

УДК 519.6

## НЕСТРУКТУРИРОВАННАЯ ПРИЗМАТИЧЕСКАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

М. Л. Сидоров, В. А. Пронин  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Представлен *параллельный* метод построения призматической неструктурированной сетки, используемой для дискретизации сложных геологических структур при численном моделировании нефтяных и гидрогеоэкологических задач. Метод позволяет проводить адаптацию сетки к различным типам объектов (скважины сложной траектории, геологические разломы, пласты и т. п.) и обладает высокой скоростью построения. Данный метод реализован в программном комплексе НИМФА.

*Ключевые слова:* термогидродинамический симулятор, неструктурированная сетка, параллельный генератор сетки, адаптация, фронтальный метод сфер, обобщенный метод угловой точки, геологические структуры, программный комплекс НИМФА, MPI-распараллеливание.

### Введение

Одними из наиболее актуальных в областях нефтедобычи и гидрогеоэкологии являются задачи прогнозирования и получения количественных характеристик для оценки:

- запасов нефти на больших месторождениях и влияния разных методов добычи на нефтеотдачу с целью повышения коэффициента ее извлечения;
- степени негативного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду техногенно-нагруженных территорий с целью его минимизации и выработки оптимальных технических решений.

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

В настоящее время в Российской Федерации математическое моделирование задач фильтрации осуществляется в основном с использованием зарубежных программных продуктов [1–4], которые являются коммерческими закрытыми кодами и имеют ряд недостатков (слабый уровень распараллеливания, предпочтительное использование на ПЭВМ и, как следствие, 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 которых покрываемая площадь может составлять от сотен до нескольких тысяч квадратных километров. Так, чтобы рассчитать месторождение площадью 5 000 кв. км и глубиной 100 м потребуется около 1,25 млрд ячеек со средним размером  $20 \times 20 \times 1$  м. Для расчета таких задач необходим высокопараллельный комплекс с *параллельным* генератором сеток.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан программный комплекс НИМФА [5], ориентированный на решение следующих задач в параллельном режиме:

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

- моделирование крупнейших нефтяных месторождений (площадью в несколько тыс. 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 исходя из геологической модели. На рис. 1 представлен пример геологической модели пласта с разломами, выклиниваниями и осадочными отложениями.

Особенностями геологических моделей являются:

- протяженность по латерали;
- слоистая структура отложений;
- крупный масштаб по площади (до нескольких тыс. 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 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

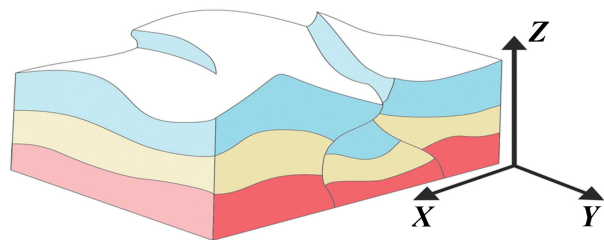


Рис. 1. Пример геологической модели

фрагментов может образовываться сетка неудовлетворительного качества. Кроме того, декомпозиция исходной области на фрагменты определяется 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 положены следующие принципы:

- используется модель распределенной памяти;
- используется интерфейс MPI;
- для построения двумерной неструктурированной сетки на поверхностях раздела пластов (планарной сетки) применяется параллельный фронтальный метод сфер;
- трехмерная сетка строится на основе планарной неструктурированной сетки с помощью обобщенного параллельного метода *угловой точки*;
- в процессе построения может использоваться адаптация сетки к различным типам трехмерных объектов: кривым (скважины сложной траектории), поверхностям (разломы и т. п.) и объемам (пласты, различные породы и источники);
- в каждом пласте может быть задан свой тип сетки;
- финальная трехмерная неструктурированная сетка представляется в виде совокупности областей (параобластей) с наложением ячеек в один слой. Каждая параобласть рассчитывается на отдельном вычислительном ядре;
- в каждой параобласти выделены три множества ячеек: *ядерные* (или *внутренние*) —

ячейки, принадлежащие только текущей параобласти; *оболочечные* — ячейки на границе смежных областей (при этом для каждой оболочечной ячейки имеется одна или несколько ячеек-образов на смежных границах параобластей и хранятся номера смежных с ней областей и соответствующие локальные номера ячеек-образов); *несчетные* — ячейки-образы соответствующих оболочечных ячеек, не рассчитываемые для данной области.

### 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. Соки, К. Шимады и С. Ямакавы. Разработанный генератор также является продолжением работы [13].

Метод FSM состоит из следующих этапов:

1. На входе генератор получает набор плоских контуров областей задачи в виде упорядоченных против часовой стрелки наборов точек.
2. Строится адаптивная двумерная фоновая сетка (*сетка 1*) для вычисления *размерной* функции (функция распределения характерного размера ребер сетки).
3. Посредством решения уравнения Лапласа с помощью библиотеки LParSol [14] на основании длин ребер контура вычисляется размерная функция на сетке 1 внутри области.
4. Область заполняется узлами, являющимися центрами сфер определенного диаметра, который вычисляется с помощью функции распределения характерного размера ребер сетки (этап фронтальной генерации узлов).
5. Выполняется триангуляция сетки с определенными ограничениями (этап фронтальной триангуляции). Для этого:
  - на основании вычисленной размерной функции строится адаптивная фоновая сетка (*сетка 2*);
  - производится начальная декомпозиция с использованием сетки 2 (для вычисления предварительного количества ячеек).

6. По ряду критериев, приводящих к улучшению качества сетки, выполняется сглаживание и локальное перестроение полученной треугольной сетки.
7. Производится адаптация полученной сетки к различным объектам геологической модели.

Все этапы метода FSM выполняются в параллельном режиме.

В конце выполнения алгоритма может производиться повторная декомпозиция области задачи (передекомпозиция), позволяющая изменить количество итоговых параобластей планарной сетки и варьировать количество ячеек в параобластях. Можно построить двумерную сетку, распределенную на  $M$  процессоров, а затем выполнить передекомпозицию на  $K$  параобластей ( $K \geq M$ ).

К особенностям метода FSM следует отнести:

- хорошее (по сравнению с методами подвижного фронта) описание зон, где сталкиваются фронты генерации узлов;
- отсутствие этапа построения предварительной сетки — триангуляции области, ограниченной контуром (как это делается в методах со вставкой узлов);
- отсутствие этапа восстановления граничных ребер, так как они изначально представлены в триангуляции;
- разбалансированность этапа узловой генерации по вычислительной работе процессоров. Так как формирование узлов происходит от границы области внутрь, то вычислительное ядро параобласти будет простаивать, пока на эту параобласть не придет фронт генерации;
- большая по отношению к методам упаковки сфер, но меньшая, чем в методах подвижного фронта (из-за двух этапов генерации), скорость построения сетки.

### Примеры построения двумерной неструктурированной треугольной сетки

На примере некоторых модельных задач продемонстрируем этапы генерации сетки в параллельном режиме. Как сказано выше, в качестве входной информации используется начальный контур области задачи. На рис. 2, 3 приведены примеры адаптивных фоновых сеток двух

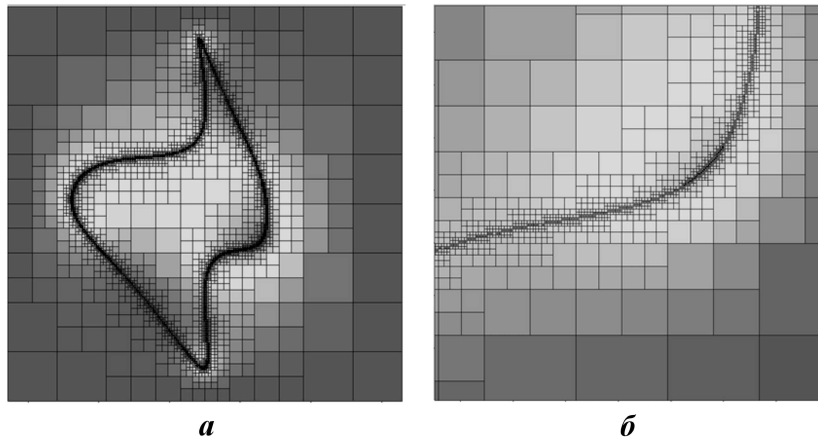


Рис. 2. Адаптивная сетка 1 для вычисления размерной функции (а) и ее увеличенный фрагмент (б)

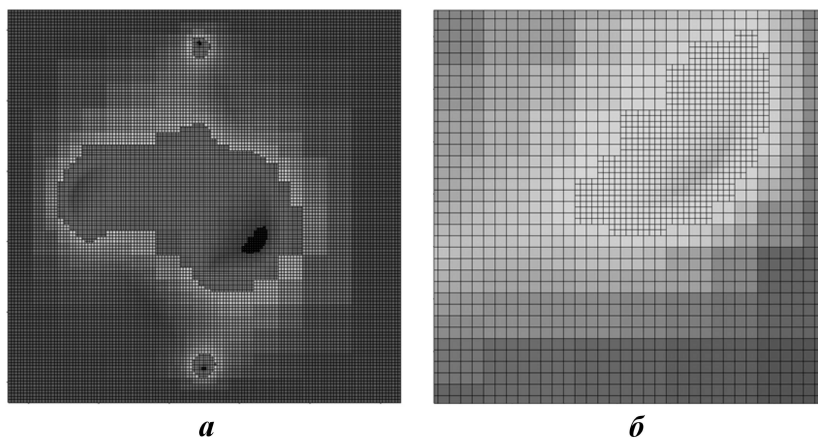


Рис. 3. Адаптивная сетка 2 для выполнения триангуляции (а) и ее увеличенный фрагмент (б)

типов: на рис. 2 — сетка 1, на которой вычисляется размерная функция, на рис. 3 — сетка 2, построенная на основании сетки 1 и используемая при триангуляции области.

На рис. 4, а (см. также цветную вкладку) показаны точки начального контура и его декомпозиция. Результат генерации узлов представлен на рис. 4, б, а на рис. 4, в показана триангуляция полученного множества точек (форму параобластей задает декомпозиция фоновой сетки 2).

Параллельный генератор FSM тестировался на построении сеток в областях как с равномер-

ным, так и неравномерным разбиением границы. На рис. 5, а приведен начальный контур тестовой области с неравномерным разбиением границы, на рис. 5, б — фрагмент полученной сетки.

В таблице приведено время генерации неструктурированных сеток в тестовых областях с границей, разбитой на ребра с учетом и без учета кривизны. Приводится количество образованных точек и граней, время генерации сетки и ускорение, полученное от использования четырех процессорных ядер. Число точек в контуре составило несколько тысяч. Результаты

### Сравнение времени генерации сетки в различных режимах

Номер теста	Разбиение границы	Количество элементов		Время генерации, с		Ускорение
		точки	границы	1 ядро	4 ядра	
1	С учетом 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

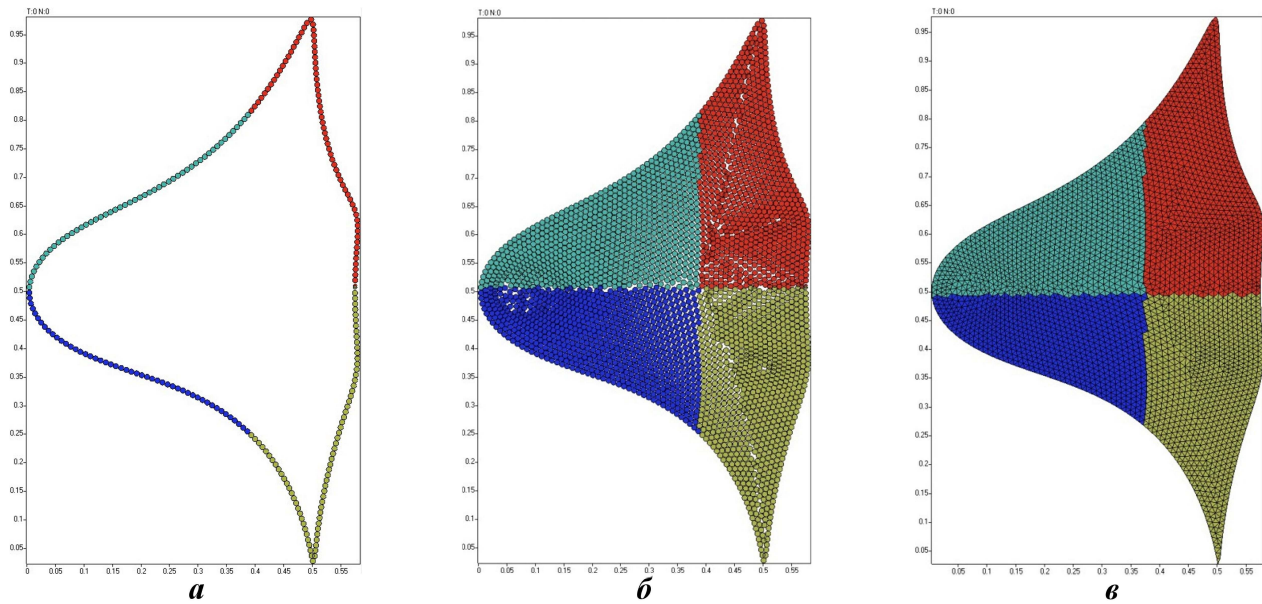


Рис. 4. Точки начального контура (а) и результаты нодальной генерации (б) и триагуляции (в)

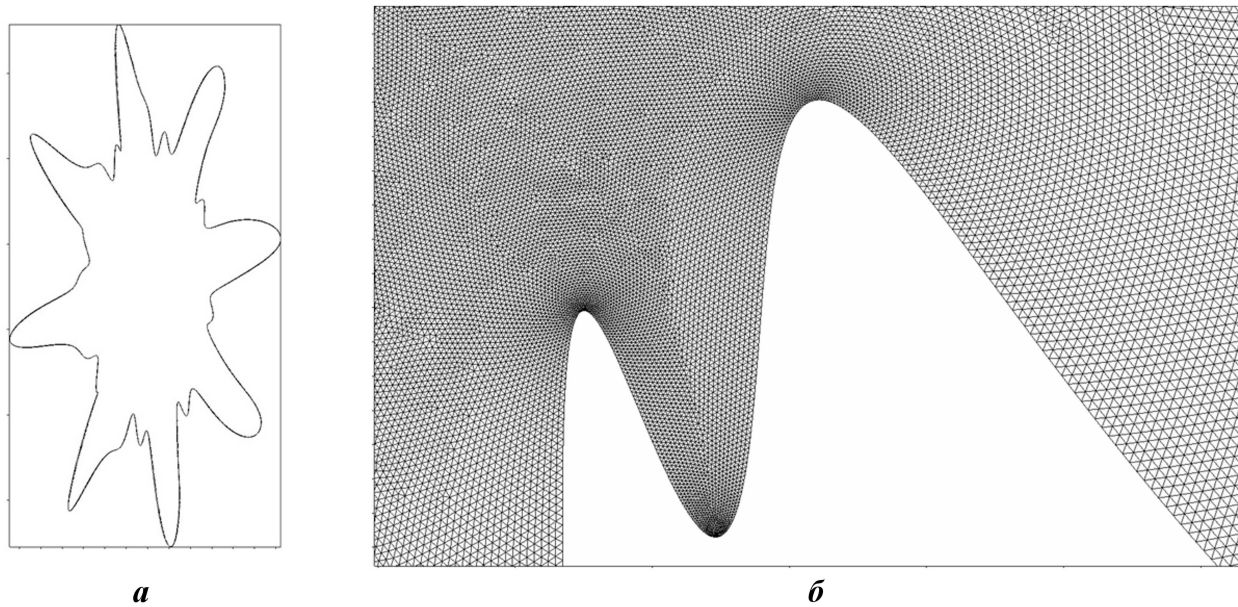


Рис. 5. Тестовый контур (а) и фрагмент полученной сетки (б)

были получены с использованием процессора Core i5 760 2.8 ГГц с 8 Гб RAM.

Из таблицы видно, что применение четырех ядер дало ускорение генерации сетки в среднем в 2,5 раза независимо от типа разбиения контура области.

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

### Построение объемной сетки

После построения двумерной (планарной) неструктурированной сетки в параллельном режиме выполняется построение трехмерной сетки для резервуара со множеством пластов. Так как рассчитываемые области в задачах моделирования процессов фильтрации в геологических объектах имеют, как правило, слоистую структуру, часто в коммерческих пакетах для построения объемной сетки используется так называемая

мый метод угловой точки (СР). Этот метод позволяет описывать разломы в пластах.

На рис. 6 приведен пример сетки, построенной по методу СР. Видно, что соседство на уровне ячеек может быть неструктурированным: сетка имеет жесткие ограничения по числу ячеек по направлениям  $I, J, K$ , но отсутствуют жестко закрепленные соседи, т. е. у ячейки  $(I, J, K)$  соседней может быть ячейка  $(I, J, K - 2)$ .

Если расчетная область имеет сильную разнотолщинность, то метод угловой точки может дать некачественный результат. На рис. 7 приведен пример области в виде клина с сеткой, построенной по методу СР, из которого видно, что на широкой стороне области сетка редкая, а на узкой — подробная.

При численном моделировании задач многофазной фильтрации в коммерческих программных продуктах, использующих неструктурированные сетки, для генерации сеток применяются преимущественно метод экструзии, метод вырезания и блочный метод. При применении первого метода образуется результирующая сетка, неструктурированная в плоскости  $XOY$ , но структурированная вдоль оси  $Z$ . При втором ме-

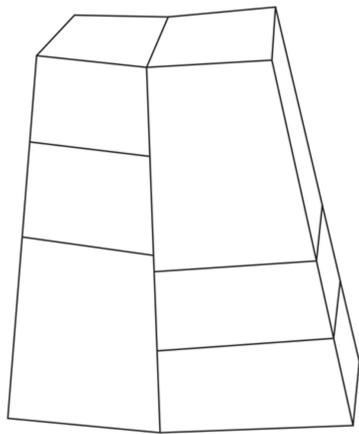


Рис. 6. Пример сетки, построенной по методу СР

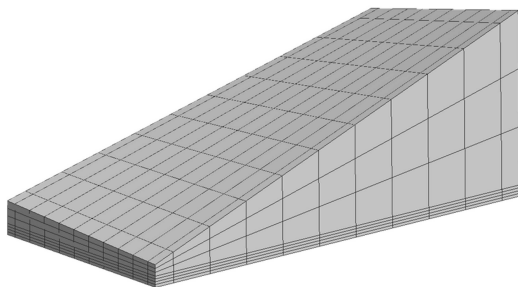


Рис. 7. Пример области в виде клина

тоде образуется результирующая сетка, неструктурированная по всем направлениям. Блочный метод может образовывать как полностью неструктурированную, так и структурированную сетку.

Авторами был разработан обобщенный метод угловой точки (GCP), который улучшает качества обычного метода СР. На рис. 8 приведен пример сетки, построенной этим методом.

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 аппликата 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. 9, 10 приведены примеры построения сеток методом GCP в разнотолщинных областях.

Программа генерации трехмерной сетки методом GCP в параллельном режиме включает следующие этапы:

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

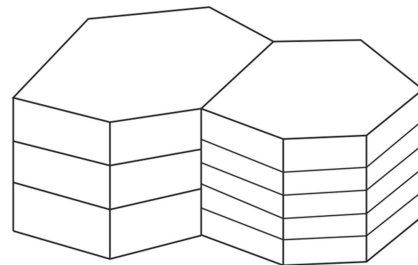


Рис. 8. Пример сетки, построенной методом GCP

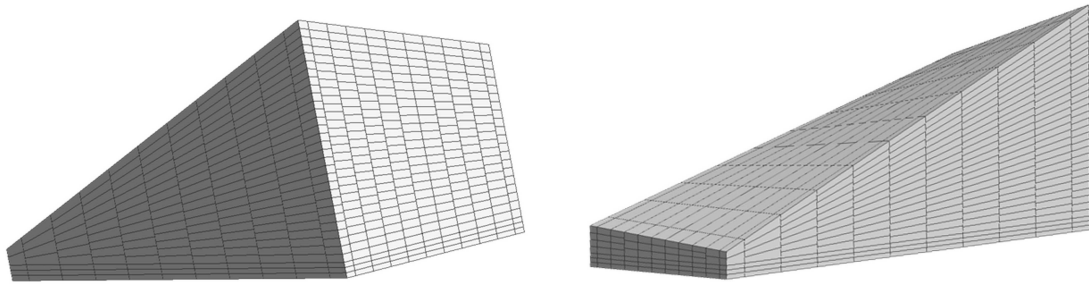


Рис. 9. Примеры сеток, построенных методом GCP в клиновидных пластах

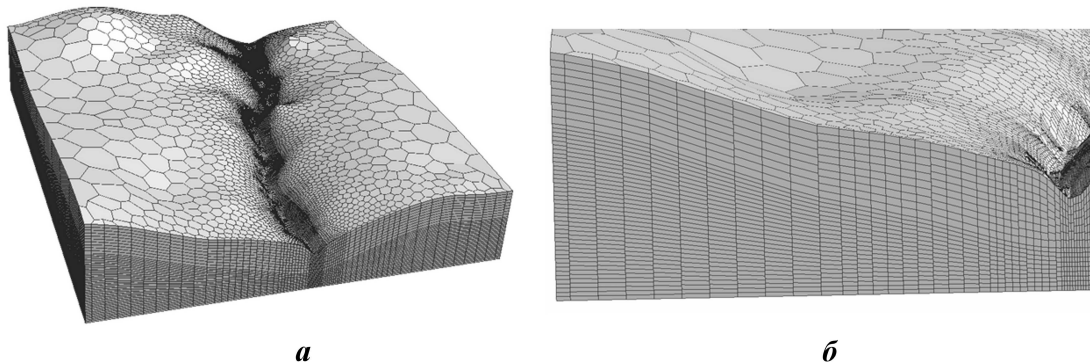


Рис. 10. Пример дискретизации методом GCP русла реки (а) с фрагментом сетки (б)

### Адаптация сетки

Часто в области задачи могут присутствовать объекты, требующие адаптации сетки. Это в первую очередь гидрогеологические объекты: скважины сложной структуры и траектории (кривые), поверхности разлома, объемные источники, отложения и т. д. Для адаптации к ним в определенных зонах полученной трехмерной распределенной сетки производится ее дробление.

Алгоритм дробления состоит из следующих шагов:

- получение начальной распределенной сетки;
- дробление ребер;
- дробление граней;
- дробление ячеек;
- обновление несчетных ячеек;
- передеконпозиция.

На рис. 11–13 приведены примеры сеток, адаптированных к определенным гидрогеологическим объектам.

На рис. 14, а (см. также цветную вставку) приведен пример деконпозиции области на шесть параобластей; одна из них показана на рис. 14, б.

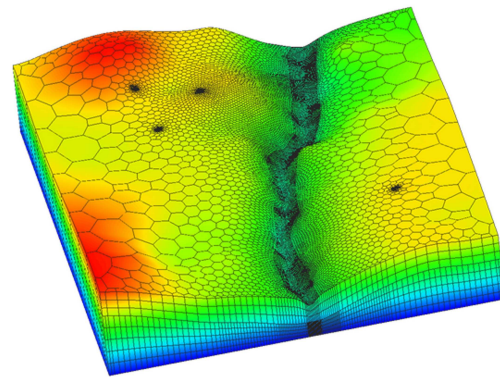


Рис. 11. Пример сетки с адаптацией к объектам

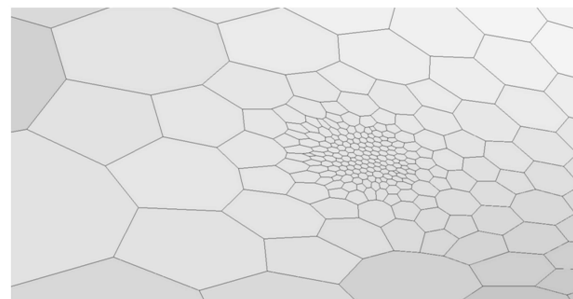


Рис. 12. Пример сетки вблизи скважины

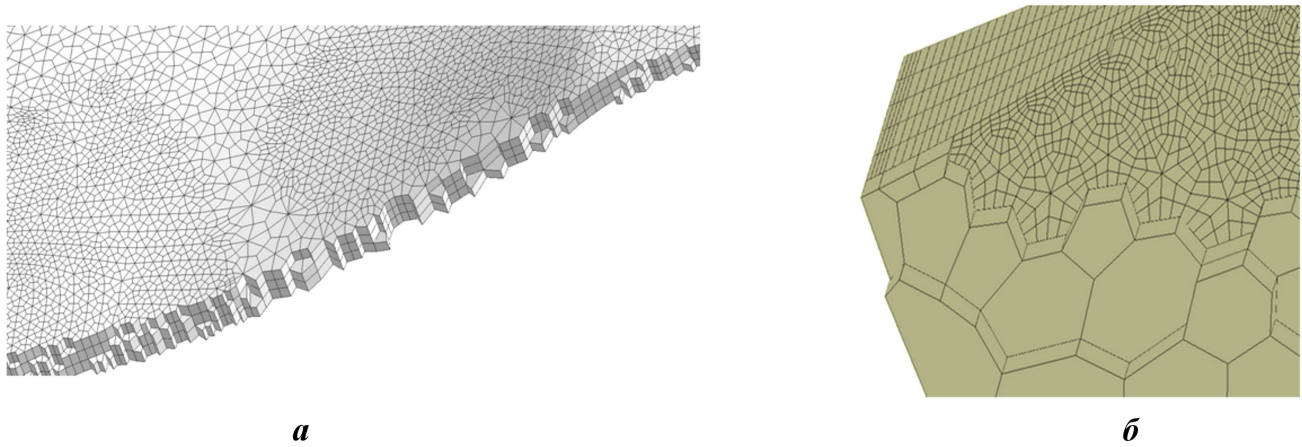


Рис. 13. Примеры сеток: *а* — с дроблением во всех пластах; *б* — с дроблением в некоторых пластах

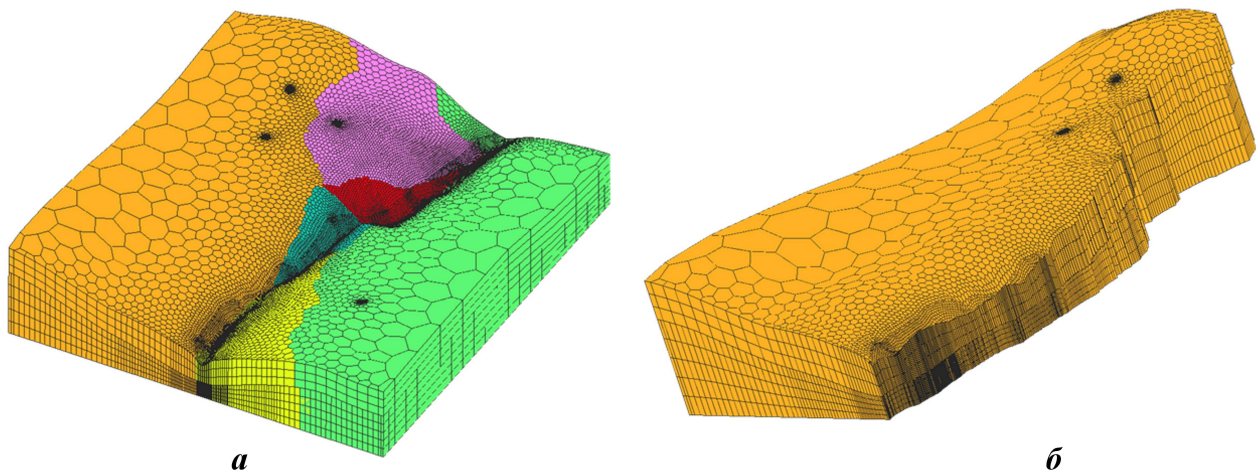


Рис. 14. Сетка, построенная с использованием шести процессорных ядер (*а*), и одна из ее параобластей (*б*)

С помощью представленных в работе алгоритмов для одной из задач фильтрации жидкости в пласте со скважинами в параллельном режиме с использованием 21 600 процессорных ядер была получена трехмерная многогранная сетка в ячеечно-граневом представлении с числом ячеек более 1,1 млрд. Время генерации сетки составило около 4 мин.

Разработанный специализированный параллельный сеточный генератор позволяет создавать и адаптировать в параллельном режиме сетки с несколькими миллиардами ячеек, 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.cmgroup.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., Бардина М. Н., Горев И. В. и др. Суперкомпьютерные технологии для нефтегазовой отрасли // Сб. статей Межд.



- конф. RAO/CIS Offshore. г. Санкт-Петербург, 2011 г. 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. 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. October 14—17, 2007. Springer-Verlag, 2007. P. 579—597. <http://www.imr.sandia.gov/papers/imr16/Casarotti.pdf>.
  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. Williamsburg, September 19—22, 2004. 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. October, 1997. 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.* Biting 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, 1995. P. 683—692. <http://www.cs.cmu.edu/tdafna/stoc95.ps.Z>.
  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.
  14. *Артемов А. Ю., Бартнев Ю. Г., Басалов В. Г. И др.* Библиотека решателей разреженных линейных систем // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2004. Вып. 7. С. 80—95.

Статья поступила в редакцию 28.04.14.

UNSTRUCTURED PRISMATIC DISCRETIZATION OF COMPLEX GEOLOGICAL STRUCTURES IN THE PARALLEL MODE / M. L. Sidorov, V. A. Pronin (FSUE RFNC-VNIIEF, Sarov, Nizhny Novgorod region).

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

*Keywords:* thermohydrodynamic simulator, unstructured grid, parallel grid generator, matching, frontal method of spheres, generalized angular point method, geological structures, NIMFA code, MPI paralleling.

---