

УДК 534.222.2

Ю. И. Димитриенко, А. А. Захаров

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЛЕНТОЧНЫХ АДАПТИВНЫХ СЕТОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВ В ВОЗДУХОЗАБОРНИКАХ

Рассмотрен численный метод решения трехмерных нестационарных задач газовой динамики применительно к течениям совершенного газа в воздухозаборниках летательных аппаратов с прямоточными воздушно-реактивными двигателями.

Обычно для решения задач нестационарной газовой динамики конечно-разностными методами пользуются регулярными прямоугольными сетками, однако для областей со сложной геометрической формой введение таких сеток становится неэффективным: оно приводит к возникновению дополнительных осцилляций решения за счет аппроксимации границы прямоугольными ячейками. Более перспективными являются методы регулярных адаптивных сеток, в которых ячейки сетки являются криволинейными, подстраиваясь под форму границы рассматриваемой области. Этим методам посвящена обширная литература, отметим лишь некоторые работы [1–25]. В настоящей статье обобщается предложенный в работе [1] метод решения двумерных нестационарных задач газодинамических течений в областях со сложной геометрией, использующий адаптивные сетки на трехмерный случай, и с его помощью решается нестационарная трехмерная задача течения идеального совершенного газа в сверхзвуковых воздухозаборниках. В качестве метода построения структурной адаптивной сетки выбран алгебраический подход [13], базирующийся на методе трансфинитной интерполяции, главное преимущество которого — быстрота построения сеток. Для разбиения сложной трехмерной области на стандартные криволинейные блоки предлагается “обратный” способ, когда расчетная область изначально строится из блоков-примитивов. Объединение локальных сеток осуществляется при помощи новой технологии ленточного построения сетки [27] для трехмерного случая.

Математическая постановка задачи. Рассматривается канал воздухозаборника типового сверхзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя (СПВРД) [26]. Задача течения идеального

совершенного нетеплопроводного газа в воздухозаборнике СПВРД состоит из следующих уравнений (в трехмерной постановке) в цилиндрической системе координат $X^{1'} = r$, $X^{2'} = z$, $X^{3'} = \varphi$:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{V}^1}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{V}^2}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{V}^3}{\partial \varphi} = \mathbf{W}, \quad (1)$$

где введены обозначения для координатных столбцов:

$$\mathbf{U} = r \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_r \\ \rho v_z \\ \rho v_\varphi \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V}^1 = r \begin{pmatrix} \rho v_r \\ \rho v_r^2 + p \\ \rho v_r v_z \\ \rho v_r v_\varphi \\ \rho \left(E + \frac{p}{\rho} \right) v_r \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{V}^2 = r \begin{pmatrix} \rho v_z \\ \rho v_z v_r \\ \rho v_z^2 + p \\ \rho v_z v_\varphi \\ \rho \left(E + \frac{p}{\rho} \right) v_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V}^3 = \begin{pmatrix} \rho v_\varphi \\ \rho v_\varphi v_r \\ \rho v_\varphi v_z \\ \rho v_\varphi^2 + p \\ \rho \left(E + \frac{p}{\rho} \right) v_\varphi \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 \\ p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь ρ — плотность газа; $E = C_V \theta + |v|^2/2$ — полная энергия газа, C_V — теплоемкость при постоянном объеме, θ — температура газа, v_r, v_z, v_φ — компоненты вектора скорости \mathbf{v} , $|v|^2 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$; $p = \rho \theta R / \mu$ — давление, R — универсальная газовая постоянная, μ — молекулярная масса газа.

На твердых непроницаемых стенках Σ_1 области V ставится условие непротекания

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{n} — вектор нормали к стенке. На плоскости симметрии Σ_2 задаются условия симметрии

$$\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \frac{\partial v_{\tau_I}}{\partial n} = 0, \quad I = 1, 2; \quad (4)$$

τ_I — векторы в плоскости симметрии. На границе входа Σ_3 задаются известные значения параметров потока

$$\rho = \rho_e, \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_e, \quad \theta = \theta_e \quad (5)$$

Начальные условия к системе (1)

$$\text{при } t = 0: \quad \rho(0, X^{i'}) = \rho^0, \quad \mathbf{v}(0, X^{i'}) = 0, \quad \theta(0, X^{i'}) = \theta^0, \quad (6)$$

здесь ρ^0, θ^0 — заданные значения.

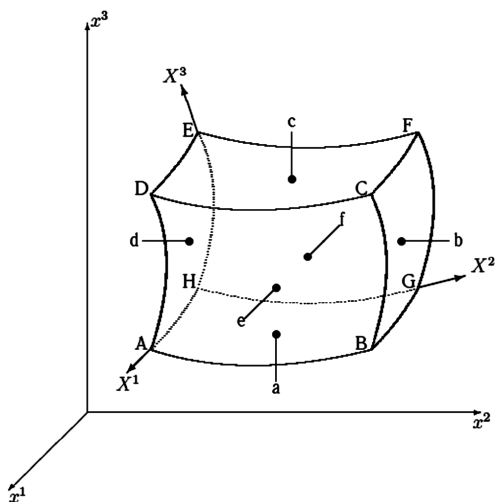


Рис. 1. Адаптивная система координат

“крупных” криволинейных кубов V_i , каждый из которых имеет вид, изображенный на рис. 1; в настоящей работе расчетная область была разделена на пять подобластей.

Обозначим в пространстве R^3 прямоугольные декартовы координаты x^i , а адаптивные координаты — X^j . Для генерации адаптивной разностной сетки необходимо отыскать зависимости

$$x^i = f^i(X^j), \quad (7)$$

которые преобразуют криволинейный куб в координатах x^i в прямолинейный куб $[0, 1] \times [0, 1] \times [0, 1]$ в координатах X^j . Зададим исходную геометрию — стороны a, b, c, d, e, f (см. рис. 1) каждого криволинейного куба V_i в параметрическом виде:

$$\begin{cases} x^i = x_a^i(X^1, X^2), \\ x^i = x_b^i(X^1, X^3), \\ x^i = x_c^i(X^1, X^2), \\ x^i = x_d^i(X^1, X^3), \\ x^i = x_e^i(X^2, X^3), \\ x^i = x_f^i(X^2, X^3). \end{cases} \quad (8)$$

Искомое преобразование координат (7) имеет вид

$$\begin{aligned} f^i(X^1, X^2, X^3) = \\ = P^i(X^1, X^2, X^3) - [P^i(X^1, X^2, 0) - x_a^i(X^1, X^2)](1 - X^3) - \\ - X^3[P^i(X^1, X^2, 1) - x_c^i(X^1, X^2)], \quad (9) \end{aligned}$$

Метод ленточных адаптивных сеток. Для решения уравнения (1) с граничными (3)–(5) и начальными (6) условиями введем для области решения V специальную разностную регулярную сетку, образованную кубическими криволинейными ячейками, которая называется ленточной адаптивной сеткой (ЛАС). Алгоритм построения ЛАС для трехмерной области следующий.

Рассматриваемую область V разобьем на совокупность

где

$$P^i(X^1, X^2, X^3) = \\ = T^i(X^1, X^2, X^3) - [T^i(0, X^2, X^3) - x_f^i(X^2, X^3)](1 - X^1) - \\ - X^1[T^i(1, X^2, X^3) - x_e^i(X^2, X^3)], \quad (10)$$

$$T^i(X^1, X^2, X^3) = (1 - X^2)x_d^i(X^1, X^3) + X^2x_b^i(X^1, X^3). \quad (11)$$

Если теперь ввести в координатах X^j для куба $\Pi = [0, 1] \times [0, 1] \times [0, 1]$ регулярную сетку

$$\Pi_e = \{X_i^1, X_j^2, X_k^3 \quad (i = 1 \dots N, \quad j = 1 \dots M, \quad k = 1 \dots L)\}, \quad (12)$$

то преобразование (7) этой сетки образует адаптивную сетку в координатах x^i :

$$V_i = \{x_i^1, x_j^2, x_k^3; \quad i = 1 \dots N, \quad j = 1 \dots M, \quad k = 1 \dots L\} \quad (13)$$

В основу метода компьютерного построения в координатах x^i криволинейной области V положим “обратный способ”, когда в координатах X^j задается образ этой области Π_Σ как совокупность кубов. Если задать граничные функции (8) для каждого из кубов $\Pi_i, i = 1, \dots, K$, то согласно формулам (7) будет определено преобразование области Π_Σ в координаты x^i . Тем самым будет решена задача компьютерного задания криволинейной области V .

В данной работе функции (8) представлялись аналитически. В каждый из криволинейных кубов V_i вводилась локальная регулярная прямоугольная разностная сетка, затем отдельные сетки для каждого куба собирались в единую разностную сетку, охватывающую всю область V . После выполнения преобразования (7) и нахождения матрицы Якоби P_j^i перехода от X^j к x^i для всех областей V_i осуществлялась коррекция таким образом, чтобы в координатах X^j эти области имели непересекающиеся образы.

Отличительной особенностью рассматриваемого алгоритма является то, что для узлов разностной сетки вводится единая нумерация (сетка при этом описывается ленточным образом) и их характеристики (координаты в системах x^i и X^j , компоненты матрицы P_j^i , номера соседних узлов) записываются в единый список. Кроме того, в список помещается информация о номерах соседних шести узлов, которым присваиваются имена $B_j, F_j, L_j, R_j, D_j, U_j$, обозначающие номера соседей j -го узла: “сзади”, “спереди”, “слева”, “справа”, “снизу” и “сверху” соответственно.

Тогда разностные аппроксимации производных получают следующий вид (например, правая разность): $\frac{\partial f(u_j, v_j, w_j)}{\partial u} \approx \frac{f_{F_j} - f_j}{u_{F_j} - u_j}$.

Разностная схема для системы (1) в данной работе строится с помощью метода типа Мак-Кормака. Следует отметить, что хотя схема Мак-Кормака не относится к широко используемым в настоящее время разностным схемам повышенной точности [12, 15, 29, 32], однако такие ее качества, как простота реализации, удобство модификации записи схемы в адаптивных координатах, высокая скорость счета, принадлежность к классу явных разностных схем, отсутствие в разностных уравнениях матриц Якоби, легкость применения граничных условий (не требуется вычислять граничные значения в точках с полужелыми по пространству индексами), существенно экономят машинное время и объем памяти, приходящиеся на один узел сетки, что является определяющим фактором для задач с достаточно большим числом ячеек и временем установления. Кроме того, многие используемые в настоящее время схемы повышенного порядка точности, в частности TVD-схемы, не гарантируют повышения порядка слабой аппроксимации на обобщенных решениях, что в частности относится и к решениям с сильными разрывами, рассматриваемым в данной работе. Указанные факты обусловили выбор схемы типа Мак-Кормака в данной работе.

Модифицированная разностная схема Мак-Кормака для ленточной адаптивной сетки имеет следующий вид:

предиктор –

$$\begin{aligned}
 U_l^{n+\frac{1}{2}} = & U_l^n - \\
 & - \Delta t \mathbf{K}_l^{1n} \left(\frac{\mathbf{V}^1(U_{F_l}^n) - \mathbf{V}^1(U_l^n)}{X_{F_l}^1 - X_l^1} \hat{P}_{1l}^1 + \frac{\mathbf{V}^1(U_{R_l}^n) - \mathbf{V}^1(U_l^n)}{X_{R_l}^2 - X_l^2} \hat{P}_{1l}^2 + \right. \\
 & + \frac{\mathbf{V}^1(U_{U_l}^n) - \mathbf{V}^1(U_l^n)}{X_{U_l}^3 - X_l^3} \hat{P}_{1l}^3 \left. \right) - \Delta t \mathbf{K}_l^{2n} \left(\frac{\mathbf{V}^2(U_{F_l}^n) - \mathbf{V}^2(U_l^n)}{X_{F_l}^1 - X_l^1} \hat{P}_{2l}^1 + \right. \\
 & + \frac{\mathbf{V}^2(U_{R_l}^n) - \mathbf{V}^2(U_l^n)}{X_{R_l}^2 - X_l^2} \hat{P}_{2l}^2 + \frac{\mathbf{V}^2(U_{U_l}^n) - \mathbf{V}^2(U_l^n)}{X_{U_l}^3 - X_l^3} \hat{P}_{2l}^3 \left. \right) - \\
 & - \Delta t \mathbf{K}_l^{3n} \left(\frac{\mathbf{V}^3(U_{F_l}^n) - \mathbf{V}^3(U_l^n)}{X_{F_l}^1 - X_l^1} \hat{P}_{3l}^1 + \frac{\mathbf{V}^3(U_{R_l}^n) - \mathbf{V}^3(U_l^n)}{X_{R_l}^2 - X_l^2} \hat{P}_{3l}^2 + \right. \\
 & \left. + \frac{\mathbf{V}^3(U_{U_l}^n) - \mathbf{V}^3(U_l^n)}{X_{U_l}^3 - X_l^3} \hat{P}_{3l}^3 \right); \quad (14)
 \end{aligned}$$

корректор –

$$\begin{aligned}
 U_l^{n+1} = & \frac{1}{2} \left(U_l^{n+\frac{1}{2}} + U_l^n \right) - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{K}_l^{1n} \left(\frac{\mathbf{V}^1(U_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^1(U_{B_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^1 - X_{B_l}^1} \hat{P}_{1l}^1 + \right. \\
 & + \frac{\mathbf{V}^1(U_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^1(U_{L_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^2 - X_{L_l}^2} \hat{P}_{1l}^2 + \frac{\mathbf{V}^1(U_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^1(U_{D_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^3 - X_{D_l}^3} \hat{P}_{1l}^3 \left. \right) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{K}_l^{2n} \left(\frac{\mathbf{V}^2(\mathbf{U}_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^2(\mathbf{U}_{B_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^1 - X_{B_l}^1} \hat{P}_{2l}^1 + \frac{\mathbf{V}^2(\mathbf{U}_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^2(\mathbf{U}_{L_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^2 - X_{L_l}^2} \hat{P}_{2l}^2 + \right. \\
& + \left. \frac{\mathbf{V}^2(\mathbf{U}_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^2(\mathbf{U}_{D_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^3 - X_{D_l}^3} \hat{P}_{2l}^3 \right) - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{K}_l^{3n} \left(\frac{\mathbf{V}^3(\mathbf{U}_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^3(\mathbf{U}_{B_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^1 - X_{B_l}^1} \hat{P}_{3l}^1 + \right. \\
& + \left. \frac{\mathbf{V}^3(\mathbf{U}_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^3(\mathbf{U}_{L_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^2 - X_{L_l}^2} \hat{P}_{3l}^2 + \frac{\mathbf{V}^3(\mathbf{U}_l^{n+\frac{1}{2}}) - \mathbf{V}^3(\mathbf{U}_{D_l}^{n+\frac{1}{2}})}{X_l^3 - X_{D_l}^3} \hat{P}_{3l}^3 \right). \quad (15)
\end{aligned}$$

Здесь \hat{P} — матрица Якоби перехода от X^{li} к X^i .

При численной реализации конечноразностных методов типа Мак-Кормака в граничных узлах уже нельзя пользоваться разностной схемой типа (14)–(15), поскольку значения в соседних узлах уже могут быть неопределены. Для вычисления значений функций в этих узлах используют граничные условия. Однако, число этих условий может быть меньше числа неизвестных функций, например, на границе выхода потока граничные условия вообще не задаются. В этом случае необходимо привлекать дополнительные соотношения для нахождения значений неизвестных функций в граничных точках.

Для обеспечения второго порядка точности аппроксимации, который имеют разностные схемы типа Мак-Кормака, достаточно значения функций аппроксимировать по двум соседним узлам, а производные функций — центральной разностью. В данной работе аппроксимация производилась с помощью метода “фиктивных ячеек” [28].

Моделирование нестационарных течений в ВЗ СПВРД. Разработанный метод ЛАС применялся для моделирования течений в ВЗ модельного СПВРД. Предполагалось, что центральное тело воздухозаборника закреплено с помощью трех пилонов, отстоящих равномерно друг от друга. Выбирался участок симметрии, образованный лучами $\varphi = 0$ и $\varphi = \frac{2\pi}{3}$. Проведены варианты расчета для четырех разных конфигураций ВЗ.

В первых двух конфигурациях не производился расчет внешнего обтекания передней кромки ВЗ; значения параметров на входе ВЗ рассчитывались исходя из таблиц данных по обтеканию конуса и предположения о том, что на входе в ВЗ находится прямой скачок. При искусственном введении прямого скачка влияние камеры сгорания и выходного сопла можно не учитывать, истечение воздуха из ВЗ свободное, значения параметров на выходе не фиксируются. В конфигурации 1 (рис. 2, а) расчет проводился без введения пилонов, конфигурация 2 (рис. 2, б) задавалась с учетом расстановки пилонов.

В третьей и четвертой конфигурациях производился расчет внешнего обтекания передней кромки воздухозаборника. В конфигурации 3 (рис. 2, в) не учитывалось влияние пилонов, конфигурация 4 (рис. 2, г) учитывает это влияние. Прямой скачок не вводился, а влияние камеры сгорания и выходного сопла осуществлялось путем задания фиксированных параметров на выходе. В приведенном расчете фиксировалось только значение плотности на выходе, конкретное ее значение бралось из расчета соответствующих конфигураций, искусственно учитывающих прямой скачек.

Результаты численного решения. При обтекании пилонов в конфигурации 2 по сравнению с конфигурацией 1 происходит примерно двукратная потеря осевой скорости на выходе воздухозаборника, а также наблюдается небольшой локальный нагрев и повышение давления (плотности) вблизи сторон пилонов, обращенных нормально к набегающему потоку. Выходное давление конфигурации с пилонами больше примерно на 13 %.

Сравнивая область расчета с ударной волной и расчетную область, начинающуюся от входа в воздухозаборник, можно заключить следующее: в конфигурации 3 по сравнению с конфигурацией 1 на выходе реализуется сверхзвуковой режим ($M = 1,53$ и $M = 0,55$ соответственно). Таким образом, задание только одинаковых плотностей на выходе без учета геометрической формы ВЗ на входе не позволяет смоделировать “близкие” значения осевых скоростей. Выходная температура и давление конфигурации 1 получились больше на 37 %, чем в конфигурации 3.

Сравнивая конфигурацию 2 с конфигурацией 4 по значениям осевых скоростей, можно получить прямо противоположную картину: осевая скорость в конфигурации 4 получилась приблизительно $0,01 M$ в отличие от $0,3 M$ в конфигурации 2. Сильно заниженное значение осевой скорости в конфигурации 4 обусловлено малым количеством разбиений сетки по окружной координате и применением метода “фиктивных ячеек”, который фактически уменьшает число реальных ячеек с “физическими” результатами. Такого же характера результаты были получены и для конфигурации 2, у которой число узлов сетки было уменьшено до 1000, что совпадает с числом узлов конфигурации 4 для соответствующей части ВЗ от входа в канал до выходного сечения. Введение существенно большего числа точек в конфигурации 4, наряду с учетом области внешнего обтекания с границей ударной волны, приводило к значительному увеличению времени счета и не было осуществлено в данной работе. Температура и давление в конфигурации 2 приблизительно в 2 раза больше температуры и давления в конфигурации 4.

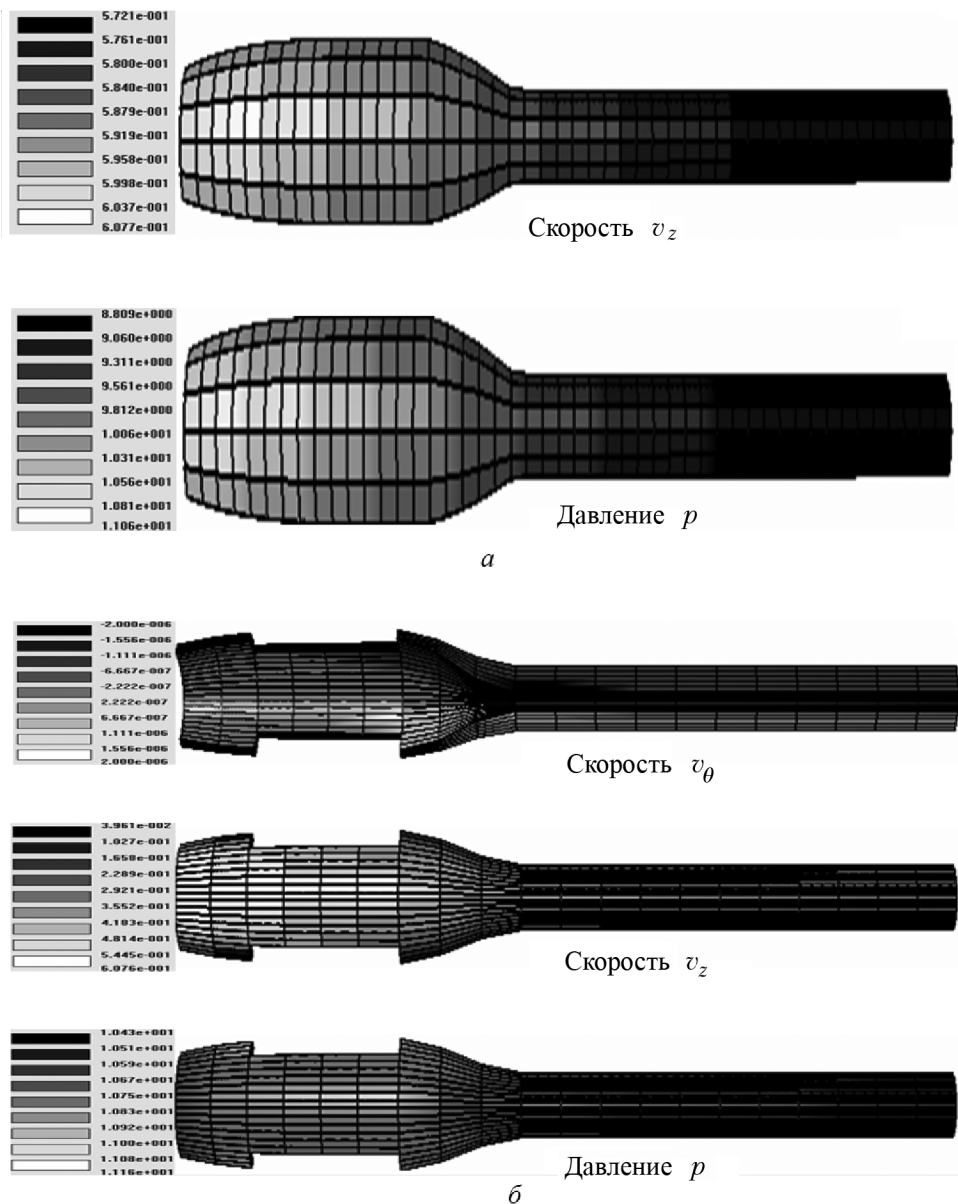
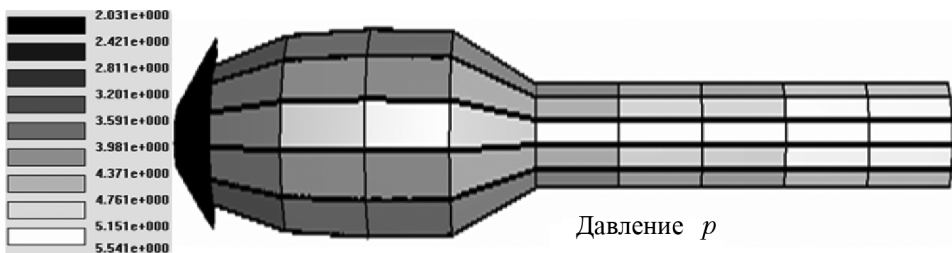
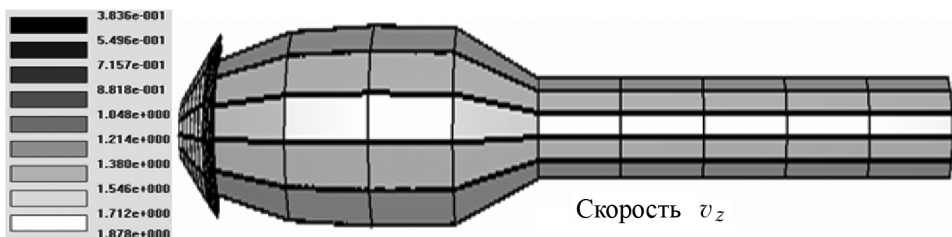
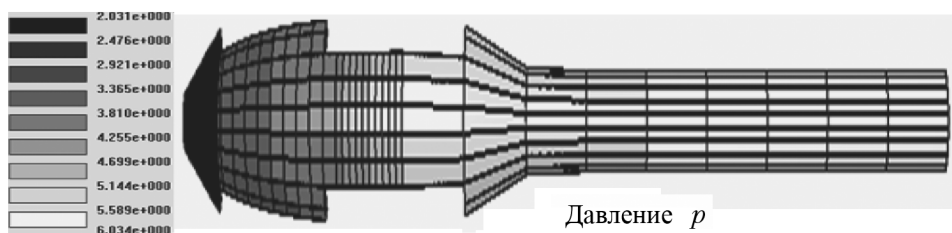
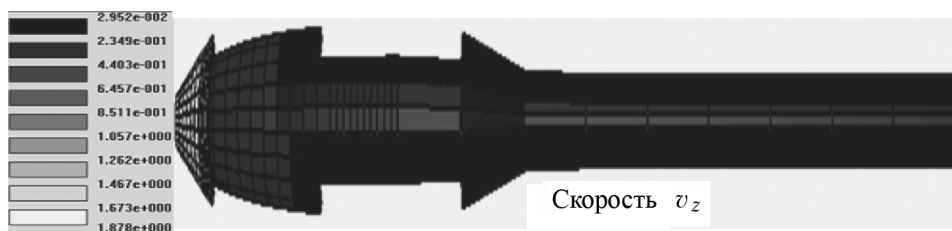


Рис. 2 (начало). Распределение параметров потока в конфигурациях воздухозаборника № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в) и № 4 (г)

Сравнивая между собой параметры потока конфигурациях 3 и 4, можно отметить, что осевая скорость потока в конфигурации 3 больше примерно в 15 раз скорости потока в конфигурации 4 (количество разбиений по угловой координате здесь одинаково, но пилоны тормозят поток по основной (осевой) координате, тогда как в конфигурации 3 обнуляется только угловая скорость). Распределение температуры и давления для обеих конфигураций практически идентичны.



6



2

Рис. 2 (окончание)

Радиальная скорость течения во всех конфигурациях оказалась достаточно малой, так как поток входит в воздухозаборник практически параллельно оси z и, несколько раз отразившись от поверхностей центрального тела и обечайки, сходит на ноль. Угловая скорость течения на входе во всех конфигурациях равна нулю и только в конфигурациях 2 и 4 с пилонами появляются ее ненулевые значения вблизи пилонов.

Оценивая суммарное машинное время расчета по всем конфигурациям (таблица), можно сделать вывод о том, что трехмерные нестационарные задачи являются достаточно трудоемкими для персональных

компьютеров с частотой процессоров порядка 1,5–2,0 ГГц. Минимальное время счета даже на грубой сетке составляет не менее 3–4 дней, что примерно на порядок больше времени расчета двумерных задач. Расчет сложных конфигураций ВЗ такого типа становится более эффективным с применением метода параллельных вычислений [21, 22].

Параметры разностной сетки и результаты численного решения задачи для разных конфигураций воздухозаборника

№ конфигурации	1	2	3	4
Число узлов сетки	3 264	4 000	2 240	4 992
Шаг по времени, мкс	0,029	0,029	0,029	0,029
Число итераций до установления	1 800 000	600 000	500 000	700 000
Время счета, ч (процессор 2 ГГц)	406	116	72	178

Закключение. Разработан метод ленточно-адаптивных регулярных сеток для решения трехмерных нестационарных задач течения газа в областях со сложной геометрий. Проведено численное моделирование газодинамических процессов в канале воздухозаборника типового сверхзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя. Установлено, что пилоны ВЗ существенно влияют на осевую скорость, давление, плотность и температуру потока. Также установлено, что учет области от ударной волны до входа в канал ВЗ по сравнению со случаем, когда входные данные задаются непосредственно на входном сечении ВЗ, приводит, вообще говоря, к различным результатам при одинаковых значениях плотности в выходном дозвуковом сечении, что говорит о необходимости тщательного учета указанной входной области при численных расчетах течений в ВЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ч и с л е н н о е решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
2. B r a c k b i l l J. U., S a l t z m a n J. S. Adaptive Zoning for Singular Problems in Two Dimensions // Journal of Computational Physics. – 1982. – V.46, № 3. – P.342–368.
3. T h o m p s o n J. F., W a r s i Z. U. A., M a s t i n C. W. Numeral Grid Generation, Foundations and Applications. – North Holland, New York, 1985.
4. К у л а ч к о в а Н. А., С а х а б у т д и н о в Ж. М. Построение расчетных сеток для областей сложной конфигурации // Числ. методы механ. сплошной среды. Новосибирск: ВЦ ИТПМ СО АН СССР. – 1985. – Т. 16, № 3. – С. 68–78.
5. Р ы ч к о в А. Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. – Новосибирск: Наука, 1988.

6. Воскресенский Г. П., Забродин А. В. Некоторые вопросы численного моделирования сверхзвукового обтекания летательных аппаратов // Успехи механ. – 1989. – Т. 12, № 2. – С. 99–119.
7. Прокопов Г. П. Об организации сравнения алгоритмов и программ построения регулярных двумерных разностных сеток // Вопросы атомной науки и техники. Сер. “Математическое моделирование физических процессов”. – М.: НИИ упр. экон. и информации. – 1989. – Вып. 3. – С. 98–107.
8. Годунов С. К., Роменский Е. И., Чумаков Г. А. Построение разностных сеток в сложных областях с помощью квазиконформных отображений // Вычислительные проблемы в задачах математической физики. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1990. – С. 75–84.
9. Лисейкин В. Д. О конструировании регулярных сеток на n -мерных поверхностях // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1991. – Т. 31, – № 11.
10. Прокопов Г. П. Конструирование тестовых задач для построения двумерных регулярных сеток // Вопросы атомной науки и техники. Сер. “Математическое моделирование физических процессов”. – 1993. – Вып. 1. – С. 7–12.
11. Иваненко С. А. Адаптивные сетки и сетки на поверхностях // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1993. – Т. 33, № 9. – С. 1333–1351.
12. Похилко В. И., Тишкин В. Ф. Однородный алгоритм расчета разрывных решений на адаптивных сетках // Математическое моделирование. – 1994. – Т. 6. – № 11.
13. Лисейкин В. Д. Обзор методов построения структурных адаптивных сеток // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1996. – Т. 36, № 1. – С. 3–41.
14. Забродин А. В., Прокопов Г. П. Методика численного моделирования двумерных нестационарных течений теплопроводного газа в трехтемпературном приближении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. “Математическое моделирование физических процессов”. – 1998. – Вып. 3.
15. Гильманов А. Н. Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики. – М.: Наука. – Физматлит, 2000. – 248 с.
16. Богомолов К. Л., Дегтярев Л. М., Тишкин В. Ф. Вариационный метод построения высокоаспектных регулярных адаптивных сеток // Математическое моделирование. – 2001. – Т. 12, № 5.
17. Прокопов Г. П. Универсальные вариационные функционалы для построения двумерных сеток // М.: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2001. – № 1. – 36 с.
18. Мышенков Е. В., Мышенкова Е. В. Интерактивная адаптация сетки в расчетах течений вязкого газа // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2002. – Т. 42, № 12. – С. 1881–1890.
19. Руденко Д. В., Утюжников С. В. Применение динамически адаптивных к решению сеток для моделирования пространственных нестационарных течений газа с большими градиентами // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2002. – Т. 42, – № 3. – С. 395–409.
20. Димитриенко Ю. И., Изотова С. Г. Численное исследование нестационарных газодинамических процессов горения твердых топлив в камере РДТТ. В сб. “Аэрокосмические технологии”: Труды Всерос. науч.-техн. конф. / Под ред. Р.П. Симоньянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2003. – С. 144–154.

21. Димитриенко Ю. И., Ануфриев С. Н., Изотова С. Г. Разработка технологии параллельных вычислений для решения задач газовой динамики в соплах РДТТ. – В сб. “Аэрокосмические технологии”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – С. 109–111.
22. Димитриенко Ю. И., Ануфриев С. А., Изотова С. Г. Разработка метода решения трехмерной нестационарной внутренней задачи газовой динамики на многопроцессорных вычислительных системах. – В сб. “Математика в современном мире” / Под ред. Дробышева Ю.А. – Калуга.: Изд-во КГПУ. – 2004 г. – С. 139–146.
23. Димитриенко Ю. И., Изотова С. Г., Ануфриев С. Н., Захаров А. А. Численное моделирование трехмерных газодинамических процессов в камерах сгорания РДТТ на основе метода геометрически-адаптивных сеток // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. – 2005. – № 3.
24. Smith R. E., Ericsson L. E. Algebraic grid generation // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1987. – V. 64. – P. 285–300.
25. Лисейкин В. Д. Метод алгебраической адаптации // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 3. – № 10. – С. 1692–1709.
26. Бондарюк М. М. Ильяшенко С. М. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1958.
27. Димитриенко Ю. И., Кукленков Л. Л., Ануфриев С. Н. Метод ленточных адаптивных сеток для решения задач газовой динамики в невыпуклых областях сложной формы. – Современные естественно-научные и гуманитарные проблемы: Сборник трудов научно-методической конференции, посвященной 40-летию НУК ФН. – М.: Логос, 2005. – С. 506–512.
28. Роч П. Вычислительная гидромеханика. – М.: Мир, 1980.
29. Munz C. D. On the numerical dissipation of high resolution schemes for hyperbolic conservation laws. Journal of Computational Physics. – 1988. – V. 77. – № 1. – P. 18–39.
30. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980.
31. Остапенко В. В. О конечно-разностной аппроксимации условий Гюнио на фронте ударной волны, распространяющейся с переменной скоростью // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 38, № 7. – С. 1170–1185.
32. Пинчуков В. И. Компактная схема шестого порядка для решений уравнений Эйлера // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 38, № 10. – С. 1717–1721.
33. Бондаренко Ю. А., Башуров В. В., Янилкин Ю. В. Математические модели и численные методы для решения задач нестационарной газовой динамики: Обзор зарубежной литературы. Препринт 88. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – 53 с.

Статья поступила в редакцию 24.10.2005



Юрий Иванович Димитриенко родился в 1962 г., окончил в 1984 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, действительный член академии инженерных наук. Автор более 100 научных работ в области вычислительной механики, нелинейного тензорного анализа, термомеханики композитов, математического моделирования в материаловедении.

Yu.I. Dimitrienko (b. 1962) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1984. D. Sc. (Phys.-Math.), professor, head of "Computing Mathematics and Mathematical Physics" department of the Bauman Moscow State Technical University, full member of the Russian Academy of Engineering Sciences. Author of more than 100 publications in the field of computing mechanics, nonlinear tensor analysis, thermomechanics of composites, mathematical simulation in science of materials.



Андрей Алексеевич Захаров родился в 1982 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ по численным методам решения задач газовой динамики.

A.A. Zakharov (1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Post-graduate of “Computing Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of numerical methods to solve problems of gas dynamics.

УДК 621.914

В. М. Б у я н к и н

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ НЕЙРОРЕГУЛЯТОР

Рассмотрен интегральный пропорциональный дифференциальный нейрорегулятор, предназначенный для интеллектуального управления электроприводами.

Интегральный пропорциональный дифференциальный регулятор используется во многих отраслях промышленности. Регуляторы такого типа производятся различными фирмами и признаны стандартным продуктом для массового производства.

ИПД регуляторы обеспечивают устойчивость и необходимые запасы по фазе в процессе работы большинства систем управления с