

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАСТОВЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕТОДА ЛИНИЙ ТОКА

Сидельников К.А., к.т.н. Васильев В.В.

E-mail: sidelkin@yandex.ru

В статье приведено описание областей возможного применения математического моделирования на базе метода линий тока (SL-моделирование) в процессе комплексной интерпретации данных. Кроме того, дан анализ основных преимуществ метода, обуславливающих полезность SL-моделирование в решении проблем, которые традиционно представляют сложную задачу для более стандартных способов моделирования применительно к процессам вытеснения малосжимаемых жидкостей в больших, неоднородных пластовых системах.

A possible application of the streamline-based flow simulation (SL-simulation) at a complex data interpretation is described in article. Besides the streamline method's main advantages are analyzed that contribute to the usefulness of the streamline simulation in solving problems which are difficult to solve by more conventional flow modeling techniques related to the process of the incompressible fluids displacing in large, heterogeneous reservoirs.

Введение

Объединение всех доступных данных для моделирования – важный аспект при оптимальном управлении разработкой месторождения и надежном прогнозировании. Недавние успехи в геофизике, неточности существующих методов оценки и комплексная интерпретация данных привели к тому, что у нефтяной промышленности появились возможность и необходимость в создании больших многоблочных детализированных геологических моделей. Согласование таких высокодетализированных моделей с гидродинамической информацией (скважинные и приборные испытания, история многофазной добычи) очень важно для получения надежной модели месторождения с возможностью предсказания уровня добычи. Другими словами, модели месторождений имеют ограниченную ценность без способности к воспроизведению истории гидродинамических процессов разработки. Однако интеграция динамических данных все еще полностью не решенная проблема из-за больших временных затрат и связанной с ней субъективностью и неединственностью решений.

Типичный рабочий процесс комплексной интерпретации данных приведен на рис. 1. Процесс затрагивает интеграцию и согласование всех доступных источников данных, а именно статические и динамические источники информации. В этой дорогостоящей, комплексной и сложной среде создания репрезентативной модели месторождения, моделирования на базе метода линий тока может оказаться средством уменьшения стоимости и сложности процесса [2]. Область возможного использования подобного моделирования показана красным цветом на рис. 1.

Основные применения метода

Большое разнообразие применений моделирования на базе линий тока при комплексной интеграции различной информации о месторождении обуславливается основными достоинствами метода по сравнению с более традиционными подходами. В литературе в основном приводятся конкретные примеры в контек-

сте адаптации модели по истории разработки месторождения. Тем не менее, потенциал метода на базе линий тока позволяет использовать его гораздо шире данного одиночного приложения. Интересующийся читатель может быть отослан к работам [1] и [2], где приведены исчерпывающие обзоры современного использования моделирования на базе метода линий тока в различных направлениях математического моделирования в нефтяной промышленности, не только применительно к комплексной интерпретации.

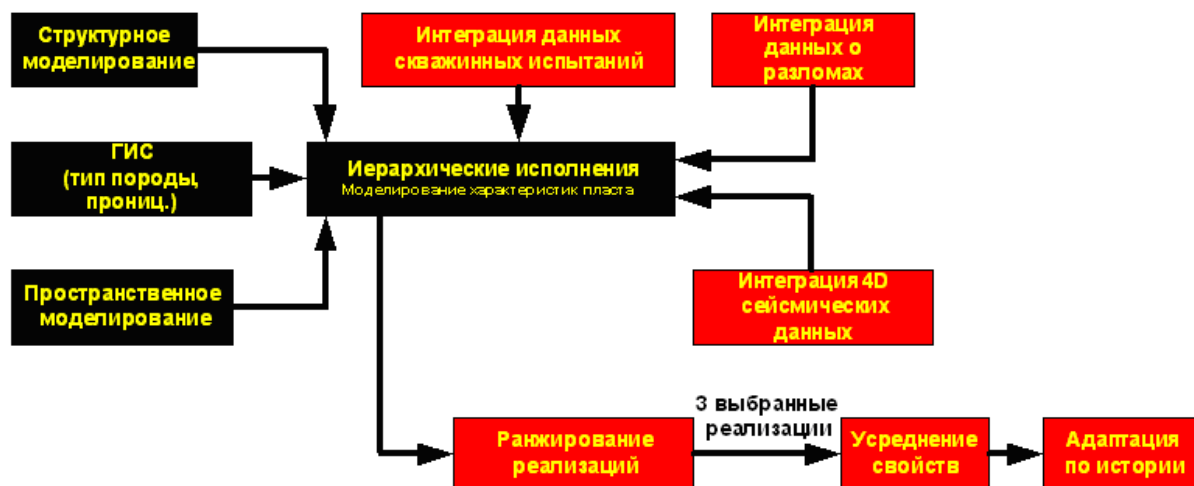


Рис. 1. Обычный рабочий процесс комплексной интерпретации данных, где возможное применение моделирования на базе метода линий тока показано красным цветом [2]

Основные преимущества метода [1]

Множество работ в последние несколько лет ясно показали полезность моделирования месторождений на базе метода линий тока (SL-моделирование) в решении проблем, которые традиционно представляют сложную задачу для более стандартных способов моделирования применительно к процессам вытеснения малосжимаемых жидкостей в больших, геологически-неоднородных системах. Не повторяя уже приведенные в литературе хорошие примеры и важные выводы, основной упор будет сделан на попытке ответить на вопросы успеха SL-моделирования и его быстрого распространения, являющегося мощной альтернативой классическим принципам моделирования. Там где будет возможно, это будет иллюстрироваться на конкретных примерах.

Наглядная визуализация потока жидкости

Наиболее привлекательная особенность для множества инженеров состоит в визуальных возможностях метода линий тока при оконтуривании течений жидкости и газов. Вместо ожидания последовательных во времени изменений величины насыщенности, линии тока предоставляют мгновенный «снимок» поля распределения потоков, ясно показывающего, где поток начинается (в какой нагнетающей скважине) и где он заканчивается (в какой добывающей скважине). Возможность видеть внутреннее расположение линий тока очень полезно и всегда приносит дополнительную информацию о режиме потока. Реальные месторождения, даже те, что разбурены в соответствии с оптимальной системой размещения скважин, редко отображают ожидаемое распределение линий тока. Нет ничего необычного в том, чтобы видеть взаи-

мосвязь скважин не вполне отвечающей существующей схеме их расположения. Поскольку подобное поведение может быть связано с «неправильной» геологической моделью или с несбалансированностью в системе расположения скважин, метод линий тока пока не имеет себе равных в установке таких проблем.

Моделирование в масштабе всего месторождения

Прямым следствием моделирования месторождений, редко имеющих ясные планы расположения скважин, дополнительным является то, что обычная практика, основанная на применении секторных моделей, становится плохо управляемой, поскольку трудно «подобрать» такую часть модели, у которой отсутствует расход вдоль границ на протяжении всего времени. Эта проблема хорошо знакома промышленности и успех секторных моделей сильно зависит от принятия правильных значений притока и оттока для границ секторов, или от попытки использовать «барьер» вокруг предложенного сектора. Наилучшее решение, конечно, состоит в том, чтобы моделировать месторождение, при котором структура системы имела бы возможность «развиваться» до определенной степени в зависимости от расположения скважин, их дебитов, строения пласта и присутствующих в нем неоднородностей. Но возможность выбирать подходящую модель всего месторождения требует эффективных технологий создания имитационных моделей, как с точки зрения разумных затрат на память так и с позиции требуемого вычислительного времени. Модели в масштабе месторождения печально известны тем, что могут достигать огромных размеров (с точки зрения числа ячеек), даже при использовании ограниченного числа ячеек между скважинами (рис. 2). Хотя SL-моделирование делает некоторые упрощения для достижения эффективности своего применения, в большинстве случаев модель на базе метода линий тока остается предпочтительней секторной модели, т.к. ошибка появляющаяся в результате использования примерных секторных границ может потенциально оказаться больше и значительней, чем погрешности, вводимые самими моделями линий тока.



Рис. 2. Пример применения метода линий тока для модели в масштабе всего месторождения (линии тока окрашены в зависимости от нагнетающей скважины), показывающий что выбор «сектора» всегда сложная задача [1]

Эффективность и скорость вычислений

Одним из достоинств SL-моделирования по сравнению с традиционными подходами является присущая ему вычислительная эффективность. Однако эффективность достигается за счет упрощения свойств потока, неконсервативной формулировки и других допущений. Все же для многих реальных задач, SL-моделирование дает решения, которые сложно получить по-другому. От больших моделей с миллионами блоками до моделирований сотен равновероятных реализаций. Здесь эффективность понимается как с точки зрения памяти, так и с точки зрения вычислительных затрат. Эффективность с точки зрения требуемой памяти это результат двух ключевых аспектов:

- SL-моделирование решается с использованием IMPES-метода и таким образом требует только неявного решения по давлению;
- трассировка линий тока и решение соответствующей транспортной задачи осуществляется последовательно. Только одна линия тока хранится в памяти в данный момент времени.

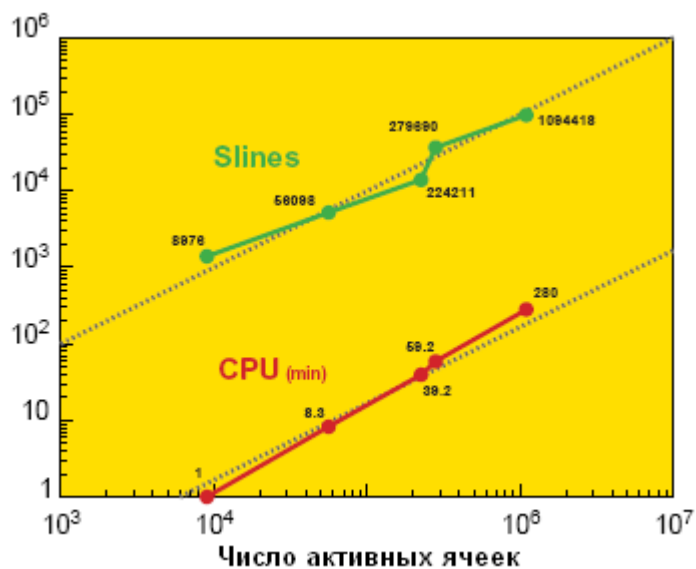


Рис. 3. Пример линейной зависимости времени работы (нижний график) и числа линий тока (верхний график) как функций от числа активных ячеек для проекта SPE#10 с использованием пакета 3DSL (коммерческий симулятор) и ПК на базе процессора PIII 866МГц [1]

С другой стороны, эффективность в скорости вычислений при почти линейной зависимости времени работы от числа активных блоков достигается за счет:

- одномерная транспортная задача вдоль каждой линии тока может быть решена более рационально;
- число линий тока увеличивается линейно с увеличением числа активных блоков;
- линии тока требуют нечастного обновления.

Хотя линии тока меняются во времени из-за изменений подвижности, гравитации и непостоянных граничных условий, для большинства практических за-

Когда используется эффективное управление памятью для массивов сеток и эффективная программа, решающая систему линейных уравнений (например, на базе алгебраического многосеточного метода AMG [3]), появляется возможность использовать модели с примерно 0,37 Мбайт на 1000 активных блоков (Самир¹ (Samier) и др., 2001). Имея 400 Мбайт доступной памяти, которая на сегодня присутствует в большинстве ПК, можно работать с моделями, состоящими из 1 млн. активных блоков, на относительно недорогой платформе.

¹ Все последующие ссылки на авторов можно найти в работе [1].

дач предположение о том, что события, связанных со сменой режима работы скважин, происходят в раз в год или полгода, но при этом линии тока остаются неизменными за этот интервал, является вполне справедливым. Моделирование месторождения с 30- или 40-летней историей разработки обычно осуществляется с годичным временным шагом (Бэйкер (Baker) и др., 2001). В противоположность другим технологиям моделирования, длительность и число глобальных временных шагов (частота обновления линии тока) зависит только от моделируемого физического процесса и полностью не зависит от размера и степени неоднородности трехмерной модели.

Вдоль каждой линии тока решение транспортной задачи особенно эффективно, поскольку оно рассматривается как упорядоченная одномерная задача в TOF-пространстве. Упорядочивание одномерной задачи весьма важно. Оставляя маленькие блоки вдоль линии тока – как результат движения линии тока через область с максимальным расходом вблизи скважины или заостренного угла блока – увеличило бы время решения подобно тому, как маленькие блоки влияют на скорость решения IMPES-методом в обычных симуляторах.

Хорошим примером, демонстрирующим эффективность SL-моделирования, является «Модель 2» 10-го SPE-проекта сравнительных решений (Кристи (Christie) и Блант (Blunt), 2001, рис. 3). Общее время работы T любого симулятора на базе метода линий тока примерно пропорционально

$$T \approx \sum_{i=1}^{n_{ts}} \left(t^{solver} + \sum_{j=1}^{n_{sl}} t_j^{sl} \right),$$

где n_{ts} – число шагов во времени (число обновлений линий тока);

t^{solver} – время необходимое на решение задачи общего распределения давления ($Ax = B$) в каждый интервал времени;

n_{sl} – число линий тока в каждый интервал времени;

t_j^{sl} – время для решения уравнения переноса вещества вдоль каждой линии

тока.

Почти линейная зависимость возникает за счет:

1. Число временных шагов (обновлений линии тока) не зависит от размера модели, неоднородностей и любых других геометрических особенностей трехмерной модели. Оно зависит только от числа событий в связи со сменой режима работы скважин и присутствующего режима фильтрации. Для задачи SPE10 на рис. 3 все примеры работали при одинаковом числе обновлений линии тока – 24.

2. Эффективная решающая программа на базе AMG также имеет почти линейную характеристику (Стабен (Stuben), 2000).

3. Число линий тока линейно зависит от числа сеточных блоков при прочих равных условиях. Рисунок 3 иллюстрирует эту особенность.

4. Время на решение транспортной задачи вдоль каждой линии тока может быть уменьшено за счет упорядочивания основной TOF-сетки и выбора числа узлов для каждой линии независимо от размера основной трехмерной сетки.

Линейная зависимость от размера модели это главная причина, почему SL-моделирование так удобно при моделировании больших систем. При FD-моделировании более подробная модель не только приводит к более мелкому временному шагу из-за уменьшения сеточных блоков, но также из-за увеличенной неоднородности, т.к. такая модель приводит к использованию более широкого диапазона значений проницаемости и пористости. Обычный обходной путь для

традиционных симуляторов состоит в использовании неявных или адаптивных неявных методов решения, но для больших задач такие решения могут стать недопустимо затратными, с точки зрения CPU и памяти.

Возможность постепенного усложнения физических свойств потока

Существуют довольно значительные допущения при формулировании метода линий тока, главным образом связанные с физикой потока. Все это обусловлено предположением о течении несжимаемых флюидов, как результат влияния строения пласта и геологических неоднородностей при взаимодействии с нагнетающими и добывающими объемами жидкостей. Подобные задачи являются непростыми для традиционного FD-моделирования, в особенности из-за того, что модели становятся большими (увеличивается число блоков) и неоднородными (существенный разброс в свойствах пласта). Первоначально цель метода линий тока состояла в определении эффективности вытеснения, причем время работы зависело только от сложности физики потока при прочих равных условиях. Связано это с тем, что «физическая сложность» будет стремиться увеличить число обновлений линии тока (n_{ls}) и время требуемого на решение одномерной транспортной задачи вдоль каждой линии (t_{sl}).

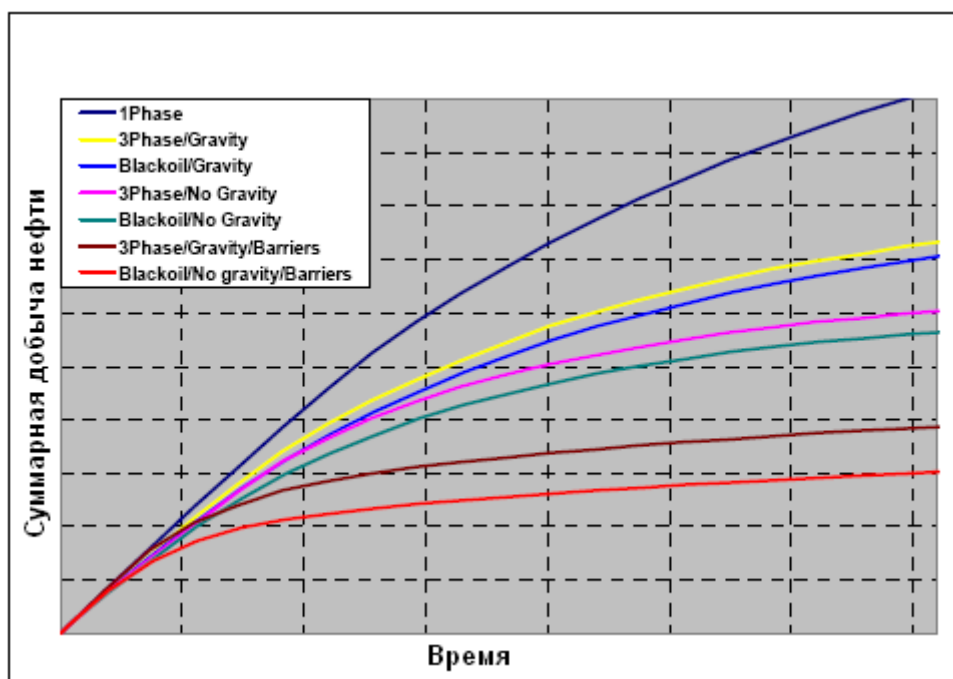


Рис. 4. Метод линий тока дает быструю оценку степени влияния различных физических свойств потока на эффективность вытеснения [1]

Это способствовало появлению исследовательских задач, когда, начиная с самой простой и быстрой модели, происходит постепенное добавление новых физических свойств к моделируемому потоку. Процесс моделирования мог бы, например, начинаться с введения позиций расположения скважин, неоднородности пласта, его строения и указания добываемых/нагнетаемых объемов флюида при условии однофазного и несжимаемого потока, затем постепенно добавляются различные относительные проницаемости и значения вязкости для каждой фазы (коэффициент вытеснения), далее учитывается неодинаковость плотностей фаз

(гравитация) и, наконец, принимаются во внимание сжимаемость и более сложные режимы фильтрации. Этот естественный процесс усложнения физики возможен в обычных симуляторах, но редко применяется. Вместо этого, стало привычкой включать столько физических свойств, сколько позволяет симулятор, т.е. сразу начинать с наиболее сложной модели, с выявлением вкладов каждого их свойств – полностью противоположно SL-моделированию.

Рисунок 4 иллюстрирует пример реального месторождения, которое было на стадии планирования к разработке. Размер модели составлял 30x140x245 и линии тока быстро показали, что гравитация и проницаемые границы будут важны в определении конечного уровня добычи месторождения. Пробные запуски также показали, что требовалась трехфазная модель, однако сжимаемость имела существенно меньшее влияние. Отношение времени работы для различных моделей составило 1:4:7,3 (1Phase:3Phase:Blackoil). Что примечательно в этом примере так это то, что режим фильтрации мог быть определен уже на ранней стадии геологического моделирования месторождения, таким образом, позволяя геофизикам дополнительно использовать динамическую информацию помимо обычной (керна, ГИС и т.д.).

Поток несжимаемой жидкости и управление скважинами

В полностью несжимаемых системах, уровень абсолютного давления системы не существенен. Все что требуется это разность давления для расчета общей скорости фильтрации, используя закон Дарси. Хотя в реальности такие систем не существует, предположение о несжимаемости оказывается математически очень мощным средством, поэтому должно использоваться везде, где это возможно. Для систем с большим водным напором, систем имеющих коэффициент изменения пористости близким к единице или систем с давлением выше давления насыщения, предположение о несжимаемости нашло широкое применение. Метод линий тока также используется в подобных системах.

Очень привлекательным следствием несжимаемости систем состоит в том, что дебит скважин может быть адаптирован без предварительной необходимости того, чтобы модели скважин будут воспроизводить реальное забойное давление, т.е. $p > 0$. Это имеет существенное значение при адаптации модели по истории разработки месторождения. Вместо того чтобы начинать процесс адаптации с настройки моделей скважин для воспроизведения реальных уровней добычи – другими словами, пытаться минимизировать число скважин, переключая их в режим ОДС (ограничение на дебит скважины) – несжимаемая модель позволяет инженеру немедленно начинать увязку с историей без учета давления по абсолютной величине. В месторождениях, где присутствуют 100, а может и 1000 скважин, практически невозможно провести адаптацию без переключения забойного давления некоторого процента скважин в режим ограничения или вообще исключить их из рассмотрения. Попытки индивидуальной настройки каждой скважины являются дорогим и медленным решением, и даже не нужным в свете того факта, что давление могло бы само по себе иметь вторичное значение. Возможность адаптировать внутрисхемный поток и получать новые, специфические для метода линий тока данные делает процесс воспроизведения истории разработки больших моделей с множеством скважин особенно подходящим для SL-моделирования. Прямым следствием этого является уменьшение времени затрачиваемого на увязку модели месторождения с реальной картиной разработки.

Новая (специфическая для метода линий тока) информация

Метод линий тока далеко выходит за рамки более наглядной визуализации, т.к. может предоставлять новые данные недоступные для стандартных симуляторов. Это возможно наиболее интересный и значительный вклад SL-моделирования в область моделирования месторождений, хотя промышленность еще не нашла лучшего применения этой информации. Поскольку линии тока начинаются в источнике и заканчиваются в стоке, есть возможность, например, определить какая добывающая скважина (или часть водоносного слоя) «обслуживает» какую-либо добывающую скважину, и в какой степени. Высокий водонапор в добывающей скважине может быть отслежен к определенным нагнетающим скважинам или границам с притоком воды. Наоборот, можно определить какой объем воды из какой-либо нагнетающей скважины закачивается в добывающую скважину – особенно значимая информация при попытке сбалансировать схему расположения скважин.

Линии тока также позволяют идентифицировать область пласта связанной с любым источником или стоком в системе, т.к. любой блок, который пересекается линией привязанной в свою очередь к определенной скважине, будет принадлежать к его области дренирования. Для начала, можно разделить пласт на динамически определяемые зоны дренирования, привязанные к определенным скважинам. Все свойства обычно связанные с выделенными областями пласта могут тогда быть точно выражены в базисе «единиц на скважину». Например, количество нефти, воды и среднее давление, приходящееся на единицу объема, и т.д. Эти данные были не доступны ранее и мало описаны в литературе по их использованию. Тем не менее, одно применение можно выделить: определение «эффективности» вытеснения и добычи в базисе «от скважины к скважине».

FD- и SL-моделирования

Из анализа литературы, посвященной сравнению SL-моделирования с обычными подходами, может сложиться мнение о кажущейся тенденции к полной смене основной концепции при гидродинамическом моделировании. На наш взгляд «исчезновение» FD-моделирования маловероятно, поскольку наряду с большим количеством достоинств SL-моделирования, у подобного подхода существуют и ощутимые недостатки, не всегда ясно указываемые авторами работ посвященных этой теме. Скорее всего, это связано с действительно высокой перспективностью метода на базе линий тока и его относительно недавним «переоткрытием». Тем не менее, наиболее ясно вырисовывается ориентированность к комбинированию обоих подходов, совмещая достоинства и того и другого методов с минимизацией недостатков каждого. Другими словами, вполне вероятное будущее стоит за так называемыми «гибридными» симуляторами, позволяющими на различных этапах моделирования применять тот или иной подход, в зависимости от стадии. Поэтому в качестве заключения приводится уже апробированный результат совмещения FD- и SL-моделирования применительно к процессу адаптации гидродинамической модели по истории разработки месторождения.

Для решения проблемы повышения эффективности компьютерного моделирования месторождений был предложен один из способов, т.н. параллельный метод моделирования (parallel modeling approach) [4, 5]. Главным достоинством подобного подхода является возможность работы с множеством масштабов модели сообща. Такой подход предоставляет различные типы данных, каждый из которых дает информацию о разных масштабах, для их последующей интеграции.

Более подробное описание методологии параллельного подхода можно найти в [4] и [5], по сути, в статье [4] представлен фрагмент перевода [5].

Основной недостаток параллельного подхода представленного на рис. 5 состоит в том, что не учитываются ошибки усреднения. Адаптация в мелком масштабе может быть достигнута, только если поведение потока в усредненном масштабе ($z^{up}(r)$) соответствует характеристикам потока в точном масштабе ($z(r)$). Цель состоит в том, чтобы получить полностью адаптированную мелкозернистую модель с историей разработки.

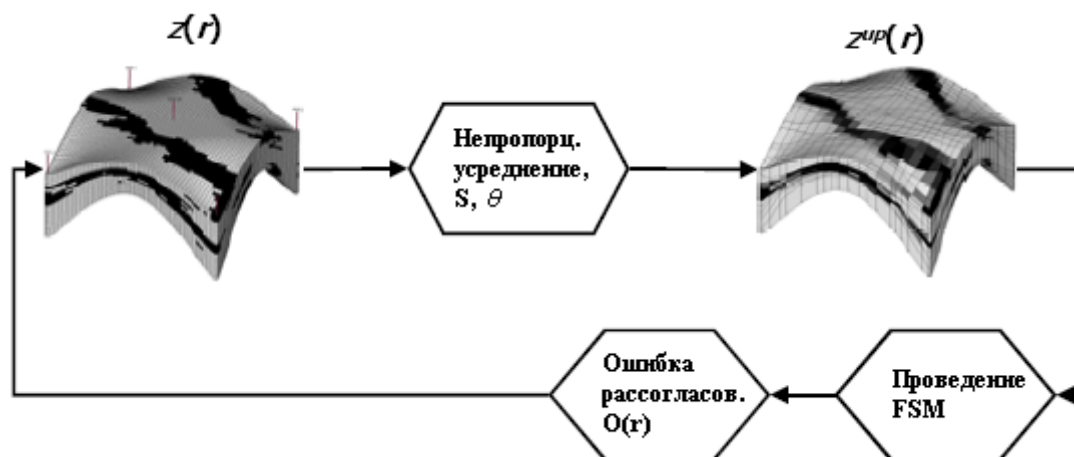


Рис. 5. Параллельный подход к моделированию пласта [4]

В этом случае методология также заключается в создании мелкозернистой модели с распределением основных свойств пласта $z(r)$. Однако вместо немедленного проведения фазы ремасштабирования, проводится оптимизация генерируемой сетки с целью уменьшения ошибок усреднения между обеими моделями. Истинная, но не известная ошибка может быть представлена следующим соотношением

$$\varepsilon = \|FSM(z^{up}(r)) - FSM(z(r))\|,$$

где ε представляет ошибку усреднения, а FSM – аббревиатура, означающая процесс полного FD-моделирования движения флюида. Однако в действительности ε не может быть вычислена, т.к. это потребовало бы проведение FSM в мелком масштабе. Поэтому задача состоит в уменьшении ошибки усреднения ε без знания результатов $FSM(z(r))$. Для достижения этого, авторы [5] ввели «быструю» аппроксимацию моделирования движения жидкости в пласте FSM^* , позволяющая определить примерную ошибку усреднения

$$\varepsilon^* = \|FSM^*(z^{up}(r)) - FSM^*(z(r))\|.$$

При этом сделано следующее допущение: уменьшение ε^* должно подобным образом отражать уменьшение ε . Оптимизация генерируемой сетки начинается с выполнения FSM^* в мелком масштабе. Затем мелкозернистая модель усредняется по некоторым данным начальным параметрам S и θ . FSM^* затем выполняется множество раз над крупнозернистой моделью для нахождения набора S, θ , который бы минимизировал ε^* . Единственное требование состоит в том,

чтобы уменьшение ε^* должно сопровождаться таким же уменьшением ε , хотя эти величины могут различаться по абсолютной величине.

Параллельный подход к моделированию с дополнительной оптимизацией генерируемой сетки, являющийся основным методом определения параметров пласта, представлен на рис. 6. Детали решения (технология адаптации модели, алгоритмы усреднения и генерации сетки и т.п.) могут варьироваться в зависимости от присутствующих задачи и средств.

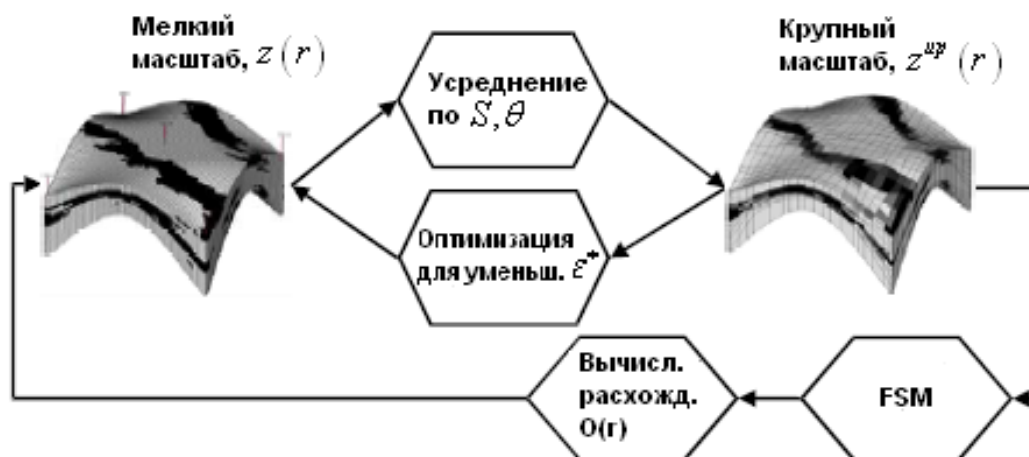


Рис. 6. Базовый параллельный подход к моделированию с оптимизацией генерируемой сетки [5]

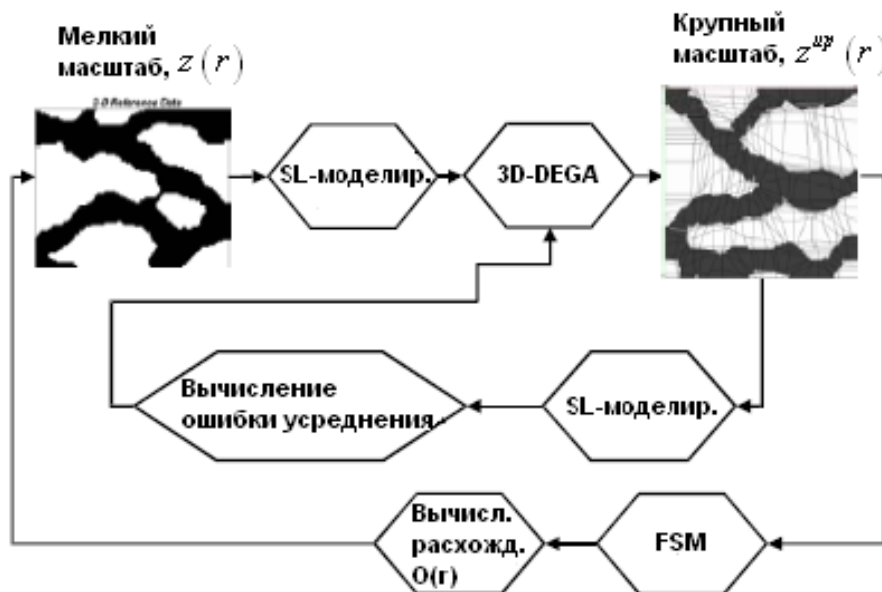


Рис. 7. Блок-схема рабочего процесса для учебного примера [5]

В работе [5] приведен конкретный учебный пример с представленным специфическим рабочим процессом моделирования (рис. 7). Рабочий процесс начинается с создания подробной мелкозернистой модели. SL-моделирование (FSM^*) выполняется над мелкозернистой моделью с получением диаграммы обводненности (дебит воды, деленный на суммарный дебит воды и нефти). Используя алго-

ритм 3D-DEGA (алгоритм генерации трехмерной гибкой сетки, [5]), подробная модель усредняется до получения крупнозернистой модели. Затем выполняется SL-моделирование над усредненной моделью и вычисляется ошибка рассогласования ($O(r)$) между диаграммами обводненности обеих моделей. Моделирование на базе метода линий тока выполняется множество раз до тех пор, пока не будут оптимизированы параметры, заданные для 3D-DEGA, и минимизировано расхождение $O(r)$.

Результатом предложенного алгоритма является крупнозернистая модель с оптимально сгенерированной сеткой, которая с достаточной точностью воспроизводит историю разработки и предоставляет надежные прогнозы на будущее при той же самой схеме расположения скважин. Пожалуй, самым большим достоинством подобного подхода является то, что FD-моделирование проводится только в крупном масштабе, а дополнительная оптимизация сетки за счет применения SL-моделирования позволяет получить полностью адаптированную мелкозернистую модель.

Литература

1. Thiele, M.R. Streamline Simulation // 6th International Forum on Reservoir Simulation, 3-7 September 2001. – Schloss Fuschl, Austria.
2. Ates, H. Use of Streamline Simulations for Integrated Reservoir Modeling: Dissertation for the degree of Doctor of philosophy. – The University of Tulsa, 2005. – 164 p.
3. Сидельников К.А., Васильев А.В. Решение матричных уравнений алгебраическим многосеточным методом при моделировании течения жидкости в нефтяных пластовых системах // Надежность и качество. Труды международного симпозиума / Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – С. 224-226.
4. Сидельников К.А., Васильев В.В. Анализ современных способов увеличения эффективности моделирования нефтяных месторождений // Надежность и качество. Труды международного симпозиума / Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – С. 227-230.
5. Tureyen, O.I., Karacali, O., Caers, J. A. Parallel, Multiscale Approach to Reservoir Modeling // 9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, 30 August - 2 September 2004. – Cannes, France.