

УДК 519.6
DOI 10.53403/9785951505071_2022_323

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ГЕНЕРАЦИИ ОБЪЕМНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНОГО ДРОБНО-АДАПТИВНОГО ШАБЛОНА В МЕТОДИКЕ ТИМ

В. А. Никитин

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В докладе приведено описание функционального блока, позволяющего генерировать объемную неструктурированную сетку на основе регулярного мелко-адаптивного шаблона. Модуль может использоваться как на этапе подготовки задачи к расчету, так и во время счета задачи для перестроения счетной сетки, динамически адаптированной под решение задачи. Приведено описание алгоритма работы генератора. Также приведен результат внедрения модуля в методику ТИМ.

Ключевые слова: генератор объемной сетки, неструктурированные сетки, мелко-адаптивный шаблон, методика ТИМ.

При математическом моделировании физических процессов методом конечных разностей генераторы сеток играют ключевую роль. Они используются как для подготовки сетки для задачи на старте, так и в ходе проведения расчета, перестраивая искаженную сетку, на которой дальнейший счет невозможен либо ее использование приводит к возрастанию времени проведения расчета.

Методика ТИМ[1] предназначена для решения многомерных нестационарных задач механики сплошной среды на неструктурированных подвижных сетках произвольного вида. По этой методике проводятся сложные расчеты в трехмерной постановке в лагранжевых переменных, связанных с вихревыми и струйными течениями. Такие расчеты приводят к большим деформациям вещества, что в свою очередь искажает сетку в трех направлениях (рис. 1).

Для корректировки сетки на протяжении всего расчета в методике ТИМ реализован широкий набор алгоритмов, которые позволяют проводить расчеты с автоматическим контролем состояния и поддержания качества сетки. Но все они работают локально и при большом количестве исправляемых элементов заметно увеличивают время счета задачи. В таких случаях целесообразнее построить новую сетку со сгущением в локальных зонах (там, где это необходимо для корректного описания решения) и выполнить на нее переинтерполяцию физических величин.

Анализ существующих в математическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ генераторов неструктурированных сеток, использующих аналогичный подход [2–3], показал, что для внедрения их в методику ТИМ необходимо провести работу по отчуждению функционала от программ, в которые эти генераторы внедрены. Оценка работ по отчуждению оказалась сравнимой с реализацией генератора с нуля. Так же нет уверенности, что работу имеющихся генераторов возможно реализовать в параллельном режиме с использованием интерфейса MPI.

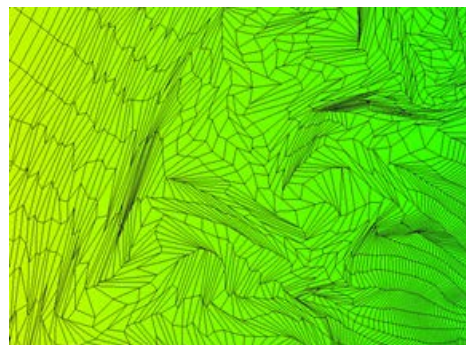


Рис. 1. Искраженная сетка

Для решения описанной проблемы для методики ТИМ создан модуль, позволяющий генерировать объемную неструктурированную сетку, как в ручном режиме с заданием требуемых параметров при подготовке сетки для проведения расчета, так и в автоматическом, когда подготовка параметров генерации сетки проводится без участия пользователя на основе данных об исходной сетке.

Модуль генерации объемной неструктурированной сетки на основе регулярного дробно-адаптивного шаблона позволяет создавать сетку, состоящую из многогранных ячеек, имеющих форму параллелепипедов. Каждая из шести сторон ячейки может быть представлена одной или четырьмя гранями, в зависимости от условий формирования соседних ячеек. Области сгущения сетки задаются с помощью набора контрольных объемов или на основе данных об исходной сетке. Контрольный объем представляет собой геометрическую фигуру в пространстве, внутри которой указан требуемый размер, предъявляемый к генерируемым ячейкам. Реализовано шесть типов контрольных объемов:

- параллелепипед (рис. 2);

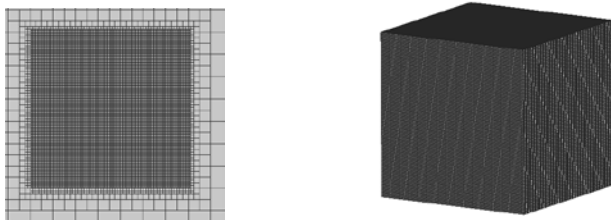


Рис. 2. Построение объема в виде параллелепипеда

- цилиндр (рис. 3);

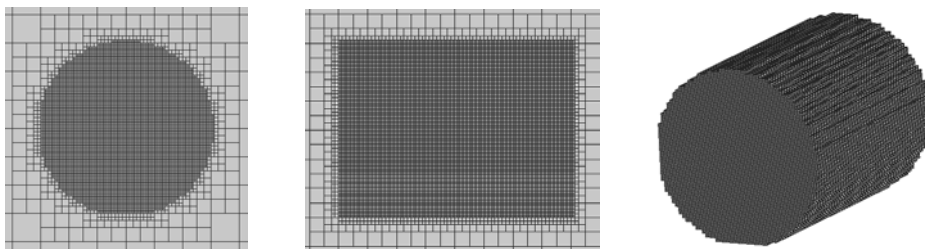


Рис. 3. Построение объема в виде цилиндра

- усеченный конус (рис. 4);

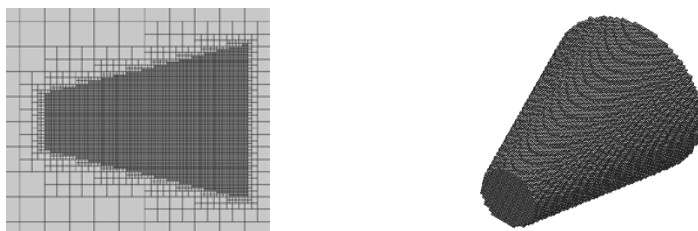


Рис. 4. Построение объема в виде конуса

- сфера (рис. 5);

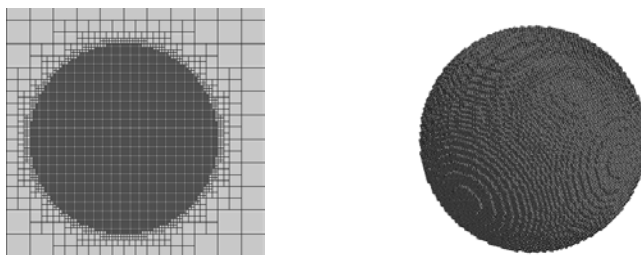


Рис. 5. Построение объема в виде сферы

- труба (рис. 6);

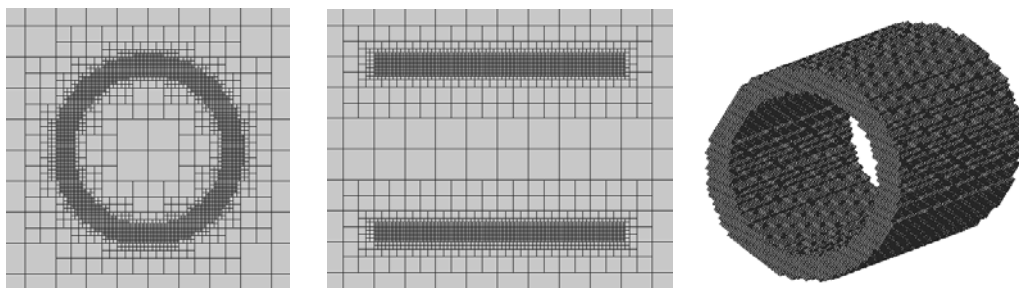


Рис. 6. Построение объема в виде трубы

- комбинированный контрольный объем (рис. 7).

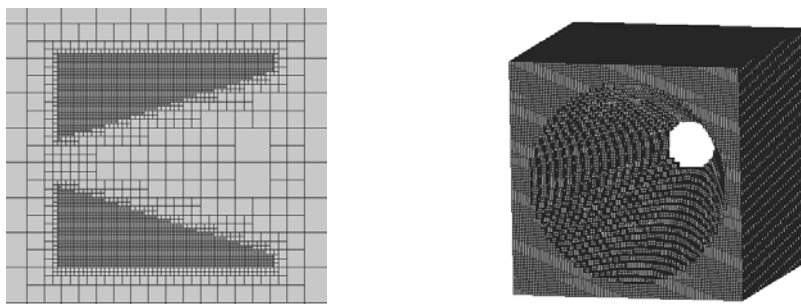


Рис. 7. Построение объема в виде комбинации объемов

При генерации сетки допускается любое количество и сочетание контрольных объемов (рис. 8).

Возможно пересечение и наложение контрольных объемов. В этом случае в пространстве пересечения алгоритм работы модуля будет стремиться к созданию ячеек с наименьшим требуемым размером из пересекаемых контрольных объемов.

Для работы модуля необходимо задать следующую информацию:

1) Габарит, в котором необходимо построить сетку. Габарит указывается заданием минимальной и максимальной точки пространства.

2) Базовый размер ячейки – требуемая длина ребра ячейки первоначальной сетки. То есть, сетки с которой начинается работа модуля.

3) Номера граничных условий – номера, которые заносятся в информацию о гранях, лежащих на внешних поверхностях генерируемой сетки.

4) Набор контрольных объемов, которые задают область пространства со своей геометрией и требуемой в этой области размером ячеек:

- Параллелепипед – задается как габарит, т. е. минимальной и максимальной точками пространства.
- Цилиндр – задается двумя точками пространства, формирующих ось цилиндра, и радиусом основания.
- Конус – задается двумя точками пространства, формирующих ось конуса, и двумя радиусами оснований.
- Сфера – задается координатами центра и радиусом.

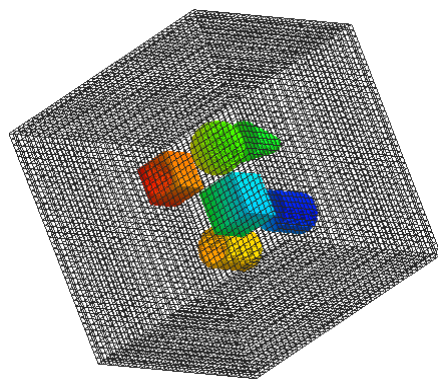


Рис. 8. Пример построения различных контрольных объемов

- Труба – задается двумя точками пространства, формирующих ось трубы, и внешним и внутренним радиусами основания.
- Комбинированный контрольный объем – задается двумя типами контрольных объемов. Внутри первого заданного объема строится адаптивная сетка с требуемым размером до тех пор, пока не встретится второй заданный объем. Адаптивная сетка внутри второго контрольного объема не строится.

Генерация объемной сетки разбивается на два этапа: генерация трехмерной регулярной сетки с возможностью вставки адаптивной сетки в ячейки и преобразование регулярной сетки в нерегулярный формат на этапе записи файла-разреза в формате ЕФР [4].

Этап генерации трехмерной регулярной сетки разбивается на несколько шагов. На первом шаге формируется матричная сетка по заданным параметрам. Выбор такого формата представления сетки обусловлен простотой поиска соседей для элементов сетки (узлов и ячеек), а также минимальным набором дополнительной информации для доступа к элементам.

Следующим шагом проводится анализ пересечения каждой ячейки матричной сетки с набором заданных контрольных объемов. Если ячейка имеет пересечение с одним из объемов, проводится анализ на необходимость дробления этой ячейки. То есть, происходит сравнение размера текущей ячейки с требуемым размером в контрольном объеме. Если ячейка проходит по критерию, то для нее вызывается процедура дробления. Как такового дробления не происходит, т. е. матричная сетка никаких изменения не претерпевает. Вместо этого формируется новая, аналогичная исходной, матричная сетка, габаритами и местоположением в пространстве совпадающая с обрабатываемой ячейкой. Размерность сетки $2 \times 2 \times 2$ ячеек. В ячейку записывается ссылка на новую сетку. Нумерация узлов ячейки согласовывается с крайними узлами новой сетки. Для новой сетки также формируется информация о соседних ячейках исходной сетки и аналогичных матричных сетках в этих ячейках.

После обработки всех ячеек исходной сетки формируется набор матричных сеток, который образует адаптивность первого уровня. Далее анализируются ячейки из этого набора сеток на пересечение с контрольными объемами. Если есть ячейка, удовлетворяющая критериям дробления, то для нее, аналогично описанному выше методу, формируется матричная сетка. Таким образом формируется набор матричных сеток второго уровня адаптивности.

Третий и последующий уровни адаптивности формируются аналогично. Количество уровней адаптивности не ограничено (рис. 9).

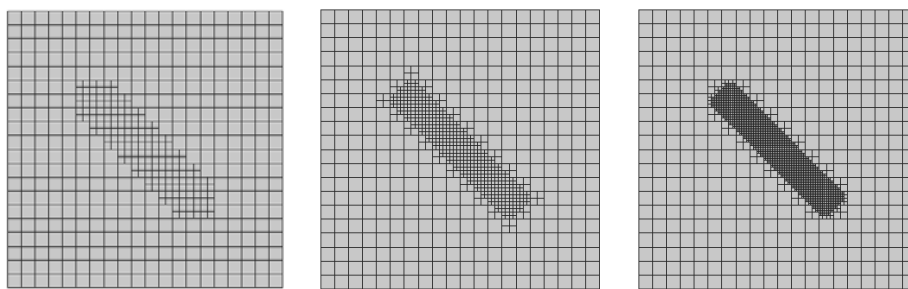


Рис. 9. Формирование первых трех уровней адаптивности

После построения всех уровней происходит сглаживание переходов между уровнями адаптивности. Для этого анализируются все «не подробленные» ячейки регулярной адаптивной сетки. Для ячейки формируется список соседей всех уровней, которые соседствуют с обрабатываемой через грань. Анализируются уровни адаптивности каждой ячейки из этого списка.

Если в списке есть ячейка с уровнем адаптивности превышающий уровень обрабатываемой ячейки больше чем на один, то обрабатываемая ячейка дробится аналогично описанному выше методу. Такой анализ проводится до тех пор, пока разница между «не подробленными» ячейками не будет превышать один уровень адаптивности (рис. 10).

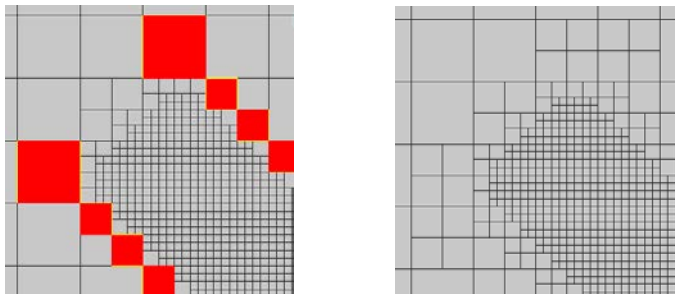


Рис. 10. Формирование первых трех уровней адаптивности

В результате образуется объемная сетка в матричном адаптивном представлении (рис. 11)

Формирование неструктурированной объемной сетки происходит в формате ЕФР на стадии записи файла-разреза. Для приведения регулярной адаптивной сетки к требуемому формату необходимо сформировать информацию о гранях – номера разделяемых ячеек и список узлов. Для ячейки формируется список граней, из которых она состоит.

На первом шаге проводится нумерация всех «не подробленных» ячеек всех уровней адаптивности. Таким образом, при формировании информации о гранях в поля номеров разделяемых ячеек сразу пишется конечная информация.

При формировании списка узлов для грани необходимо соблюдать правильный порядок следования узлов. Согласно формату ЕФР узлы грани должны идти в порядке против хода часовой стрелки, если смотреть на эту грань из первой разделяемой ячейки.

Обработка сетки начинается с последнего уровня адаптивности. Таким образом ячейки меньшего размера формируют набор граней, относящийся к одной из сторон более крупной ячейки. Это позволяет экономить время на вычислениях соседства между ячейками и определением количества граней для конкретной ячейки (рис. 12).

Так как преобразование происходит с матричной сетки, то при формировании узлов координаты вычисляются через номера этих узлов в сетке и смещение относительно минимальной точки габарита сетки.

Сформированная сетка записывается в файл формата ЕФР-3.

На текущий момент основной задачей модуля генерации неструктурированной трехмерной сетки, – это создание новой сетки на основе данных о старой деформированной сетке в методике ТИМ-3D. В ходе счета задачи алгоритмы, анализирующие качество сетки, дают сигнал о необходимости перестроения счетной сетки. Производится подготовка параметров для генерации новой сетки: вычисляются габариты ячеек старой сетки и определяется размер для новых ячеек. Для каждой ячейки перестраиваемой сетки формируется контрольный объем «Параллелепипед», который эквивалентен габариту ячейки. В качестве требуемого размера задается исходный размер ячейки. Набор контрольных объемов передается в модуль генерации сетки. Так же в модуль передаются габариты задачи и базовый размер ячейки исходной сетки.

После окончания работы генератора результат сохраняется в файл формата ЕФР-3, который передается в методику ТИМ-3D для загрузки и переинтерполяции величин со старой сетки на новую (рис. 13).

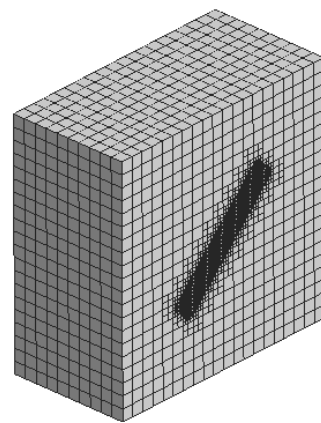


Рис. 11. Результат генерации матричной адаптивной сетки

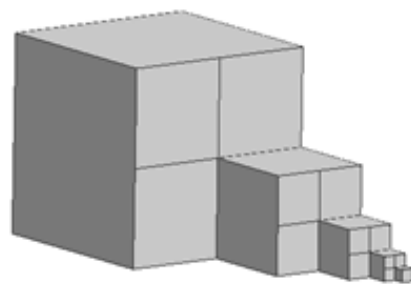


Рис. 12. Формирование ячеек

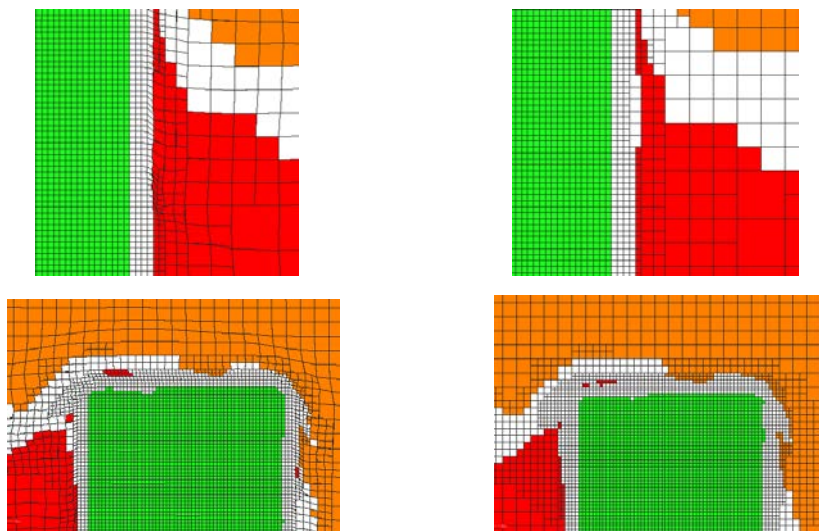


Рис. 13. Фрагмент перестроения сетки (слева – перестраиваемая, справа – новая)

Все операции по генерации новой сетки проводятся полностью в автоматическом режиме без остановки счета задачи.

Для оценки работоспособности модуля было проведено тестирование на различных задачах с помощью методики ТИМ-3D.

В первой задаче тестирование проводилось на ПЭВМ с 16 Гб оперативной памяти и процессором Intel Core i7 2.93 GHz. Параметры перестраиваемой сетки: 2466883 ячеек, 3 уровня адаптивности. При работе генератора исходная сетка состояла из 129600 ячеек. В ходе построения адаптивных уровней прибавилось еще 2689344 ячеек. Из них 523252 первого уровня, 835308 – второго и 1412000 – третьего. Время построения матричной адаптивной сетки около 10 с. Время конвертации в неструктурированный формат – около 8 с. Время записи итоговой сетки в файл формата ЕФР – около 18,5 с. Общее время работы модуля – 37,2 с. Затраченный объем оперативной памяти не превышает 2,5 Гб.

Во второй задаче тестирование проводилось на ЭВМ с 54 Гб оперативной памяти. Цель теста – анализ зависимости времени работы модуля от количества генерируемых ячеек. Построение сетки проводилось, начиная с 60 млн ячеек с пятью уровнями адаптивности. Анализ результатов показал, что время построения линейно зависит от числа ячеек (рис. 14).

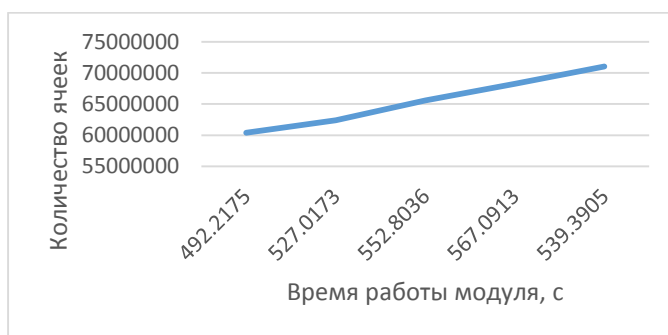


Рис. 14. График зависимости времени работы модуля от количества ячеек

Заключение

Разработанный функциональный блок расширил возможности методики ТИМ, позволяя генерировать объемную неструктурированную сетку, как в ручном и автоматическом режимах. В автоматическом режиме методика ТИМ получила возможность проводить сложные расчеты с перестройкой всей счетной сетки без остановки счета задачи.

В ближайших планах реализовать работу функционального блока в параллельном режиме с использованием интерфейса MPI.

Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 2. С. 37–52.
2. Смолкина Д. Н., Борисенко О. Н., Черенкова М. В., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Попова Н. В., Турусов М. Р. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ "ЛОГОС" // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 25–39.
3. Потехина Е. В., Ребров С. В., Логинов Д. В. Методы расчета трехмерных разностных сеток и распределения частиц в препроцессоре 3D-РНД // Труды международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2009» – 2009. С. 158–164.
4. Олесницкая К. К., Антипин И. А., Петрова М. А. Коллективный доступ к файловым данным на вычислительных системах с различной архитектурой в библиотеке ЕФР // XVII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: Сборник докладов. Саров, 15–19 октября 2018.

A MODULE IN THE *TIM* CODE FOR GENERATION OF 3D UNSTRUCTURED GRIDS ON THE BASE OF A REGULAR ADAPTIVE REFINEMENT PATTERN

V. A. Nikitin

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper describes a module that allows generating 3D unstructured grids on the base of a regular adaptive refinement pattern. This module can be used both in the stage of preparing data to solve the problem and in the stage of reconstructing the computational grid dynamically adapted to the problem solution. The generator operation algorithm is described. The result of the module incorporation into the TIM code is given.

Key words: a 3D grid generator, unstructured grids, an adaptive refinement pattern, the TIM code.