

ПРИМЕР КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОЙ РАДИАЦИОННО-МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.Н. Саврицкий

savritskiy@student.bmstu.ru

А.М. Назарян

arsennazaryan20037@gmail.com

Т.А. Савельев

savelevta@student.bmstu.ru

Е.А. Воронина

spross87.87@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Реализован метод построения адаптивных сеток при расчете комплексных импульсных радиационно-магнитогазодинамических (РМГД) моделей в обобщенной системе координат. Проведены валидация и верификация многомерных комплексных импульсных РМГД-моделей и численных методов для получения характеристик импульсных РМГД-систем на примере расчета газодинамических параметров струи, выходящей со среза сопла в сputный поток газа. Разработана численная методика построения регулярных криволинейных адаптивных сеток в произвольных областях. Данная методика позволяет построить адаптивную (к границам расчетной зоны и особенностям решения задач математической физики) расчетную сетку путем решения эллиптических уравнений в частных производных и с помощью специальных алгоритмов адаптации. Проведены тестовые расчеты.

Ключевые слова

Плазмодинамические процессы, построение сетки, радиационная магнитогазодинамика, газовый поток, математическое моделирование, численный метод, импульсные системы, математическая физика

Поступила в редакцию 18.07.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Для математического описания процессов воздействия мощного излучения (например, лазерного) на вещество разработан простой и эффективный способ дискретизации расчетной области, позволяющий построить квазиортогональные структурированные сетки в областях сложной формы. В разработанной модели плазмодинамические процессы, которые имеют место как в низко-, так и в высокотемпературной плазме [1–6], определяются интенсивностью, длительностью и диапазоном спектра мощного излучения, материалом исследуемого образца, термодинамическими параметрами окружающей среды. Численная реализация плазмодинамической модели основана на многоблочной многосеточной технологии расчетов на не ортогональных структурированных сетках с использованием схем расщепления по физическим процессам и направлениям. Решение расщепленных уравнений Рейнольдса находят с помощью разработанного в работе варианта авторами квазимонотонного метода Годунова шестого порядка аппроксимации [7–10].

Метод построения адаптивных сеток. При решении задачи мощного воздействия на вещество требуется наличие простых и эффективных способов дискретизации расчетных областей. Геометрически и динамически адаптивный алгоритм генерации сетки должен обладать определенным набором свойств: гладкость, простота построения и адаптивность (сетка должна сгущаться в областях, где происходит резкое изменение численного решения). Метод нахождения сетки должен также обладать свойством эллиптичности, т. е. определять влияние каждого узла сетки на множество прилегающих к нему узлов. Такого рода сетки можно получить путем решения эллиптических уравнений, которые позволяют найти отображения расчетной криволинейной области в параметрический квадрат в двумерном и параллелепипед в трехмерном случае. Введем в декартовой системе координат XYZ прямоугольный параллелепипед $ABFEDCGH$, который непрерывно дифференцируемым образом необходимо отобразить в криволинейный параллелепипед (гексаэдр) $A'B'F'E'D'C'G'H'$. При этом прямоугольная сетка, нанесенная на область $ABFEDCGH$, образует гладкую криволинейную сетку в области $A'B'F'E'D'C'G'H'$.

Обозначим через \mathbf{r} радиус-вектор в системе координат XYZ и введем вектор $\mathbf{U} = \mathbf{r}^* - \mathbf{r}$, характеризующий смещение точек. Здесь \mathbf{r} и \mathbf{r}^* — радиус-векторы точек областей до преобразований $\mathbf{r} \in ABCDCGH$ и после $\mathbf{r}^* \in A'B'F'E'D'C'G'H'$. Тогда уравнения, определяющие смещения U_x, U_y, U_z и применяемые для построения регулярных адаптивных сеток близких к ортогональным в трехмерной декартовой системе координат XYZ , имеют вид [11]

$$\begin{aligned} & \lambda_x \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + \frac{1+\sigma}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} + \\ & + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + \frac{1+\sigma}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} + \\ & + k_{opt} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g_{22}g_{33}}{g_{11}}} \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{g_{33}g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{\frac{g_{11}g_{22}}{g_{33}}} \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) \right\} = 0; \\ & \lambda_y \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \\ & + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) + \frac{1+\sigma}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +k_{opt} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g_{22}g_{33}}{g_{11}}} \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{g_{33}g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{\frac{g_{11}g_{22}}{g_{33}}} \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) \right\} = 0; \\
 & \lambda_z \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \\
 & + \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) + \frac{1+\sigma}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \right\} + \\
 & +k_{opt} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g_{22}g_{33}}{g_{11}}} \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{g_{33}g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{\frac{g_{11}g_{22}}{g_{33}}} \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} = 0,
 \end{aligned}$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \sigma, k_{opt}$ — соответствующие коэффициенты; $F = (\nabla f, \nabla f)^{\alpha/2} + \varepsilon$, $i \in \{x, y, z\}$; U_x, U_y, U_z — смещения; g_{ij} — компоненты ковариантного метрического тензора ($i, j = 1, 2, 3$); α — коэффициент, который задает необходимую степень сгущения узлов расчетной сетки. Здесь принято, что все коэффициенты, входящие в данную систему уравнений, равны между собой. Граничные условия, необходимые для решения данной системы уравнений, задаются следующим образом:

$$U_i|_{\Gamma} = r_i^*|_{\partial(A'B'F'E'D'C'G'H')} - r_i|_{\partial(ABFEDCGH)}, \quad i \in \{x, y, z\}.$$

Компоненты ковариантного метрического тензора, входящие в систему уравнений, определяются соотношениями:

$$g_{ik} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial r'^{\alpha}}{\partial q^i} \frac{\partial r'^{\alpha}}{\partial q^k};$$

$$g^{kj} = \delta_i^j = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j; \end{cases}$$

$$q^1 = x; \quad q^2 = y; \quad q^3 = z.$$

При этом f является функцией, управляющей адаптацией расчетных узлов. Коэффициент $\sigma \in [-1; 1]$ характеризует отношение поперечной деформации к продольной деформации. Коэффициент $\lambda_i > 0$ увеличивает «диффузию» сеточных линий от границы внутрь расчетной области $A'B'F'E'D'C'G'H'$, обеспечивая нахождение узлов сетки внутри расчетной зоны.

Параметр $\varepsilon \approx \min_{h_i \in A'B'F'E'D'C'G'H'} (h_i)$ выбирают исходя из условия, что он не должен быть равным нулю ($\varepsilon \neq 0$), т. е. он должен иметь порядок шага сетки h , чтобы избежать особенности в тех узлах, где $\nabla f = 0$. Отметим, что, применяя многоблочную технологию расчетов, рассматриваемая численная методика поз-

воляет построить квазиортогональные структурированные сетки в областях сложной формы.

Для численного решения исходной задачи, представленной в операторной форме $AU = 0$, применяют итерационный метод вариационного типа. То есть для численного нахождения решения задачи минимизируют значение невязки $R_{i,j,m} = AU_{i,j,m} - b_{i,j,m}$, используя модифицированный вариант итерационного метода вариационного типа — метод минимальных невязок [12]. В этом случае итерации следует проводить по формулам вида

$$U_{i,j,m}^{k+1} = U_{i,j,m}^k + c\tau R_{i,j,m}^k; \quad c \approx 0,9; \quad \tau = (R, AR)/(AR, AR).$$

Для решения задачи с достаточно сложной структурой газодинамических разрывов можно использовать квазиортогональную структурированную расчетную сетку, полученную путем решения предложенных в работе трехмерных эллиптических уравнений. Расчетную сетку можно адаптировать к особенностям течения и самому физическому объекту.

Расчет газодинамических параметров струи, выходящей со среза сопла в спутный поток газа. При проведении расчетов с помощью разработанной выше методики [13–21] принимали, что газодинамические параметры одинаковы в азимутальном направлении φ и соответствуют постановке задачи в работе [22], где задача была решена с использованием двумерной нестационарной системы уравнений Навье – Стокса. Сразу отметим, что результаты, полученные с использованием обеих форм уравнений Эйлера, оказались полностью идентичными.

Расчетную область при проведении методических расчетов представляли в виде верхней части меридиональной плоскости q_1, q_3 , ограниченной слева плоскостью среза сопла и плоскостью, через которую внешний поток газа втекает в расчетную зону. Сверху она была ограничена поверхностью достаточно удаленной от оси симметрии, чтобы на ней можно было задавать условия, соответствующие условиям на бесконечности в спутном потоке. Снизу область интегрирования была ограничена осью симметрии, на которой заданы условия симметрии. С правой стороны область была ограничена находящейся на достаточном расстоянии от среза сопла плоскостью. Положение данной плоскости определяли из условия того, чтобы возмущения от правой границы не искажали течение в окрестности среза сопла.

Газодинамические параметры в спутном потоке на границе расчетной области (зона вдува спутного потока) находили из следующих соотношений:

$$p_\infty = \frac{n\mu_a \operatorname{Re}_a \sqrt{\frac{R_0 T_\infty}{\chi}}}{r_c M_a \sqrt{\gamma}}, \quad W_\infty = \begin{cases} a_\infty M_\infty (r - r_c)^2, & \frac{r}{r_c} \leq \delta_\infty; \\ a_\infty M_\infty, & \frac{r}{r_c} > \delta_\infty; \end{cases} \quad \rho_\infty = P_\infty \left(\frac{R_0 T_\infty}{\chi} \right)^{-1};$$

$$a_\infty = \sqrt{\frac{\gamma p_\infty}{\rho_\infty}}; M_\infty = \frac{W_\infty}{a_\infty}; T_\infty = 270 \text{ К.}$$

Здесь p_∞ , T_∞ , W_∞ , ρ_∞ — давление, температура, скорость и плотность потока на границе расчетной области; n — концентрация; μ_a — молярная масса; Re_a , M_a — число Рейнольдса и число Маха (индекс a означает параметры на срезе сопла); R_0 — универсальная газовая постоянная; $\chi = 28$ кг/кмоль — молекулярная масса газа; r_c — радиус среза сопла; r — радиус плазмы; γ — показатель адиабаты; a_∞ — местная скорость звука; $\delta_\infty = 0,125$ — относительная толщина вязкого слоя в спутном потоке газа на границе расчетной области.

Характерные значения газодинамических параметров струи, выходящей со среза сопла в спутный поток газа, определяли с помощью соотношений:

$$W_a = \begin{cases} a_\infty M_a, & \frac{r}{r_c} \leq 1 - \delta_a; \\ \frac{a_\infty M_a}{2} \left[1 + \cos \left\{ \pi \frac{r/r_c + \delta_a - 1}{\delta_a} \right\} \right]; & \frac{r}{r_c} > 1 - \delta_a, \end{cases}$$

$$p_a = n p_\infty, \rho_a = n \rho_\infty, a_a = \sqrt{\frac{\gamma p_a}{\rho_a}}; M_a = \frac{W_a}{a_a}; T_a = 270 \text{ К,}$$

где $\delta_a = 0,125$ — относительная толщина вязкого слоя на срезе сопла.

Зависимость коэффициента вязкости от температуры принята в виде

$$\mu_a = C_1 \frac{T^{3/2}}{T + C_2},$$

где $C_1 = 1,458 \cdot 10^{-6}$ кг/(м · с · К^{1/2}), $C_2 = 110,4$ К.

При графическом представлении результатов методических расчетов в качестве характерного размера используется радиус среза сопла r_c , а определяющими величинами служат параметры на срезе сопла. Безразмерные переменные, относительно которых представлены графические зависимости, имеют вид ρ/ρ_a , u_{q1}/u_{q3a} , u_φ/u_{q3a} , u_{q3}/u_{q3a} , e/u_a^2 . При проведении методических исследований варьировалось число расчетных узлов в продольном направлении q_3 — от 240 до 400, в поперечном направлении q_1 — от 50 до 200, а в азимутальном направлении φ — от 4 до 20.

На рис. 1–3 показаны распределения безразмерной температуры T_a/T_∞ в поперечных сечениях $q_3/r_c = 1$, $q_3/r_c = 2,4$, $q_3/r_c = 5,6$, полученных в результате проведения расчетов смещения осесимметричной сверхзвуковой струи и спутного потока газа при значениях параметров $\gamma = 1,4$; $T_a/T_\infty = 1$; $M_a = 2$, $Re = 1000$; $n = 10$; $M_\infty = \{0,3; 1; 4; 6\}$.

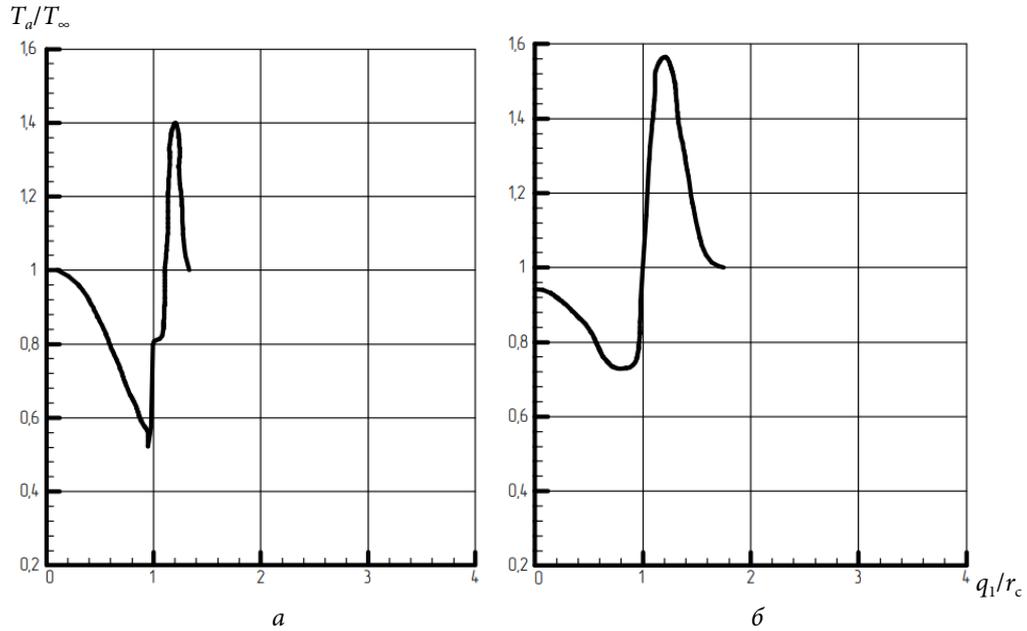


Рис. 1. Поперечное распределение безразмерной температуры в спутной недорасширенной струе ($M_a = 2$, $Re = 1000$, $n = 10$, $x = 1$, $M_\infty = 6$):
a — численные расчеты; *б*—результаты работ [22, 23]

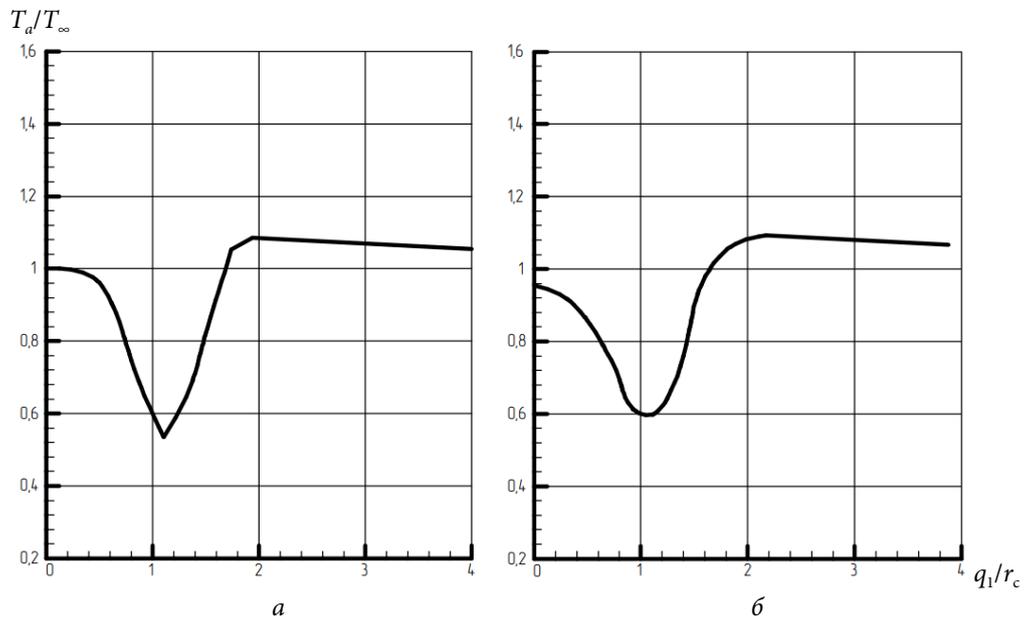


Рис. 2. Поперечное распределение безразмерной температуры в спутной недорасширенной струе ($M_a = 2$, $Re = 1000$, $n = 10$, $x = 1$, $M_\infty = 1$).
a — численные расчеты; *б* — результаты работ [22, 23]

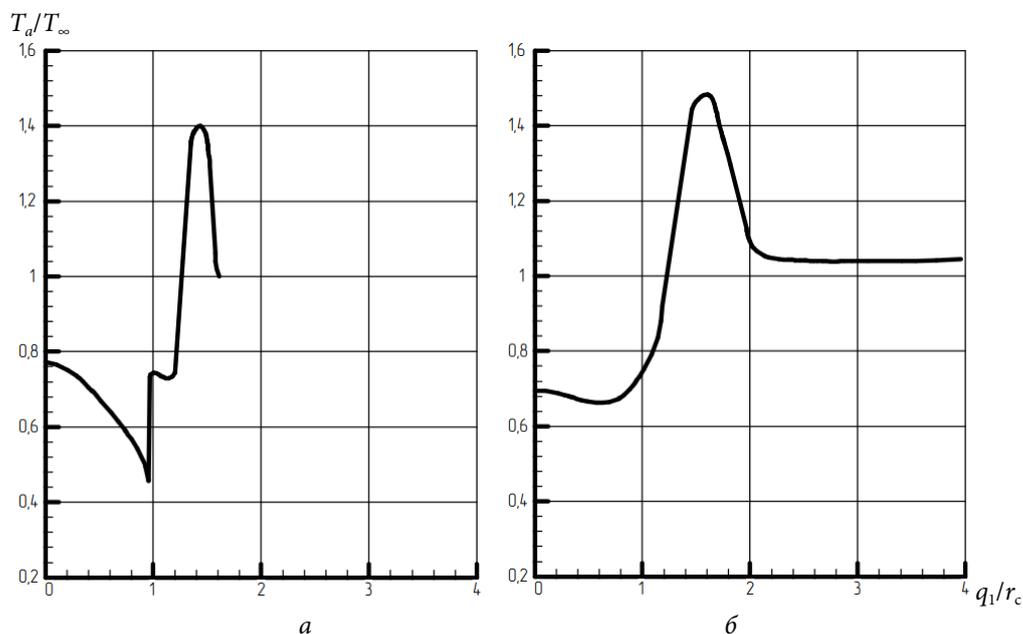


Рис. 3. Поперечное распределение безразмерной температуры в спутной недорасширенной струе ($M_a = 2$, $Re = 1000$, $n = 10$, $x = 2.4$, $M_\infty = 6$):
 а — численные расчеты; б — результаты работ [22, 23]

Выводы. Разработана численная методика построения регулярных криволинейных адаптивных сеток в произвольных областях. Данная методика позволяет построить адаптивную (к границам расчетной зоны и особенностям решения задач математической физики) расчетную сетку путем решения эллиптических уравнений в частных производных и с помощью специальных алгоритмов адаптации. Проведены тестовые (модельные) расчеты с помощью предложенной численной методики, которая применима для решения широкого круга задач [24–30].

Литература

- [1] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами. *ТВТ*, 2021, т. 59, № 4, с. 492–501. <http://doi.org/10.31857/S0040364421040141>
- [2] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical parameter estimation of a neutron source based on the action of broadband radiation on a cylindrical target. *Fusion Science and Technology*, 2023, vol. 79, pp. 399–406. <http://doi.org/10.1080/15361055.2022.2112037>
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, pp. 092704. <http://doi.org/10.1063/1.5109830>

-
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme. *Physica Scripta*, 2021, vol. 96, pp. 125613. <http://doi.org/10.1088/1402-4896/ac2543>
- [5] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of pulsed jets of a high-current pulsed surface discharge. *Computational Thermal Sciences*, 2020, vol. 13, pp. 45–56. <http://doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2020034742>
- [6] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Science and Technology*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161. <http://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [7] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Approximate calculation of convective heat transfer near hypersonic aircraft surface. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018, vol. 25 (2), pp. 181–193. <http://doi.org/10.1615/JENHHEATTRANSF.2018026947>
- [8] Кузенов В.В., Рыжков С.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. Математическая модель импульсного плазменного двигателя с предионизацией геликонным разрядом. *Труды МАИ*, 2015, № 82. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/24a/kuzenov-ryzhkov-shumaev-frolko_rus.pdf?lang=ru&issue=82 (дата обращения 15.05.2023).
- [9] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Плазмодинамическое моделирование взаимодействия импульсных плазменных струй. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2018, т. 9, № 1, с. 63–68. <https://doi.org/10.1134/S207956291706015X>
- [10] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment. *Mathematics*, 2022, vol. 10, art. 2130. <http://doi.org/10.3390/math10122130>
- [11] Кузенов В.В. Построение регулярных адаптивных сеток в пространственных областях с криволинейными границами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, № 1, с. 3–11.
- [12] Альшина Е.А., Болтнев А.А., Качер О.А. Эмпирическое улучшение простейших градиентных методов. *Математическое моделирование*, 2005, т. 17, № 6, с. 43–57.
- [13] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Evaluation of the possibility of ignition of a hydrogen-oxygen mixture by erosive flame of the impulse laser. *Laser Physics*, 2019, vol. 29, p. 096001. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab342d>
- [14] Кузенов В.В. Численное моделирование процессов истечения продуктов горения заряда твердого топлива в окружающее пространство. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 2, с. 44–55.
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Calculation of heat transfer and drag coefficients for aircraft geometric models. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (21), p. 11011. <https://doi.org/10.3390/app122111011>
- [16] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The qualitative and quantitative study of radiation sources with a model configuration of the electrode system. *Symmetry*, 2021, vol. 13 (6), p. 927. <https://doi.org/10.3390/sym13060927>
- [17] Molchanov A.M., Myakochin A.S. Numerical simulation of high-speed flows using the algebraic Reynolds stress model. *Russian Aeronautics*, 2018, vol. 61, pp. 236–243. <http://doi.org/10.3103/S1068799818020125>
- [18] Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А., Рыжков С.В. *Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 264 с.

- [19] Рыжков С.В. Моделирование теплофизических процессов в магнитном термоядерном двигателе. *Тепловые процессы в технике*, 2009, № 9, с. 397–400.
- [20] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Physics of Plasmas*, 2014, vol. 21, art. 022501.
<http://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [21] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. *Системы альтернативной термоядерной энергетики*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2017, 200 с.
- [22] Ковалев Б.Д., Мышенков В.И. Расчет вязкой сверхзвуковой струи, истекающей в спутный поток. *Уч. зап. ЦАГИ*, 1978, т. 9, № 3, с. 125–130.
- [23] Мышенков В.И. Расчет течения вязкой ламинарной сверхзвуковой струи в спутный поток. *ЖВМ и МФ*, 1979, т. 19, № 2, с. 474–485.
- [24] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Turbulence in Two-Phase Flows with Macro-, Micro- and Nanoparticles (A Review). *Symmetry*, 2022, vol. 14, p. 2433.
<https://doi.org/10.3390/sym14112433>
- [25] Dimitrienko Y., Koryakov M., Zakharov A. Numerical modeling of coupled problems of external aerothermodynamics and internal heat-and-mass transfer in high-speed vehicle composite constructions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10187, pp. 294–301.
- [26] Ryzhkov S.V. Magneto-inertial fusion and powerful plasma installations (a review). *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (21), p. 6658. <https://doi.org/10.3390/app13116658>
- [27] Shumeiko A.I., Telekh V.D., Ryzhkov S.V. Probe diagnostics and optical emission spectroscopy of wave plasma source exhaust. *Symmetry*, 2022, vol. 14 (10), art. 1983.
<http://doi.org/10.3390/sym14101983>
- [28] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (A Review). *Aerospace*, 2023, vol. 10, p. 662. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080662>
- [29] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Simulation of parameters of plasma dynamics of a magnetoplasma compressor. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (9), p. 5538.
<https://doi.org/10.3390/app13095538>
- [30] Рудинский А.В., Ягодников А.В., Рыжков С.В., Онуфриев В.В. Особенности формирования собственного электрического поля низкотемпературной кислород-метановой плазмы. *Письма в ЖТФ*, 2021, т. 47, вып. 10, с. 42–45.
<https://doi.org/10.21883/PJTf.2021.10.50973.18638>

Саврицкий Александр Николаевич — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Назарян Арсен Мигранович — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Савельев Тимофей Алексеевич — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Воронина Елена Анатольевна — студентка кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. SPIN-код 8978-9250. E-mail: svryzhkov@bmstu.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Саврицкий А.Н., Назарян А.М., Савельев Т.А., Воронина Е.А. Пример комплексного расчета импульсной радиационно-магнитогазодинамической системы. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 09 (86). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-9-937>

EXAMPLE OF COMPLEX CALCULATION OF THE PULSED RADIATION-MAGNETOGASDYNAMIC SYSTEM

A.N. Savitskiy

A.M. Nazaryan

T.A. Savelyev

E.A. Voronina

savritskiy@student.bmstu.ru

arsennazaryan20037@gmail.com

savelevta@student.bmstu.ru

spross87.87@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers an implemented method of constructing the adaptive grids to calculate the complex pulsed radiation-magnetogasdynamic (RMGD) models in a generalized coordinate system. Multidimensional complex pulsed RMHD models and numerical methods for obtaining characteristics of the pulsed RMHD systems were validated and verified using an example of calculating the gas-dynamic parameters of a jet coming from the nozzle exit into the cocurrent gas flow. Numerical technique for constructing regular curvilinear adaptive grids in the arbitrary areas was developed. This technique makes it possible to construct an adaptive (to the computational zone boundaries and to peculiarities in solving the mathematical physics problems) computational grid by solving the elliptic partial differential equations and using the special adaptation algorithms. Test calculations were performed.

Keywords

Plasmodynamic processes, grid construction, radiation magnetogasdynamics, gas flow, mathematical simulation, numerical method, pulse systems, mathematical physics

Received 18.07.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical modeling of the interaction of a magnetic-inertial thermonuclear fusion target with plasma and laser drivers. *High Temperature*, 2022, vol. 60, pp. S7–S15. <http://doi.org/10.1134/S0018151X21040143>
- [2] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical parameter estimation of a neutron source based on the action of broadband radiation on a cylindrical target. *Fusion Science and Technology*, 2023, vol. 79, pp. 399–406. <http://doi.org/10.1080/15361055.2022.2112037>
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, pp. 092704. <http://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme. *Physica Scripta*, 2021, vol. 96, pp. 125613. <http://doi.org/10.1088/1402-4896/ac2543>

- [5] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of pulsed jets of a high-current pulsed surface discharge. *Computational Thermal Sciences*, 2020, vol. 13, pp. 45–56.
<http://doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2020034742>
- [6] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Science and Technology*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161.
<http://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [7] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Approximate calculation of convective heat transfer near hypersonic aircraft surface. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018, vol. 25 (2), pp. 181–193.
<http://doi.org/10.1615/JENHHEATTRANSF.2018026947>
- [8] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A., Shumaev V.V. Mathematical model of a pulsed plasma engine with preionization by a helicon discharge. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/24a/kuzenov-ryzhkov-shumaev-frolko_rus.pdf?lang=ru&issue=82 (accessed May 15, 2023).
- [9] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics simulation of the interaction of pulsed plasma jets. *Physics of Atomic Nuclei*, 2018, vol. 81, pp. 1460–1464.
<http://doi.org/10.1134/S106377881811011X>
- [10] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment. *Mathematics*, 2022, vol. 10, art. 2130. <http://doi.org/10.3390/math10122130>
- [11] Kuzenov V.V. Construction of regular adaptive grids in spatial regions with curvilinear boundaries. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series mechanical engineering*, 2008, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.).
- [12] Al'shina E.A., Boltnev A.A., Kacher O.A. Empirical improvement of simple gradient methods. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2005, vol. 17, no. 6, pp. 43–57. (In Russ.).
- [13] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Evaluation of the possibility of ignition of a hydrogen-oxygen mixture by erosive flame of the impulse laser. *Laser Physics*, 2019, vol. 29, pp. 096001. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab342d>
- [14] Kuzenov V.V. Numerical modeling of the processes of outflow of combustion products of a solid fuel charge in the surrounding space. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series mechanical engineering*, 2007, no. 2, pp. 44–55. (In Russ.).
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Calculation of heat transfer and drag coefficients for aircraft geometric models. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (21), pp. 11011.
<https://doi.org/10.3390/app122111011>
- [16] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The qualitative and quantitative study of radiation sources with a model configuration of the electrode system. *Symmetry*, 2021, vol. 13 (6), pp. 927.
<https://doi.org/10.3390/sym13060927>
- [17] Molchanov A.M., Myakochin A.S. Numerical simulation of high-speed flows using the algebraic Reynolds stress model. *Russian Aeronautics*, 2018, vol. 61, pp. 236–243.
<http://doi.org/10.3103/S1068799818020125>
- [18] Klimenko G.K., Kuzenov V.V., Lyapin A.A., Ryzhkov S.V. *Raschet, modelirovanie i proektirovanie generatorov nizkotemperaturnoy plazmy* [Calculation, modeling and design of low-temperature plasma generators]. Moscow, BMSTU Press, 2021, 264 p. (In Russ.).
- [19] Ryzhkov S.V. Modeling of thermophysical processes in a magnetic thermonuclear engine. *Thermal Processes in Engineering*, 2009, no. 9, pp. 397–400. (In Russ.).

- [20] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Physics of Plasmas*, 2014, vol. 21, art. 022501.
<http://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [21] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. *Alternative fusion fuels and systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, 200 p.
- [22] Kovalev B.D., Myshenkov V.I. Calculation of a viscous supersonic jet flowing into a cocurrent flow. *Uch. zap. TsAGI*, 1978, vol. 9, no. 3, pp. 125–130. (In Russ.).
- [23] Myshenkov V.I. Calculation of the flow of a viscous laminar supersonic jet into a cocurrent flow. *ZhVMi MF*, 1979, vol. 19, no. 2, pp. 474–485. (In Russ.).
- [24] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Turbulence in two-phase flows with macro-, micro- and nanoparticles (a review). *Symmetry*, 2022, vol. 14, p. 2433.
<https://doi.org/10.3390/sym14112433>
- [25] Dimitrienko Y., Koryakov M., Zakharov A. Numerical modeling of coupled problems of external aerothermodynamics and internal heat-and-mass transfer in high-speed vehicle composite constructions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10187, pp. 294–301.
- [26] Ryzhkov S.V. Magneto-inertial fusion and powerful plasma installations (a review). *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (21), p. 6658. <https://doi.org/10.3390/app13116658>
- [27] Shumeiko A.I., Telekh V.D., Ryzhkov S.V. Probe diagnostics and optical emission spectroscopy of wave plasma source exhaust. *Symmetry*, 2022, vol. 14 (10), art. 1983.
<http://doi.org/10.3390/sym14101983>
- [28] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (a review). *Aerospace*, 2023, vol. 10, p. 662. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080662>
- [29] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Simulation of parameters of plasma dynamics of a magnetoplasma compressor. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (9), p. 5538.
<https://doi.org/10.3390/app13095538>
- [30] Rudinskii A.V., Yagodnikov D.A., Ryzhkov S.V., Onufriev V.V. Features of intrinsic electric field formation in low-temperature oxygen–methane plasma. *Technical Physics Letters*, 2021, vol. 47, iss. 7, pp. 520–523. <https://doi.org/10.1134/S1063785021050278>

Savritskiy A.N. — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Nazaryan A.M. — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Savelyev T.A. — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Voronina E.A. — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ryzhkov S.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. SPIN-code 8978-9250. E-mail: svryzhkov@bmstu.ru

Please cite this article in English as:

Savritskiy A.N., Nazaryan A.M., Savelyev T.A., Voronina E.A. Example of complex calculation of the pulsed radiation-magnetogasdynamic system. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 09 (86). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-9-937>