

*Посвящается доктору физико-математических наук, академику РАН
Юрию Гавриловичу Евтушенко в связи с его 85-летием.*

АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ К ПОЛЮ ТЕЧЕНИЯ, СОДЕРЖАЩЕМУ ГОЛОВНОЙ СКАЧОК УПЛОТНЕНИЯ¹⁾

© 2024 г. И.В. Воронич^{1,*}, Н.С. Смирнова^{1,**}, В.А. Титарев^{1,***}

¹ 119333 Москва, ул. Вавилова, 44, ФИЦ ИУ РАН, Россия

*e-mail: i.voronich@frccsc.ru

**e-mail: nsmirnova@frccsc.ru

***e-mail: vladimir.titarev@frccsc.ru

Поступила в редакцию 08.04.2024 г.

Переработанный вариант 13.05.2024 г.

Принята к публикации 31.05.2024 г.

Построение качественных расчетных сеток играет существенную роль в получении высокоточных результатов в задачах расчета внешнего обтекания тел высокоскоростным потоком. Приоритетной задачей является адаптация расчетной сетки к разрывам, в первую очередь к головным скачкам уплотнения. В настоящей работе рассмотрен вариант алгоритма адаптации расчетной сетки как механической системы с упругими связями к полю течения, содержащему головной скачок уплотнения. В результате применения алгоритма к типичной структурированной расчетной сетке происходит ее перестройка в областях большого градиента поля путем стягивания в область скачка сеточных линий с сохранением качества элементов сетки. Рассмотренные задачи показывают возможность применения описанного алгоритма к реальным задачам обтекания тел. Библ. 24. Фиг. 6.

Ключевые слова: адаптация сетки, вычислительная аэродинамика, сверхзвуковые течения, параллельные вычисления.

DOI: 10.31857/S0044466924090145, EDN: WIQSBX

ВВЕДЕНИЕ

Реализованные к настоящему времени модели и алгоритмы генерации расчетных сеток позволяют успешно проводить расчеты обтекания геометрических форм различной сложности [1, 2]. Задача повышения точности численных решений предъявляет в первую очередь требования к расчетной сетке — по качеству элементов, по количеству элементов на масштаб особенности течения, по соответствию сеточных линий линиям тока [3]. Для повышения эффективности расчета сверхзвуковых течений приоритетной задачей является адаптация расчетной сетки к разрывам, в первую очередь к головным скачкам уплотнения [4, 6].

Неоднократно было показано, что адаптация расчетной сетки эквивалентна увеличению количества ее элементов, порой весьма существенному, в зависимости от способа адаптации [7–10]. Традиционно большое внимание уделяется методам построения и начальной адаптации расчетных сеток к форме обтекаемых поверхностей и полям течения. Эти методы делятся на алгебраические (трансфинитная интерполяция), методы конформных преобразований, вариационные методы, методы решения уравнений эллиптического типа [1, 4, 6, 7, 11–15]. Наряду с указанными методами развивался второй подход, основанный на измельчении начальной расчетной сетки путем деления элементов по ребрам, на которых достигаются наибольшие перепады целевой функции [8–10]. Такой подход сейчас широко представлен в коммерческом программном обеспечении.

Преимущество первой группы методов заключается в неизменном количестве узлов расчетной сетки, сохранении ее топологии и непрерывности, соответствии семейств сеточных линий общей структуре течения и

¹⁾ Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования “Высокопроизводительные вычисления и большие данные” (ЦКП “Информатика”) ФИЦ ИУ РАН и МСЦ РАН (г. Москва).

форме обтекаемых поверхностей. Недостатки заключаются в неоднородном качестве элементов для алгебраических методов и ограниченных возможностях контроля адаптации расчетной сетки к деталям поля течения для остальных методов.

Вторая группа методов в качестве преимущества дает алгоритмическую простоту, но имеет серьезные недостатки: потерю непрерывности расчетной сетки, более низкое качество производных элементов, необходимость контроля количества добавляемых элементов. В рамках подхода встраиваемых расчетных сеток задача заключается в построении функции-сигнализатора и разработке алгоритма встраивания новых элементов путем деления исходных. Такой подход обладает свойством локальности, затрагивая только некоторую подобласть расчетной сетки, но не обеспечивает ее непрерывности. Последнее обстоятельство частично обесценивает результат адаптации из-за нарушения аппроксимации численного решения. Подход применяется как для структурированных расчетных сеток, так и для неструктурированных расчетных сеток общего типа.

В недавнее время в связи с решением сопряженных задач на подвижных сетках развились методы адаптации, основанные на силовых физических аналогиях [5, 6, 16–22]. Эти аналогии рассматривают элементы сетки как упругие деформируемые объекты и наделяют их механическими связями, определяемыми с учетом решаемой задачи. Преимущество этой категории методов заключается в том, что расчетная сетка представляется как механическая система узлов (масс), соединенных связями, жесткость которых определяется свойствами поля. На сегодняшний день считается, что задача адаптации при надлежащем выборе коэффициента жесткости имеет корректное решение, при этом на перемещения узлов могут быть наложены дополнительные ограничения, и к полученной сетке могут быть применены процедуры сглаживания. Данная модель адаптации в силу физической универсальности может быть применена к сеткам произвольной размерности и топологии.

В настоящей работе рассмотрен вариант алгоритма адаптации структурированной расчетной сетки как механической системы с упругими связями к полю течения, содержащему головной скачок уплотнения.

1. МОДЕЛЬ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ КАК МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Расчетная сетка рассматривается как механическая система точечных масс, в которой ребра элементов представлены упругими связями со свойствами, определяемыми полем течения. Поле течения в виде выбранной функции течения $P(x)$ определено в расчетной области, где задана сетка. Функция $P(x)$ может быть непрерывной или дискретной $\{P_i\}$, заданной в узлах сетки $\{x_i\}$. Во втором случае предполагается, что существует непрерывное продолжение дискретной сеточной функции на всю расчетную область в виде той или иной интерполяционной функции так, чтобы можно было вычислить значения функции в новых положениях узлов. В качестве функции $P(x)$ можно использовать поле плотности или поле давления, которые везде положительны и имеют заведомо ограниченные вариации. Удобно нормировать значения функции P с использованием ее характерного значения в поле течения.

Под адаптацией расчетной сетки понимается изменение координат части ее узлов в соответствии с функцией $P(x)$ и выбранным алгоритмом адаптации. Координаты узлов на границе адаптируемой части расчетной сетки могут фиксироваться (например, на стенке) либо их движение может быть ограничено (например, условием принадлежности узла кривой или поверхности либо условием близости к границе).

Уравнения динамики механической системы с заданными начальными и граничными условиями и ограничениями запишем в форме:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= \sum_{j(i)} K(P(x_{j(i)}), P(x_i)) (x_{j(i)} - x_i) - 2\gamma_i \dot{x}_i, \quad i = 1, \dots, N, \\ x_{iw} &= x_{iw}^0, \quad G(x_{is}) = 0, \\ x_i(t=0) &= x_i^0, \quad \dot{x}_i(t=0) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x_i — координаты узлов, массы узлов приняты единичными (хотя может быть сделан и иной выбор), $K(P(x_j), P(x_i))$ представляет собой функцию жесткости, зависящую от взаимного положения узлов и поля $P(x)$, $\gamma_i > 0$ — локальный коэффициент демпфирования, нижний индекс w указывает неподвижные узлы на границе, s — ограниченно подвижные узлы на границе, G — функция, задающая ограничение движения узлов на границе, индекс $j(i)$ нумерует ближайших соседей узла с номером i . Таким образом, система (1) представляет собой динамическую систему из N упруго связанных масс с демпфированием при заданных начальных и граничных условиях [23]. Размерность задачи и структура связей могут быть произвольными. В настоящей работе рассматриваются структурированные расчетные сетки как наиболее экономичные для расчета задач сверхзвукового обтекания.

Уравнения (1) могут быть сопоставлены с механическими колебательными системами [23]. Параметр демпфирования γ_i служит для обеспечения сходимости к стационарному решению системы (1), соответствующему

положению равновесия. Для обеспечения оптимальной сходимости целесообразно выбирать значение параметра γ_i близким к границе колебательных режимов локального осциллятора:

$$\gamma_i \approx \omega_{0i} = \sqrt{\sum_{j(i)} K(P(x_{j(i)}), P(x_i))}.$$

В такой модели расчетная сетка является напряженной — силы упругости на ребрах исчезают только в случае сетки, стянутой в точку, и конечное состояние расчетной сетки определяется достижением баланса сил упругости на ребрах элементов в адаптируемой части расчетной области с учетом наложенных граничных условий. Это обстоятельство отличает настоящий подход от широко принятых, которые рассматривают начальную сетку как ненапряженную [18–20], в которой начальные положения узлов считаются равновесными и силы упругости возникают только при отклонении узлов от начальных значений, что адекватно для описания малых отклонений узлов. Так как адаптация расчетной сетки к полю течения со скачком уплотнения требует больших деформаций начальной сетки для обеспечения разрешения разрывов, в настоящей работе принята модель напряженной сетки.

В качестве определения функции $K(P(x_j), P(x_i))$ примем выражение следующего вида:

$$K(P(x_j), P(x_i)) = F(a, b, c, \delta, z) = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \tanh\left(\frac{z-c}{\delta}\right), \quad (2)$$

$$z = |\Delta_{ij} P(x) / \Delta_{ij}(x)|, \quad \Delta_{ij} P = P(x_j) - P(x_i), \quad \Delta_{ij}(x) = \|x_j - x_i\|.$$

Данное выражение связывает коэффициент жесткости упругой связи на ребре расчетной сетки с градиентом поля $P(x)$ в направлении ребра между узлами i и j . Параметры a, b, c, δ выбираются таким образом, чтобы обеспечить нужный минимальный (a) и максимальный (b) уровень функции F , центрированной в точке c и имеющей ширину переходной зоны δ . Практика показывает, что в определении функции F важны прежде всего отношение параметров b/a и правильный выбор параметра c в соответствии с разрешаемым градиентом, при этом параметр δ может быть выбран достаточно малым по сравнению с уровнем порога c .

2. ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Предложенная система уравнений (1) для динамической системы из N упруго связанных масс с демпфированием решается численно, при заданных начальных и граничных условиях. Дифференциальное уравнение для узла с номером i аппроксимируется разностной схемой второго порядка точности по времени:

$$\frac{x_i^{n+1} - 2x_i^n + x_i^{n-1}}{\Delta t^2} = \sum_{j(i)} K(P(x_{j(i)}^n), P(x_i^n)) (x_{j(i)}^n - x_i^n) - 2\gamma_i^n \frac{x_i^{n+1} - x_i^{n-1}}{2\Delta t}. \quad (3)$$

Положение узлов на новом временном шаге определяется решением системы:

$$x_i^{n+1} = \frac{2x_i^n + (\gamma_i^n \Delta t - 1)x_i^{n-1} + \Delta t^2 \sum_{j(i)} K(P(x_{j(i)}^n), P(x_i^n)) (x_{j(i)}^n - x_i^n)}{1 + \gamma_i^n \Delta t} \quad (4)$$

с учетом ограничений, наложенных граничными условиями.

Шаг по времени для схемы (4) в настоящей работе выбирается из условия разрешения периода колебаний для самых жестких связей:

$$\Delta t < \frac{2\pi}{\max_i \omega_{0i}}.$$

Если поле $P(x)$ является результатом интерполяции сеточной функции, в процессе адаптации необходимо проводить повторную интерполяцию после перерасчета поля с учетом новых положений узлов.

Критериями остановки итерационного процесса могут служить установление положений узлов или достижение некоторого ограничения. Следует отметить, что наложение избыточных ограничений на расчетную сетку в процессе адаптации не требуется, так как механическая модель практически не допускает пересечений ребер элементов, обеспечивая выстраивание и сгущение сеточных линий в зонах больших градиентов.

Улучшение качества полученной адаптированной расчетной сетки может быть достигнуто с помощью процедуры взвешенного сглаживания (здесь W — собственный вес узла):

$$x_i = \frac{1}{W + \sum_{j_i} 1} \left(W x_i^{n+1} + \sum_{j_i} x_{j_i}^{n+1} \right). \quad (5)$$

Данная процедура может применяться для улучшения конечной расчетной сетки избирательно в области элементов большой скошенности или скорости роста размеров.

3. РАСЧЕТНЫЕ ПРИМЕРЫ

В настоящем разделе рассмотрены примеры применения описанного алгоритма к аналитически заданным и дискретным полям в двухмерном случае. В первом случае это позволяет выявить поведение алгоритма и влияние его параметров при адаптации расчетной сетки к гладкому полю, содержащему заданный перепад параметров и переходную зону. Во втором случае технология применяется к дискретным вычислительным полям, формирующимся при обтекании тела сверхзвуковым потоком газа. В этих примерах выполняется адаптация и перерасчет поля на новой сетке, чтобы эффект мог быть оценен с практической стороны.

В расчетах применялась процедура сглаживания (5) с весом $W = 1$. У стенки перемещение узлов при адаптации и сглаживании ограничиваются путем умножения на экспоненциальную функцию вида

$$f(s, s_*) = 1 - \exp(-(s/s_*)^3), \quad (6)$$

так что на поверхности перемещение узла равно нулю, тогда как на внешней границе оно полностью определяется алгоритмом адаптации. Здесь s — расстояние до стенки, s_* — характерный масштаб, определяемый с учетом расстояния от стенки до фронта ударной волны для конкретной задачи. Применение (6) дает возможность избежать ухудшения точности моделирования пограничного слоя на стенке.

3.1. Адаптация к аналитически заданному полю

Рассмотрим приложения алгоритма адаптации расчетной сетки к аналитически заданному полю около цилиндра с имитацией головного скачка уплотнения. Поле задается в полярных координатах (r, θ) выражением вида

$$P(r, \theta) = F(\psi(\theta), 1, r_s(\theta), \Delta(\theta), r), \quad r \geq 1, \quad (7)$$

где общий вид функции F определен в (2). Здесь функция $\psi(\theta)$ задает изменение по полярному углу интенсивности поля за скачком, функция $r_s(\theta)$ задает форму скачка, функция $\Delta(\theta)$ задает изменение ширины скачка.

Форму скачка положим заданной в виде

$$r_s(\theta) = 1 + 0.5 \exp(0.5\theta^2).$$

Первое поле представляет ситуацию с постоянным перепадом параметров на скачке $\psi(\theta) = 2$ и постоянной шириной скачка $\Delta(\theta) = 0.02$.

Второе поле представляет ситуацию с уменьшающимся перепадом параметров на скачке

$$\psi(\theta) = 2(1 - 0.001 \exp(0.5\theta^2))$$

и увеличивающейся шириной скачка

$$\Delta(\theta) = 0.02 \exp(0.5\theta^2).$$

Результаты для аналитически заданных полей получены на расчетной сетке размерности 50×50 ячеек с квадратичным распределением узлов по радиусу [1] в области $1 \leq r \leq 4$, $0 \leq \theta \leq \pi$; пристенная ячейка высотой 10^{-4} . На фиг. 1 приведены начальная, адаптированная и сглаженная расчетные сетки для первого поля. Функция F , используемая в (1)–(2), построена при параметрах:

$$a = 1, \quad b = 3, \quad c = \maxgrad/10, \quad \delta = 0.3.$$

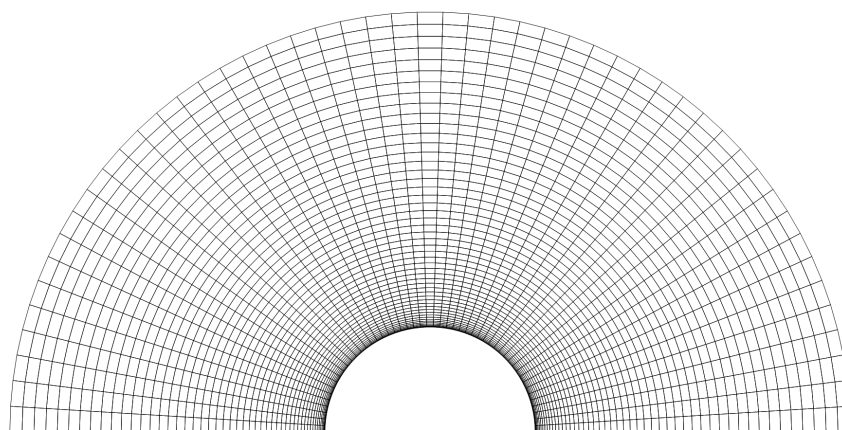
Здесь $\maxgrad$ — максимальное значение дискретного градиента величины P вдоль ребра во всей расчетной области:

$$\maxgrad = \max_{ij} |\Delta_{ij} P(\mathbf{x}) / \Delta_{ij}(\mathbf{x})|.$$

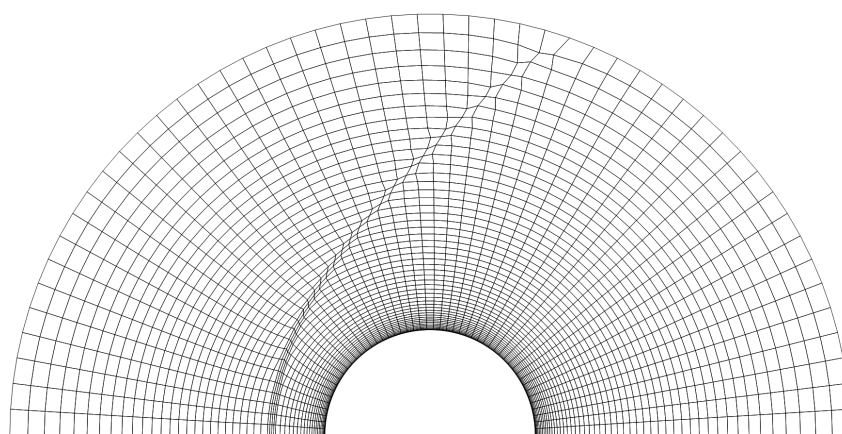
На фиг. 2 приведены начальная, адаптированная и сглаженная расчетные сетки для второго поля с параметрами функции F

$$a = 1, \quad b = 5, \quad c = \maxgrad/10, \quad \delta = 0.5.$$

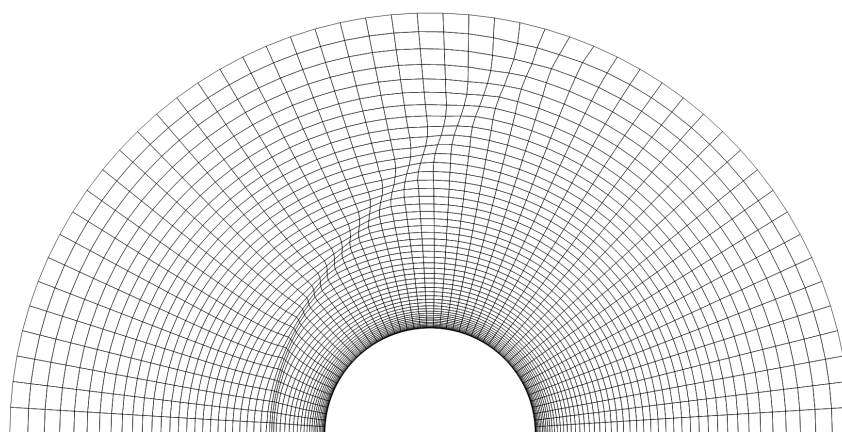
В рассматриваемых примерах $\maxgrad = 23$. В обоих случаях адаптация происходит адекватно — линии сетки выстраиваются вдоль скачка, происходит втягивание линий в скачок. Финальная сетка после сглаживания обладает достаточной для практики ортогональностью (минимальный угол при вершине элемента равен 30 градусам) и ограниченностью скорости роста элементов вдоль сеточных линий.



(а) начальная сетка



(б) адаптированная сетка без сглаживания

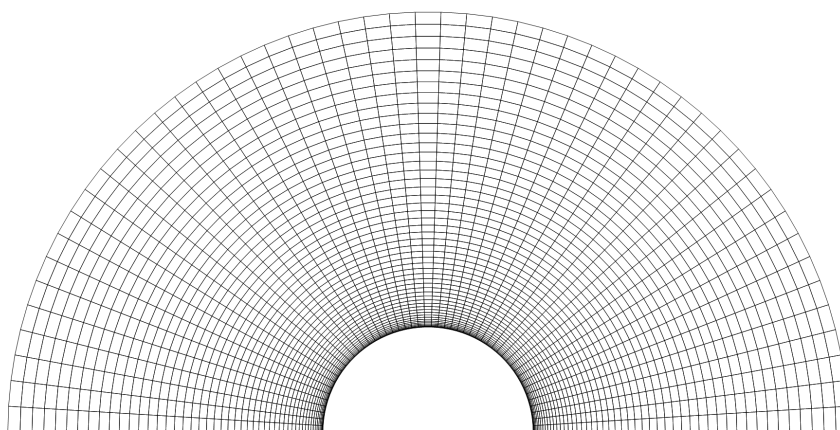


(в) адаптированная сетка после сглаживания

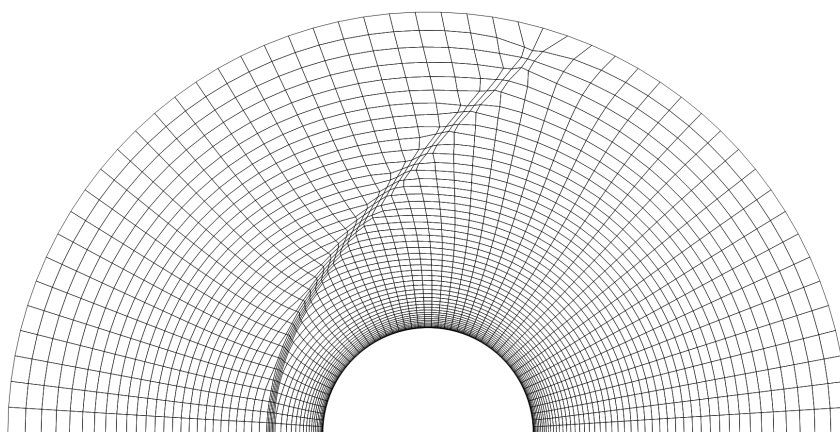
Фиг. 1. Адаптация расчетной сетки к первому аналитически заданному полю около цилиндра.

3.2. Адаптация к дискретному полю

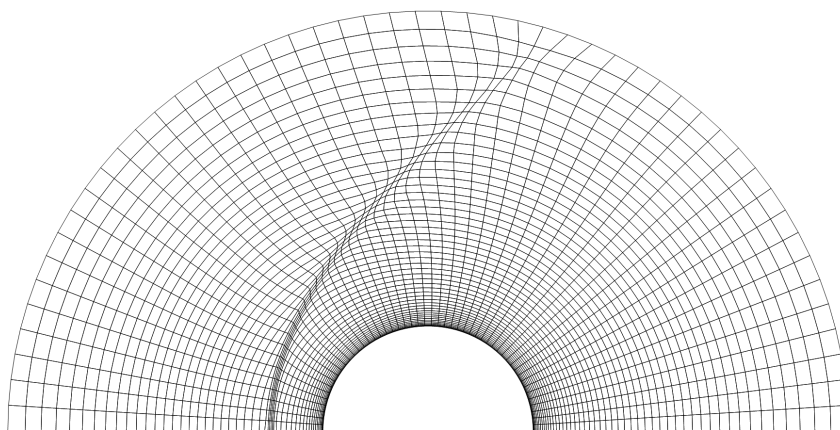
Рассмотрим задачи об адаптации расчетной сетки к двумерному полю течения двухатомного совершенного вязкого газа около цилиндра и эллипса. Во всех тестовых примерах число Маха набегающего потока $M_\infty=10$, число Рейнольдса $Re = 13.5 \times 10^6$ в расчете на размер 1 метр, температурный фактор $T_w/T_0 = 0.12$. Поле те-



(а) начальная сетка



(б) адаптированная сетка без сглаживания



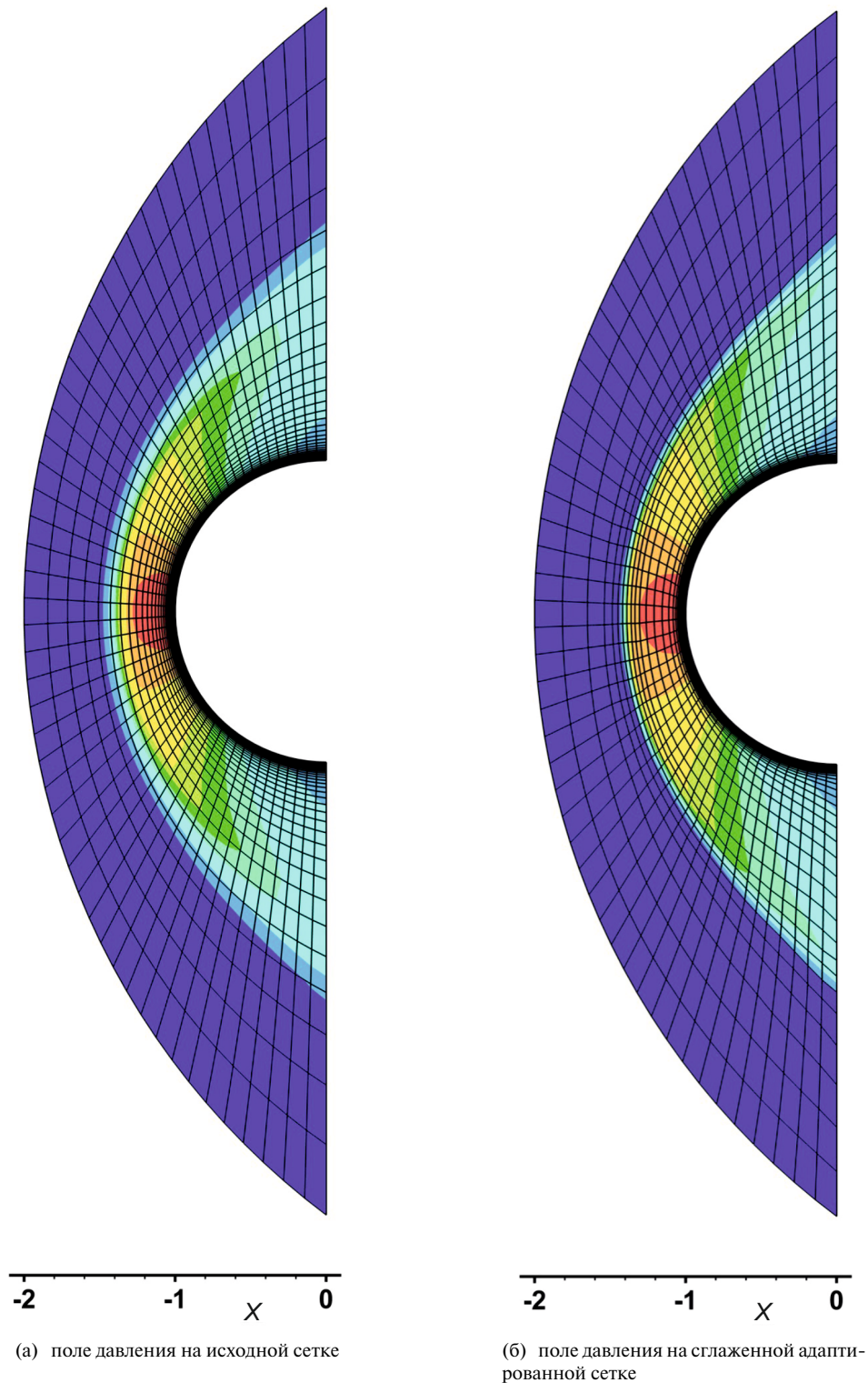
(в) адаптированная сетка после сглаживания

Фиг. 2. Адаптация расчетной сетки ко второму аналитически заданному полю около цилиндра.

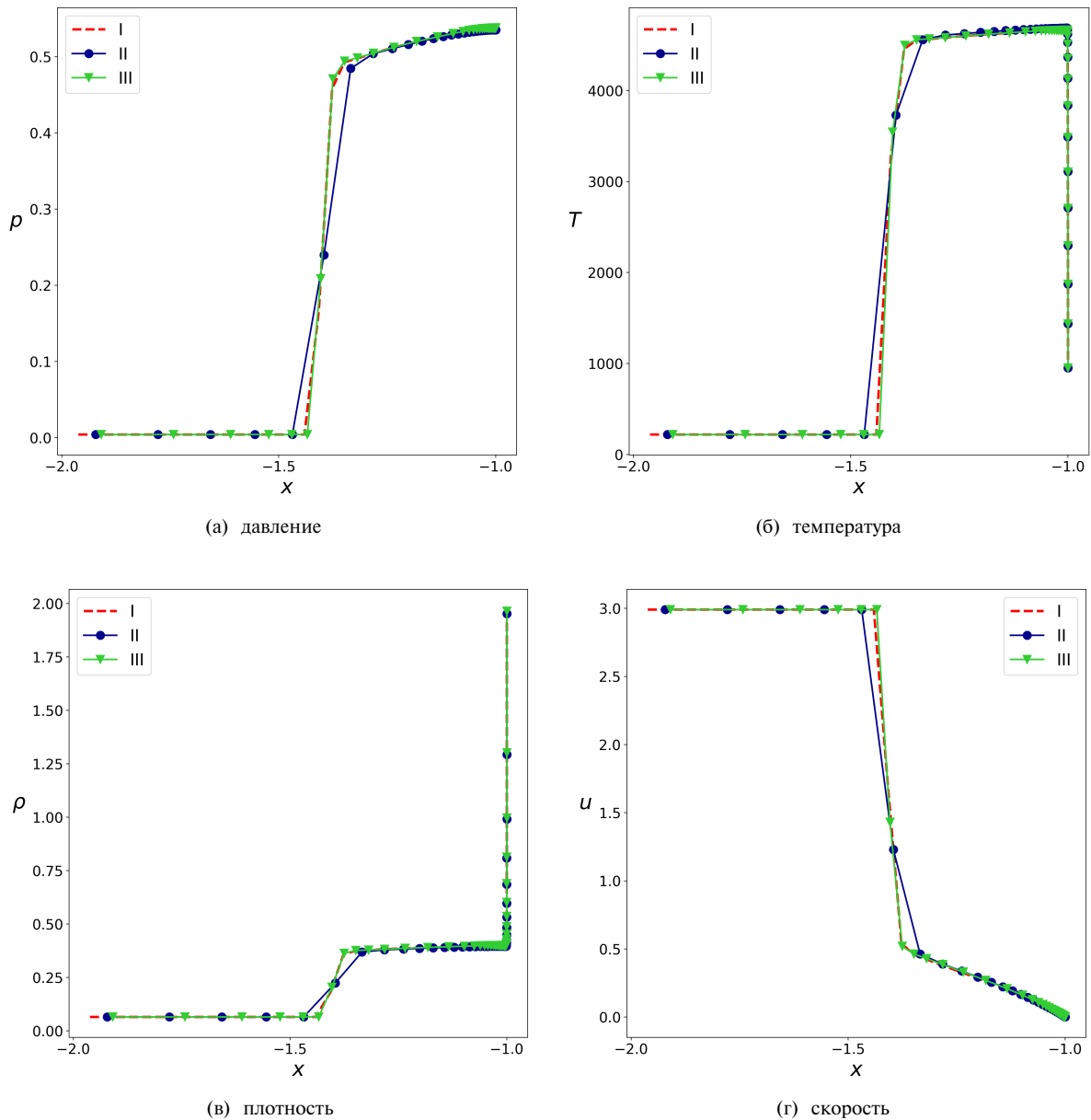
чения на исходной и адаптированной сетках получено путем решения трехмерных уравнений Навье-Стокса совершенного газа с помощью неявного численного метода второго порядка аппроксимации [24]. Вычисления проводились на одном сервере ЦКП “Информатика” ФИЦ ИУ РАН и МСЦ РАН с использованием до 32 физических ядер. Для построения функции $P(x)$ использовалось нормированное поле давления, что обусловлено

его слабыми изменениями в пограничном слое.

Исходная расчетная сетка для половины цилиндра радиуса 1 метр содержала 50×50 ячеек. Поскольку детальное разрешение пограничного слоя не являлось целью расчетов, высота первой ячейки принималась равной $h \approx 10^{-4}$ м. На фиг. 3 приведены результаты применения алгоритма адаптации и изменение поля давления.



Фиг. 3. Адаптация расчетной сетки к дискретному полю около половины цилиндра.



Фиг. 4. Распределения давления (МПа), температуры (К), плотности (кг/м³) и скорости (км/с) вдоль линии торможения перед цилиндром. I – 100 ячеек по радиусу; II – 50 ячеек по радиусу; III – 50 ячеек по радиусу после адаптации.

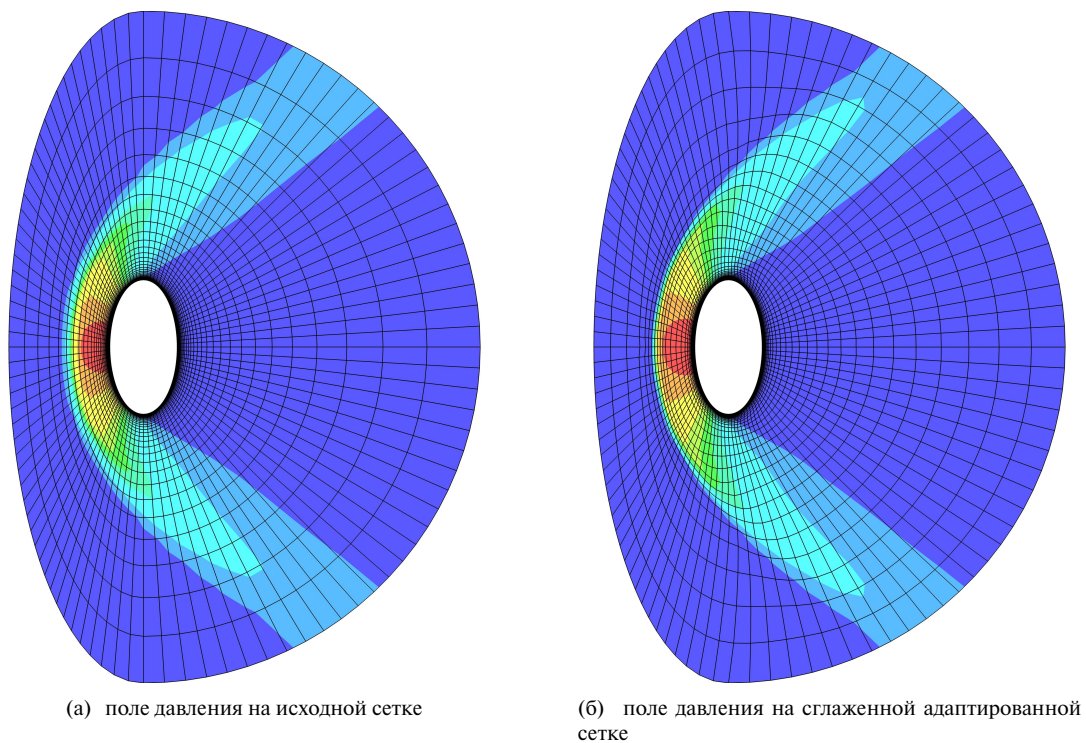
На фиг. 4 приведены распределения размерных величин вдоль линии торможения. В дополнение к основной серии расчетов на фиг. 4 приведены также результаты вычислений на неадаптированной сетке, содержащей 100 ячеек по радиусу с сохранением высоты первой ячейки. Параметры функции F задавались следующие:

$$a = 1, \quad b = 5, \quad c = \maxgrad/10, \quad \delta = 0.3.$$

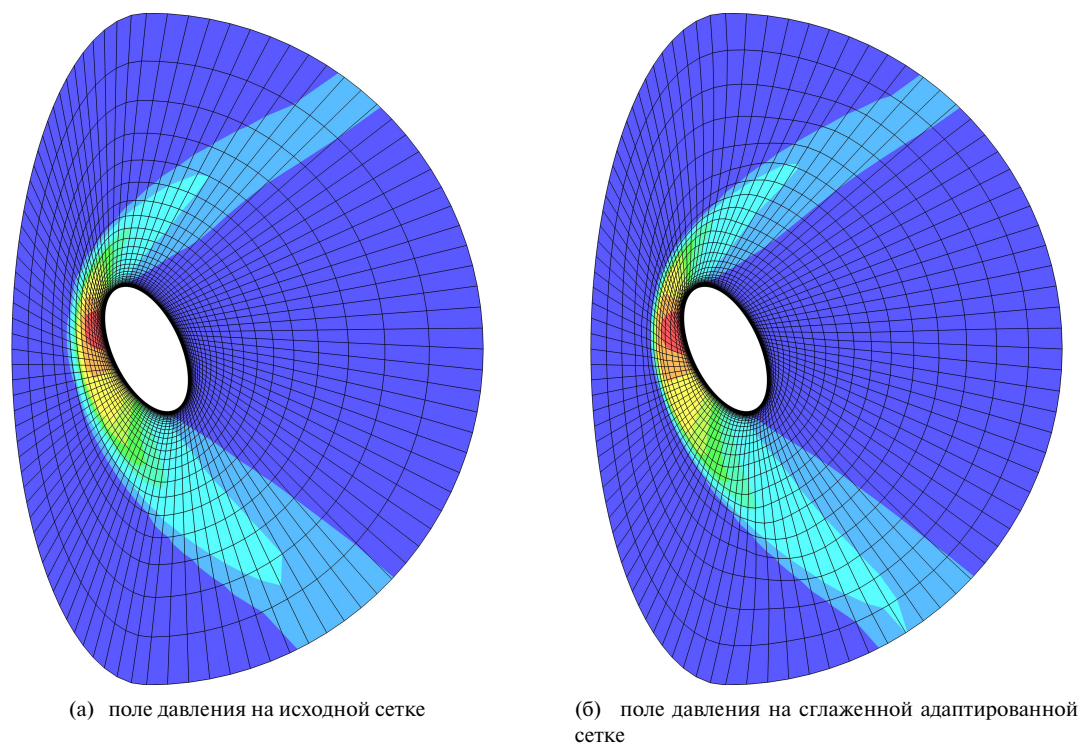
Результаты демонстрируют сгущение узлов к области скачка уплотнения, а также показывают значительное количественное уточнение профилей в окрестности скачка: использование адаптации позволяет проводить расчеты на приблизительно вдвое менее подробной сетке.

Исходные расчетные сетки для обтекания полного эллипса с полуосями 1 и 2 метра состояли из 50 ячеек по радиальному направлению и 100 ячеек по углу, высота первой ячейки составляла $h \approx 10^{-4}$ м. Параметры функции F задавались следующие:

$$a = 1, \quad b = 10, \quad c = \maxgrad/10, \quad \delta = 0.22.$$



Фиг. 5. Адаптация расчетной сетки к дискретному полю около эллипса.



Фиг. 6. Адаптация расчетной сетки к дискретному полю около эллипса с повернутой на 25 градусов большой полуосью.

На фиг. 5 представлены результаты применения алгоритма адаптации и изменение поля давления для эллипса с вертикально расположенной большой полуосью. На фиг. 6 изображены результаты адаптации расчетной сетки для обтекания эллипса с большой полуосью, повернутой на угол 25° относительно начального положения. В процессе адаптации сеточные линии стягиваются к скачку, повторяя фронт ударной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная модель адаптации расчетной сетки как механической системы с упругими связями показывает работоспособность: происходит перестройка расчетной сетки в областях с большими значениями градиента поля с воспроизведением формы головной части скачка и втягиванием в область скачка дополнительных сеточных линий. Качество элементов структурированной расчетной сетки в отношении ортогональности сохраняется на приемлемом для практических расчетов уровне с минимальным углом при вершине элемента $30\text{--}50$ градусов. Дополнительное повышение качества расчетной сетки производится взвешенным сглаживанием. Полученные численные решения демонстрируют уточнение профилей параметров в окрестности головного скачка уплотнения. Это приводит к заметному снижению уровня численной ошибки в зоне скачка и возможности использовать примерно в 2 раза более экономные сетки по направлению к фронту ударной волны. Рассмотренные тестовые задачи показывают возможность применения алгоритма к более общим задачам внешнего обтекания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thompson J.F., Warsi Z.U.A., Mastin C.W.* Numerical grid generation: Foundations and Applications. North Holland, 1985.
2. *Молчанов А.М., Щербаков М.А., Янышев Д.С., Куприков М.Ю., Быков Л.В.* Построение сеток в задачах авиационной и космической техники. Учебное пособие. М.: МАИ, 2013.
3. *Chawner J.R., Michal T., Slotnick J.P., Rumsey C.L.* Summary of the 1st AIAA Geometry and Mesh Generation Workshop (GMGW-1) and Future Plans. AIAA Paper 2018-0128.
4. *Ворожцов Е.В., Яненко Н.Н.* Методы локализации особенностей в вычислительной газодинамике. Новосибирск, 1985.
5. *Garanzha V.A.* Variational principles in grid generation and geometric modelling: theoretical justifications and open problems // Numerical Linear Algebra with Applications. 2004. V. 11, № 5–6. P. 535–563.
6. *Sheshadri A., Crabill J., Jameson A.* Mesh deformation and shock capturing techniques for high-order simulation of unsteady compressible flows on dynamic meshes. AIAA Paper 2015-1741, 2015.
7. *Суржиков С.Т.* Аналитические методы построения конечно-разностных сеток для расчета аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. 2004. № 2.
8. *Афендииков А.Л., Меркулов К.Д., Пленкин А.В.* Динамическая локальная адаптация сеток на основе вейвлет-анализа в задачах газовой динамики // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 99. С. 26.
9. *Меркулов К.Д., Меньшов И.С.* Динамически перестраиваемые декартовы сетки с локальным измельчением для расчета задач газовой динамики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, № 4. С. 1–11.
10. *Стручков А.В., Козелков А.С., Жучков Р.Н., Уткина А.А., Саразов А.В.* Численное моделирование задач аэродинамики со статической адаптацией сетки под особенности решения // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Т. 2. С. 55–67.
11. *Иваненко С.А., Чарахчян А.А.* Криволинейные сетки из выпуклых четырехугольников // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1988. Т. 28, № 4. С. 503–514.
12. *Лебедев А.С., Лисейкин В.Д., Хакимзянов Г.С.* Разработка методов построения адаптивных сеток // Вычисл. технологии. 2002. Т. 7, № 3. С. 29–43.
13. *Лысенков А.В.* Разработка метода построения многоблочной адаптивной сетки для расчета сложных двумерных течений на базе полной системы уравнений Эйлера // Ученые записки ЦАГИ. 2002. Т. 33. № 3, 4.

14. *Вальгер С.А.* Создание вычислительных технологий для расчета ветровых и ударно-волновых воздействий на конструкции. Дисс. на соискание к.ф.-м.н. Новосибирск. 2015. 220 С.
15. *Huang T-H, Chen J-S, Tupek M.R., Beckwith F.N., Fan H.E.* A variational multiscale immersed meshfree method for fluid structure interactive systems involving shock waves // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2022. № 389. 114396.
16. *Selim M.M., Koomullil R.P.* Mesh deformation approaches – a survey // *J. of Physical Mathematics.* 2016. V. 7. № 2. 1000181.
17. *Garanzha V.A., Kudryavtseva L.N.* Hyperelastic springback technique for construction of prismatic mesh layers // 26th International Meshing Roundtable (IMR26), 18-21 September 2017, Barcelona, Spain. *Procedia Engineering.* 2017. V. 203.
18. *Mehta A.* Mesh deformation algorithms for fluid-structure interaction studies. 2020.
19. *Takizawa K., Tezduyar T.E., Avsar R.* A low-distortion mesh moving method based on fiber-reinforced hyperelasticity and optimized zero-stress state // *Computational Mechanics.* 2020. № 65. P. 1567–1591.
20. *Shamanskiy A., Simeon B.* Mesh moving techniques in fluid-structure interaction: robustness, accumulated distortion and computational efficiency // *Computational Mechanics.* 2021. V. 67. P. 583–600.
21. *Вершков В.А.* Математическое моделирование процесса обтекания шарнирного несущего винта вертолета методом деформируемых неструктурированных сеток. Дисс. на соискание к.т.н. Москва. 2021. 116 С.
22. *Garanzha V., Kaporin I., Kudryavtseva L., Protais F., Sokolov D.* In the Quest for Scale-optimal Mappings // *ACM Transactions on Graphics.* 2024. V. 43, № 1. P. 1–16.
23. *Карлов Н.В., Кириченко Н.А.* Колебания, волны, структуры. М.: Физматлит, 2003.
24. *Петров М.Н., Тамбова А.А., Титарев В.А., Утюжников С.В., Чикиткин А.В.* Программный комплекс FlowModellium для расчета высокоскоростных течений сжимаемого газа // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2018. Т. 58. № 11. С. 1932–1954.

ALGORITHM FOR MESH ADAPTATION TO A FLOW FIELD WITH A BOW SHOCK WAVE

I. V. Voronich*, N. S. Smirnova**, V. A. Titarev***

119333 Moscow, FRC CSC RAS, Russia

**e-mail: i.voronich@frcsc.ru*

***e-mail: nsmirnova@frcsc.ru*

****e-mail: vladimir.titarev@frcsc.ru*

Received: 08.04.2024

Revised: 13.05.2024

Accepted: 31.05.2024

Abstract. The construction of high-quality computational grids plays an essential role in obtaining high-precision results in the problems of calculating the external high-speed flow around bodies. The priority task is to adapt the computational grid to discontinuities, primarily to leading edge shock waves. In this paper, a variant of the algorithm for adapting the computational grid as a mechanical system with elastic connections to the flow field containing the bow shock wave is considered. As a result of applying the algorithm to a typical structured computational grid, it is rebuilt in areas of a large field gradient by drawing grid lines into the shock area while maintaining the quality of grid elements. The considered problems show the possibility of applying the described algorithm to real problems of external flow.

Keywords: grid adaptation, computational aerodynamics, supersonic flows, parallel computing.