

Method for Volume Layered Grid Generation for Problems of Hypersonic Flows around Vehicles with Changing Shape as a Result of Ablation Based on Electrostatic Analogy

P.S. Tikhonychev

TsNIIMash, Korolyev, 141070, Russia

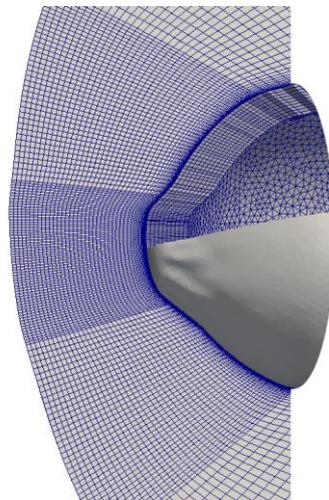
tikhonychev@phystech.edu

Abstract

A method based on electrostatic analogy for generation of 3D unstructured layered grids is proposed. A method for grid adaptation to the bow shock is described.

The method described in the paper allows fast generating of layered meshes for external flow problems as well as surface recession of the vehicles, are easy implemented and ready for simple parallelization.

Keywords: volume unstructured grids, adaptation to shock wave, parallel computations.



An example of the generated layered grid outside and inside a body with changed shape as a result of ablation. Here and hereafter the body was taken from the paper [1].

УДК 533

Метод построения пространственных слоистых сеток для задач обтекания летательных аппаратов с изменяющейся формой, основанный на электростатической аналогии

П.С. Тихонычев

ЦНИИМаш, Россия, Королёв, 141070, ул. Пионерская, дом 4.

tikhonychev@phystech.edu

Аннотация

В статье приведён метод построения пространственных слоистых неструктурированных сеток, основанный на электростатической аналогии. Описан метод адаптации сетки к ударной волне.

Описанные в статье методы позволяют быстро строить слоистые сетки для задач внешнего обтекания и расчётов уноса поверхности летательных аппаратов, легки в реализации и просты для распараллеливания.

Ключевые слова: пространственные неструктурированные сетки, адаптация к ударной волне, параллельные вычисления.

1. Введение

Моделирование полёта гиперзвукового летательного аппарата с уносимой теплозащитой включает в себя не только его внешнее обтекание, но и расчёт изменения его формы вследствие уноса ТЗП. Для такого моделирования нужно уметь строить пространственную расчётную сетку, структура которой учитывала бы особенности задач внешнего обтекания и обгара.

Для внешнего обтекания таковыми особенностями являются: пограничный слой, а также головная и внутренние ударные волны. Для качественного расчёта необходимо разрешить структуру пограничного слоя и уметь ориентировать грани расчётных ячеек вдоль сильных скачков параметров потока в области ударных волн[2].

Для проведения расчёта изменения формы поверхности летательного аппарата при разрушении ТЗП в настоящее время используется метод продвижения границы[3]. Разрушение ТЗП является следствием высоких тепловых нагрузок на уносимый материал, свойства которого варьируются с ростом температуры. Кроме того, на величину уноса ТЗП сильное влияние оказывает характер процессов теплообмена на поверхности аппарата. Поэтому на практике даже на изначально гладких поверхностях вследствие уноса возникают различные особенности в виде углов, выпуклостей и вогнутостей[4]. Для проведения расчётов изменения таких форм с помощью метода продвижения границы требуется частое переобразование сетки в окрестности движущейся границы. Таким образом, с одной стороны переобразование сетки в окрестности поверхности тела становится массовой операцией в процессе проведения расчётов, с другой стороны сетка должна учитывать сложные особенности получаемой геометрии.

Помимо особенностей вышеупомянутых задач, структура сетки должна позволять быстро и без перестроения связей между ячейками подстроить сетку для расчёта внешнего обтекания под изменённую вследствие уноса форму. Всем этим требованиям удовлетворяет пространственная расчётная сетка со слоистой структурой. Слоистая сетка состоит из семейства образующих, каждая из которых порождается узлом сетки на поверхности тела, и слоёв. Каждая из образующих разделена на одинаковое количество пронумерованных отрезков. Отрезки с одинаковыми номерами вместе со связями между элементами на поверхности образуют слои.

2. Описание метода

Для построения слоистой сетки предлагается использовать электростатическую аналогию. Из электростатики известно, что силовые линии электрического поля, касательные к которым задаются уравнением (1), не пересекаются. Поэтому можно построить силовые линии электрического поля, идущие от точек поверхности гиперзвукового летательного аппарата и, принимая их за образующие, построить слоистую сетку.

$$\vec{E} = \frac{q}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (1)$$

Хотя силовые линии электрического поля не могут пересекаться, они могут очень близко сближаться (характерное поведения силовых линий в угле показано на рис.1, а, что приводит к большому скачку размеров соседствующих ячеек и, следовательно, ухудшению качества сетки. Поэтому классический электростатический потенциал предлагается заменить на более дальнедействующий (2), при котором влияние изломов поверхности в области этих изломов было бы соизмеримо с влиянием оставшейся поверхности (рис.1, б).

$$\vec{E} = \frac{q}{|\vec{r}|^b} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (2)$$

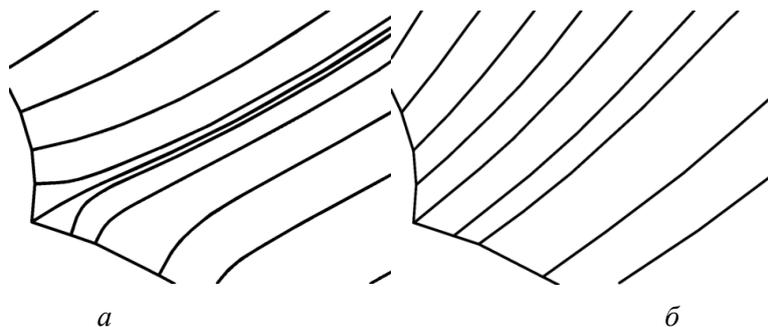


Рис. 1. Поведение силовых линий в угле: а) $b=2$, б) $b=1$

Для построения силовых линий, идущих от поверхности тела, нужен некий источник зарядов, который расположен целиком внутри обтекаемого тела. В роли такого источника могут выступать узлы сетки поверхности самого тела, но, для того чтобы избежать неопределённости поля в этих точках, построение силовых линий следует начать после вытягивания по нормали на небольшое расстояние от поверхности. Так как силовые линии не взаимодействуют между собой, количество операций при таком построении пропорционально квадрату узлов сетки поверхности тела. Поскольку используется дальнедействующий потенциал, скорость построения семейства образующих может быть увеличена, если использовать в качестве источника зарядов другую поверхность. Она должна быть приближена к исходной, но может быть сильно разреженной. Такая разреженная поверхность может в некоторых местах выходить за исходное тело, что приведёт к излишнему изгибу силовой ли-

нии. Поэтому в этом случае необходимо источник заряда сместить внутрь по нормали на некоторое расстояние.

Если требуется расчёт высокоскоростных летательных аппаратов вместе с донной областью, поверхность тела является замкнутой, и построенной по такому принципу расчётной сетки будет достаточно, так как внешнюю границу можно легко разбить на входную и выходную, течение на которой было бы сверхзвуковым. Если требуется провести расчёт без учёта донной области, граница расчётной области будет состоять из некоего отображения поверхности тела и поверхности, полученной при вытягивании крайнего сечения тела. Эта поверхность должна быть такой, чтобы течение на ней было сверхзвуковым. Самый простой способ гарантировать это – сделать эту поверхность плоской. Для того чтобы поверхность, натянутая на силовые линии, исходящие из крайнего сечения тела, была плоской нужен источник заряда, имеющий плоскость симметрии, проходящую через крайнее сечение тела (предполагается, что это сечение целиком лежит в одной плоскости). Для получения такого источника заряда нужно добавить к источнику, построенному по предыдущему методу, его симметричное отображение относительно интересующей нас плоскости (рис.2). Число точек нового источника возрастет вдвое, равно как и время построения расчётной сетки. Такова цена получения плоской выходной границы.

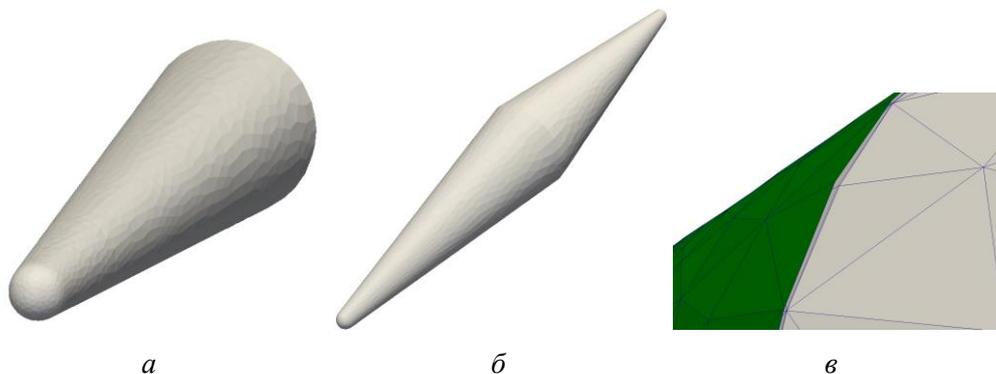


Рис. 2. Поверхность тела *a*), источник заряда *б*), их взаимное расположение *в*)

Если точки источника заряда будут заряжены одинаково, в областях сгущения силовые линии будут расходиться, в областях разрежения – сжиматься (рис.3). Чтобы сгладить этот эффект, нужно изменять заряды узлов в зависимости от плотности их распределения по поверхности (3).

$$q_i = s_i^a, \quad (3)$$

где q_i – заряд точки поверхности; s_i – средняя площадь элементов поверхности, к которым она принадлежит.

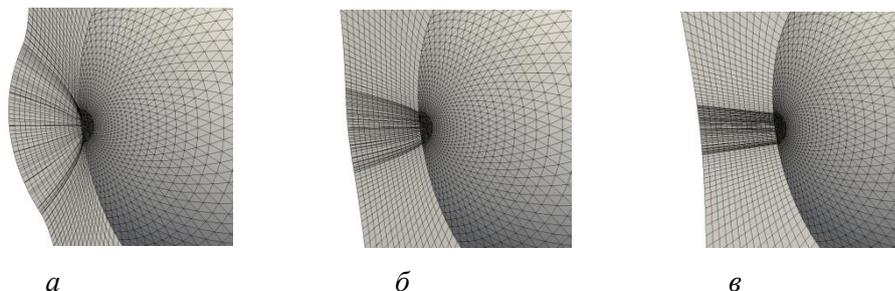


Рис. 3. Поведение силовых линий: *a*) $a=0$, *б*) $a=0.5$, *в*) $a=1$

Положение внешней границы сетки в общем случае заранее неизвестно, но одним из необходимых условий её качества является её гладкость. Для обеспечения этого необходи-

мо управлять длинами образующих сетки. Это невозможно сделать в общем виде из-за слишком большого количества факторов, влияющих на направление и изгиб направляющих. Поэтому предлагается построить сетку и обрезать её какой-то фигурой, например эллипсоидом, либо подстроить длины образующих сетки под положение ударной волны. На рис.4, *а* показано положение внешней границы до адаптации, на рис.4, *б* — после.

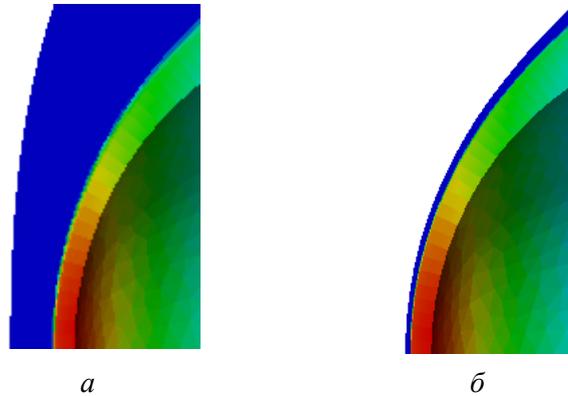


Рис. 4. Взаимное расположение ударной волны и внешней границы сетки: *а*) – до адаптации, *б*) – после адаптации

После проведения адаптации слоистая структура сетки позволяет разбить заново направляющие сетки, чтобы добавить сгущение к поверхности для обеспечения вязкого расчёта. Процедура разбиения направляющих сетки происходит почти мгновенно.

3. Примеры построенных сеток

Электростатическая аналогия хорошо подходит для построения сеток для внешнего обтекания из-за поведения силовых линий, которые стремятся удалиться от тела. Но для проведения расчёта изменения формы необходимо построить сетку в некоторой окрестности поверхности внутри тела. Как показывает опыт, описанный метод можно также использовать и для этого. Для построения сетки внутри тела необходимо по-прежнему найти направление силовых линий в точках тела, только смещаться нужно против направления электростатического поля и в качестве источника заряда использовать текущий слой.

Пример построения образующих наружной и внутренней сетки на теле с изменяющейся поверхностью показан на рис. 5, *а*. На рис. 5, *б* показано добавление сгущения к поверхности для внешней сетки.

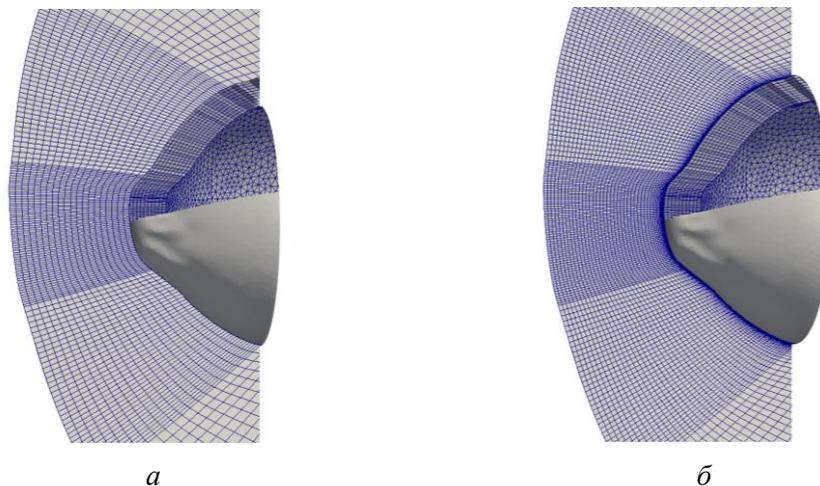


Рис. 5. Образующие сетки *а*), слой сетки *б*)

4. Адаптация внешней границы сетки к головной ударной волне

Для эффективного использования ячеек расчётной области и получения хорошего решения необходимо адаптировать внешнюю границу сетки к ударной волне. При адаптации нужно найти поверхность ударной волны. Так как изначально сетка не была подстроена под головной скачек, поверхность ударной волны будет не ровной, поэтому требуется её сгладить. На сетке со слоистой структурой получение поверхности ударной волны — простая задача. Достаточно, продвигаясь по каждой из образующих, от внешней границы к поверхности тела следить за изменением параметров. Точка, параметры в которой отличаются от параметров набегающего воздуха на некоторую относительную величину, постоянную для всех образующих, принимается за точку, лежащую на ударной волне. Эта точка может не быть точкой исходной сетки, она может просто лежать на образующей. После того как найдены положения ударной волны на всех образующих, узлы вместе со связями между собой, сохраняющимися благодаря слоистой структуре, образуют поверхность ударной волны. После адаптации положение ударной волны несколько изменится, поэтому необходимо сделать небольшой запас, сдвинув поверхность ударной волны вдоль образующих сетки от тела. После этого, приняв эту поверхность за внешнюю границу, необходимо её сгладить. Из физических соображений это следует делать, применяя механическую аналогию, а именно, добавить этой поверхности некую упругую силу, которая бы убрала неровности. Если сделать так, вся внешняя граница схлопнется, подобно сдуваемому воздушному шару. Чтобы этого избежать, необходимо добавить другие упругие силы, которые бы привязывали внешнюю границу к несглаженному её варианту. Эти упругие силы должны быстрее расти с расстоянием, чем предыдущие, чтобы не дать сильно отклониться от начального положения.

Чтобы реализовать это на практике, необходимо решить следующее уравнение для всех точек поверхности.

$$\left(\vec{F}(\vec{x}), \vec{l}(\vec{x})\right) = 0, \vec{F}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N \vec{F}_{ni}(\vec{x}) + \vec{F}_s(\vec{x}), \quad (4)$$

где введены следующие обозначения: \vec{l} — направление образующей сетки; \vec{F}_{ni} — сила, действующая со стороны i -го соседа; \vec{F}_s — сила связи с изначальным положением поверхности.

$$\vec{F}_{ni}(\vec{x}) = \vec{x}_i - \vec{x}, \vec{F}_s(\vec{x}) = \alpha \frac{|\vec{x}_0 - \vec{x}|}{d} (\vec{x}_0 - \vec{x}), \quad (5)$$

где величина d — толщина слоя (для сохранения размерности слагаемых уравнения (4)); \vec{x}_0 — положение ударной волны на данной образующей; α — постоянная, отвечающая за жёсткость привязки к начальному положению.

Если решать это уравнение явным методом, решение устанавливается приблизительно за 300 итераций на поверхности из 20000 точек. Под явным методом подразумевается следующее. На каждой итерации ищется новое положение равновесия каждой точки относительно соседних точек, находящихся в текущем положении. Затем положение соседей обновляется.

Для демонстрации влияния на решение такой адаптации ниже представлены картины поля плотности на изначальной сетке и на сетках после одной, двух и трёх адаптаций соответственно (рис. 6). Количество ячеек в сетке не менялось, сгущения не производились. Для получения этих полей проводились расчёты невязкого обтекания обгоревшей болванки методом установления.

Во всех расчётах намеренно использовалась низкодиссипативная схема, поэтому на носке образовывалось свойственное ей нефизичное решение — карбункул [5]. Несмотря на это, представленный здесь алгоритм адаптации и сглаживания позволили не допустить его

разрастания. Без сглаживания на внешней границе сетки в местах нефизичного решения образовывались бы локальные выпуклости, которые бы создали положительную обратную связь, и карбункул бы увеличивался с каждой адаптацией.

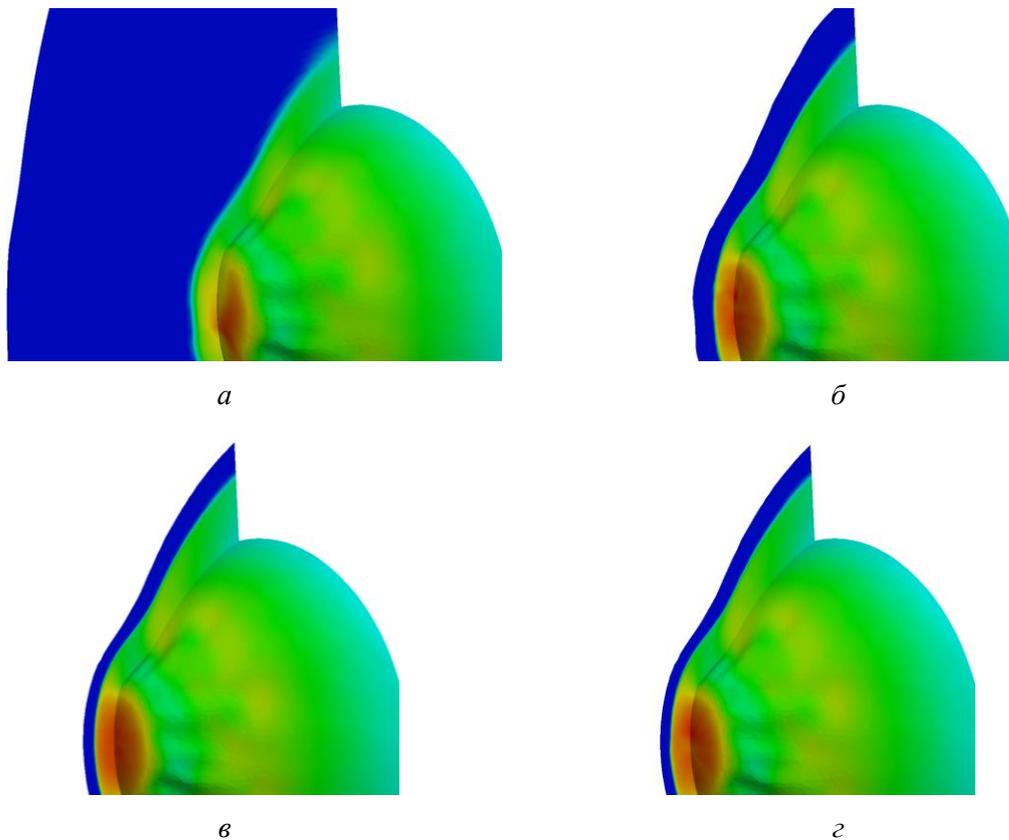


Рис. 6. Поля плотности – без адаптации *a*), после одной *б*), двух *в*), трёх *г*) адаптаций

Несмотря на то, что адаптация сетки проходит довольно быстро – за пару секунд в однопоточной программе, на получение нового решения на адаптированной сетке нужно затратить значительное количество времени. Поэтому важно ответить на вопрос, сколько проводить адаптаций. На рис. 7 показано распределение давления вдоль образующей после каждой адаптации.

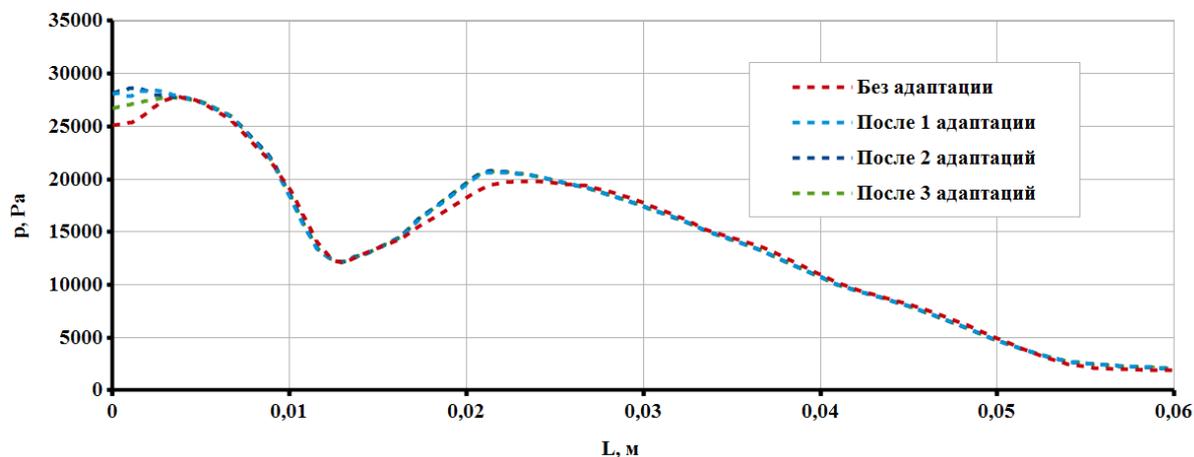


Рис. 7. Распределение давления вдоль образующей

На рис. 8 показано отклонение давления от эталонного давления (полученного после трёх адаптаций).

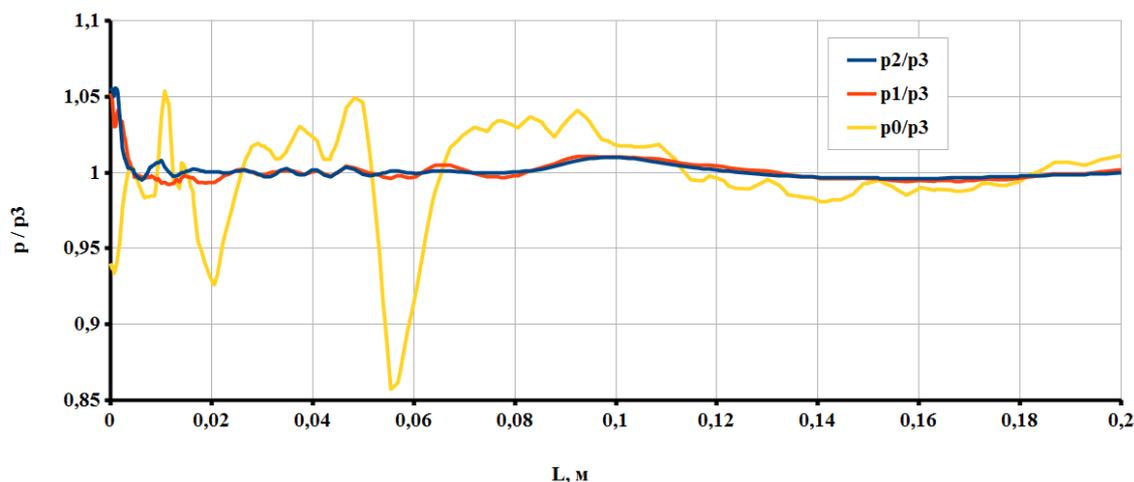


Рис. 8. Отношение давлений на неадаптированной сетке, после первой и второй адаптации к давлению, полученному после проведения третьей адаптации

Глядя на эти графики, можно сделать вывод о том, что необходимо провести хотя бы одну адаптацию данного типа.

5. Достоинства метода

Описанный выше метод построения пространственных расчётных сеток имеет квадратичную вычислительную сложность по отношению к числу точек на поверхности. Предложенный метод сглаживания поверхности тоже требует большого объёма вычислений. Несмотря на это, данный метод построения сеток имеет много достоинств. Алгоритм очень прост для написания и идеально подходит для распараллеливания на GPU. Сравнение времени работы CPU и GPU версий программ показано в табл. 1. Параллельная версия не требует много памяти. Не нужно держать всю сетку в памяти, можно хранить только источник заряда и один строящийся слой.

Таблица 1

**Построения одного слоя сетки.
В источнике заряда приблизительно 40000 точек**

Вычислительное устройство	Intel i7 4770k	NvidiaGTX 960
Время расчёта	15 мин	1 с

Так же достоинством данного метода, а также слоистых сеток в целом, является отсутствие необходимости перестраивать образующие сетки: их можно построить один раз на достаточное расстояние в обе стороны от поверхности, а затем после каждого изменения тела лишь передвигать внешнюю границу и поверхность тела вдоль образующих.

Предложенная адаптация обладает теми же достоинствами (табл. 2).

Таблица 2

**Сглаживание поверхности приблизительно из 20000 узлов.
Проводилось 1000 итераций сглаживания**

Вычислительное устройство	Intel i7 4770k	Nvidia GTX 960
Время расчёта	20с	0.1 с

6. Заключение

Программа построения расчётных сеток, основанная на описанных методах, хорошо показала себя на практике. Позволила строить сетки в автоматическом режиме на телах с изменяющейся формой. Слоистая структура сеток позволила подстраивать расчётную область под решение, что положительно отразилось на качестве давления и теплового потока на поверхности тела. Она так же позволила уменьшить на порядок время проведение обгара методом продвижения границы из-за достаточной скорости перестраивания сетки и сильно улучшить качество получаемых результатов.

Литература

1. Галеев А.Г. и др. Промышленная установка на базе кислородно-водородной камеры ЖРД для отработки материалов и конструкций в высокотемпературной высоконапорной струе газа//Ракетно-космическая техника, сборник, 1996, серия 2, выпуск 1, С. 70–76.
2. Graham V. Candler. Development of the US3D code for advanced compressible and reacting flow simulations// AIAA. 2015-1893.
3. Osher, S., Fedkiw, R. Level Set Method and Dynamic Implicit Surface//Applied Mathematical Sciences. Vol. 153, 2003.
4. Знаменский В.В. Численное решение уравнений уноса//МЖГ. 1978. № 2.
5. K. Peery and S. Imlay. Blunt-body flow simulations//. AIAA Paper, 1988-2904.

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2016 г.