

Оптимизация детальности гидродинамической модели для ускорения процесса адаптации на историю разработки

Н.А. Шевко¹, к.т.н.

¹Газпромнефть Бадра Б.В., Багдад

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

Ключевые слова: апскейлинг, огрубление, нерегулярные матрицы, неортогональные сетки, ускорение расчетов, настройка модели

Ускорение гидродинамических расчетов является актуальной задачей при моделировании крупных залежей и многовариантных вычислениях. Стандартные приемы ускорения, основанные на построении сеток меньшей детальности, ограничены геометрией укрупненных ячеек, что не позволяет получить оптимальную детализацию сетки.

Предлагаемый подход улучшенного ремасштабирования (advanced coarsening) сетки путем создания нерегулярных укрупненных ячеек на базе готовой гидродинамической модели дает возможность более чем на порядок сократить размерность модели и существенно ускорить расчет с сохранением приемлемой точности решения. Для этого строится вспомогательная триангуляционная сетка с зонами измельчения (возле скважин, трещин) и укрупнения (законтурная зона, межскважинные интервалы) ячеек. Для каждого узла вспомогательной сетки определяются ячейки новой сетки, выполняются перенос свойств на созданную неравномерную сетку, расчет проводимостей, коэффициентов продуктивности скважин и законтурной зоны.

Рассматриваемый подход реализован в виде опции в гидродинамическом симуляторе. Апробация реализованных алгоритмов выполнена на нескольких полномасштабных моделях залежей нефти и газа с различными размерностью и фазовым состоянием. Показана хорошая устойчивость решения и сходимость с результатами, полученными на исходной сетке.

Новая опция применяется как для ускорения расчета больших и многоскважинных моделей, так и в многовариантных расчетах, возникающих при адаптации моделей к истории разработки, когда погрешность адаптации выше погрешности дискретизации решения по пространству.

Advanced grid coarsening of dynamic model for fast history matching

N.A. Shevko¹

¹Gazprom Neft Badra B.V., Iraq, Baghdad

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

Keywords: upscaling, upgridding, irregular matrix, non-orthogonal mesh, history matching, CPU run time reduction

Reducing CPU simulation time is essential for simulation of huge reservoirs and multivariate calculations. One of the industry's approaches is 'coarsening'. Due to geometric constraints of enlarged regular cells, this approach does not allow generating an optimal cells size mesh.

In this paper we propose an "Advanced Coarsening" approach, which is based on the available dynamic model and allows building a reduced size complex grid with irregular enlarged cells and speeding up the calculations.

For this purpose, an auxiliary smoothed triangulation mesh is constructed with refined (near wells, faults) and coarsened (within aquifer) cells. The enlarged cells are assigned mesh nodes by an upgridding procedure. The grid properties are to be upscaled accordingly. The connection transmissibility factors, connection coefficients of the well productivity and the aquifers require special calculations.

This algorithm has been successfully implemented as a feature for in-house reservoir simulator designed for both Corner Point and Irregular grids. Numerical tests were carried out on several models of oil and gas reservoirs with different dimensions and phase state. The test showed good solution stability and convergence with results received on the initial regular grid.

This approach can be used for large model simulations and multivariate calculations which arise in history matching procedures, when the matching error (discrepancy of actual and calculated data) is higher than the solution discretization error.

Ускорение гидродинамических расчетов является актуальной задачей, особенно при моделировании крупных залежей и многовариантных расчетах, необходимых при адаптации моделей к истории разработки. Стандартные приемы ускорения расчетов моделей, использующие построение сеток меньшей детальности в силу ограничений на геометрию и расположение укрупненных ячеек, не позволяют получить оптимальную детализацию сетки. В данной статье на базе готовой гидродинамической модели (ГДМ) предложен подход к построению сложных неравномерных расчетных сеток, позволяющих меньшим числом ячеек описать особенности геологического строения и фильтрационных потоков с сохранением приемлемой точности решения. Такое сокращение размерности модели, более чем на порядок, существенно ускоряет расчет и обеспечивает контролируемые погрешности расчетных данных.

Реализованные в рамках гидродинамического симулятора алгоритмы апробированы на нескольких полномасштабных моделях залежей нефти и газа с различными размерностью и фазовым состоянием.

Традиционные возможности оптимизации сетки ГДМ

Исторически наибольшее распространение при моделировании геологического строения и разработки месторождений углеводородов получили модели, расчетные сетки которых основаны на геометрии «угловой точки» (corner point). Произвольное задание координат узлов ячеек (гексаэдра) этих сеток позволяет точно вдоль координатных линий описать крупные тектонические элементы (разломы) и ориентировать сетку согласно главным направлениям фильтрации или анизотропии проницаемости. Для того чтобы не допускать больших погрешностей дискретизации уравнений по пространству, рекомендуется создавать равномерные и ортогональные сетки.

Имеется несколько стандартных возможностей ремасштабирования исходной гидродинамической сетки.

Для описания локализованных особенностей фильтрации, таких как течение возле скважин сложной траектории, трещины гидроразрыва или разломы, применяются вложенные локальные подсетки большей детальности (local grid refining – LGR). Преимущества этой детализации очевидны: добавление LGR позволяет оперативно локально уточнить решение без перестройки и изменения размерности готовой модели.

Для сокращения общего числа ячеек используется прием локального объединения нескольких ячеек в одну крупную (coarsening), как правило, в водонасыщенной (или законтурной) зоне пласта, реже – в нефтенасыщенной части, вдали от зон активной фильтрации, или межскважинном пространстве. Варианты задания таких модификаций сетки выполняются кубическими боксами (BOX), имеющими регулярную структуру [1]: набор ячеек в диапазонах сеточных координат I_1 – I_2 , J_1 – J_2 , K_1 – K_2 объединяется в новый набор с размерностью NX , NY , NZ . Этот формат ограничивает применение локального объединения ячеек для построения произвольных неравномерных сеток.

Анализ точности прогнозирования различных приемов огрубления сетки (up-gridding) на базе коммерческих и некоммерческих симуляторов выполнен в тесте SPE-8 «Gridding Techniques in Reservoir Simulation» [2]. Проведено сравнение результатов моделирования закачки газа в нефтенасыщенный пласт на произвольных укрупненных сетках. Все проанализированные сетки попадали в круг допуска 10%-ной погрешности по прогнозу времени прорыва газа и достижения заданного газового фактора. При этом по всем сеткам достигнуто сокращение размера ячеек более чем в 4 раза (68–108 против 400). Наряду с различными вариантами локального укрупнения ячеек, рассматривались нерегулярные неравномерные, триангуляционные и PEVI сетки, сохраняющие размеры ячеек возле скважин, в местах интенсивных потоков и уменьшающие детализацию в местах с минимальными градиентами давлений.

Можно отметить следующие недостатки проведенных тестов: отсутствовали проверка скорости счета (CPU), время на построение новой сетки и расчет нере-

гулярных связей; не рассматривались инструменты построения произвольных сеток для масштаба залежи в целом, включая алгоритмы автоматического построения сеток. В итоге не был выбран способ ремасштабирования, который был бы более эффективным и предпочтительным по точности и скорости счета.

Предлагаемый подход улучшенного ремасштабирования

Ключевая идея рассматриваемого в работе ремасштабирования – укрупнение сетки в местах с недостаточной и/или недостоверной геологической информацией (законтурная зона, межскважинные интервалы), низкой плотностью данных и малыми градиентами потоков (вдали от скважин, трещин).

Для успешной практической реализации подхода при полномасштабном моделировании должны выполняться следующие требования: использование традиционных симуляторов и готовой ГДМ; полуавтоматическое или автоматическое создание сетки с укрупненными ячейками и наличие параметров управления процессом детализации; учет основных особенностей фильтрации и сохранение численной эффективности стандартных алгоритмов на неравномерной сетке. Основными задачами, которые необходимо решить, являются:

- укрупнение сетки (upgridding) в условиях сохранения геометрии «угловой точки» и с учетом границ модели, пластов, разломов, замещений, углеводородных контактов, распределения водоносной зоны, расположения скважин и их конструкции;

- перенос свойств (upscaling) на новую сетку с использованием алгоритмов, обеспечивающих сохранение величины запасов и учитывающих тип свойств (объемные, потоковые, индексные массивы, концевые точки кривых фазовой проницаемости);

- расчет коэффициентов проводимости для новой сетки с учетом исходной неоднородности и распределения свойств;

- определение форматов хранения новой смешанной сетки, матриц коэффициентов и способов факторизации уравнений при сопоставимом числе регулярных и нерегулярных связей;

- модификация численных методов для учета несоседних соединений (non-neighbor connections – NNC) в декартовой сетке и возможности решения полностью нерегулярной неортогональной задачи.

Для решения указанных задач при построении неравномерной сетки используется следующий подход.

1. Построение вспомогательной триангуляционной сетки. Исходные данные берутся из модели в виде объектов, у которых есть свой шаг дискретизации и приоритет, определяющий порядок вставки точек/линий при триангуляции. Границам и разломам присваивается высокий приоритет (точки не смещаются и не удаляются). Траектории скважин в пределах пласта задаются набором точек/линий и максимально допустимым шагом дискретизации. Объем пласта

(bulk points) заполняется равномерно точками по заданной схеме с шагом и углом или специальным алгоритмом «продвижения фронта сетки» (advancing front method) от скважин. Детализация сетки управляется через максимальный размер ячеек возле скважин. Если размер ячейки превышает установленное значение, то происходит автоматическое измельчение. Для улучшения качества сетки, с точки зрения численных расчетов и минимизации погрешности дискретизации, выполняется итерационное сглаживание, при котором точки (с низким приоритетом) смещаются в усредненный барицентр соседних треугольников.

2. Создание новых ячеек. Методом ближайшего расстояния формируется массив-идентификатор (PEBICELL) будущих крупных ячеек, который используется далее в модели в секции GRID. Для каждого узла вспомогательной сетки определяются ячейки новой сетки. На этом этапе можно провести визуальный контроль качества результатов (рис. 1).

Автоматическое построение укрупненной сетки. Для создания укрупненной сетки достаточно использовать массив PEBICELL. Поскольку каждая ячейка новой сетки или совпадает, или полностью включает целые ячейки исходной сетки, то upscaling свойств на созданную неравномерную сетку выполняется стандартными методами. Расчет новых связей между укрупненными ячейками определяется с учетом направлений ИЖ, если связи нерегулярные, то создаются NNC. Проводимости между крупными ячейками рассчитываются через специальное усреднение проводимостей исходных ячеек. Выполняется уточнение коэффициентов продуктивности скважин и законтурной зоны.

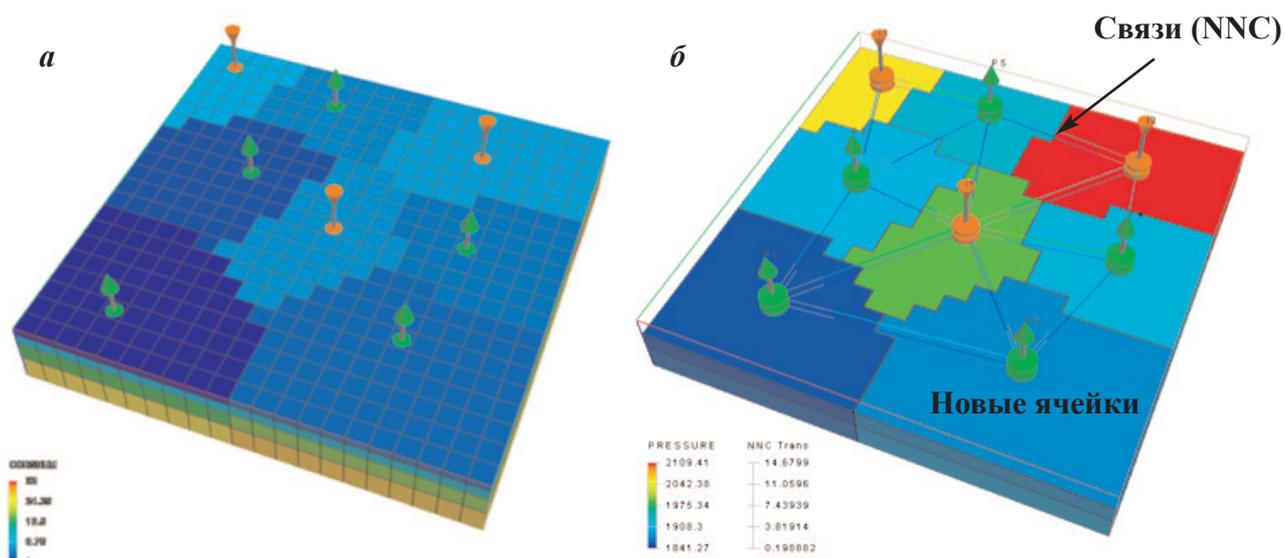


Рис. 1. Исходная модель и массив PEBICELL, построенный только по скважинным данным (а), и ремасштабированная модель с ячейками произвольной формы и новые связи NNC (б)

Совершенствование численной схемы расчета

Для моделирования многофазной фильтрации применяется модель Black Oil. Для численной модели на 3D декартовой и 2,5D триангуляционной сетках использованы наиболее распространенные и апробированные подходы и алгоритмы: для дискретизации – конечно-разностная схема методом Volume Balance (VB), для расчета коэффициентов для неортогональной сетки – метод Control Volume Finite Element (CVFE), для схемы по времени – полностью неявная с линеаризацией методом Ньютона. Для задач средней сложности при решении системы линейных алгебраических уравнений используются итерационные методы ORTHOMIN, (F)GMRES, BiCGStab с предобуславливателями Nested Factorization [3], MILU, ILU(0). Базовые алгоритмы успешно испытаны в тестах SPE, относящихся к моделям Black Oil.

Несмотря на простоту подхода, на самой грубой сетке, построенной только по скважинным данным, получается полностью нерегулярная неортогональная разностная сетка, аппроксимация потоков на которой должна проводиться с учетом мультиточечного шаблона аппроксимации (MPFA). Поэтому предусмотрена аппроксимация потоков с двух- (TPFA) и мультиточечным (MPFA) шаблоном.

Укрупненные ячейки ремасштабированной сетки создают множество нерегулярных связей между собой, из-за чего возникают проблемы со сходимостью стандартного Nested Factorization (NF) и резко увеличивается время счета. Для повышения скорости достижения сходимости решения этот метод был модифицирован. Для трехмерного случая NF имеет 7 векторов-диагоналей, которые участвуют во вложенной факторизации по трем направлениям. Обобщение понятия диагоналей на полную нижнюю L и верхнюю U матрицы, позволяет учесть все несоседние соединения. Для этого потребовалось изменить схему хранения элементов матрицы путем формирования блочной вложенной структуры совместно регулярной и нерегулярной частей и скорректировать схему расчета коэффициентов разложения. Модифицированный NF показал высокую численную эффективность при большом числе NNC по сравнению со стандартной версией алгоритма: в сложных тестовых и полномасштабных задачах число линейных итераций сокращалось в 3-5 раз.

Тестирование подхода на примере теста SPE-8

Для проверки точности и скорости счета реализованных алгоритмов использован тест SPE-8 [2]. На основе декартовой «эталонной» сетки размером 400 ячеек (10×10×4) сгенерированы четыре различные сетки (рис. 2, а):

- 1) триангуляционная с 92 узлами (23 в плане и 4 по разрезу); расчет потоков выполнен по TPFA и MPFA схемам аппроксимации;
- 2) укрупненная до 92 ячеек (23×4);
- 3) укрупненная до 44 ячеек (11×4);
- 4) укрупненная до «самой грубой», построенная только по скважинам, с общим числом ячеек 20 (5×4).

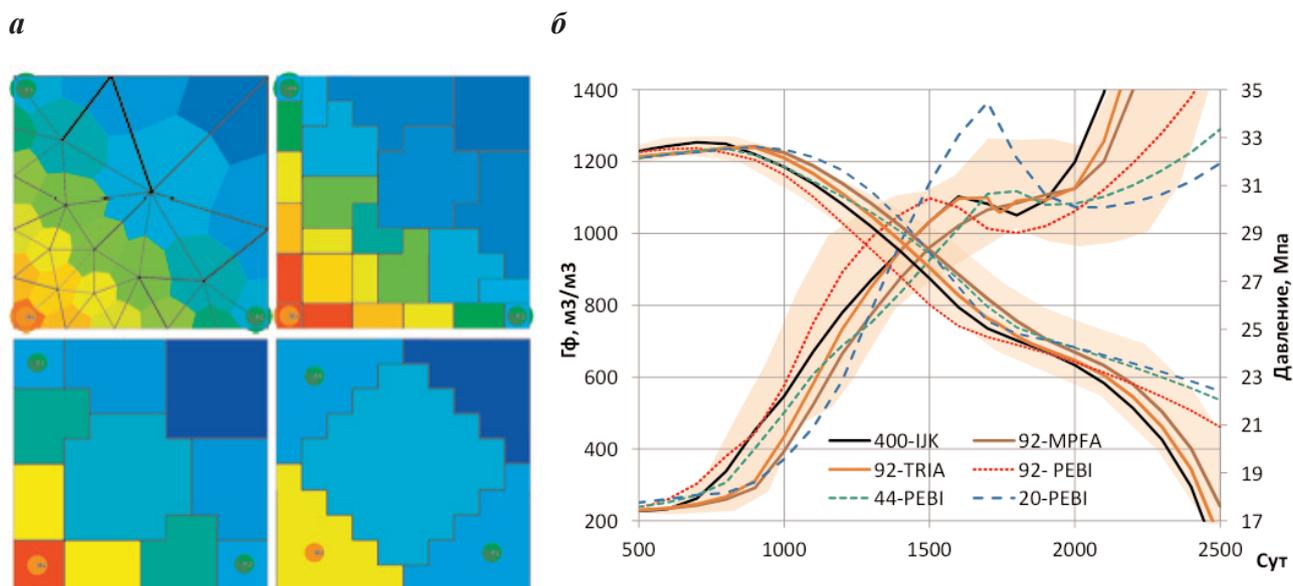


Рис. 2. Сопоставление результатов расчетов:
а – распределение S_{gas} на различных расчетных сетках;
б – динамика газового фактора и забойного давления скважин

Сравнение расчетов на базе этих сеток с результатами других авторов [2] показано на рис. 2. Несмотря на требование 10%-ной погрешности при прогнозе времени прорыва газа, разброс забойного давления и газового фактора показывают широкий «коридор» значений (отмеченные области на рис. 2) в зависимости от типа (PEBI, триангуляционная, огрубленные стандартной опцией Coarsening) и размерности сеток (17×4–27×4). Динамика давления и газового фактора по всем четырем сеткам практически лежит внутри этих коридоров, за исключением временных диапазонов 2400–2500 сут для сеток малой размерности 11×4 и 5×4.

Интересным является сравнение времени выполнения, представленное в табл. 1. На сетке 2 при сокращении числа ячеек в 4 раза можно достигнуть ускорения расчета до 5 раз, а для сеток 3 и 4 – соответственно в 15 и 220 раз. С учетом того, что если в специальном тесте с прорывом газа отклонения прогнозных параметров до-

Таблица 1

Сетка	Время, число шагов	Нелинейная итерация	Линейная итерация	CPU, сек	Ускорение	Погрешность забойного давления на конец расчета, %
Декартовая	40	324	1431	1,17	1	0,0
1 TPFA	40	151	692	0,57	2,1	7
1 MFPA	34	103	470	0,33	3,6	16
2	39	111	459	0,25	4,7	38
3	32	77	268	0,08	15	45
4	31	68	193	0,005	220	48

пустимы, то в реальных залежах можно получать хорошее соответствие результатов даже на очень грубых сетках, достигая при этом кратного ускорения.

Отметим, что для триангуляционной сетки (см. табл. 1) использование МРФА немного увеличило погрешность решения по сравнению с ТРФА. В целом анализ точности решений при полномасштабном моделировании на огрубленных сетках показал, что опция МРФА не имеет ключевого влияния на точность и может быть опущена в рамках решения практических задач по настройке модели.

Выполнение полномасштабных расчетов

В качестве примера рассмотрим результат создания серии неравномерных сеток разной размерности на базе готовой ГДМ нефтяной залежи с газовой шапкой. Параметры полномасштабной модели: трехфазная (нефть, свободный и растворенный газ, вода), размер $200 \times 330 \times 20$, 282 тыс. активных ячеек, 500 скважин, история разработки – 30 лет, последняя (четвертая) стадия разработки, закачка по смешанной (девятиточечная и рядная) схеме размещения скважин.

Построение сеток выполнялось с использованием границ пласта, разломов, скважинных данных, заданных максимальных размеров ячеек возле скважин, равномерного размещения точек в водонасыщенной зоне с финальным сглаживанием узлов. Участок модели показан на рис. 3. Для «самой грубой» сетки (нулевой уровень дискретизации) использовались только скважинные данные и равномерно распределенные точки с расстоянием, равным удвоенному шагу сетки скважин.

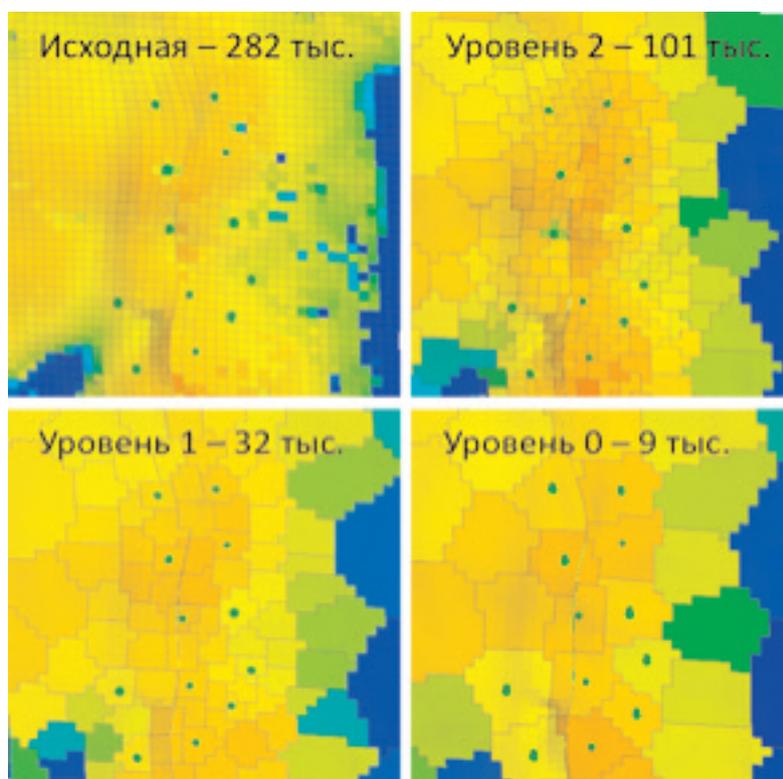


Рис. 3. Участок залежи с разными уровнями детализации сетки

Число ячеек сетки составило 9,3 тыс., что в 30 раз меньше, чем исходная сетка. Результаты расчетов представлены в табл. 2. Из нее видно, что время расчета на «самой грубой» сетке сократилось в 154 раза при погрешности накопленных показателей 1,8 %, текущих – 12 %. Эта сетка использовалась на первых этапах адаптации модели, когда погрешность настройки модели на фактические данные (пластовое давление, накопленная добыча нефти, закачка воды) достигала 20–40 %. По мере улучшения адаптации детализация сетки увеличивалась до уровней 1, 2 и далее приближалась к исходной сетке.

Таблица 2

Параметры	Модель			
	исходная	2	1	0
Ячеек, тыс.	282	101	32	9,3
CPU, с	45100	14900	1757	293
Доля ячеек, %	100	36	11	3
Ускорение	1	3	26	154
Погрешность, %: текущих показателей	0	3	7	12
накопленных показателей	0	0,9	1,5	1,8

Рассматриваемый подход обеспечивает гибкость в построении сетки и позволяет на каждом этапе адаптации модели использовать «оптимальную» сетку. При этом модель на уровне детализации 0 можно рассматривать как метод материального баланса. В этом случае фактические скважинные данные будут ассоциироваться с параметрами ячеек, и адаптация может быть упрощена и автоматизирована. Для рассматриваемой модели автоматически можно выполнить адаптацию следующих параметров: 1) среднее пластовое давление за счет притока воды по контуру и общий баланс добычи жидкости – закачки воды; 2) пластовое давление и проводимость пласта по данным гидродинамических исследований (ГДИ) за счет модификации проницаемости ячейки со скважиной; 3) забойное давление путем модификации продуктивности или скин-фактора; 4) обводнение с помощью модификации фазовых проницаемостей для нефти и воды.

Результат адаптации поля проницаемости к интерпретации данных ГДИ показан на рис. 3 в виде множителя к исходной проницаемости.

По результатам проведенных тестов и расчетов можно заключить, что наблюдается хорошая устойчивость решения на сетках разной детальности и сходимость решения к результатам на исходной детальной сетке.

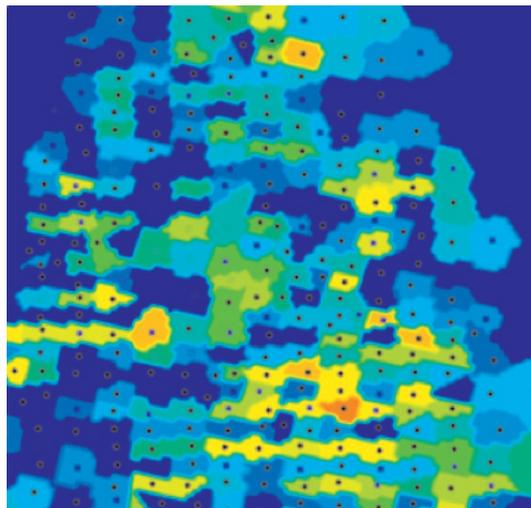


Рис. 3. Распределение множителя к проницаемости, определенное в рамках автоматической адаптации на грубой сетке

Выводы

1. Предложенная методика построения сложных неравномерных расчетных сеток позволяет достичь значительного ускорения расчетов по времени, что является критичным при выполнении многовариантных расчетов на этапе адаптации моделей крупных залежей к истории разработки.

2. Рассматриваемый подход реализован в виде опции в гидродинамическом симуляторе, который для большей гибкости разработан как для сеток «угловой точки», так и для нерегулярных неортогональных сеток.

3. Апробация реализованных алгоритмов выполнена на нескольких полномасштабных моделях залежей нефти и газа с различной размерностью и фазовым состоянием.

4. Перспективы улучшения точности подхода на «грубых» сетках связаны с автоматическим построением и использованием псевдофазовых проницаемостей.

5. На основе предлагаемой стратегии укрупнения сетки и агрегированного мультисеточного метода (Aggregated MG) можно сформировать эффективную численную схему для решения задачи непосредственно на исходной сетке.

Автор выражает благодарность руководству компании ООО «Нова Технолоджиз» за программный продукт FLOWZOOM, использованный при оформлении материалов данной статьи.

Список литературы

1. Schlumberger: Eclipse, Reference Manual, 2007. – 2392 p.
2. Quandle P. Eighth SPE Comparative Solution Project: Gridding Techniques in Reservoir Simulation // SPE-25263-MS. – 1993. – <https://doi.org/10.2118/25263-MS>
3. Appleyard J.R. Nested Factorization // SPE-12264-MS. – 1983. – <http://dx.doi.org/10.2118/12264-MS>