также вложенной факторизацией (Nested Factorization), модифицированной для гибридных сеток [5], т.е. регулярных сеток с большим числом несоседних соединений или полностью нерегулярных сеток. Нелинейная система уравнений решается методом Ньютона, а вложенные иерархические сетки дополняются схемой полной аппроксимации (FAS).

Устойчивость и сходимость численных схем проверена на специальных тестах, включая известные тесты SPE 1, 2, 7, 8, 9, 10, а также апробирована на нескольких десятках традиционных полномасштабных моделей залежей нефти и газа с различной размерностью и фазовым состоянием. Из-за особой значимости теста SPE 8, для

рассматриваемого в работе подхода, результаты сравнений описаны далее более подробно.

Реализация описанных методов выполнена в виде гибридного симулятора, позволяющего считать на разных типах сеток – структурированные и полностью неструктурированные неортогональные сетки, включая варианты их комбинаций. Структура симулятора, написанного на C++, состоит из иерархии классов (Class Hierarchy), иерархии объектов моделирования (Objects Hierarchy) и схемы, порядка вычислений в зависимости от задачи (Workflow). Ввод данных выполняется в текстовом (DATA) формате, вывод – бинарном для визуализации и текстовом для оформления. Имеются модули PVT, SCAL, VFP, Initialization (3 версии), Grid (7), Formulation (7) и т. п., объекты – Field, Reservoir, Layer, Fault, Fracture, WellGroup, Well, Aquifer и другие.

Результаты тестирования на базе модели SPE 8

Идеи сокращения числа ячеек и оптимизации сетки с построением неравномерных неструктурированных сеток сложной геометрии были рассмотрены в тесте SPE 8 «Gridding Techniques» [8], оценивающего точность воспроизведения прорыва газа по высокопроницаемому пропластку. Данный тест подходит для проверки реализованных алгоритмов по точности счета [5].

Построены 3 типа сетки (рис. 9), подходящих для использования при оперативном моделировании, согласно условий теста: 1) регулярная, построенная на основе декартовой «эталонной» сетки размерностью $10 \times 10 \times 4$ (400 ячеек); 2) триангуляционная с 23 узлами в плане и 4 по разрезу (92 узла), расчет потоков выполнен по MPFA схеме аппроксимации; 3) неравномерная сетка, полученная по методу AC [5], на базе триангуляции сетки 2, это аналог PEVI с TPFA, размерностью 23×4 (92 ячейки).

Сравнение расчетов для этих вариантов сеток между собой и с диапазоном расчетных данных, полученными другими авторами, показано на рис. 9. Видна приемлемая точность воспроизведения газового фактора и забойного давления скважин на триангуляционной

сетке (рис. 9, в), в сравнении с «эталонной» сеткой (рис. 9, б), несмотря на меньшее число ячеек почти в 4 раза. Сетка (рис. 9, з) также показывает хорошие результаты, однако погрешность немного выше.

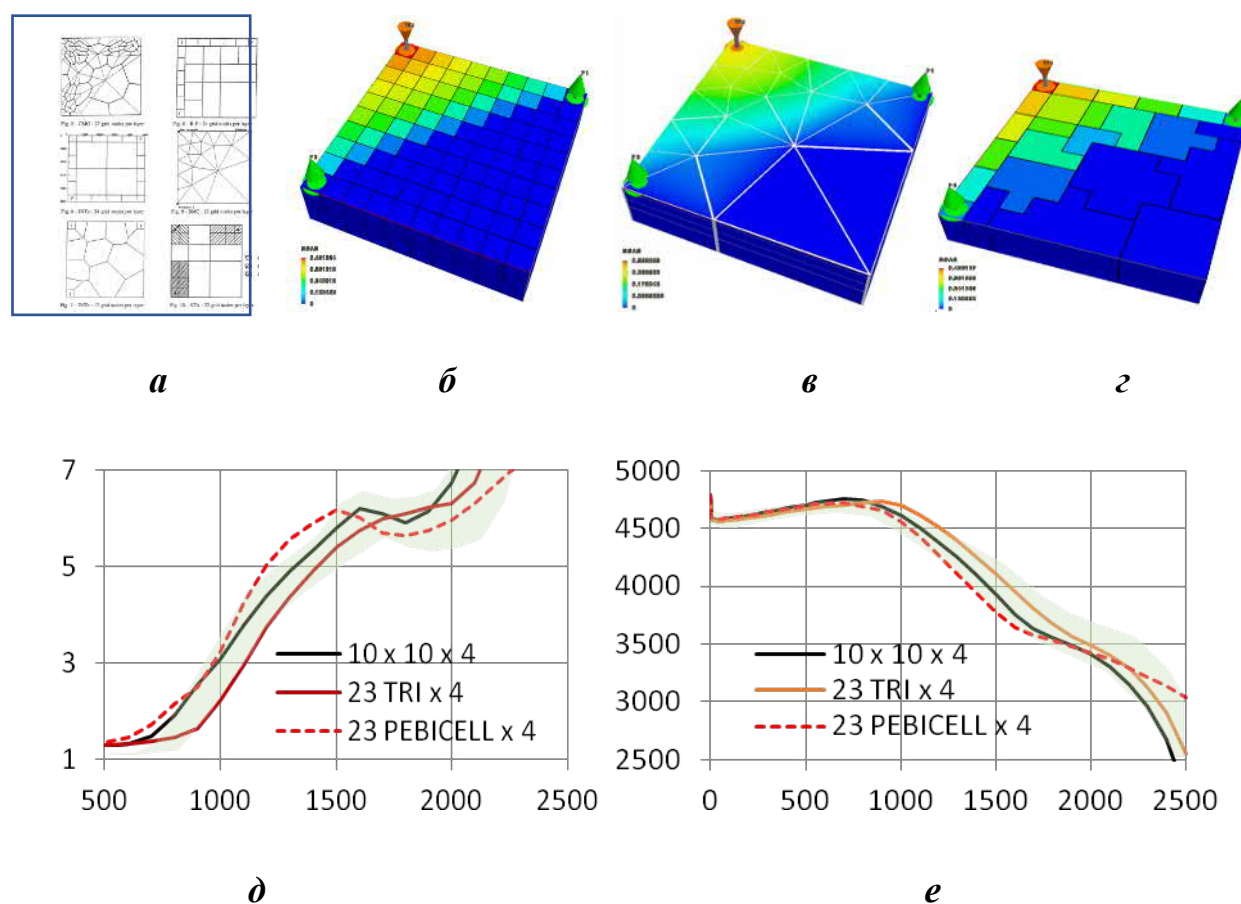


Рис. 9. Сопоставление результатов расчетов в тесте SPE 8: варианты сеток, рассмотренные в статье [8] (а); декартова сетка (б); триангуляционная сетка (в); сетка на базе AC (г); сравнение газового фактора (д); сравнение забойного давления скважин (е)

Сравнение времени выполнения расчетов сетки (1) с (2) и (3) показало, что при сокращении числа ячеек в 4 раза можно достигнуть ускорения расчета до 4 и 5 раз, соответственно. В работе [5] показаны более грубые сетки, при которых также получены допустимые отклонения прогнозных параметров. Эти результаты позволяют использовать

технику огрубления, оптимизации сеток моделей реальных залежей для достижения ускорений расчетов более чем на порядок.

Результат применения

Предлагаемый подход к построению гибридной геолого-гидродинамической модели и используемые численные схемы и алгоритмы построения расчетной сетки апробированы на нескольких полномасштабных моделях залежей нефти и газа.

Выполнение полномасштабных расчетов

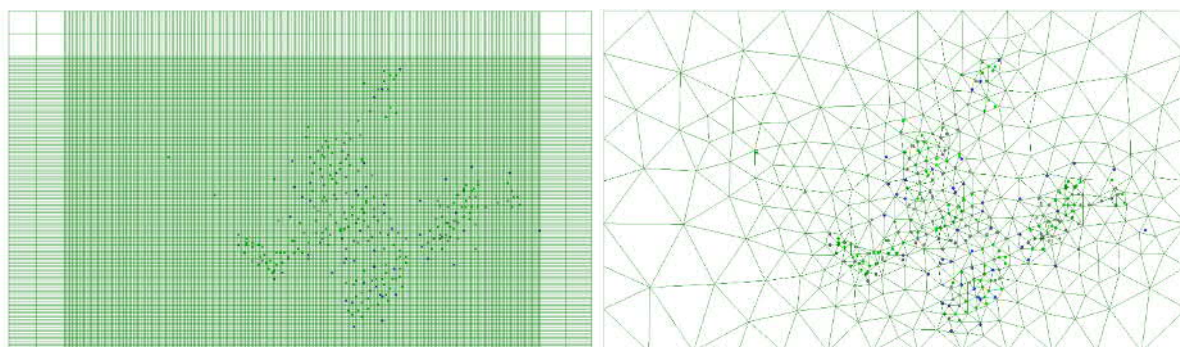
В качестве примера рассмотрим нефтяную залежь с длительной историей эксплуатации (45 лет), находящуюся на 4 стадии разработки. Параметры полномасштабной модели, построенной традиционным способом и используемой для сравнения, следующие: трехфазная (нефть, растворенный газ, вода), размерность сетки $148 \times 243 \times 100$ (3,6 млн., рис. 10, а), 1,6 млн. активных ячеек, 159 добывающих и 106 нагнетательных скважин. Среднее расстояние между скважинами – 500 м, диапазон 150–2000 м.

Для оценки качества (скорость и точность) моделирования используем набор сеток (рис. 10):

- 0) объектная сетка (L0), размеры ее ячеек равны расстоянию между скважинами, а за пределами разбуренной части увеличиваются плавно до 2000 м на границе моделирования. Размерность модели – 31 тыс. активных узлов (рис.10, б).
- 1) сетка (L1), ячейки которой равномерно распределены и имеют размер не более 400 м. Размерность – 64 тыс. узлов (рис.10, в).
- 2) сетка (L2), с вложенным измельчением на 1 уровень возле скважин, но ячейки создаются не менее 200 м, размерность – 146 тыс. ячеек (рис.10, г).
- 3) Сетка (L3), с вложенным измельчением на 2 уровня возле скважин, но ячейки создаются не менее 100 м как в ГДМ, размерность – 270 тыс. ячеек (рис.10, д).

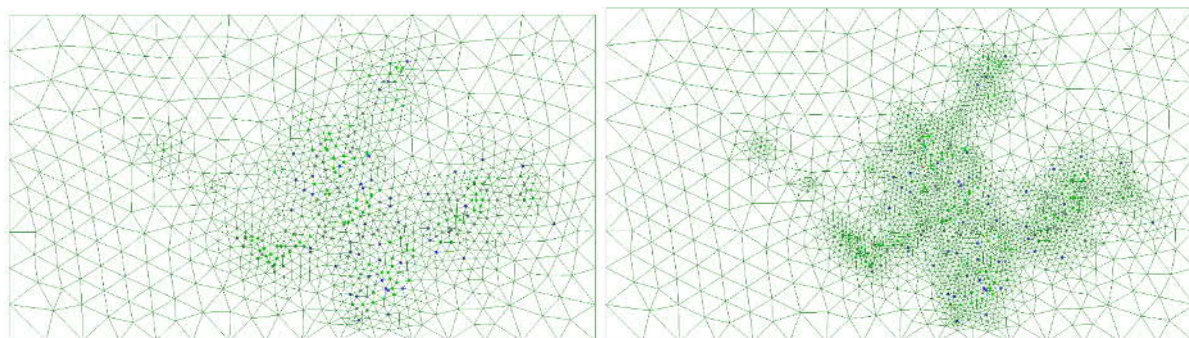
4) Сетка (L4), аналогична L3, но в разбуренной зоне ячейки 200 м, далее увеличиваются к границе до 1300 м, размерность – 320 тыс. ячеек (рис. 10, e).

5)



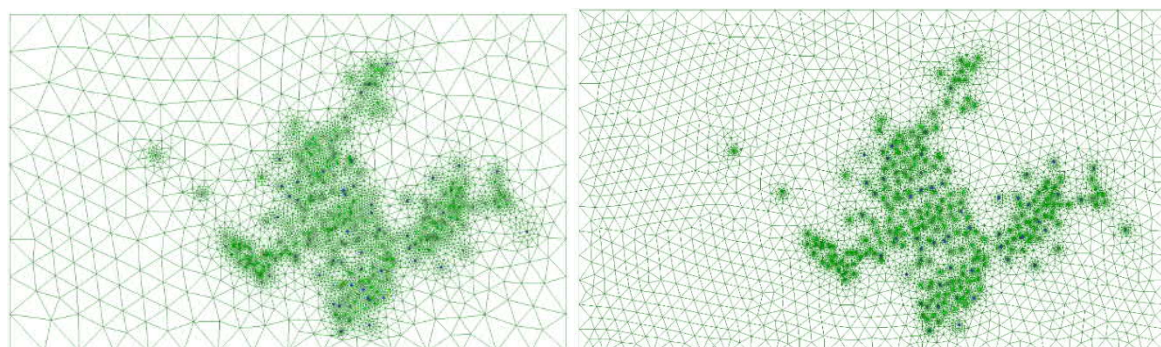
a

б



в

г



д

e

Рис. 10. Набор сеток для оценки точности оперативной модели

Контроль по скважинам выполнялся по жидкости (WLPR) и закачке (WWIR) с ограничением на минимальное и максимальное забойное давление, соответственно. Сравнение результатов расчетов приведено в таблице 1. При расчетах полномасштабных моделей достигается значительное сокращение времени вычислений, практически линейная зависимость от размеров модели, т.е. достигнуто ускорение в 74 раза при сокращении ячеек в 50 раз для объектной сетки (минимальное число ячеек). Дополнительный вклад в ускорение также вносит увеличение длины временного шага из-за более крупных ячеек. Отклонения по дебиту нефти скважин на последнюю фактическую дату составляют – 23%, по пласту – 3,4%, накопленная добыча нефти по скважинам – 17%, по пласту – 2,5%. При детализации отличия с традиционной ГДМ быстро сокращаются и на сетке L4 имеем отклонения по накопленным около 1% (рис. 11), по скважинам – 2–4% (рис. 12). Отклонение по пластовому давлению на конечную дату моделирования на рассмотренных сетках составляет менее 1,5%. Различия показателей разработки для залежи в целом с отклонением 0,5-2% визуальными практически не видны.

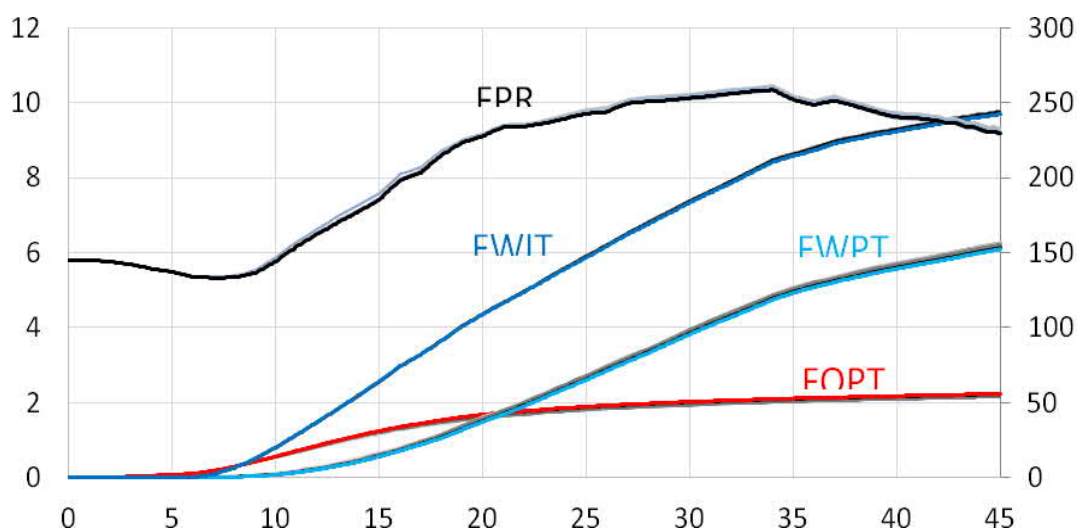


Рис. 11. Сравнение основных показателей разработки традиционной ГДМ и сетках различной детальности

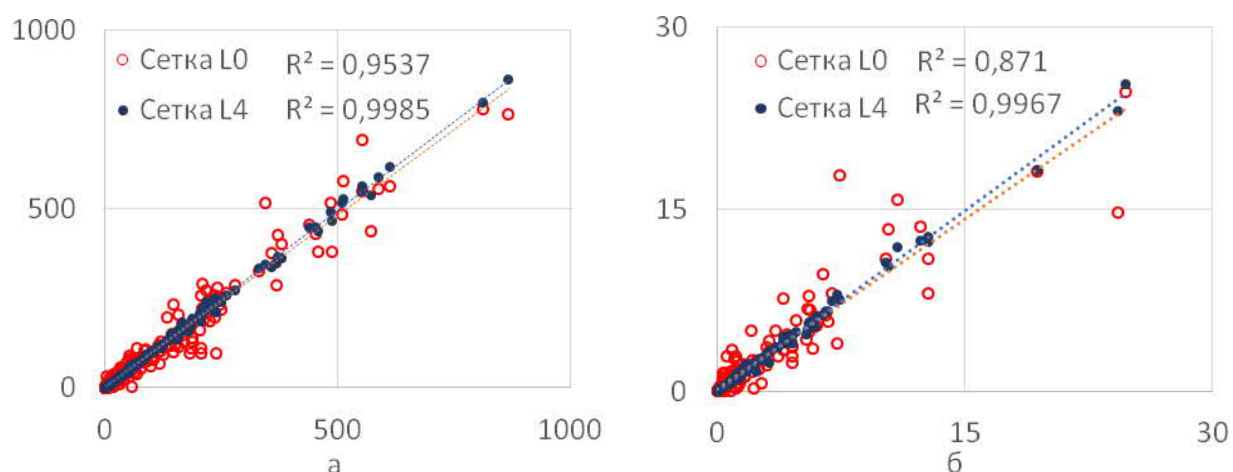


Рис. 12. Сравнение расчетов по скважинам на традиционной ГДМ и сетках различной детальности: накопленная добыча нефти (а); дебит нефти на последний расчетный шаг (б)

Распределение нефтенасыщенности на конец исторического периода представлено для сравнения на рис. 13.

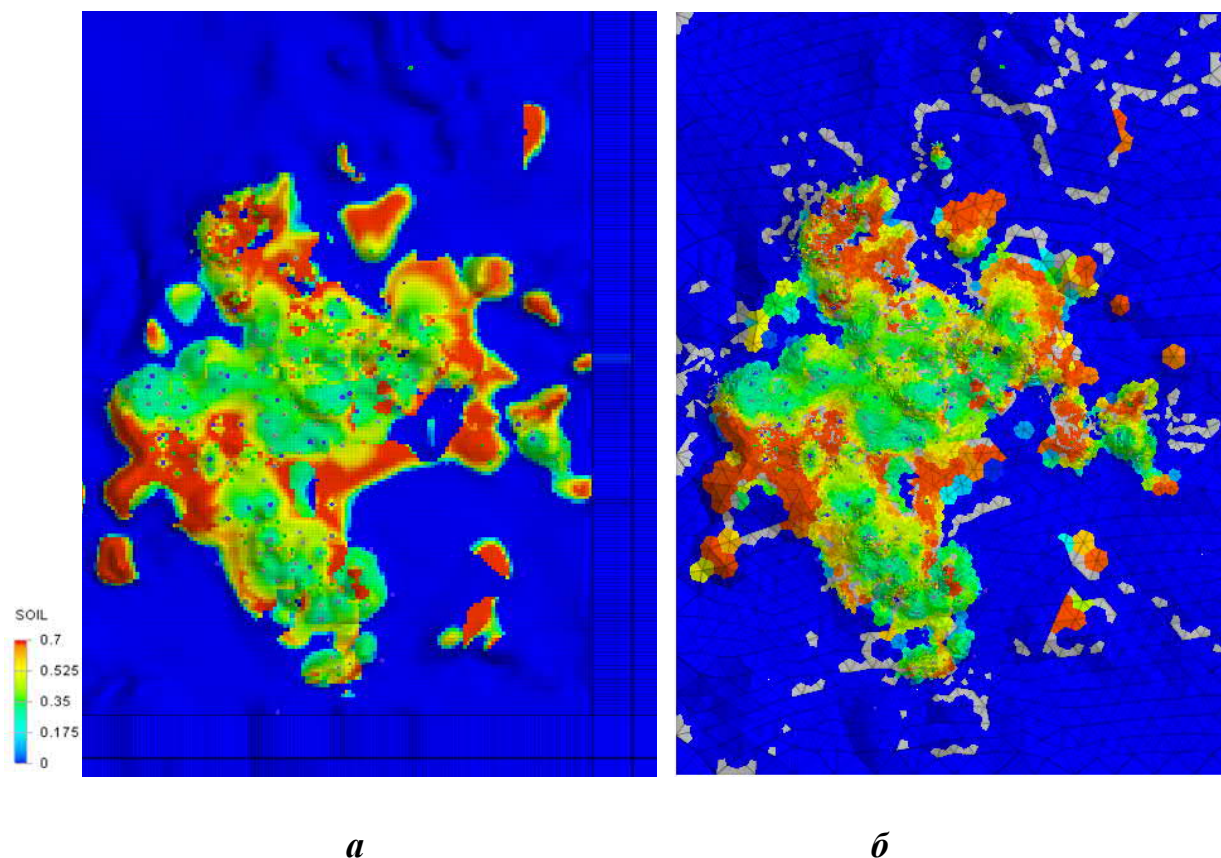


Рис. 13. Распределение нефтенасыщенности на конец моделирования: ГДМ (а); оперативная модель, построенная на сетке L4 (б)

Следует отметить, что сходимость триангуляционной сетки к фиксированной декартовой сетки невозможна по причине разной геометрии потоков к узлам, т.е. треугольная сетка имеет в среднем 6 направлений притока в плане, а декартовая сетка – только 4. Координаты скважин по мере сгущения и укрупнения сетки не меняются, а в ГДМ смещаются, что значительно влияет на точность. Таким образом, по мере повышения детализации, даже при том же числе узлов (ячеек) точность аппроксимации потоков в триангуляционной сетке выше. Однако, при расположении узлов триангуляционной сетки в центрах ячеек ГДМ, будет достигнуто 100% совпадение результатов.

Проверка сходимости триангуляционной сетки проверялись с использованием аналитических однофазных и двухфазных решений.

При моделировании отдельных скважин или участка залежи детализировать всю сетку не требуется, что является одним из важнейших преимуществ оперативной модели – локальное измельчение сетки практически не влияет на высокую скорость счета.

Таблица 1. Сравнение результатов расчетов традиционной ГДМ и оперативной модели с различной детальностью

Параметр	Уровень детализации					
	ГДМ	Объектный	1	2	3	4
Активных ячеек, тыс. штук	1562	31	64	146	270	320
Время расчета (ТCPU), сек	3828	52	92	268	724	808
Сокращение ячеек от ГДМ	1	50	24	11	5.8	4.9
Ускорение	1	74	42	14	5.3	4.7
Отклонение текущих и накопленных показателей, %						
Дебит нефти скважин (WOPR)	0	23	18	11	5.4	4.0
Дебит воды скважин (WWPR)	0	11	9	7	3.3	2.2
Нак. добыча нефти скважин (WOPT)	0	17	12	7.6	3.4	2.4
Нак. добыча нефти скважин (WWPT)	0	17	13	10.5	5.5	4.1
Нак. добыча нефти (FOPT)	0	-2.5	-2.8	-2.1	-2.0	-1.1
Нак. добыча воды (FWPT)	0	2.3	2.8	2.0	0.8	0.6
Добыча нефти (FOPR)	0	3.4	1.8	-0.2	-0.4	-0.5
Добыча воды (FWPR)	0	4.9	3.1	0.6	0.5	0.5
Пластовое давление (FPR)	0	-0.4	-1.3	1.5	1.2	0.8

Особенности применения

Для понимания возможностей и ограничений применения рассматриваемого подхода при моделировании реальных залежей отметим следующие методические особенности и причины их появления.

1. Упрощение ГМ в случае сложных геологических объектов за счет использования модели пропластков. Вариант использования готовых ГМ или ГДМ применялся ранее, однако он имеет свои ограничения и недостатки. Например, исходные данные не могут быть идентифицированы в кубах свойств. В модели много промежуточных, избыточных построений, не соответствующих набору исходных данных. Использование традиционной нарезки слоев по разрезу при большом числе пропластков не позволяет достичь точного описания границ коллектора как в объектной модели.

2. Описание геологических объектов минимальным числом дескрипторов сетки. Может создаться впечатление, что объектная модель достаточно «грубая», однако она полностью соответствует объему исходных данных.

3. Использование треугольной призматической сетки с пирамидами (pillar grid). Опыт показал, что для реальных задач сложные формы ячеек разных типов и динамические сетки имеют низкую эффективность использования. В этих случаях теряется смысл в экономии числа ячеек, поскольку потребление памяти и время счета гораздо выше, чем в стандартных ГДМ, которые всегда выступают критерием скорости и точности принятия решения.

4. Дискретизация расчетной сетки применяется на более поздних этапах моделирования, когда известны конкретные особенности фильтрации.

5. Значительное сокращение времени перестроения модели и времени расчетов для задач обычной и невысокой точности – настройка на историю, материальный баланс, оптимизационные задачи, оценка энергетики и т. п.

Отметим очевидные **преимущества** рассматриваемого подхода над традиционным и/или РЕВИ сетками:

- узловая и блочная аппроксимация потоков;
- многоточечная аппроксимация потоков, учет тензора коэффициента абсолютной проницаемости;
- возможность описания сложной геометрии малым числом элементов;
- скважины расположены в узлах сетки, а не смещаются в центры ячеек, что не искажает расстояние между скважинами при разных размерах ячеек, нет погрешностей в глубинах пластов;
- использование интерполяции между узлами, структурная поверхность строится автоматически;
- использование напрямую граничной информации (контуры, блоки, разломы);
- неоднородность учитывается измельчением первичной сетки и прямым переносом свойств (сеймика, карты);
- гибкость изменения размерности модели.

Недостатки в сравнении с традиционным подходом:

- «непривычность» работы в сравнение с гексаэдральной сеткой;
- эффективность численных алгоритмов при том же числе элементов ниже в 1,5–2 раза, чем для регулярных сеток.
- используемые методы аппроксимации уравнений не позволяют эффективно использовать геометрический мультисеточный метод (MG);
- стохастическая или мелкая неоднородность потребует более мелкие сетки – придется переносить (upscaling) свойства на уровни выше, чтобы не потерять эффективность подхода;
- требуется выделение коллектора по пропласткам до начала построения объектной модели.

Выводы

1. Предложен подход построения фильтрационных моделей, расширяющий возможности геолого-гидродинамического моделирования и

позволяющий значительно сократить время расчетов при решении оперативных задач разработки.

2. Разработан прототип симулятора, решающего задачи в рассматриваемой постановке, основные алгоритмы которого протестированы.

Направления развития и перспективы

1. 3D и 2D визуализация с учетом особенностей геометрии объектов, сеток и ячеек.

2. Реализация методов распараллеливания решения на нерегулярных сетках (CPU, GPU).

3. Совершенствование подхода при решении различных рутинных задач разработки, используя единую геологическую и гидродинамическую основу со всей имеющейся геолого-промысловой информацией.

4. Гибридизация симулятора по четырем направлениям интеграции: ГМ – ГДМ, регулярные – нерегулярные сетки, полномасштабное – детальное моделирование, традиционные – оперативные задачи разработки.

Список литературы

1. *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>.

2. *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.

3. *Шевко Н.А.* Особенности моделирования сложного нетрадиционного карбонатного коллектора на примере залежей Ближнего Востока // Тезисы докладов XIV научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений нефти и газа», г. Москва, 14–15 сентября, 2022 г. – М.: Изд-во Нефтяное Хозяйство, 2022.

4. *Шевко Н.А.* Прогнозирование результатов воздействия на пласт и околоскважинные зоны на основе моделирования многофазных фильтрационных потоков сложной геометрии: дис. канд. техн. наук: 25.00.17. – Пермь, 2002. – 231 с.

5. *Шевко Н.А.* Оптимизация детальности гидродинамической модели для ускорения процесса адаптации на историю разработки // 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. 66-75.

6. *Шевко Н.А.* Автоадаптация иерархической модели нефтяной залежи на историю разработки с использованием облачных технологий // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли», г. Москва, 17–18 ноября, 2022 г. – М.: Изд-во Нефтяное Хозяйство, 2022.

7. *Скворцов А.В.* Алгоритмы построения триангуляции с ограничениями // Вычислительные методы и программирование. - 2002. Т3.– С. 82-92.

8. *Quandalle P.* Eighth SPE Comparative Solution Project: Gridding Techniques in Reservoir Simulation // SPE-25263-MS. – 1993. – <https://doi.org/10.2118/25263-MS>.