

УДК 519.6

Неструктурированная призматическая дискретизация сложных геологических структур в параллельном режиме

В статье дано описание параллельного метода построения призматической неструктурированной сетки, используемой для дискретизации сложных геологических структур при численном моделировании нефтяных и гидрогеологических задач. Метод позволяет проводить адаптацию сетки к различным типам объектов (скважины, разломы и т. п.). Данный метод реализован в программном комплексе НИМФА.

М. Л. Сидоров, В. А. Пронин

Одними из наиболее актуальных задач на сегодняшний день являются задачи прогнозирования и количественных характеристик для оценки:

- запасов нефти на больших месторождениях и влияния разных методов добычи на повышение нефтеотдачи с целью увеличения коэффициента ее извлечения;
- степени негативного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду в техногенно-нагруженных территориях с целью выработки оптимальных технических решений для минимизации негативных последствий техногенных воздействий.

Основным методом, позволяющим получить количественные пространственно-временные характеристики параметров данных задач, является компьютерное моделирование.

В настоящее время в Российской Федерации математическое моделирование задач фильтрации на практике осуществляется, в основном, с использованием импортных программных продуктов [1–4], которые являются коммерческими закрытыми кодами и имеют ряд недостатков (слабый уровень распараллеливания, предпочтительное использование на ПЭВМ, вследствие этого малая детализация и огрубление геологической модели, высокая стоимость в расчете на одно ядро, незащищенность информации и т. д.), ограничивающих возможности их применения. В связи с этим высокую актуальность приобретает разработка отечественного импортозамещающего программного продукта, лишенного указанных недостатков.

Особый интерес представляют расчеты крупных нефтяных месторождений. При расчете больших территорий покрываемая площадь может составлять от сотен до нескольких тысяч квадратных километров. Например, при расчете месторождения площадью 5000 кв. км и глубиной 100 м, со средним размером ячейки $20 \times 20 \times 1$ м, потребуется порядка 1,25 млрд ячеек. Для расчета таких задач необходим высокопараллельный комплекс с параллельным генератором сеток.

Отечественный программный комплекс НИМФА [5] является разработкой Института теоретической и математической физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Данный комплекс ориентирован на решение следующих задач в параллельном режиме:

- оценку воздействия ядерных и радиационно-опасных объектов на подземные, поверхностные воды и грунты, создание постоянно действующих гидродинамических моделей крупных техногенно-нагруженных территорий;

- моделирование крупнейших нефтяных месторождений площадью в несколько тысяч кв. км).

В задачах математического моделирования в интересах нефтегазовой отрасли, гидрогеологии и гидроэкологии исследуемый объект представляет собой математическую модель коллектора, месторождения, участка почвы и т. п. Данная модель образуется из геологической модели. На рис. 1 представлен пример геологической модели пласта с разломами, выклиниваниями и осадочными отложениями.

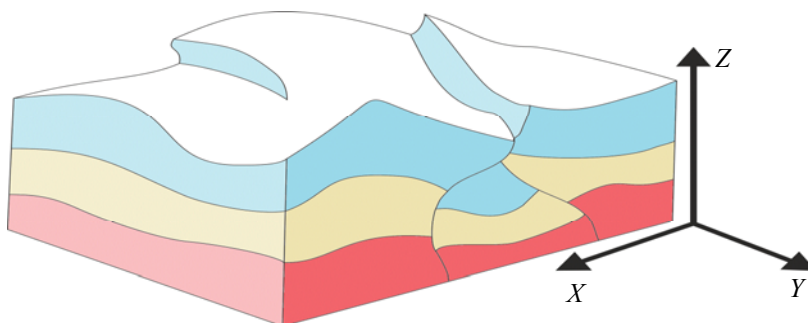


Рис. 1. Пример геологической модели (см. цветную вкладку)

Особенностями геологических моделей является:

- протяженность по латерали;
- слоистая структура отложений;
- крупный масштаб по площади (до нескольких тысяч кв. км);
- нечеткость описания внутреннего строения пластов (из-за ограничений методов их изучения).

Как правило, математические модели исследуемых объектов представляют собой слоистые модели, полученные экструзией.

Для получения математических моделей с числом ячеек, сопоставимым с количеством ячеек первичной геологической модели (до нескольких миллиардов) требуется разработка алгоритмов и программ параллельной генерации трехмерных неструктурированных сеток.

Авторам известно мало работ, посвященных задаче распараллеливания алгоритмов генерации трехмерных неструктурированных сеток [6, 7], а также реализации таких генераторов [8]. В мировой практике распространен подход распараллеливания алгоритма по фрагментам, когда в каждом фрагменте вычислительным ядром генерируется своя собственная неструктурированная сетка. В местах стыка фрагментов может образовываться сетка неудовлетворительного качества. Кроме того, декомпозиция исходной области на фрагменты является искусством исполнителя и увеличивает сроки подготовки задачи, внося зависимость финальной сетки от человеческого фактора.

В зарубежных коммерческих программных продуктах, ориентированных на расчеты нефтяных и гидрогеологических задач, неструктурированные сетки применяются очень активно. Примерами таких продуктов являются ECLIPSE [1], CMG-STARS [2], TOUGH2 [3], MODFLOW-USG [4] и др. Использование неструктурированных сеток необходимо для описания сложных структурных элементов геологической модели с целью повышения точности расчета вблизи геометрических особенностей.

Для обеспечения сквозной технологии расчета задач в параллельном режиме перед авторами возникла проблема разработки своего сеточного генератора, покрывающего и превосходящего возможности зарубежных коммерческих аналогов. В основу разрабатываемого сеточного генератора заложены следующие принципы:

- использование модели распределенной памяти;
- использование интерфейса MPI;
- для построения двумерной распределенной неструктурированной сетки на поверхностях раздела пластов использование параллельного фронтального метода сфер;
- для построения трехмерной сетки применение обобщенного параллельного метода «угловой точки», основанного на двумерной распределенной сетке предыдущего этапа;
- возможность в процессе построения использовать адаптацию сетки к различным типам трехмерных объектов: кривым (скважины сложной траектории), поверхностям (разломы и т. п.) и объемам (пласты, различные породы и источники);
- возможность задать свой тип сетки в каждом пласте;
- представление финальной распределенной трехмерной неструктурированной сетки в виде параобластей с наложением ячеек на один слой;
- выделение в каждой параобласти трех множеств ячеек: *ядерных* (или *внутренних*) – ячеек, принадлежащих только текущей параобласти; *оболочечных* – ячеек, лежащих на границе смежных параобластей (при этом каждая оболочечная ячейка имеет одну или несколько ячеек-образов на смежных границах параобластей и хранит номера смежных с ней параобластей и соответствующие локальные номера ячеек-образов); *несчетных* – несчетных ячеек-образов соответствующих оболочечных ячеек.

Построение планарной неструктурированной сетки

Для построения планарной неструктурированной сетки был разработан фронтальный метод сфер (FSM), синтезированный на основе работ [9–12] авторов Я. Ито, А. Шиха, Б. Сони, К. Шимады и С. Ямакавы. Разработанный генератор также является продолжением работы [13].

Основные этапы метода FSM состоят в следующем:

1. На вход генератор получает набор плоских контуров областей в виде упорядоченных против часовой стрелки наборов точек.
2. Строится адаптивная двумерная фоновая сетка (*сетка_1*) для вычисления размерной функции (функции распределения характерного размера ребер сетки).
3. На основании длин ребер контура вычисляется размерная функция на *сетке_1* внутри области посредством решения уравнения Лапласа.
4. На основании вычисленной размерной функции строится адаптивная фоновая сетка (*сетка_2*), предназначенная для ускорения поиска ближайших точек.
5. Производится начальная декомпозиция с использованием *сетки_2* (для вычисления предварительного количества ячеек).
6. Область заполняется узлами, являющимися носителями сфер определенного диаметра, вычисляемого с помощью функции распределения характерного размера ребер сетки (этап фронтальной генерации узлов).
7. Производится триангуляция с определенными ограничениями (этап фронтальной триангуляции).

8. Производится сглаживание и локальное перестроение полученной треугольной сетки по ряду критериев, приводящих к улучшению геометрической меры качества сетки.

Этапы 2–4 метода FSM выполняются на каждом вычислительном ядре для всей области без обменов. Этапы 5–8 реализованы в параллельном режиме, причем выполнение каждого из них производится локально (в своей параобласти), а на границах смежных параобластей осуществляются обмены данными.

В конце работы алгоритма может производиться повторная декомпозиция области задачи (передекомпозиция), позволяющая изменять количество итоговых параобластей планарной сетки (рис. 2) и варьировать количество ячеек в параобластях. Построение распределенной двумерной сетки может проводиться на M процессорах, а затем может быть проведена передекомпозиция на K параобластей ($K \geq M$).

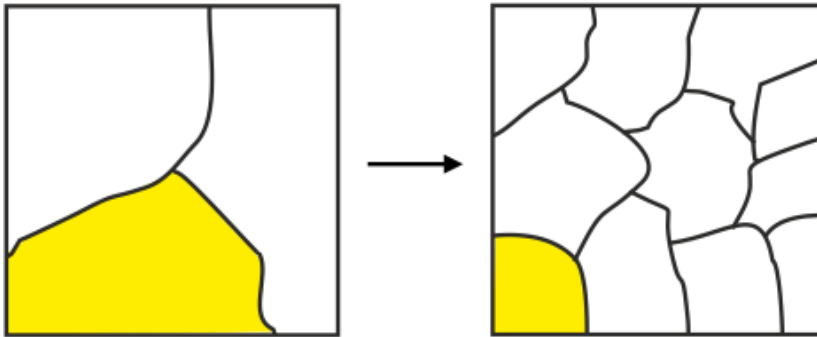


Рис. 2. Начальная декомпозиция задачи на M параобластей и передекомпозиция задачи на K параобластей

К особенностям метода FSM можно отнести следующее:

- хорошее описание зон, где сталкиваются фронты при генерации узлов (по сравнению с методами подвижного фронта);
- отсутствие этапа построения предварительной сетки – триангуляции области, ограниченной контуром (как в методах со вставкой узлов);
- отсутствие этапа восстановления граничных ребер, так как они изначально представлены в триангуляции;
- разбалансированность по вычислительной работе процессоров на этапе узловой генерации. Это связано с тем, что формирование узлов происходит от границы области внутрь, и, пока на соответствующую параобласть не приходит фронт генерации, вычислительное ядро этой параобласти простаивает;
- скорость построения сетки больше по отношению к методам упаковки сфер, но меньше, чем в методах подвижного фронта (из-за двух этапов генерации).

Пример работы программы построения двумерной неструктурированной треугольной сетки

На примере некоторых модельных задач покажем этапы генерации сетки в параллельном режиме. Как было сказано выше, в качестве входной информации используется начальный контур области задачи. На рис. 3–6 приведены примеры адаптивных фоновых сеток двух типов. На рис. 4 приведена адаптивная фоновая сетка_1, на которой вычисляется размерная функция, а на рис. 6 – сетка_2, построенная на основании сетки_1, используемая при начальной декомпозиции области.

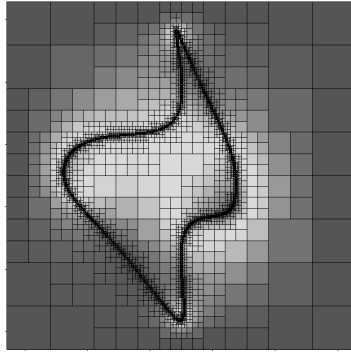


Рис. 3. Адаптивная сетка_1 для вычисления размерной функции

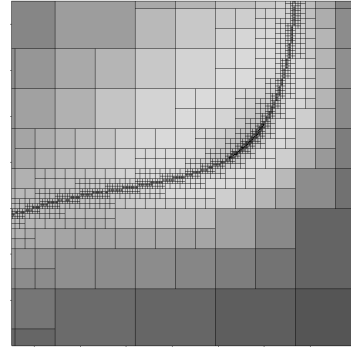


Рис. 4. Фрагмент адаптивной сетки_1

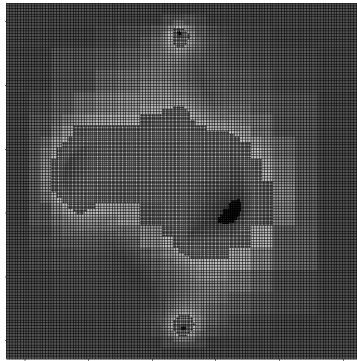


Рис. 5. Адаптивная сетка_2 для хранения сеточных элементов

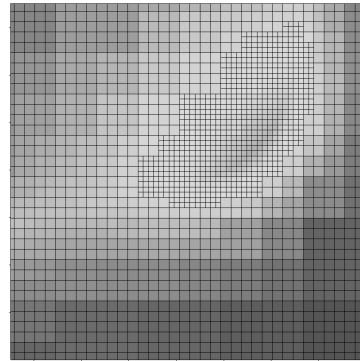


Рис. 6. Фрагмент адаптивной сетки_2

На рис. 7 показаны точки начального контура и его декомпозиция. Результат нодальной генерации представлен на рис. 8, а на рис. 9 показана триангуляция полученного множества точек (форму параобластей задает декомпозиция фоновой сетки_2).

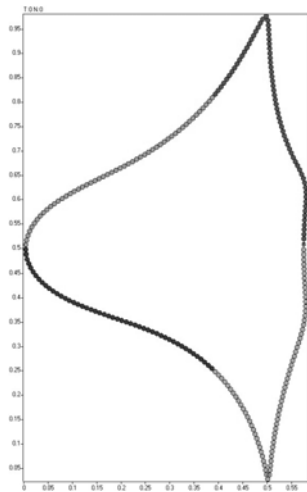


Рис. 7. Точки начального контура

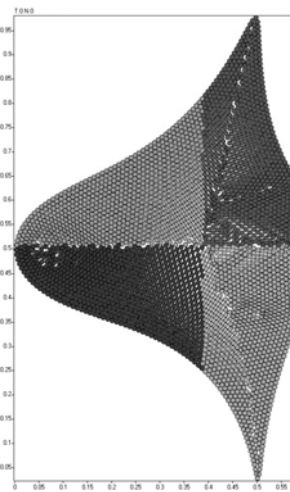


Рис. 8. Результат нодальной генерации

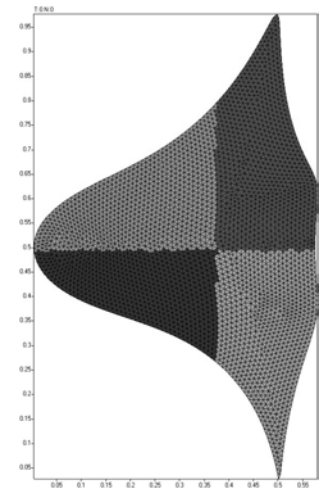


Рис. 9. Результат триангуляции

Параллельный генератор FSM тестировался для построения сеток в областях как с равномерным разбиением границы, так и с неравномерным. На рис. 10 приведен начальный контур тестовой области с неравномерным разбиением границы.

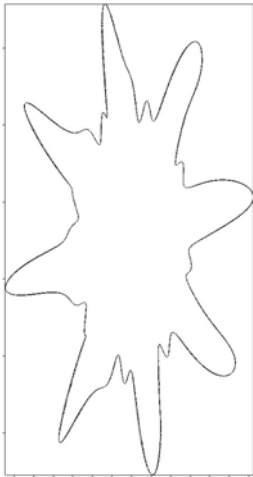


Рис. 10. Тестовый контур

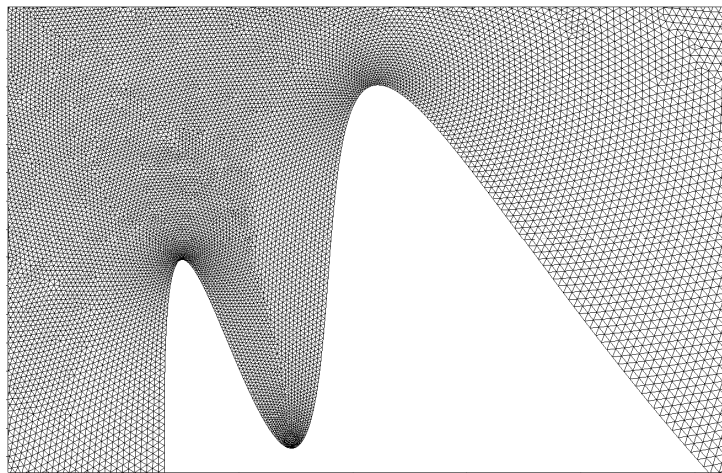


Рис. 11. Фрагмент полученной сетки

В таблице приведено время генерации неструктурированных сеток в тестовых областях с границей, разбитой на ребра с учетом кривизны и без учета. В данной таблице приводится количество образованных точек и граней, время генерации сетки и полученное ускорение от использования четырех ядер. Число точек в контуре составило несколько тысяч. Результаты были получены с использованием процессора Core i5 760 2.8 GHz с 8 Gb RAM.

Сравнение времени генерации сетки в различных режимах

№ теста	Разбиение границы	Количество элементов		Время генерации, с		Ускорение, раз
		Точки	Грани	1 ядро	4 ядра	
1	Учет кривизны	~470 000	~880 000	37,6	14,0	2,68
2	Без учета кривизны	~440 000	~820 000	24,3	9,9	2,45

Из таблицы видно, что применение четырех ядер дало ускорение генерации сетки в среднем в 2,5 раза независимо от типа разбиения контура области. В задаче с перепадом длин ребер вычислительная нагрузка примерно в 1,5 раза выше, чем при генерации почти равномерной сетки.

С помощью данного алгоритма в параллельном режиме была получена планарная сетка с числом точек более 10 миллионов с использованием 289 вычислительных ядер. Время генерации такой сетки составило около 19 секунд.

Построение объемной сетки

После построения двумерной неструктурированной сетки в параллельном режиме проводится построение трехмерной сетки в резервуаре со множеством пластов. Так как рассчитываемые области в задачах моделирования процессов фильтрации в геологических структурах имеют, как

правило, слоистую структуру, часто в коммерческих пакетах для построения объемной сетки используется так называемый *метод угловой точки* (CP). Данный метод позволяет описывать разломы в пластах. На рис. 12 приведен пример сетки, построенной по методу CP. Из данного рисунка видно, что соседство на уровне ячеек может быть неструктурированным – сетка имеет жесткие ограничения по числу ячеек по I, J, K направлениям, но в ней отсутствуют жестко закрепленные соседи, то есть у I, J, K ячеек в соседях может быть $I, J, K-2$ ячейка.

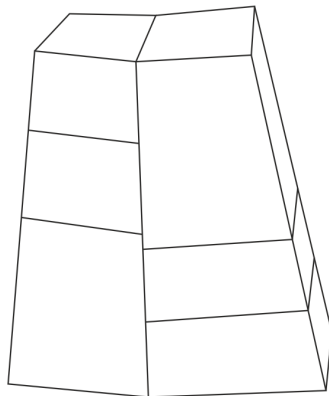


Рис. 12. Пример сетки, построенной по методу CP

Если расчетная область имеет сильную разнотолщинность, то метод угловой точки может дать некачественный результат. На рис. 13 приведен пример области в виде клина с сеткой, построенной по методу CP. Из рисунка видно, что на широкой стороне области сетка редкая, а на узкой – подробная.

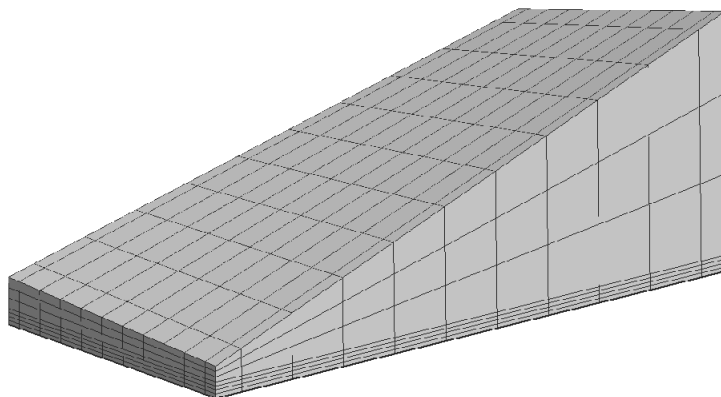


Рис. 13. Пример области в виде клина

При численном моделировании задач многофазной фильтрации в коммерческих программных продуктах, использующих неструктурированные сетки, для генерации сеток применяется преимущественно метод экструзии, метод вырезания и блочный метод. Первый подход образует результирующую сетку в плане неструктурированную, а вдоль оси Z – регулярную. Второй подход образует результирующую сетку в плане неструктурированную, а вдоль оси Z – нерегулярную. Блочный метод может образовывать как полностью неструктурированную сетку, так и структурированную.

Авторами был разработан *обобщенный метод угловой точки (GCP)*, который улучшает качества обычного метода угловой точки. На рис. 14 приведен пример построения сетки обобщенным методом угловой точки.

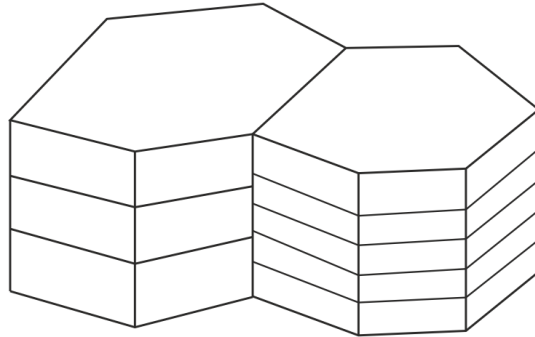


Рис. 14. Построение сетки методом GCP

Основное преимущество метода GCP состоит в том, что двумерная сетка на поверхностях раздела пластов, используемая при построении трехмерной, может быть неструктурированной общего вида (треугольная, преимущественно четырехугольная, многоугольная), а по оси аппликат в разных местах используется разное число дробления. Следовательно, при дискретизации пласта, имеющего сильно переменную толщину, итоговую сетку можно адаптировать в соответствии с толщиной и особенностями рельефа. На рис. 15–17 приведены примеры построения сеток методом GCP.

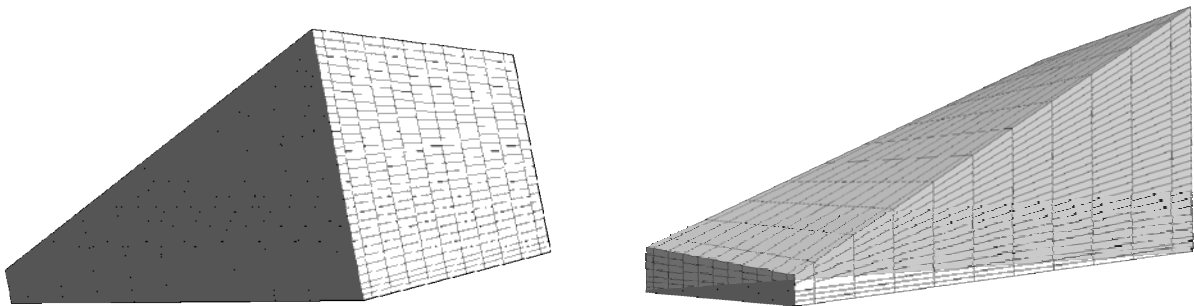


Рис. 15. Пример сетки в клиновидном пласте. Вид с разных сторон

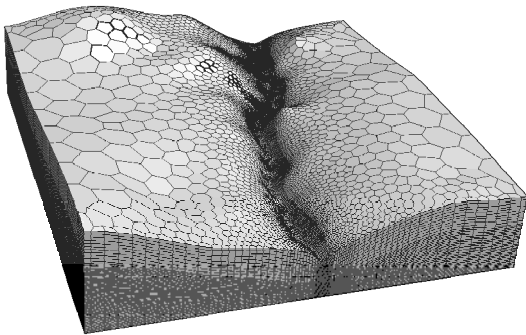


Рис. 16. Пример дискретизации русла реки

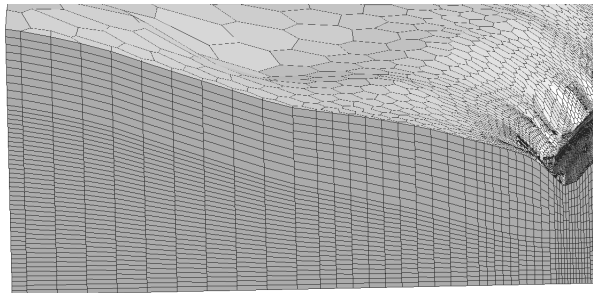


Рис. 17. Фрагмент сетки

На всех этапах при работе с трехмерной сеткой используется структура данных «узел – ребро – грань – ячейка». В программе не используются глобальные массивы, все данные размещаются локально. Структура программы генератора трехмерной сетки обобщенным методом угловой точки в параллельном режиме выглядит следующим образом:

- получение начальной распределенной двумерной сетки;
- образование столбцов трехмерной сетки вдоль оси аппликата под каждой ячейкой двумерной сетки с адаптацией количества ячеек к толщине слоя;
- сшивание всех столбцов в параобласти;
- сшивка участков пластов в свою часть резервуара;
- добавление слоя несчетных ячеек к граничным ячейкам параобласти;
- передekomпозиция распределенной сетки.

Передekomпозиция распределенной трехмерной сетки состоит в том, что каждая из K параобластей может быть разбита на соответствующее количество подобластей (в зависимости от количества ячеек каждой исходной параобласти). Финальное количество параобластей может быть равно N ($N \geq K$) (рис. 18).

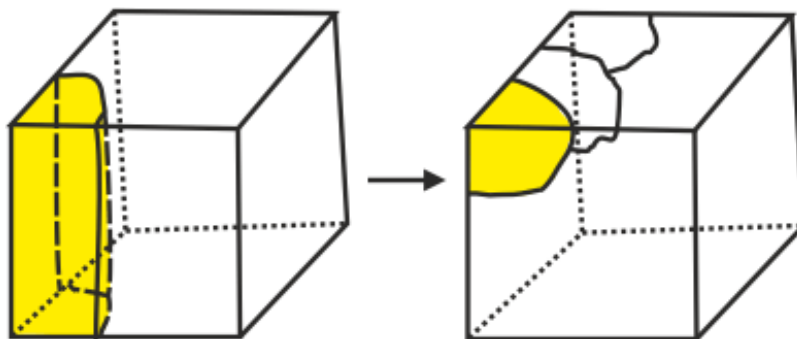


Рис. 18. Трехмерная декомпозиция на K параобластей и передekomпозиция на N параобластей

Адаптация сетки

Часто в области задачи могут присутствовать объекты, требующие адаптации сетки. В качестве таких объектов могут выступать гидрогеологические объекты: скважины сложной структуры и траектории (кривые), поверхности разлома, объемные источники, отложения и т. д. Для адаптации к таким объектам проводится дробление сетки в определенных зонах полученной трехмерной распределенной сетки. Структура программы дробления выглядит следующим образом:

- получение начальной распределенной сетки,
- дробление ребер,
- дробление граней,
- дробление ячеек,
- обновление несчетных/теневых/призрачных ячеек,
- передekomпозиция.

На рис. 19–22 приведены примеры сеток, адаптированных к определенным гидрогеологическим объектам.

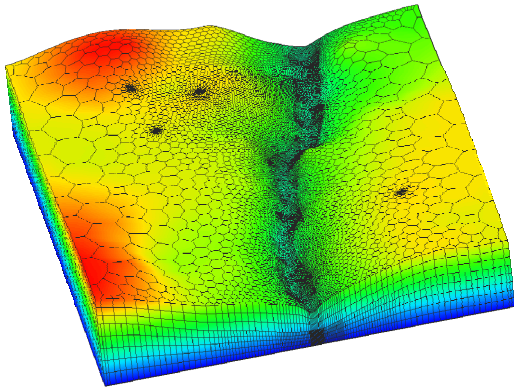


Рис. 19. Пример сетки с адаптацией к объектам (см. цветную вкладку)

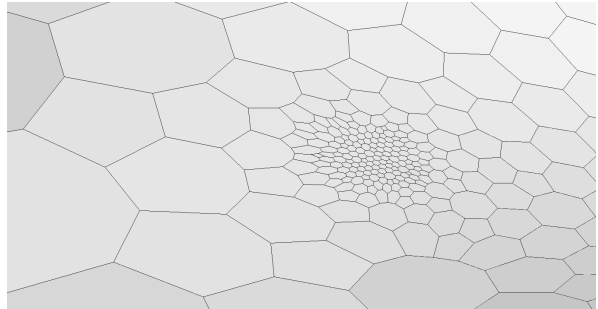


Рис. 20. Пример сетки вблизи скважины

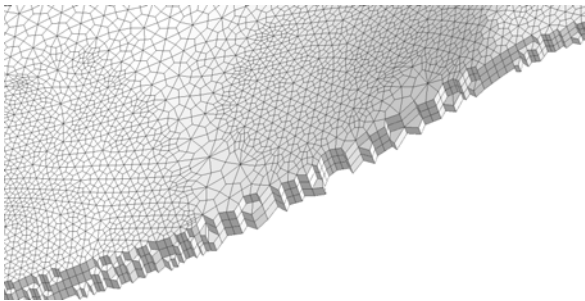


Рис. 21. Пример сетки с дроблением во всех пластах

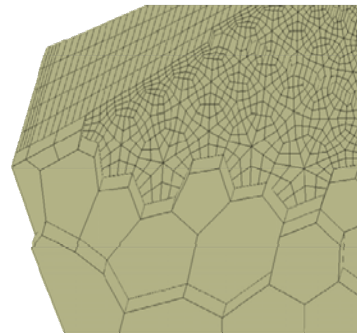


Рис. 22. Пример сетки с дроблением в некоторых пластах

На рис. 23 приведен пример декомпозиции области на 6 параобластей, а на рис. 24 показан пример одной из параобластей.

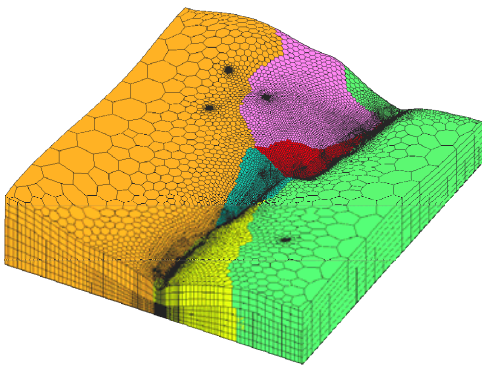


Рис. 23. Пример сетки, построенной на 6 процессорах (см. цветную вкладку)

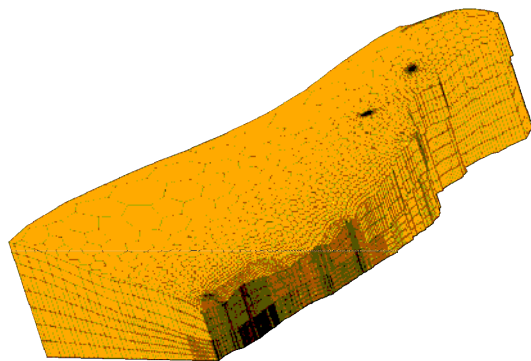


Рис. 24. Пример одной из параобластей сетки

С помощью представленных в работе алгоритмов для одной из задач фильтрации жидкости в пласте со скважинами в параллельном режиме была получена трехмерная многогранная сетка в ячеечно-граневом представлении с числом ячеек более 1,1 миллиарда, с использованием 21600 процессорных ядер. Время генерации сетки составило порядка 4 минут.

Разработанный специализированный параллельный сеточный генератор позволяет создавать и адаптировать сетки с числом ячеек порядка нескольких миллиардов в параллельном режиме, тем самым обеспечивая высокую детализацию крупных территорий. Генератор является частью прикладного программного комплекса НИМФА численного моделирования физических процессов в сложных геологических структурах, он используется для построения сеток при решении нефтяных и гидрогеоэкологических задач.

Список литературы

1. Официальный сайт компании Schlumberger. <http://www.slb.ru/sis>.
2. Официальный сайт компании Computer Modelling Group Ltd .<http://www.cmggroup.com/software/stars.htm>.
3. Официальный сайт компании Lawrence Berkeley National Lab. Earth Sciences Division. <http://esd.lbl.gov/research/projects/tough/software>.
4. Сайт программного продукта MODFLOW-USG. <http://www.swstechnology.com/blog/modflow-usg-unstructured-grids-a-game-changer-for-groundwater-modeling>.
5. Бутнев О.И., Горев И.В. и др. Суперкомпьютерные технологии для нефтегазовой отрасли // Сб. статей межд. конф. RAO/CIS Offshore. – Санкт-Петербург, 2011. С. 499–502
6. Chrisochoides N. Parallel Mesh Generation / Ed. by M. Bruaset, A. Tveito, Springer-Verlag. 2005. P. 237–259.
7. Casarotti E., Stupazzini M., Shiann J. L., Komatitsch D. et al. CUBIT and Seismic Wave Propagation Based Upon the Spectral-element Method: An Advanced Unstructured Mesher for Complex 3D Geological Media // Proc. 16th Int. Meshing roundtable. Springer-Verlag, 2007. P. 579–597. <http://www.imr.sandia.gov/papers/imr16>
8. Parallel MeshSim by Simmetrix. <http://www.simmetrix.com/products/SimulationModelingSuite/ParallelMeshSim/ParallelMeshSim.html>.
9. Ito Y., Shih A. M., Soni B. K. Reliable Isotropic Tetrahedral Mesh Generation based on an Advancing front method // Proc. 13th Int. meshing roundtable. – Sandia National Laboratories, 2004. P. 95–105. <http://www.imr.sandia.gov/papers/imr13/ito.pdf>.
10. Shimada K., Yamakawa A., Itoh T. Anisotropic triangular meshing of parametric surfaces via close packing of ellipsoidal bubbles // Proc. 6th Int. Meshing roundtable. Sandia National Laboratories, 1997. P. 375–390. <http://www.imr.sandia.gov/papers/imr6/shimada97.ps.gz>.
11. Li X. Y., Teng S. H., Ungor A. Bitting spheres in 3d// Submitted to the 8th Int. Meshing Roundtable. South Lake Tahoe, October, 1999. P. 85–95. <http://www.imr.sandia.gov/papers/imr8/li1.ps.gz>.
12. Miller G. L., Talmor D., Teng S. H., Walkington N. A delaunay based numerical method for three dimensions: generation, formulation and partition // Proc. 27th Annual ACM Sympos. On Theor. of Comput. May, 1995. Las Vegas. P. 683–692, <http://www.cs.cmu.edu/tdafna/stoc95.ps.gz>.
13. Сидоров М. Л. Модификация алгоритма Боуэра–Уотсона генерации топологически двумерных неструктурированных сеток в областях произвольной формы // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 3. С. 52–63.

Unstructured prismatic discretization of complex geological structures in the parallel mode

M. L. Sidorov, V. A. Pronin

The paper presents a parallel grid generation method for prismatic unstructured grids used for discretization of complex geological structures in oil and hydrogeology simulations. The method enables grid matching to various types of objects (wells, geological fractures, etc.) The method is implemented in the NIMFA code.