



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

Yu. N. Deryugin, A. S. Sarazov, R. N. Zhuchkov, Features of overset meshes methodology on unstructured grids, *Mat. Model.*, 2017, Volume 29, Number 2, 106–118

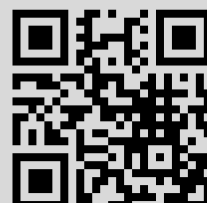
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.169

February 7, 2025, 04:06:08



ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА НА СЕТКАХ ТИПА «ХИМЕРА» ДЛЯ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК

© 2017 г. Ю.Н. Дерюгин, А.В. Саразов, Р.Н. Жучков

ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ

ynderyugin@vniief.ru, avsarazov@vniief.ru, rnzhuchkov@vniief.ru

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-08-12033-ОФИм.

Рассматриваются основные этапы построения методики расчёта на сетках типа «Химера». Основное внимание уделяется особенностям реализации алгоритмов на сетках, состоящих из произвольных многогранников. Предложены методы построения пересечения счетных регионов произвольной формы. Работоспособность и эффективность демонстрируется на задачах с доступными экспериментальными данными.

Ключевые слова: неструктурированные сетки, сетки типа «Химера», интерполяционный шаблон, численное моделирование.

FEATURES OF OVERSET MESHES METHODOLOGY ON UNSTRUCTURED GRIDS

Yu.N. Deryugin, A.V. Sarazov, R.N. Zhuchkov

FSUE RFNC-VNIIEF

The main steps of Overset Grids technique are being discussed. The emphasis is on the peculiarities of the implementation of algorithms on grids consisting of arbitrary polyhedral cells. The methods of constructing countable regions of arbitrary shape are being offered. The operability and efficiency are being demonstrated by cases with available experimental data.

Key words: unstructured meshes, Chimera grids, interpolation pattern, numerical simulation.

1. Введение

Большинство задач вычислительной газодинамики, имеющих практический интерес, связано с моделированием нестационарных трёхмерных процессов. Выбор дискретной модели является важным фактором, влияющим на результаты расчётов. До недавнего времени наиболее распространёнными были структурированные сетки, преимущества использования которых заключаются в простоте реализации алгоритмов и возможности использования схем высокого порядка точности.

Для задач, в которых рассматриваются объекты сложной геометрической формы, использование подобных дискретных моделей весьма затруднительно по причине трудоёмкости построения расчётной модели, учитывающей все особенности конструкции. Поэтому в инженерной практике в последнее время всё чаще используются трёхмерные нерегулярные сетки; структурированные сетки находят своё применение в основном в задачах, где форма исследуемого тела относительно простая.

Характерными особенностями неструктурированных сеток является то, что ячейки представляют собой произвольные многогранники, что позволяет генерировать в автоматическом режиме дискретные модели для тел сложной формы. Процесс построения нерегулярной трёхмерной сетки существенно сокращает время подготовки расчётной модели и проще по сравнению с генерацией структурированной сетки. Однако в ряде случаев построение даже неструктурированной сетки довольно затруднительно. К таким задачам в первую очередь относятся задачи с относительным движением конструктивных элементов.

Задачи с подвижными границами можно решать, применяя различные подходы, например, используя технологию адаптивно встраиваемых сеток [1] или методику счёта на деформирующихся сетках с сохранением сеточной топологии [2]. Отличительной особенностью методики счёта на адаптивно встраиваемых сетках является то, что на каждый момент времени генерируется новая сетка, отвечающая текущему положению границ. Однако создание новой сетки довольно дорогой с вычислительной точки зрения процесс. В отличие от предыдущего подхода методика счёта на деформирующихся сетках взамен построения новой сетки изменяет только положение узлов расчётной сетки, что позволяет существенно сократить время моделирования. В свою очередь, встаёт вопрос качества получаемой сетки после операции деформирования, так как при серьёзных изменениях границ высока вероятность образования ячеек очень плохого качества. Поэтому данный подход может быть использован лишь в тех случаях, когда относительное движение элементов конструкции незначительно.

Одним из вариантов, объединяющим положительные качества методик расчёта на адаптивно встраиваемых и деформируемых сетках, является технология счёта на сетках с перекрытиями. Данный подход предполагает построение независимых сеток для каждого тела в отдельности, в дальнейшем объединяя их в одну общую сетку с перекрытиями. Каждая сетка учитывает форму и геометрические особенности только своего тела, что позволяет упростить процесс построения расчётной геометрии. Такой тип сеток с перекрытиями получил название сетки типа «Химера».

Ключевые особенности технологии рассматриваются в [3,4], где сформулированы основные этапы подготовки расчётной модели, включающие в себя генерацию геометрических моделей, объединение моделей, процедуру исключения ячеек и проведение расчёта. С развитием технологии «Химера» проводились исследования, направленные на повышение качества получаемых результатов с помощью алгоритмов интерполяции высокой точности [5,6]. Также предпринимались попытки построения консервативных схем расчёта [7-10]. Подобные подходы можно условно разделить на две категории. В первую группу входят методики, где выполнение законов сохранения гарантировалось путём применения специальных схем расчёта, основанных на использовании геометрических характеристик элементов сетки [7,8]. Основной недостаток данного подхода состоит в том, что реализация его для произвольных трёхмерных сеток крайне затруднительна. Методы второй группы основываются на построении сетки без перекрытий на основе сетки типа «Химера» [9,10]. В данном случае консервативность методики расчёта гарантирована самим подходом, но процесс связывания сеток трудоёмок, в особенности для неструктурированных сеток, состоящих из произвольных многогранников.

Большинство исследований в области проведения расчётов на сетках с перекрытиями посвящено структурированным сеткам. С точки зрения методики «Химера» это

означает ряд предположений о форме граней ячеек: грани являются плоскими и четырехугольными. Выполнение этих предположений для сеток, состоящих из произвольных многогранников, не гарантировано, а значит, базовые алгоритмы, необходимые для построения интерполяционного шаблона, должны быть пересмотрены.

В данной статье приводится описание этапов построения методики расчёта на неструктурированных сетках с перекрытиями, которые могут применяться в случае использования сеток из произвольных многогранников с неплоскими гранями. Предлагаемые методы реализованы в комплексе программ ЛОГОС [11].

2. Ключевые этапы методики расчёта на сетках типа «Химера»

В случае использования сеток типа «Химера» расчёт производится на двух и более топологически несвязанных между собой дискретных моделях. Центральной задачей при создании расчётной методики является сопряжение этих областей. Ключевые этапы – определение несчетных областей и построение интерполяционного шаблона для взаимодействия несвязанных сеточных регионов (рис. 1).

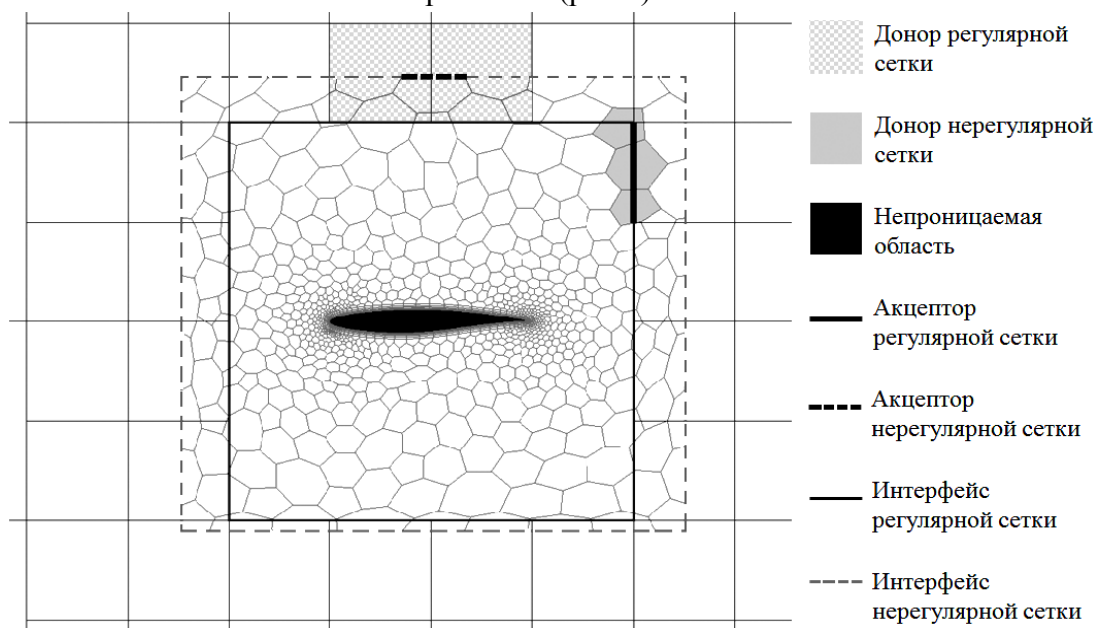


Рис.1. Сетки типа «Химера».

Ниже приведены определения, принятые в большинстве работ по методам расчёта на сетках типа «Химера»:

- интерфейс – открытая граница дискретной модели, значение полей на которой формируется на основании данных из окрестных ячеек;
- акцептор – грань интерфейса;
- доноры – ячейки, расчётные поля которых используются для восстановления информации на интерфейсах;
- операция «сечение» – метод определения пересечения поверхностей одной из сеток с ячейками другой сетки в пространстве.

Для дальнейших построений вводится несколько базовых правил расчёта задач на сетках с перекрытиями:

1. К основным типам граничных условий добавляется специализированное условие – интерфейс.

2. Непроницаемые границы, такие как стенка, не допускают проникновения сквозь неё потока для любой сетки.
3. Все ячейки, попавшие внутрь замкнутого объёма, ограниченного непроницаемой границей, должны быть исключены из счётного процесса.
4. Поиск несчётных областей проводится таким образом, чтобы минимизировать количество счётных ячеек расчётной области.

Следует обратить внимание на то, что принятые правила и определения не являются строгими и относятся, в частности, к методике, реализованной в комплексе программ ЛОГОС. В некоторых работах, например, в [12], можно видеть, что четвёртый принцип не используется. Влияние последнего правила на результаты операции определения несчётных областей может быть продемонстрировано на задаче движения пули по каналу ствола (рис.2).



Рис.2. Сравнение результатов маркировки для разных подходов.

На рис.2 приводится сравнение результатов процедуры исключения ячеек из вычислительного процесса. Использование правил 1 – 3 не позволяет сблизить интерфейсы, что отражено на верхней части рисунка. В нижней части рисунка применено правило 4, что позволило сблизить интерфейсы разных регионов и увеличить скорость сходимости задачи.

3. Операция сечения

Одним из важных вопросов методики расчёта на сетках с перекрытиями является задача нахождения пересечения поверхностей одной из сеток с ячейками другой сетки в пространстве. Как будет показано далее, от характеристик применяемых подходов будет во многом зависеть эффективность расчёта. Операция сечения для сеток типа «Химера» используется как для удаления из счётного процесса ячеек, попавших внутрь нерасчётной области, ограниченной непроницаемой границей, так и для нахождения доноров для акцепторов.

Поиск пересечений – известная задача, для решения которой могут применяться различные подходы. Самым простым является прямой перебор попарно граней и ячеек разных сеток, но с точки зрения эффективности вычислений данный подход является крайне нежелательным, поскольку даже в случае двух несвязанных дискретных моделей количество вычислительных операций сравнимо с оценкой $O(f_1 \cdot n_2 + f_2 \cdot n_1)$, где f_i, n_i – соответственно количество поверхностных граней и ячеек отдельно взятой сетки.

В случае малого количества геометрических элементов вычислительные затраты метода прямого поиска пересечённых ячеек не будут превалировать над остальными издержками. Однако вычислительная сложность подхода резко возрастает с повышением

качества расчётной геометрии, и использование прямых методов приведёт к значительным тратам по времени, что особенно критично для нестационарных задач.

Чтобы избежать чрезмерных вычислительных затрат, необходимо использовать эффективные алгоритмы обработки данных. Среди их множества выделяют методы, основанные на использовании альтернативных бинарных деревьев [13], для которых вычислительная сложность поиска пересечения грани и множества ячеек эквивалентна $O(\log_2 n)$, что существенно сокращает время поиска пересечения трёхмерных объектов. Взаимное расположение ячеек в пространстве носит случайный характер, поэтому результатом поиска пересечения посредством альтернативных бинарных деревьев является множество ячеек, среди которых могут оказаться лежащие вблизи рассматриваемого пересечения, но в действительности не пересекающиеся. Поскольку рассматриваются произвольные нерегулярные сетки, процесс выделения подмножества пересечённых ячеек основан на использовании алгоритмов геометрического сечения.

В отличие от структурированной сетки, где грани ячеек являются плоскими и четырёхугольными, ячейками нерегулярной трёхмерной сетки являются произвольные многогранники с неплоскими гранями, поэтому секущая грань разбивается на набор непересекающихся треугольников, и рассматривается задача пересечения рёбер ячеек с множеством треугольников. С помощью иерархических структур данных нахождение пересечений произвольных трёхмерных объектов для методики «Химера» позволяет быстро и корректно проводить операцию поиска ячеек доноров для граней акцепторов и выделения несчётных областей.

4. Исключение несчётных ячеек

Выше было сказано, что при сопряжении несвязанных сеток определённая часть ячеек одной из них может попасть внутрь непроницаемой границы другой. Все подобные ячейки исключаются из вычислительного процесса.

Маркировкой называется процедура поиска несчётных ячеек. Очевидно, для стационарных задач процесс маркировки выполняется единожды в начале счёта, тогда как в задачах с подвижными элементами необходимо проводить процедуру исключения несчётных ячеек на каждый момент времени.

По окончании процедуры маркировки необходимо произвести поиск граней, разделяющих счётные и несчётные ячейки. Полученное множество граней образует новый фиктивный интерфейс, который в дополнение к реальным интерфейсам предназначен для создания связи между разными регионами. Фиктивные интерфейсы также являются открытыми границами и рассматриваются наравне с реальными интерфейсами. Процесс маркировки ячеек состоит из двух шагов:

- поиск всех ячеек, пересекающихся с непроницаемыми границами;
- удаление из счётного процесса всех ячеек, лежащих в несчётных областях.

После получения множества пересечённых ячеек путём обхода графа соседства ячеек через грань выделяется несчётная область и формируются фиктивные интерфейсы. Подобный подход позволяет достаточно быстро проводить маркировку ячеек, но обладает недостатком, заключающимся в том, что интерфейсы взаимодействия, построенные в перекрывающихся сетках расчётной области, сильно разнесены друг от друга в пространстве (рис.2). Данный факт может замедлить процесс сходимости решения, что особенно важно для нестационарных задач.

Сближение интерфейсов положительно влияет на скорость сходимости процесса решения. Базовая процедура маркировки должна быть доработана с целью сближения интерфейсов и минимизации перехлёстов счётных областей. Требуется найти надёжный алгоритм, удовлетворяющий требованиям по количеству операций и простоте реализации для произвольных трёхмерных сеток. Ниже предлагается подход, позволяющий строить пересечения произвольных фигур с минимальными областями перекрытия.

В качестве примера рассматривается двумерная задача, представленная на рис.3.

Здесь для общности представлены три произвольно пересекающиеся невыпуклые фигуры. Требуется выполнить сечения фигур таким образом, чтобы исключить области перекрытия. Пусть приоритет фигур задан следующим образом:

- первая фигура имеет низший приоритет;
- вторая фигура имеет средний приоритет;
- третья фигура имеет наивысший приоритет.

Представим процедуру исключения перекрытий, которая определяет правила построения новых границ рассматриваемых фигур.

Предполагается, что границы фигур можно представить в дискретном виде множеством отрезков. Дальнейшие рассуждения представляют собой один из вариантов формализации логики действий для создания алгоритма сечений на общий случай.

Проводится сечение фигур в порядке возрастания приоритета, то есть сначала для первой фигуры, а затем для второй. Причём сечение каждой фигуры с приоритетом i проводится по контурам других фигур в порядке уменьшения приоритета, начиная с границы региона с максимальным приоритетом, заканчивая границей фигуры с приоритетом, равным $i+1$.

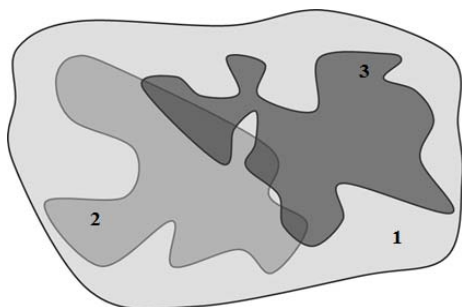


Рис.3. Пересечение произвольных фигур.

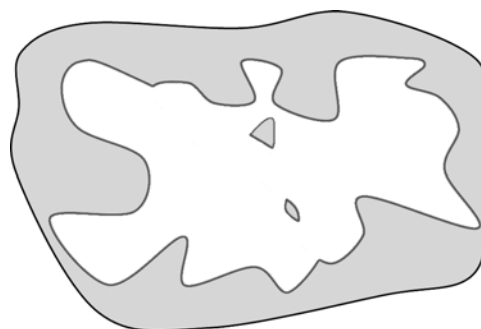


Рис.4. Первая фигура после операции сечения.

Каждой фигуре в зависимости от назначенного приоритета присваивается числовой код $F_i = 2^{i-1}$. В дальнейшем изложении подхода все числовые коды приводятся в двоичном представлении:

- первая фигура код $F_1 = 001$;
- вторая фигура код $F_2 = 010$;
- третья фигура код $F_3 = 100$.

Пусть $H_i = H_{i+1} \parallel H_{i+2} \parallel \dots \parallel H_n$ представляет собой бинарный код фигур с приоритетом выше текущей фигуры. Тогда для первой фигуры $H_1 = F_2 \parallel F_3 = 110$, для второй – $H_2 = F_3 = 100$, а для третьей $H_3 = 000$ (где \parallel – битовая операция ИЛИ).

Алгоритм начинается с первой фигуры, обладающей низшим приоритетом. Исходя из предложенного подхода, проводится сечение вдоль контура третьей замкнутой области. Пусть K_{13} – ключевой код сечения первой фигуры по контуру третьей, которой мож-

но выразить формулой: $K_{13} = H_1 \wedge F_3 = 110 \wedge 100 = 010$ (где \wedge – битовая операция исключающего ИЛИ). Дополнительно вводится бинарный код $R_{13} = K_{13} \& D_3$ (где $\&$ – битовая операция И), где D_3 – бинарный код фигур, с которыми элементарный участок контура третьей области может пересекаться. В данном случае D_3 может принимать значения из множества $\{F_1 = 001, F_2 = 010, F_1 \parallel F_2 = 011\}$. Лишь для тех элементарных участков контура, где $R_{13} = 0$, проводится сечение, иначе – если контур третьей фигуры пересекает и первую, и вторую область – операция сечения не выполняется (рис.4).

Затем выполняется сечение первой области вдоль контура второй фигуры, тогда $K_{12} = 110 \wedge 010 = 100$, D_2 принадлежит множеству $\{001, 100, 101\}$. Здесь $R_{12} = 0$ только в том случае, если элементарный участок второго региона пересекается только с первой фигурой. То есть в результате двух шагов сечения генерируются новые границы первой области, не имеющей перекрытий с остальными фигурами (рис.5). Такая процедура является оптимальной, так как не приходится выполнять сечения полностью по всем контурам.



Рис.5. Вторая фигура после операции сечения.

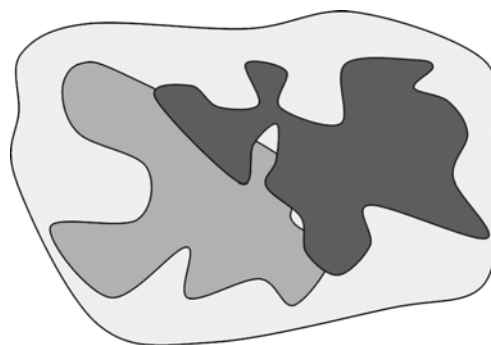


Рис.6. Результат сечения.

На следующем этапе подобный механизм применяется к операции сечения для второй области. В данном случае $H_2 = 100$, и согласно вышеуказанному предложению сечение будет выполняться только по контуру третьей сетки, тогда $K_{23} = 100 \wedge 100 = 0$. Следовательно, величина R_{23} тождественно равна нулю, что соответствует операции сечения по всему контуру. В конечном итоге получаются фигуры, не имеющие перехлестов, как показано на рис.6.

Предложенный порядок действий использует бинарную логику для сохранения информации о пересечении с фигурами для каждого элемента контура. Алгоритм достаточно экономно использует вычислительные ресурсы и обладает лишь одним условным переходом, что позволяет эффективно решать поставленную задачу. Подобная формализация процедуры сечения позволяет реализовать алгоритм и для произвольных трёхмерных фигур.

Определяющим фактором описанной методики является присвоение приоритета каждой фигуре. Обычно приоритет каждого региона может определяться, исходя из инженерных соображений, либо устанавливается автоматически в зависимости от подробности дискретизации и качества отдельно взятой сетки. Последовательность ключевых этапов предложенной техники минимизации перехлестов при расчёте на сетках типа «Химера» может быть представлена в виде укрупнённой блок-схемы (рис.7).

Взяв за основу разработанный подход, процедура маркировки может быть улучшена. Доработанная процедура маркировки выглядит следующим образом:

- поиск всех ячеек пересекающихся с непроницаемыми границами;
- удаление из счётного процесса всех ячеек, лежащих внутри непроницаемых границ;
- создание фиктивных интерфейсов;
- алгоритм минимизации перехлёстов, где контурами являются интерфейсы взаимодействия.

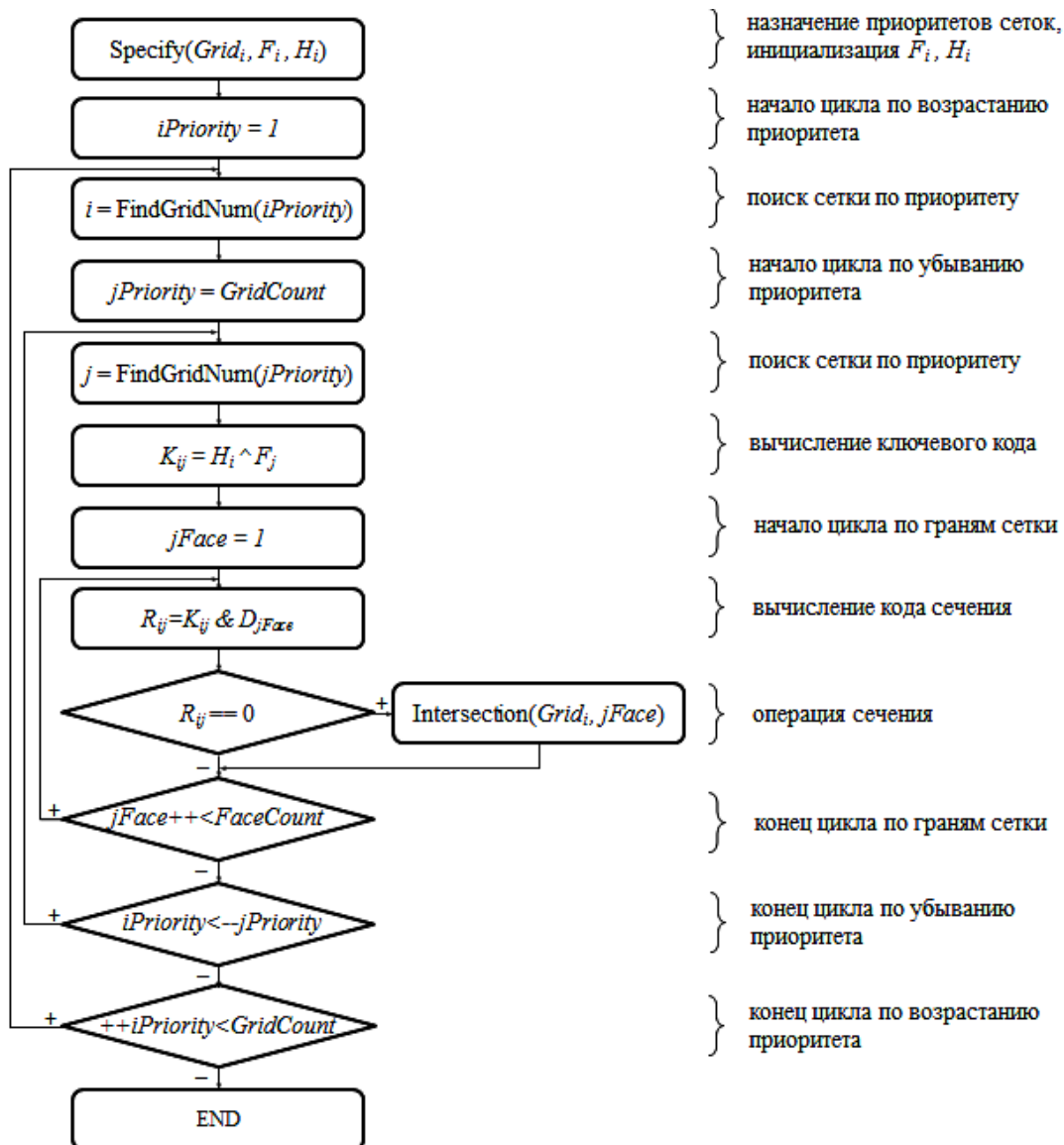


Рис.7. Блок-схема алгоритма.

После проведения операции маркировки необходимо определить взаимодействие топологически несвязанных геометрий. Взаимодействие между независимыми регионами осуществляется формированием пар донор-акцептор. Для поиска ячеек доноров проводится процедура сечения, непосредственно используя интерфейсы. Операция выполняется для всех граней граничных условий типа интерфейс. Для каждой грани находятся счётные ячейки из других регионов, на основе которых выполняется восстановление параметров на границе.

В качестве алгоритма восстановления полей на гранях-акцепторах для сеток «Химера» можно применять различные подходы: обратно взвешенную интерполяцию, метод наименьших квадратов, трилинейную интерполяцию и прочие методы.

Таким образом, получены простые с вычислительной точки зрения алгоритмы реализации ключевых этапов методики расчёта на сетках типа «Химера». Далее приводятся верификационные задачи, на которых проводится демонстрация работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов.

5. Численные эксперименты

5.1. Расчёт стационарных аэродинамических характеристик механизированного сечения крыла. Рассматривается структура течения вблизи двухзвенного элементарного профиля крыла $GA(W)$ -1 с однощелевым выдвижным закрылком [14]. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными, а также с результатами расчёта на эквивалентной сетке без перекрытий.

Для численного моделирования была сгенерирована сетка, состоящая из 36505 ячеек, с двумя топологически несвязанными регионами. На рис.8 приведена расчётная геометрия вблизи профиля крыла.

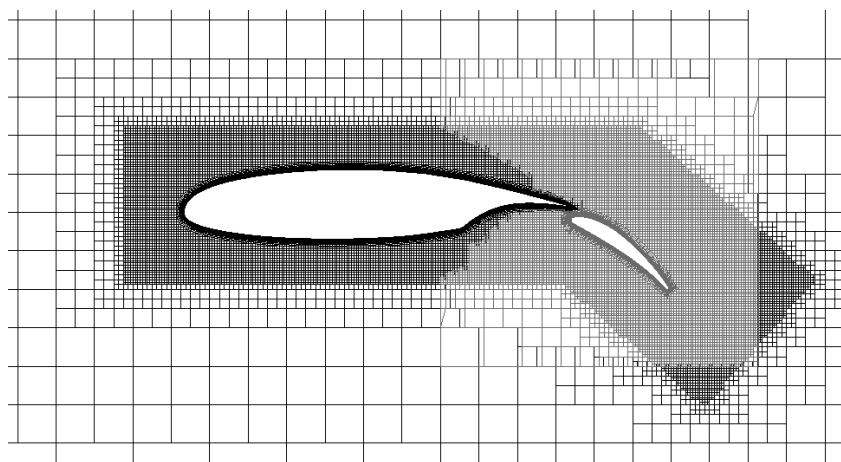


Рис.8. Активные ячейки.

Для моделирования обтекания профиля $GA(W)$ -1 принимался однородный поток вязкого газа с числом Маха $M_\infty=0.21$ и углами атаки в диапазоне $\alpha=-2^\circ\div 14^\circ$ при значении числа Рейнольдса $Re=2.2\times 10^6$. Расчёт проводился с использованием модели турбулентности Спаларта-Аллмараса. На рис.9 представлены поля распределения числа Маха в области профиля для угла атаки $\alpha=-2^\circ$.

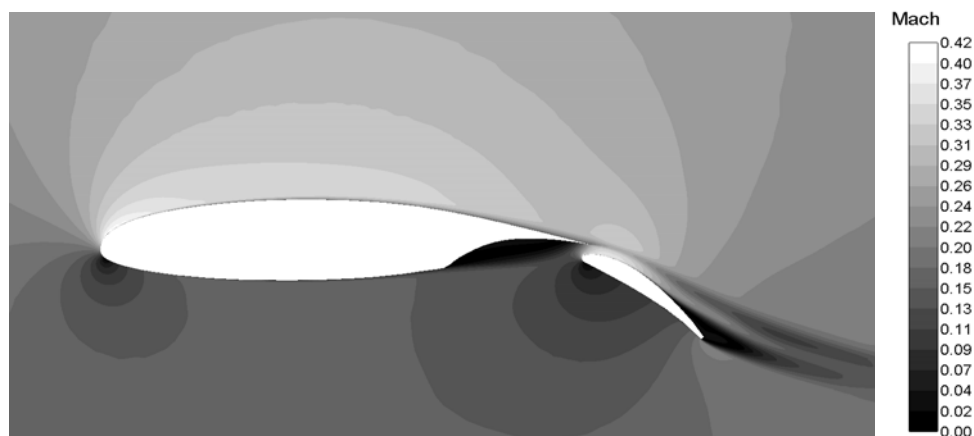


Рис.9. Распределение числа Маха, $\alpha=-2^\circ$.

На рис.10, 11 представлены графики распределения коэффициентов подъемной силы ($C_{y\alpha}$), лобового сопротивления ($C_{x\alpha}$) для различных углов атаки.

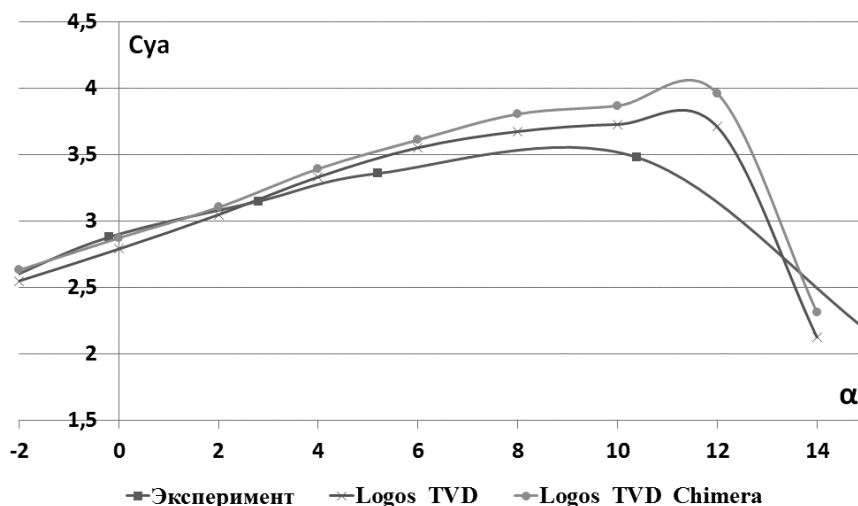


Рис.10. График зависимости $C_{y\alpha}$ от угла атаки.

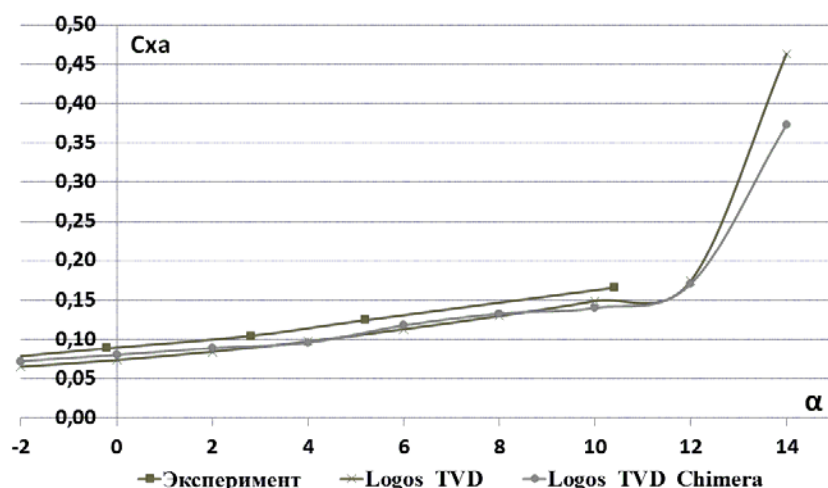


Рис.11. График зависимости $C_{x\alpha}$ от угла атаки.

На приведённых графиках представлены результаты моделирования на сетках типа «Химера», экспериментальные данные и результаты, полученные на основе базовых алгоритмов программного комплекса ЛОГОС [11] с использованием эквивалентной расчётной сетки без перекрытий.

Как видно, результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными. Отличия от результатов, полученных на сетке без перекрытий, объясняются неконсервативной процедурой интерполяции данных на гранях интерфейсов.

Вычислительная нагрузка расчётов на сетках типа «Химера» для рассматриваемой задачи сопоставима с затратами, связанными с моделированием той же задачи с использованием эквивалентной сетки без перекрытий. Поскольку рассматривается стационарный случай, операции маркировки и построения шаблона интерполяции выполняются единожды, что не сказывается на скорости расчёта, в то время как восстановление данных на интерфейсах занимает некоторое время. Замедление относительно базовых методов составило не более 1%.

5.2. Задача отделения подвешенного груза от крыла летательного аппарата. Рассматривается задача нестационарного отделения подвешенного груза в трансзвуковом потоке вязкого газа [15] (рис.12).

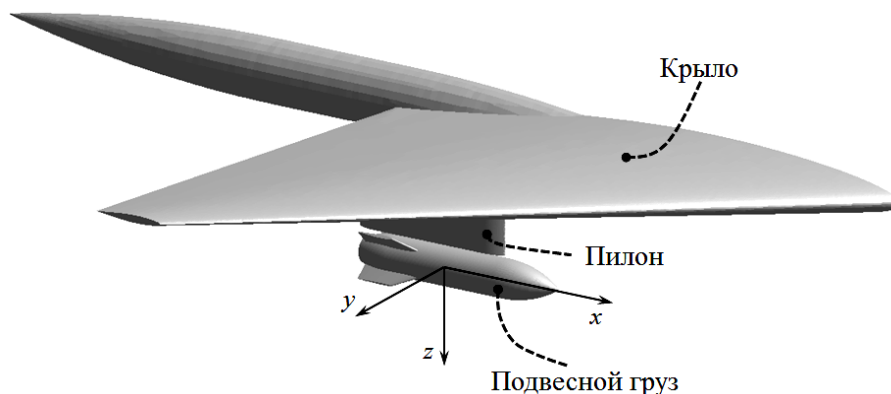


Рис.12. Расчётная модель.

В эксперименте груз отделялся посредством катапульты, действие которой в численном расчёте заменяется кратковременными силами.

Для решения задачи были сгенерированы 2 сетки, в дальнейшем объединённые в одну сетку с перекрытиями (рис.13). Общее количество ячеек ~2 млн.

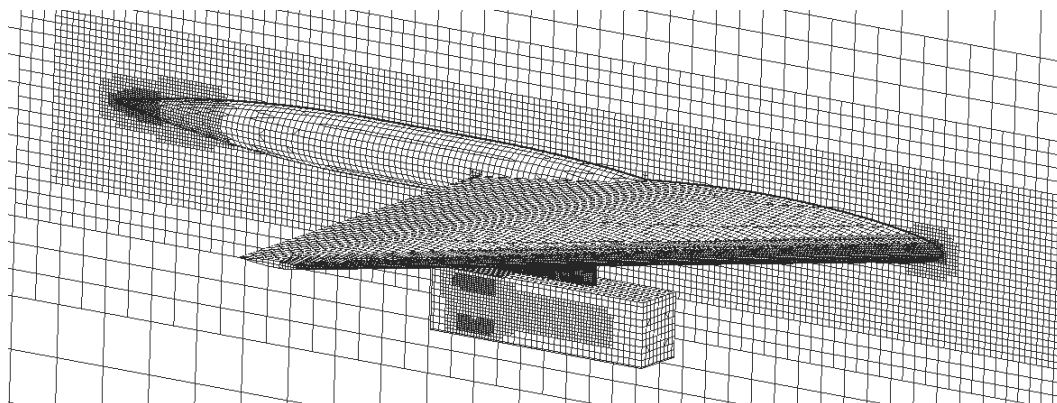


Рис.13. Геометрическая модель.

На груз на протяжении всего расчёта задачи действовали аэродинамические нагрузки и сила тяжести; задавались масса, компоненты тензора инерции:

$$m = 907.1803 \text{ кг}, \quad M_{xx} = 27.12 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}, \quad M_{yy} = M_{zz} = 488.1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}.$$

Для моделирования принимался однородный поток вязкого газа с числом Маха $M_\infty=0.95$ при значении числа Рейнольдса $Re=1.8 \times 10^6$. Шаг по времени = 0.002 сек. В задаче оценивается положения центра масс груза с течением времени (рис.14). Из графика видно, что результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В отличие от предыдущей задачи, моделирование падения подвешенного груза является нестационарным процессом, что приводит к необходимости многократного выполнения операций сечения и построения шаблона интерполяции. Время построения интерполяционного шаблона, выполнения операции сечения и восстановления расчётных полей на интерфейсах составляет около 10% общего времени расчёта, что может считаться приемлемой величиной.

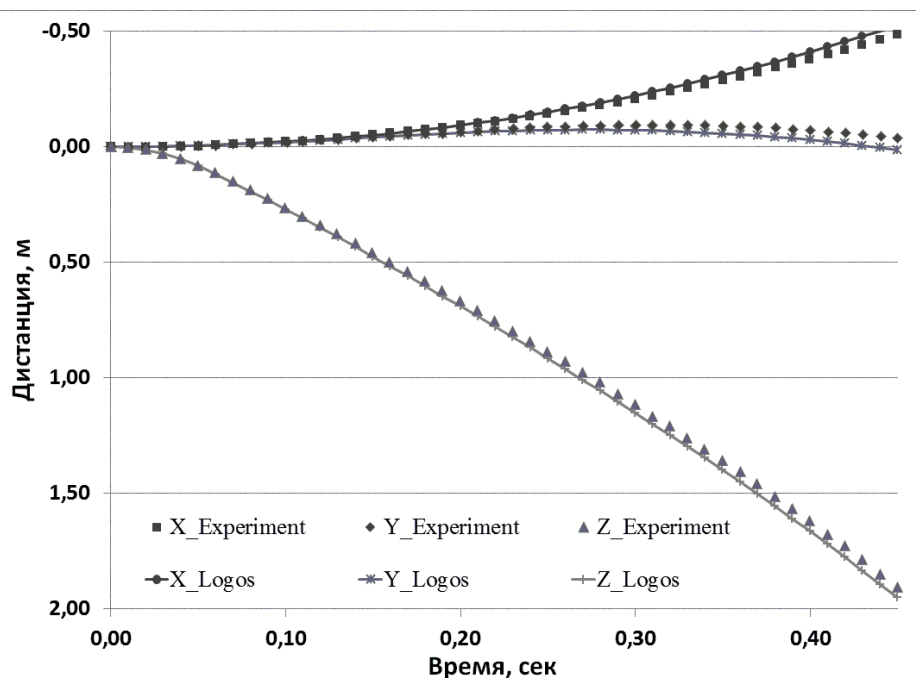


Рис.14. Изменение координат центра масс в зависимости от времени.

Заключение

Предложены эффективные алгоритмы построения интерполяционного шаблона, используемые в методике «Химера» на неструктурированных сетках, состоящих из произвольных многогранников. На выбранных задачах показано, что разработанные алгоритмы практически не снижают время расчёта в стационарных задачах, тогда как для задач с подвижными элементами замедление составляет 10%.

Точность получаемых результатов существенно зависит от способа интерполяции расчётных полей из доноров в акцепторы. Ожидается, что снижение погрешности может быть достигнуто с использованием схемы интерполяции повышенного порядка точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мажукин В.И., Самарский А.А., Кастельянос О., Шапранов А.В. Метод динамической адаптации для нестационарных задач с большими градиентами // Математическое моделирование, 1993, т.5, №4, с.32-56.
Mazhukin V.I., Samarskii A.A., Kastelianos O., Shapranov A.V. Metod dinamicheskoi adaptatsii dlia nestatsionarnykh zadach s bolshimi gradientami // Matematicheskoe modelirovanie, 1993, t.5, №4, s.32-56.
2. Годунов С.К., Прокопов Г.П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчётах // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1972, т.12, № 2, с.429-440.
Godunov S.K., Prokopov G.P. The use of moving meshes in gas-dynamical computations // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1972, v.12, № 2, p.182-195.
3. Benek J.A., Buning P.G., Steger J.L. A 3-D Chimera Grid Embedding Technique // AIAA Paper, 1985, № 85-1523.

4. *Benek J.A., Donegan T.L., Suhs N.E.* Extended Chimera Grid Embedding Scheme With Application to Viscous Flow // AIAA Paper, 1987, № 87-1126.
5. *Lee K.R., Park J.H., Kim K.H.* High-Order Interpolation Method for Overset Grid Based on Finite Volume Method // AIAA Journal, 2011, v.49, No. 7, p.1387-1398.
6. *Hahn S., Iaccarino G., Ananthan S., Baeder D.* Extension of CHIMPS for Unstructured Overset Simulation and Higher-Order Interpolation // AIAA Paper, 2009-3999.
7. *Tang H., Jones S.C., Sotiropoulos F.* An Overset Grid Method for 3D unsteady incompressible flows // Journal of Computational Physics, 2003, 191(2), p.567-600.
8. *Berger M.J.* On conservation at grid interfaces // SIAM J. Numer. Anal., 1987, 24, p. 967–984.
9. *Wang Z.J., Yang H.Q.* A Unified Conservative Zonal Interface Treatment for Arbitrarily Patched and Overlapped Grids // AIAA Paper, 1994-0320.
10. *Jung M.S., Kwon O.J.* A Conservative Overset Mesh Scheme via Intergrid Boundary Reconnection on Unstructured Meshes // AIAA Paper, 2009-3536.
11. *Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К., Полищук С.Н., Лашкин С.В., Жучков Р.Н., Глазунов В.А., Яцевич С.В., Курулин В.В.* Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и тепломассопереноса. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, препринт №111, 67 с.
Kozelkov A.S., Deriugin Ju.N., Zelenskii D.K., Polishchuk S.N., Lashkin S.V., Zhuchkov R.N., Glazunov V.A., Iatsevich S.V., Kurulin V.V. Mnogofunktsionalnyi paket programm LOGOS: fiziko-matematicheskie modeli rascheta zadach aero-, gidrodinamiki i teplomassoperenosa. – Sarov: RFIA Ts-VNIIEF, 2013, preprint №111, 67 s.
12. *Wang Z.J., Parthasarathy V.* A Fully Automated Chimera Methodology for Multiple Moving Body Problems // International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, v.33, No. 7, p.919-938.
13. *Bonet J., Peraire J.* An alternating digital tree (ADT) algorithm for 3D geometric searching and intersection problems // Intern. Journal for Numerical Methods in Engineering 1991; 31, p.1–17.
14. *Wentz W.H., Seetharam H.C.* Development of a Fowler Flap System for High Performance General Aviation Airfoil // NASA CR-2443, 1974.
15. *Fox J.H.* Generic Wing, Pylon, and Moving Finned Store, Verification and Validation Data for Computational Unsteady Aerodynamics // RTO-TR-26, Oct. 2000, St. Joseph Ottawa/Hill, Canada.

Поступила в редакцию 07.09.15.
Окончательный вариант 23.03.16.