

Визуализация результатов расчетов газодинамических течений на смешанных локально-адаптивных сетках

С.А. Суков¹

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук

¹ ORCID: 0000-0002-0667-6955, ssoukov@gmail.com

Аннотация

В статье обсуждается проблема визуализации результатов численного моделирования газодинамических течений на смешанных локально-адаптивных сетках с определением значений переменных в центрах масс расчетных ячеек. Описан алгоритм преобразования иерархических адаптивных сеток, состоящих из тетраэдров, треугольных призм, четырехугольных пирамид и гексаэдров, к конформному виду. Идея предлагаемого алгоритма состоит в декомпозиции подмножества сеточных ячеек с висячими узлами на ребрах на тетраэдры и пирамиды с добавлением новых вершин в центры масс многогранников. Интерполяция значений сеточных функций выполняется на основе дискретного аналога формулы интегрального представления градиента. Применение алгоритма позволяет отображать поля сеточных функций программными средствами визуализации данных на нерегулярных сетках. На примере визуализации стационарного сверхзвукового течения у поверхности сферы с использованием пакета Tecplot продемонстрированы преимущества и недостатки различных вариантов представления данных. Среди них отображение результатов на сетке с висячими узлами без изменения топологии, перенос решения на стартовую конформную сетку, визуализация полиэдров и преобразование адаптивной сетки к конформному виду с декомпозицией ячеек и интерполяцией данных.

Ключевые слова: вычислительная газовая динамика, визуализация данных, смешанные сетки, адаптация сеток.

1. Введение

В современной вычислительной газовой динамике для повышения точности результатов и снижения времени расчета применяются методы статической и динамической адаптации сеток. Адаптивная сетка перестраивается в процессе моделирования с учетом особенностей структуры течения. Например, сгущается к поверхности ударной волны. Первые научные работы с описанием технологии и результатов расчетов на адаптивных сетках были представлены более четверти века назад [1, 2]. Тем не менее, проблемы разработки новых, а также оптимизации и применения известных методов адаптации представляют интерес и в настоящее время [3, 4].

По частоте упоминаний в литературе лидируют подходы, основанные на иерархическом дроблении и обратном объединении элементов. Самый распространённый пример сеток данного типа - ортогональные решетки с топологией восьмеричного дерева, которые используются как непосредственно в расчетах [5], так и для решения сопутствующих прикладных задач [6]. Практическим преимуществом использования иерархических сеток в вычислительной газовой динамике является логическая простота реализации процедур динамической адаптации для расчетов нестационарных течений, когда при фиксированном общем числе ячеек зона сгущения произвольным образом движется в пределах расчетной области. Иерархическая топология формально не имеет ограничений на разброс характерных размеров

смежных по граням элементов-листьев. Однако в расчетах задач математической физики разница уровней вложенности соседних расчетных ячеек, как правило, ограничивается единицей. То есть, например, лист восьмеричного дерева всегда имеет либо одного либо четырех соседей по каждой грани.

В случае моделирования течений у поверхностей сложной формы для пространственной дискретизации системы газодинамических уравнений используются смешанные сетки. Они состоят из так называемых базовых многогранников (тетраэдр, треугольная призма, четырехугольная пирамида, гексаэдр) и полипризм с полиэдрами. Полипризмы и полиэдры генерируются путем преобразования вспомогательных сеточных блоков из треугольных призм и тетраэдров [7].

Отображение смешанных сеток и анализ привязанных полей сеточных функций поддерживаются большинством пакетов программ постпроцессинга и визуализации научных данных. Топология базовых многогранников описывается либо явно с указанием типа ячейки (формат VTK [8]), либо используется формат представления гексаэдров с вырожденными ребрами и гранями (пакет Tecplot [9]). Тогда, например, треугольная призма задается как гексаэдр на шести узлах сетки с двумя стянутыми в точки противоположными ребрами. Описание топологии полиэдральной сетки, состоящей из произвольных многогранников, содержит ориентированные списки вершин плоских граней с добавлением индексов пары смежных по граням ячеек. Алгоритмы визуализации работают с заданными в узлах значениями сеточных функций, но форматы представления данных допускают определение значений газодинамических переменных как в узлах, так и в центрах сеточных элементов. В последнем случае интерполяция значений в узлы выполняется средствами визуализации на этапе считывания входных файлов.

Методы адаптации смешанных сеток и регулярных решеток совпадают по своей сути. Изотропная декомпозиция базовых многогранников выполняется с использованием фиксированных шаблонов разбиения (рис. 1). Новые вершины ставятся на середины ребер, в центры четырехугольных граней и в центры масс шестигранников. После измельчения тетраэдров, гексаэдров и призм появляется восемь элементов аналогичного типа. Четырехугольная пирамида разбивается на четыре тетраэдра и шесть пирамид. В полиэдральных зонах на первом шаге адаптации ячейки каким-либо образом делятся на базовые многогранники, к которым в дальнейшем применяются стандартные шаблоны декомпозиции. Реализация последнего подхода включена в коммерческий пакет программ Ansys Fluent (технология PUMA [10]).

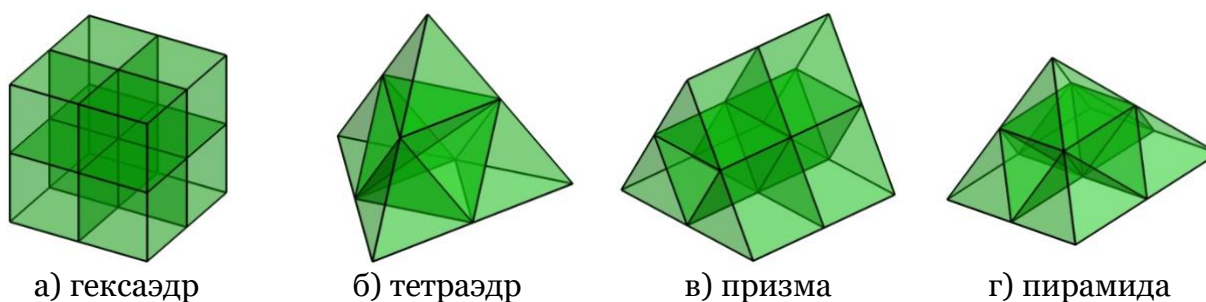


Рис. 1. Шаблоны разбиения ячеек адаптивной смешанной сетки.

Локальное измельчение ячеек приводит к появлению «висячих узлов». Чисто технически топология адаптивной сетки с висячими узлами может записываться в том же формате, что и топология неструктурированной конформной сетки. Но при этом граница смежных зон листовых ячеек разного уровня иерархии отображается как дополнительная внутренняя граница. На рис. 2 представлен пример визуализации адаптивной сетки для расчета обтекания баллистической модели (здесь и далее

иллюстрации получены инструментами пакета Tecplot). Появление внутренней границы приводит к разрывам линий уровня и изоповерхностей сеточных функций.

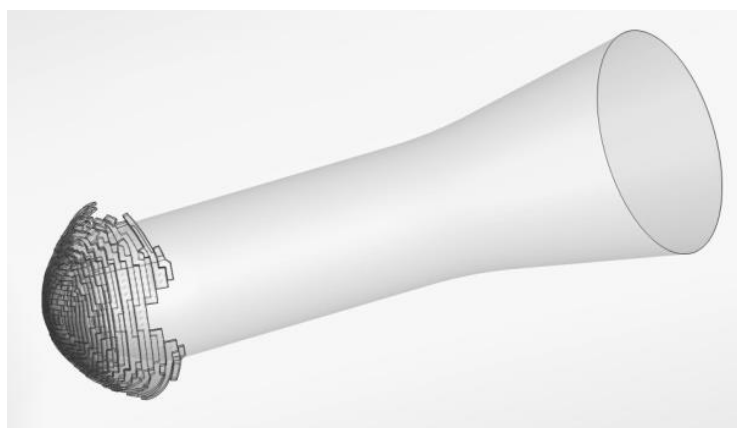


Рис. 2. Внутренняя граница при визуализации адаптивной сетки с висячими узлами.

Существует два варианта решения проблемы: разработка специальных алгоритмов визуализации, либо преобразование адаптивной сетки в конформную сетку, состоящую из полиэдров или базовых многогранников, с последующей визуализацией результатов средствами отображения данных на неструктурированных сетках. Обобщенный обзор методов и программных средств визуализации для адаптивных сеток приводится в [11]. По своим функциональным возможностям узко ориентированные приложения ожидаемо проигрывают более востребованным и распространенным пакетам программ визуализации данных на конформных сетках. Кроме того, используемый в вычислительном ядре формат представления геометрии, как правило, отличается от поддерживаемого визуализатором формата. Таким образом, для отображения картины решения необходима запись специальных файлов. Важный вопрос состоит в длительности поддержки и условиях сопровождения разработчиком специализированных программных продуктов. Поэтому вариант с преобразованием адаптивной сетки выглядит более универсальным с практической точки зрения, хотя и имеет схожие недостатки. Реализация подхода связана с разработкой алгоритма трансформации топологии и записью отдельных файлов для визуализации картины течения.

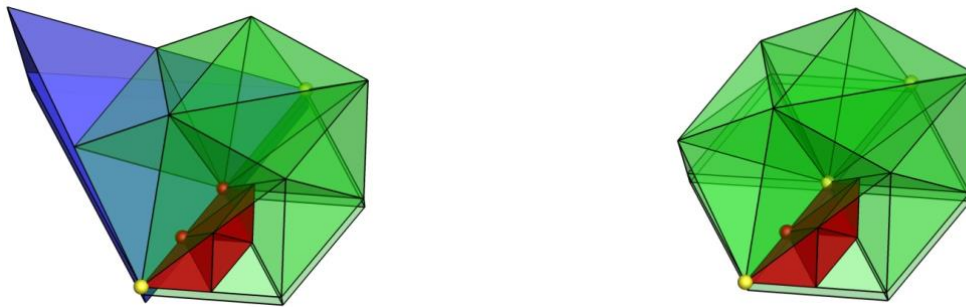
Один из известных методов преобразования адаптивной сетки, состоящей из базовых многогранников, представлен в [12]. Шаблон декомпозиции ячеек выбирается по числу и распределению находящихся на ее ребрах и гранях висячих узлов. Подход ориентирован в первую очередь на генерацию расчетной сетки, содержащей элементы правильной геометрической формы. Поэтому для некоторых конфигураций расположения вершин предлагается продолжить процедуру измельчения сеточных ячеек, что приводит к расширению зоны адаптации и многократной интерполяции значений. Код и программная реализация алгоритма отличаются сложной логикой преобразования элементов и большим объемом вычислений.

В настоящей работе описан ориентированный на визуализацию данных логически простой алгоритм преобразования иерархических адаптивных сеток с элементами типа тетраэдр, призма, пирамида и гексаэдр к конформному виду. Далее на примере задачи визуализации структуры стационарного сверхзвукового течения у поверхности сферы с использованием пакета Tecplot показаны преимущества и недостатки различных вариантов представления данных для отображения результатов расчетов на смешанных локально-адаптивных сетках.

2. Алгоритм преобразования адаптивной сетки

Алгоритм преобразования иерархической адаптивной сетки к конформному виду применим для смешанных сеток, состоящих из многогранников C_i четырех типов: тетраэдр, треугольная призма, четырехугольная пирамида и гексаэдр. Значения сеточных функций f_i считаются определенными в центрах масс элементов $x_i = (x_i, y_i, z_i)$. Топология обрабатываемой сетки должна соответствовать ограничению на разницу не более чем в один уровень вложенности между соседними по ребру листьями. То есть на ребре листовой ячейки может находиться не более одного висячего узла, а число ее соседей по каждой грани равно одной или четырем ячейкам. В противном случае сетка предварительно приводится к заданному виду.

На рис. 3а показан пример топологии адаптивной сетки, где на общем ребре двух ячеек (грани ячеек закрашены синим цветом, вершины общего ребра отмечены желтыми сферами) находятся два висячих узла (красные сферы). То есть по данному ребру граничат ячейки трех уровней иерархии, что противоречит ограничениям. По аналогии с [12] проблема решается равномерным измельчением ячеек верхнего уровня. В результате декомпозиции ребро делится на две части, только на одной из которых остается висячий узел (рис. 3б).

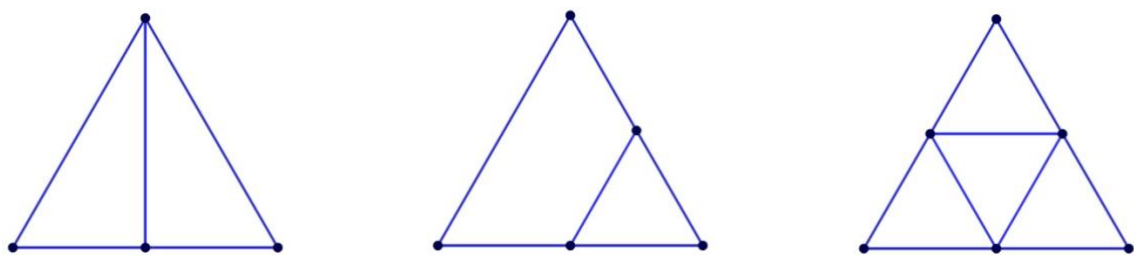


а) ребро с двумя висячими узлами

б) ребро с одним висячим узлом

Рис. 3. Приведение топологии сетки в соответствие ограничениям.

Суть предлагаемого алгоритма преобразования сетки состоит в последовательном согласованном разбиении ячеек с висячими узлами. Декомпозиция ячейки выполняется в два шага. На первом шаге происходит разбиение граней с висячими узлами. Фиксированные шаблоны декомпозиции треугольников и четырехугольников показаны на рис. 4 и рис. 5. Тип шаблона определяется по числу висячих узлов. Для четырехугольников с двумя висячими узлами дополнительно учитывается их относительное расположение: на смежных (рис. 5б) или на противоположащих (рис. 5в) ребрах. По итогам выполнения первого шага сеточная ячейка становится выпуклым многогранником с суммарным числом плоских граней от 5 до 30.



а) один висячий узел

б) два висячих узла

в) три висячих узла

Рис. 4. Шаблоны разбиения треугольных граней.

На втором шаге объем многогранника делится на пирамиды. Основаниями пирамид становятся поверхностные грани, а общей вершиной - новый сеточный узел,

расположенный в центре масс многогранника. В результате ячейка адаптивной сетки распадается на тетраэдры и четырехугольные пирамиды.

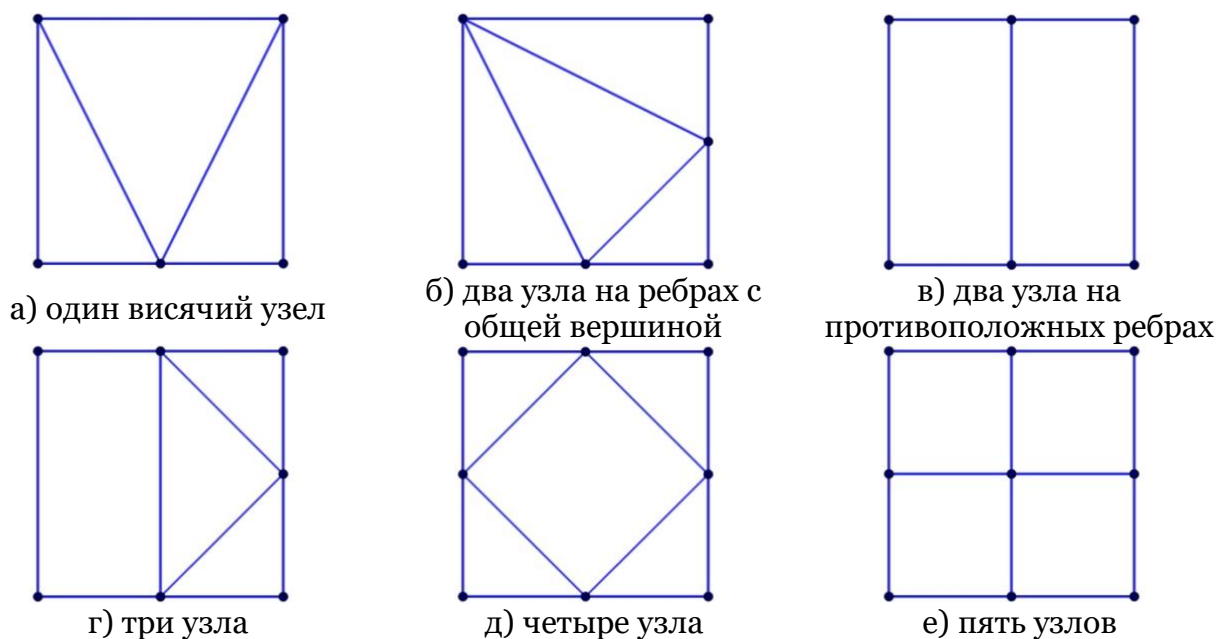


Рис. 5. Шаблоны разбиения четырехугольных граней.

На рис. 6 показаны иллюстрации примеров преобразования элементов. Тетраэдр с пятью узлами на ребрах делится на десять тетраэдров и две четырехугольные пирамиды (рис. 6а). Гексаэдр с двумя висячими узлами распадается на десять тетраэдров и три пирамиды (рис. 6б).

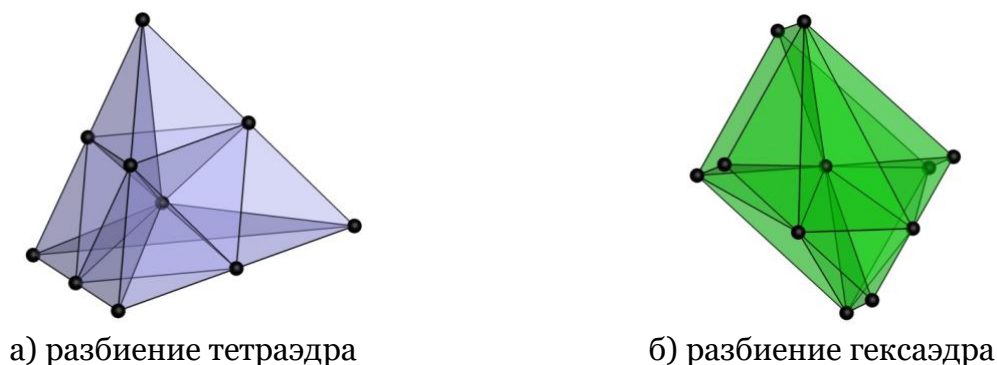


Рис. 6. Примеры преобразования сеточных ячеек.

Шаблоны декомпозиции граней однозначны. Поэтому вне зависимости от порядка обработки ячеек одного уровня иерархии их общая грань будет разбита на многоугольники одинаковым образом. Частные случаи декомпозиции граней совпадают с алгоритмами изотропного измельчения во время адаптации сетки. То есть шаблоны декомпозиции граней для случаев с максимальным числом висячих узлов (рис. 4в и рис. 5е) соответствуют вариантам разбиения граней со стороны четверок ячеек следующего уровня иерархии. Таким образом, по завершению декомпозиции ячеек с висячими узлами иерархическая адаптивная сетка будет преобразована к конформному виду.

Для вычисления значений переменных в центрах масс вложенных многогранников C_{ch} используется определенный на родительской ячейке C_p полином

$$f_{ch} = k_p^x(x_{ch} - x_p) + k_p^y(y_{ch} - y_p) + k_p^z(z_{ch} - z_p) + f_p.$$

Линейная реконструкция значений переменных отвечает условию консервативности интерполяции

$$f_p |C_p| = \sum f_{ch} |C_{ch}|,$$

где $|C_i|$ обозначен объем i -ой сеточной ячейки.

Коэффициенты полиномиальной реконструкции вычисляются на основе дискретного аналога формулы интегрального представления градиента

$$(k_i^x, k_i^y, k_i^z) = \frac{1}{|C_i|} \sum_{faces} f_{face} \mathbf{S}_{face}.$$

Здесь f_{face} обозначены значения функции в центрах масс плоских граней, геометрия которых задается внешними векторами площади \mathbf{S}_{face} .

Если ячейка C_i граничит с ячейкой C_j одинакового с ней или верхнего уровня иерархии, значение функции в центре их общей грани приравнивается среднему арифметическому значений функции в центрах ячеек

$$f_{face} = \frac{1}{2} (f_i + f_j).$$

В случае, когда с противоположной стороны грани ячейки C_i находятся четыре ячейки $C_{j_0}, C_{j_1}, C_{j_2}, C_{j_3}$ следующего уровня разбиения, для осреднения используется формула

$$f_{face} = \frac{\sum_{m=0,1,2,3} f_i + f_{j_m}}{8}.$$

Значение функции в центре грани, находящейся на границе расчетной области, приравнивается значению в центре ячейки.

Алгоритмы декомпозиции ячеек и переноса значений сеточных функций хорошо согласуются с форматом представления топологии адаптивных сеток. Таким образом, программная реализация подхода не требует инициализации дополнительных геометрических параметров или отношений связности ячеек. Выбранный метод интерполяции обеспечивает достаточную точность отображения картины течения и определения его характерных параметров (например, расстояния до отошедшей ударной волны) инструментами программ визуализации. Однако для минимизации ошибок до уровня результатов внутренних алгоритмов анализа решения вычислительного ядра более предпочтительно использование методов вычисления градиентов повышенного порядка точности [13] с последующим определением значений переменных в узлах сетки.

3. Вычислительный эксперимент

Особенности применения различных подходов к представлению данных для визуализации результатов расчетов на локально-адаптивных смешанных сетках с использованием функционала пакета Tecplot рассмотрены на примере сверхзвукового течения у поверхности сферы ($M = 2, Re = 300$). Постановка задачи, методика расчета, структура и параметры течения подробно обсуждаются в [13].

Двусвязная расчетная область представляет собой объединение цилиндра и сферы, внутри которого находится обтекаемое тело (рис. 7а). На этапе генерации стартовой сетки расчетная область делится на несколько десятков доменов с общими плоскими и криволинейными гранями. Зона разрешения пограничного слоя заполняется тетраэдрами и призмами. На выходе к внешним границам расчетной области сетка состоит из тетраэдров и гексаэдров. В оставшейся части пространства решения задачи регулярным образом чередуются гексаэдральные, тетраэдральные и призматические сеточные блоки. Четырехугольные пирамиды используются для стыковки треугольных граней тетраэдров с четырехугольными гранями гексаэдров и призм. Общая размерность конформной сетки составляет $1.3 \cdot 10^5$ вершин и $2.7 \cdot 10^5$ элементов.



а) расчетная область б) вид адаптивной сетки в сечении $Y = 0$
 Рис. 7. Геометрия расчетной области и структура адаптивной сетки для расчета сверхзвукового обтекания сферы.

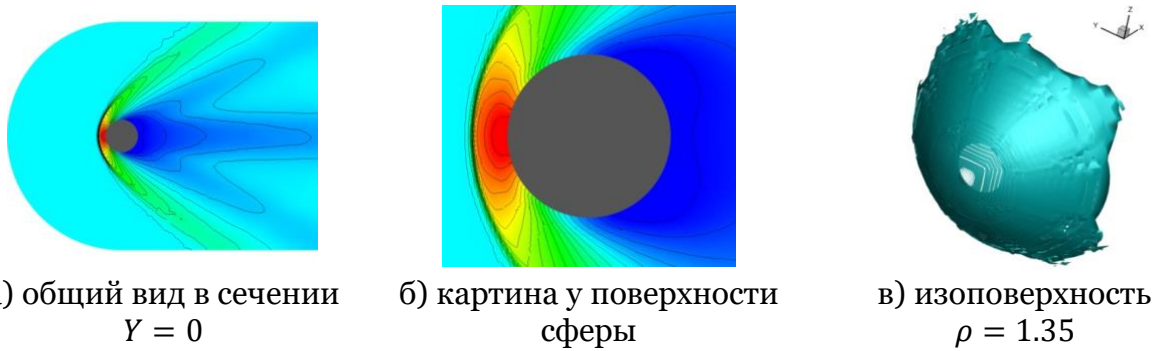
В процессе моделирования сетка дважды адаптируется. Подобранный экспериментально комбинация критериев адаптации позволяет перестраивать сетку к особенностям течения без привязки к геометрическим координатам. Измельчение элементов выполняется вблизи изоповерхности локального числа Маха $M = 1$ (переход от сверхзвуковой к дозвуковой скорости течения), вдоль границ рециркуляционной зоны, а также в областях максимальных градиентов давления и модуля скорости. Структура финальной адаптивной сетки показана на рис. 7б. Ячейки первого уровня измельчения закрашены желтым цветом, ячейки второго уровня разбиения отмечены красным цветом. Зона адаптации проходит через область разрешения пограничного слоя и пересекает границы сеточных блоков. В результате локального измельчения общее число расчетных ячеек увеличивается в 2.37 раза. Размерность сетки с висячими узлами составляет $4.5 \cdot 10^5$ вершин и $6.5 \cdot 10^5$ элементов.

Сравнительная визуализация картины течения выполняется для четырех вариантов представления данных:

- визуализация значений, заданных в центрах масс элементов адаптивной сетки;
- перенос значений в центры масс ячеек стартовой сетки;
- преобразование сетки с висячими узлами в полиэдральную сетку;
- преобразование адаптивной сетки с разбиением элементов.

Выбор перечисленных подходов обусловлен возможностью дальнейшего использования пакетов программ визуализации параметров решений, заданных на конформных сетках.

Прямая визуализация картины течения на адаптивной сетке без каких-либо преобразований, очевидно, является самым простым подходом к отображению результатов. Как отмечено во введении, основная проблема его применения связана с появлением искусственных внутренних границ, наличие которых приводит к разрывам линий уровня и изоповерхностей. На рис. 8а показано распределение плотности в сечении $Y = 0$. Используется непрерывная цветовая палитра с дополнительным выделением двадцати одной линии уровня. На общем виде изолинии выглядят непрерывными. При масштабировании изображения (рис. 8б) можно заметить незначительные разрывы, которые не имеют принципиального влияния в плане качества отображения результатов. Однако построенная на сетке с висячими узлами трехмерная изоповерхность $\rho = 1.35$ (рис. 8в) состоит из множества несвязных частей, находящихся на заметном расстоянии друг от друга. В данном случае уровень $\rho = 1.35$ не относится к характерным параметрам течения и используется исключительно как наиболее наглядный пример для демонстрации проблем визуализации результатов. Некорректное отображение изоповерхности объясняется тем, что она проходит через границы зон сеточных ячеек разного уровня измельчения. Таким образом, подход вполне применим для мониторинга промежуточных результатов расчетов, но не может быть использован на этапе визуализации окончательных результатов и детального анализа картины течения.



а) общий вид в сечении
 $Y = 0$

б) картина у поверхности
сферы

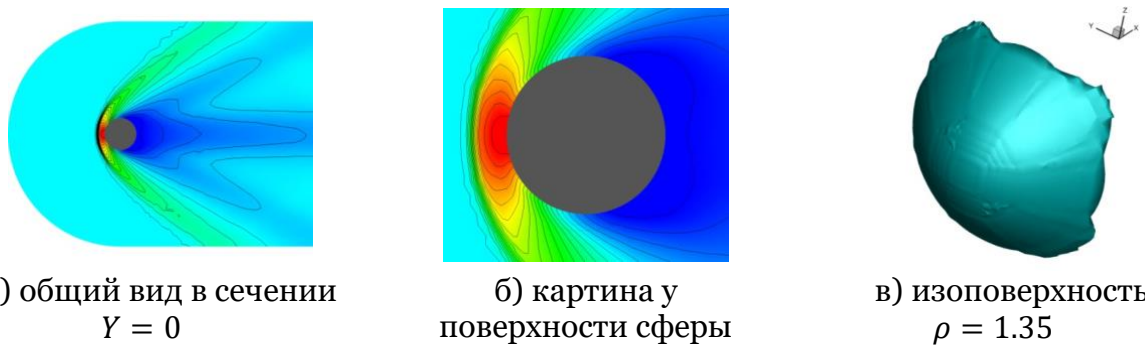
в) изоповерхность
 $\rho = 1.35$

Рис. 8. Визуализация распределения плотности на адаптивной сетке с висячими узлами.

Первый способ устранения разрывов заключается в переносе решения на начальную конформную сетку. В соответствии с методом контрольного объема значения сеточных функций в родительской ячейке вычисляются как интегральное среднее от значений, заданных в центрах дочерних элементов

$$f_p = \frac{\sum f_{ch} |c_{ch}|}{\sum |c_{ch}|}.$$

Картина течения, построенная по заданным на конформной сетке значениям, ожидаемо не содержит разрывов изолиний и изоповерхностей (рис. 9). В тоже время переход на огрубленную сетку приводит к ухудшению детализации изображения. Так, например, видно, что изолинии в районе отошедшей ударной волны находятся на увеличенном друг от друга расстоянии по сравнению с изображениями на рис. 8а и рис. 8б. То есть данный подход ограничивает возможность демонстрации мелкомасштабных деталей решения, с целью разрешения которых применяются методы сеточной адаптации.



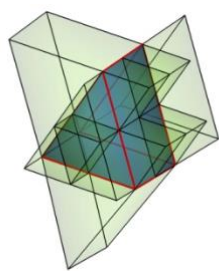
а) общий вид в сечении
 $Y = 0$

б) картина у
поверхности сферы

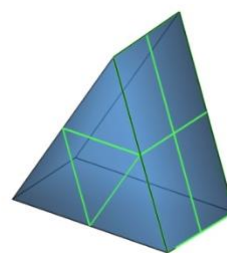
в) изоповерхность
 $\rho = 1.35$

Рис. 9. Визуализация распределения плотности на начальной сетке.

Второй способ исключения внутренних границ состоит в преобразовании многогранников с висячими узлами на ребрах в полиэдры с плоскими многоугольными гранями. Здесь треугольник с висячим узлом на одном ребре становится четырехугольником, четырехугольник с висячими узлами на двух ребрах - шестиугольником, и т.д. Когда элемент сетки имеет четырех соседей следующего уровня декомпозиции по грани, то такая грань соответствующим образом делится на части. В рамках данного подхода число сеточных ячеек и координаты центров их масс не меняются, поэтому интерполяция значений сеточных функций не требуется. На рис. 10 показана иллюстрация преобразования призмы в полиэдр с одиннадцатью плоскими гранями. Две из пяти граней ячейки разбиваются на четыре части. Оставшиеся четырехугольники становятся пятиугольником и шестиугольником. Треугольная грань с висячим узлом трансформируется в четырехугольник.



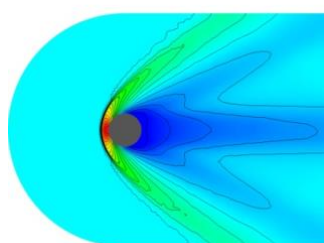
а) призма и соседи по граням



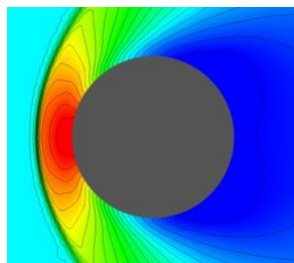
б) полиэдральная ячейка

Рис. 10. Преобразование призмы.

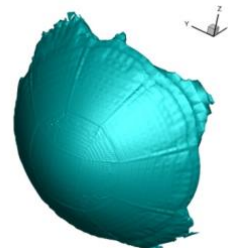
Картина течения, построенная по значениям сеточной функции в центрах полиэдров, представлена на рис.11. Линии уровня и трехмерная изоповерхность заданного значения плотности отображаются без разрывов. Детализация особенностей решения эквивалентна картине на рис. 8. И, следовательно, данный метод визуализации является наиболее предпочтительным при использовании пакетов программ, работающих с полиэдральными сетками.



а) общий вид в сечении
 $Y = 0$



б) картина у поверхности
сферы



в) изоповерхность
 $\rho = 1.35$

Рис. 11. Визуализация распределения плотности на полиэдральной сетке.

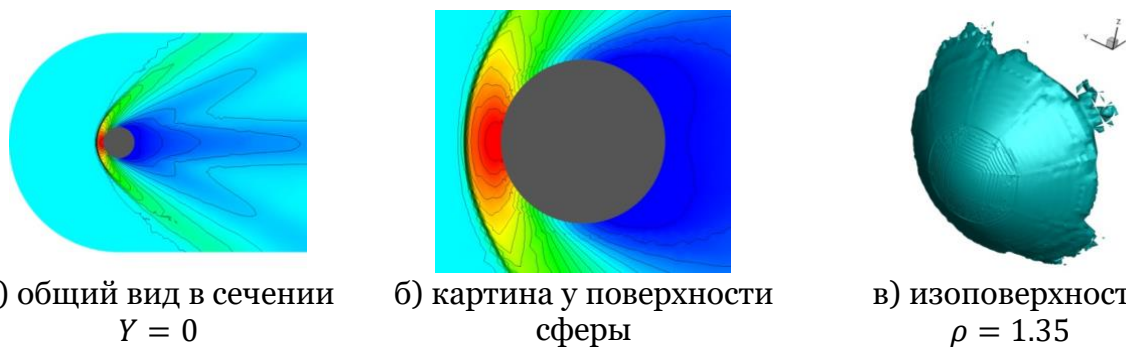
В отсутствие поддержки визуализации полиэдров адаптивная сетка может быть преобразована к виду смешанной конформной сетки из базовых многогранников с использованием алгоритма, описанного в предыдущем разделе статьи. Размерности адаптивной сетки и сгенерированной на ее основе конформной сетки даны в таб. 1.

Таблица 1

	Адаптивная сетка	Конформная сетка
Число вершин	453413	500238
Число тетраэдров	228634	658580
Число пирамид	9781	146963
Число призм	99839	94197
Число гексаэдров	307168	288326
Общее число элементов	645422	1188066

Применение алгоритма декомпозиции приводит к заметному росту числа элементов. В рассматриваемом случае после дробления 46825 ячеек (7.25% от общего числа элементов адаптивной сетки) с висячими узлами на ребрах, их суммарное число увеличивается в 1.84 раза. Параллельно меняется распределение сеточных элементов по типам. Снижается относительное число гексаэдров и призм, и возрастает доля тетраэдров и пирамид. По теоретическим оценкам для неструктурированных конечно-объемных алгоритмов объем вычислений внутри одного шага интегрирования по времени увеличивается примерно в 1.57 раза. Но несмотря на рост числа элементов, визуализационный файл с топологией сетки и полями значений пяти переменных занимает 65 Мбайт дискового пространства, что на 18% меньше размера файла данных с топологией и результатами в центрах полиэдров. Увеличенный размер описания

топологии полиэдров объясняется использованием формата с явным перечислением списков вершин граней и указанием принадлежности граней элементам.



а) общий вид в сечении
 $Y = 0$

б) картина у поверхности
сферы

в) изоповерхность
 $\rho = 1.35$

Рис. 12. Визуализация распределения плотности на полученной преобразованием сетке.

Картина течения на полученной преобразованием сетке (рис. 12) предельно близка с визуализацией данных на полиэдральной сетке (рис. 11). При детальном анализе с наложением изображений проявляются локальные искажения кривых. На рис. 13 зеленым цветом показаны изолинии плотности в сечении полиэдральной сетки, красным цветом выделены изолинии, построенные на сетке с четырьмя типами элементов. Вблизи поверхности сферы в зоне разрешения пограничного слоя можно заметить изломы красных кривых.



а) общий вид в сечении $Y = 0$

б) картина у поверхности сферы

Рис. 13. Изолинии плотности для двух вариантов представления данных.

Обозначенная проблема не является результатом некорректной работы алгоритма преобразования сетки или следствием погрешностей интерполяции значений сеточных функций. Локальные искажения картины течения в большей или меньшей степени присутствуют выше на всех иллюстрациях. Их появление обусловлено погрешностью внутреннего алгоритма программы-визуализатора, отвечающего за перенос значений из центров ячеек в узлы сетки.

На рис. 14 показаны изолинии давления потенциального течения у поверхности сферы. Зеленые кривые соответствуют точному решению, заданному в узлах конформной сетки. Красные кривые строятся по точному решению, определенному в центрах масс ее элементов. Синим цветом отображаются изолинии для случая определения давления P_i^{node} в узлах через осреднение значений переменной в центрах элементов, которым принадлежат узлы

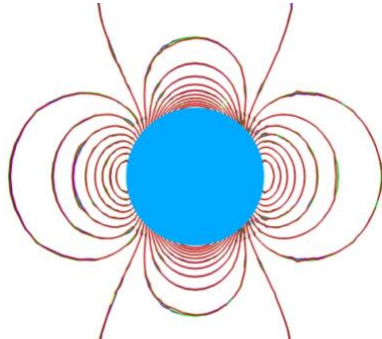
$$P_i^{node} = \frac{\sum P_k^{cell} w_k}{\sum w_k},$$

$$w_k = |C_k| / N_k.$$

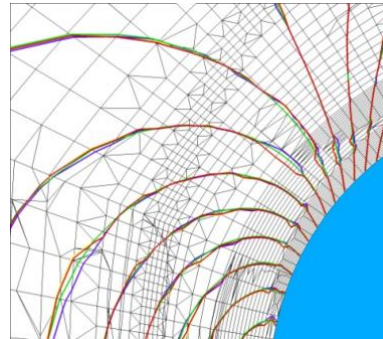
Вес элемента w_k приравнивается его объему, деленному на число вершин N_k . Альтернативный вариант осреднения (линии уровня желтого цвета) состоит в определении весов как обратных расстояний между вершинами и центрами масс ячеек

$$w_k = \frac{1}{d(x_i, x_k)}.$$

Все кривые достаточно точно отображают картину решения (рис. 14а). Но изолинии зеленого цвета, построенные по значениям функции в узлах сетки, имеют гладкую форму, а на кривых, полученные тем или иным образом по решению в центрах масс ячеек, снова видны характерные искажения (рис. 14б).



а) общий вид в сечении $Y = 0$



б) картина у поверхности сферы

Рис. 14. Изолинии давления для потенциального течения у поверхности сферы.

Проблема погрешности алгоритмов переноса значений переменных присутствует в задачах визуализации данных на любых неструктурированных сетках. Наиболее заметно дефекты изображения проявляются на нерегулярных сетках с элементами неправильной геометрической формы, большими различиями размеров соседних многогранников, чисел исходящих из вершин ребер и т.д. К данному классу дискретных моделей относятся как локально-адаптивные сетки с висячими узлами, так и различные варианты их преобразования к конформному виду. Максимальная точность визуализации здесь достигается только путем применения специальных высокоточных алгоритмов интерполяции, учитывающих в том числе и физическую постановку задачи.

4. Заключение

В статье рассмотрены вопросы визуализации результатов расчетов задач газовой динамики на смешанных локально-адаптивных сетках с использованием инструментов визуализации данных на неструктурированных сетках. Описан алгоритм преобразования иерархической адаптивной сетки с четырьмя типами ячеек к конформному виду путем согласованной декомпозиции на тетраэдры и пирамиды подмножества ячеек с висячими узлами на ребрах. На примере визуализации сверхзвукового стационарного течения с использованием пакета Tecplot показаны преимущества и недостатки различных методов представления данных. Оптимальными подходами выбраны представление ячеек адаптивной сетки в виде полиэдров и преобразование топологии с использованием предложенного алгоритма локальной декомпозиции.

Список литературы

1. Berger M.J., Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics // Journal of Computational Physics, vol. 82, Issue 1, 1989, pp. 64-84. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(89\)90035-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(89)90035-1).
2. Powell K., Roe P., Quirk J. Adaptive-Mesh Algorithms for Computational Fluid Dynamics. In: Hussaini M.Y., Kumar A., Salas M.D. (eds) Algorithmic Trends in Computational Fluid Dynamics // N.Y.: ICASE/NASA LaRC Series. Springer, 1993.

3. Afendikov A.L., Khankhasaeva Y.V., Lutsy A.E. et al. Numerical Simulation of the Recirculation Flow during the Supersonic Separation of Moving Bodies. *Math Models Comput Simul* 12, 282–292 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048220030035>.
4. Tsvetkova V., Kozubskaya T., Kudryavtseva L., Zhdanova N. On mesh adaptation for supercomputer simulation of flows around solid bodies defined by immersed boundary method // *Procedia Computer Science*, 2020, 178, p. 404-413
5. Pavlukhin P., Menshov I. (2019) GPU-Aware AMR on Octree-Based Grids. In: Malyshkin V. (eds) *Parallel Computing Technologies. PaCT 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11657. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25636-4_17.
6. Soukov S.A. Combined signed distance calculation algorithm for numerical simulation of physical processes and visualization of solid bodies movement // *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, num. 5, pp. 86-101. DOI: 10.26583/sv.12.5.08.
7. Garimella R.V., Kim J., Berndt M. (2014) Polyhedral Mesh Generation and Optimization for Non-manifold Domains. In: Sarrate J., Staten M. (eds) *Proceedings of the 22nd International Meshing Roundtable*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02335-9_18
8. ParaView – Multi-platform data analysis and visualization application URL: <https://www.paraview.org/>
9. Tecplot – CFD Visualization & Analysis Software URL: <https://www.tecplot.com/>
10. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
11. Weber G.H., Beckner V.E., Childs H., Ligocki T.J., Miller M.C., Van Straalen B., Bethel E.W. *Visualization Tools for Adaptive Mesh Refinement Data* // United States, 2007. <https://www.osti.gov/servlets/purl/925532>.
12. Mavriplis D.J. Adaptive meshing techniques for viscous flow calculations on mixed element unstructured meshes // 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1997-857>
13. Sozer E., Brehm C., and Kiris C.C. Gradient calculation methods on arbitrary polyhedral unstructured meshes for cell-centered CFD solvers // In *AIAA Paper 2014-1440*, 2014.
14. Soukov S.A. Parallelization for unstructured adaptive mesh CFD algorithm // *Matem. Mod.*, 33:6 (2021), 31–44. DOI: <https://doi.org/10.20948/mm-2021-06-03>.

Visualization of the CFD Calculations Results on Adaptive Mixed Meshes

S.A. Soukov¹

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS

¹ ORCID: 0000-0002-0667-6955, ssoukov@gmail.com

Abstract

The article discusses the problem of visualizing the results of computational fluid dynamics simulations on cell-centered adaptive mixed meshes. An algorithm for converting hierarchical adaptive mixed meshes consisting of tetrahedra, triangular prisms, quadrangular pyramids, and hexahedra to a conformal form is described. The main idea of the proposed algorithm is to decompose a subset of mesh cells with hanging nodes on the edges into tetrahedra and pyramids with the addition of new vertices at the polyhedra mass centers. The mesh functions interpolation algorithm is based on the discrete analogue of the formula for the integral representation of the gradient. Application of the algorithm allows to show the fields of mesh functions using software for data visualization on irregular grids. On the example of a stationary supersonic flow visualization at the sphere surface using the Tecplot tools, the advantages and disadvantages of various data presentation options are demonstrated. These include displaying results on a hanging node mesh without changing the topology, transferring data to a starting conformal mesh, polyhedra data visualization, and converting an adaptive mesh to conformal form with cell decomposition and data interpolation.

Keywords: computational fluid dynamics, data visualization, mixed meshes, adaptive mesh refinement.

References

1. Berger M.J., Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics // *Journal of Computational Physics*, vol. 82, Issue 1, 1989, pp. 64-84. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(89\)90035-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(89)90035-1).
2. Powell K., Roe P., Quirk J. Adaptive-Mesh Algorithms for Computational Fluid Dynamics. In: Hussaini M.Y., Kumar A., Salas M.D. (eds) *Algorithmic Trends in Computational Fluid Dynamics* // N.Y.: ICASE/NASA LaRC Series. Springer, 1993.
3. Afendikov A.L., Khankhasaeva Y.V., Lutsky A.E. et al. Numerical Simulation of the Recirculation Flow during the Supersonic Separation of Moving Bodies. *Math Models Comput Simul* 12, 282–292 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048220030035>.
4. Tsvetkova V., Kozubskaya T., Kudryavtseva L., Zhdanova N. On mesh adaptation for supercomputer simulation of flows around solid bodies defined by immersed boundary method // *Procedia Computer Science*, 2020, 178, p. 404-413
5. Pavlukhin P., Menshov I. (2019) GPU-Aware AMR on Octree-Based Grids. In: Malyshkin V. (eds) *Parallel Computing Technologies. PaCT 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11657. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25636-4_17.
6. Soukov S.A. Combined signed distance calculation algorithm for numerical simulation of physical processes and visualization of solid bodies movement // *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, num. 5, pp. 86-101. DOI: [10.26583/sv.12.5.08](https://doi.org/10.26583/sv.12.5.08).
7. Garimella R.V., Kim J., Berndt M. (2014) Polyhedral Mesh Generation and Optimization for Non-manifold Domains. In: Sarrate J., Staten M. (eds) *Proceedings of the*

22nd International Meshing Roundtable. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02335-9_18

8. ParaView – Multi-platform data analysis and visualization application URL: <https://www.paraview.org/>

9. Tecplot – CFD Visualization & Analysis Software URL: <https://www.tecplot.com/>

10. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

11. Weber G.H., Beckner V.E., Childs H., Ligocki T.J., Miller M.C., Van Straalen B., Bethel E.W. Visualization Tools for Adaptive Mesh Refinement Data // United States, 2007. <https://www.osti.gov/servlets/purl/925532>.

12. Mavriplis D.J. Adaptive meshing techniques for viscous flow calculations on mixed element unstructured meshes // 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1997-857>

13. Sozer E., Brehm C., and Kiris C.C. Gradient calculation methods on arbitrary polyhedral unstructured meshes for cell-centered CFD solvers // In AIAA Paper 2014-1440, 2014.

14. Soukov S.A. Parallelization for unstructured adaptive mesh CFD algorithm // Matem. Mod., 33:6 (2021), 31–44. DOI: <https://doi.org/10.20948/mm-2021-06-03>.