

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУИ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА, ИСТЕКАЮЩЕГО ИЗ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

К. И. Жариков, И. С. Вавилов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Рассматривается струя ионизированного разреженного газа, выходящая из ионно-оптической системы прототипа резонаторного ВЧ-ионного двигателя в окружающее пространство с низким фоновым давлением. После ряда предположений истекающая струя в первом приближении заменена на нейтральный разреженный газ, что позволяет охарактеризовать течение, удовлетворяющее гипотезе сплошности потока. Уравнения, описывающие движение сплошной среды, решаются численно с помощью метода Бубнова–Галеркина, применяющегося в динамике разреженного газа. Учтен нестационарный перенос тепла за счет взаимодействия газового потока с локальной областью тепловыделения в зазоре между сеточными элементами ионно-оптической системы. Механизм тепловыделения описывается уравнением теплопроводности, которое решается совместно с уравнениями газовой динамики. Полученные результаты расчетов приводятся в сравнении с экспериментальными данными. С помощью проведенного моделирования удалось получить пространственную структуру потока нейтрального разреженного газа в цилиндрических каналах и микроканалах двигателя. Благодаря сравнению полученной пространственной структуры с реальной термовизуализационной картиной струи можно оценить вклад резонаторного ускорения в общую энергию струи.

Ключевые слова: численное моделирование, разреженный газ, осесимметричное течение, тепловыделение, струя, термограмма, структура потока.

Введение

Создание математических моделей и способов их моделирования для исследования процессов, протекающих в микродвигателях космических аппаратов, объясняется практической важностью решения широкого круга задач, связанных с современным этапом развития освоения космоса [1–3].

Важной особенностью объекта исследования является прототип микродвигателя, принцип работы которого основан на ускорении заряженных частиц в ёмкостном зазоре тороидального резонатора при условии наличия в его объёме источника электромагнитного излучения [4]. Источник ВЧ/СВЧ-колебаний, заодно и источник плазмы, выполнен на основе твердотельных СВЧ-элементов. Рабочее тело представляет собой смесь плазмы и нейтрального газа, истекающего из ограниченного объёма в пространство с пониженным фоновым давлением (<100 Па). Полученные авторами ранее экспериментальные исследования [4, 5] послужили основой к проведению текущих исследований в части возможности оценки энергетического вклада резонаторного ускорения в общую энергию ионизированной струи по тепловому следу при малых напряжениях в ИОС, а также отсутствию в открытой печати представления о линейных и поперечных размерах разреженной струи. Тем самым возник вопрос, а возможно ли с помощью теории газовой динамики разреженного газа описать процесс истечения нейтрального газа в виде свободной струи с целью определения степени влияния теплового воздействия, геометрических параметров сеточ-

ных элементов ионно-оптической системы на термогазодинамические и геометрические параметры струи?

За последние десятилетия разработаны различные математические модели СВЧ-плазмы, истекающей в область пониженного давления [6–10], однако данные модели имеют ограниченный диапазон входных параметров (рабочее тело, массовый расход, объемная мощность тепловыделения и т.д.), и не рассматривают газодинамику потока плазмы. Таким образом, для эффективного проектирования ионно-плазменных микродвигателей космических аппаратов и сокращения затрат на проведение дорогостоящих и трудоемких экспериментов является актуальной разработка математической модели для моделирования струи разреженного газа, истекающего из ионно-оптической системы (ИОС) ионного двигателя в пространство с пониженным фоновым давлением.

Постановка задачи

Согласно анализу литературы [11–18], моделирование процесса газодинамики в каналах с различной конфигурацией поперечного сечения является одной из наиболее значимых в прикладном аспекте областей динамики разреженного газа [19]. Как известно, динамика разреженного газа является разделом аэродинамики, целью которой является исследование процессов с учетом молекулярной структуры газа. Область исследований динамики разреженного газа охватывает процессы, протекающие в газах очень малой плотности (например,

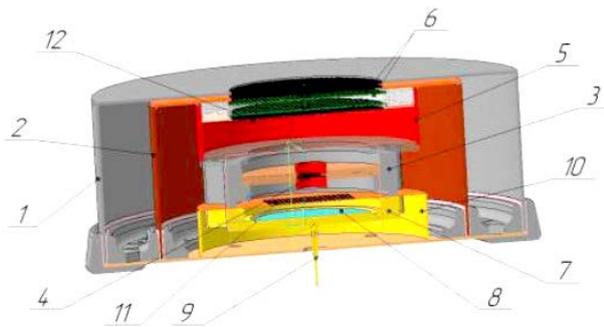


Рис. 1. Модель микродвигателя с СВЧ-ускорителем рабочего тела: 1 — внешний цилиндрический резонатор; 2 — внутренний цилиндрический резонатор; 3 — полость плазмогенератора; 4 — электроды емкостного ВЧ-разряда; 5 — пролетная полость; 6 — сеточный элемент тороидального резонатора; 7 — корпус с анодом; 8 — анод; 9 — штуцер подвода газа; 10 — корпусной элемент; 11 — защитная сетка; 12 — сеточные элементы ионно-оптической системы

Fig. 1. The model of the microthruster with a microwave accelerator working substance:
1 — external cylindrical resonator; 2 — internal cylindrical resonator; 3 — plasma generator cavity; 4 — capacitive RF discharge electrodes; 5 — flight cavity; 6 — toroidal resonator grid element; 7 — housing with anode; 8 — anode; 9 — gas supply nipple; 10 — housing element; 11 — protective grid; 12 — grid elements of the ion-optical system

движение летательных аппаратов на больших высотах) или процессы, в которых длина свободного пробега молекул соизмерима с характерными сечениями самого потока (ударные волны).

Активное применение численных методов позволяет моделировать течения в широком диапазоне чисел Кнудсена — от переходных режимов до течений со скольжением потока [20–22]. Однако необходимо отметить, что в области переходного течения использование уравнений Навье–Стокса неприменимо [23], так как нужно учитывать статистическое распределение частиц в среде, описываемое кинетическими уравнениями Больцмана [20, 24, 25].

В работе [26] проведен анализ и оценка характерных масштабов элементарных процессов в ВЧ-плазме пониженного давления. Согласно полученным данным, ВЧ-плазма в диапазоне пониженного давления (13,3–133 Па) и течения ламинарного потока ($2 \leq Re \leq 700$) имеет следующие особенности: степень термической неравновесности $10 \leq \theta \leq 100$; число Кнудсена для нейтрального газа $0,008 \leq Kn \leq 0,07$; для ионного газа $5 \cdot 10^{-4} \leq Kn \leq 5 \cdot 10^{-3}$; для электронного газа $0,001 \leq Kn \leq 0,1$. Таким образом, течение электронного и нейтрального газов можно охарактеризовать течением между переходным режимом и режимом сплошной среды, а течение заряженных частиц — режиму сплошной среды. Тем самым определяется цель данной работы: разработка математической модели, отвечающей гипотезе сплошности потока для моделирования газодинамики струи нейтрального разреженного газа, истекающего в пространство с пониженным фоновым давлением. Достижение данной цели осуществимо при решении следующих задач:

- 1) определение конфигурации поперечного сечения канала и режима течения;
- 2) оценка распределения потенциала электростатического поля от сеточных элементов ионно-

оптической системы для определения величины тепловыделения;

- 3) описание процесса нестационарного переноса тепла при движении сплошной среды.

Теория

В ходе ранних исследований были созданы прототипы ионных двигателей: электростатический ионный двигатель и двухззорный СВЧ ионный двигатель [4, 5]. У обоих двигателей имеется двухэлектродная ИОС с постоянной ускоряющей разностью потенциалов (рис. 1). Ускоряющая система представлена двумя сеточными элементами (поз. 12) — перфорированными электродами. Наружный диаметр составляет $d = 50$ мм, толщина — $\delta = 0,635$ мм. Диаметр отверстий сетки экрана составляет 0,8 мм, а диаметр отверстий сетки ускорения — 0,5 мм. Количество отверстий в сетках — по 856 штук.

По имеющимся данным сеточных элементов можно определить конфигурацию поперечного сечения каналов, в которых происходит течение разреженного газа. Согласно данным работ [27–30], предложено разделять каналы в зависимости от значения гидравлического диаметра на обычные $D_h \geq 3 \cdot 10^{-3}$ м; мини-каналы $2 \cdot 10^{-4} \leq D_h \leq 3 \cdot 10^{-3}$ м и микроканалы $10^{-5} \leq D_h \leq 2 \cdot 10^{-4}$ м. Следовательно, рассматриваемые области течения газа в экранированной полости электродов (поз. 12) будут соответствовать обычному каналу, а область в межэлектродном зазоре — микроканалу.

Модель сплошной среды для разреженного газа позволяет использовать уравнения Навье–Стокса для описания поведения газа при относительно низких давлениях. Однако необходимо отметить, что модель сплошной среды имеет свои ограничения и может быть некорректна в условиях очень высокой разреженности газа, когда число $Kn < 0,1$.

Для рассматриваемой конструкции ИОС и конфигурации поперечного сечения канала определение режима течения осуществляется по оценке величины критерияльных чисел Рейнольдса и Кнудсена. Так, для азота в диапазоне скоростей от 1 до 85 м/с и рассматриваемых конфигураций каналов число Рейнольдса лежит в диапазоне для обычного канала $1 < R < 300$ и микроканала — $4 < Re < 450$, что характеризует ламинарный режим течения.

Для диапазона давлений газа от 10 до 100 Па в рассматриваемой области течения число Кнудсена составляет $0,0014 \leq Kn \leq 0,013$, что позволяет рассмотреть применение модели сплошной среды для данной задачи с приемлемой точностью.

Решение задачи о распределении потенциала электростатического поля является краевой задачей, имеющей соответствующее решение при заданных граничных условиях. Так, потенциал электростатического поля $E = -grad\phi$ описывается общеизвестным уравнением Пуассона, которое для плоскостной задачи является линейным дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка и имеет вид [31]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

При рассмотрении расчетной области ИОС принимается двумерная осесимметричная область, которая представляет собой половину от наружного диаметра сеточных элементов (рис. 2).

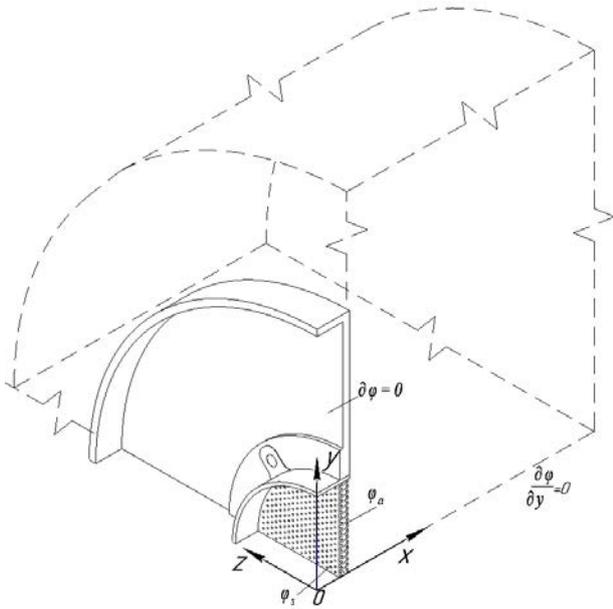


Рис. 2. Расчётная область ионно-оптической системы
Fig. 2. Computational domain of the ion-optical system

Для решения уравнения (1) дополнительно введем краевые условия согласно расчетной области (рис. 2):

— на верхних и боковых границах расчетной области, удаленных на достаточном расстоянии от сеточных элементов, принято условие Неймана:

$$\partial\varphi = 0;$$

— на нижней границе расчетной области, являющейся осью симметрии сеточных элементов ИОС, принято условие Дирихле:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial y} = 0;$$

— на поверхностях каждой пары сеточных электродов принято условие Дирихле, соответственно, на экранной сетке потенциал φ_s и на сетке ускорителя φ_a .

Таким образом, потенциал φ удовлетворяет уравнению Лапласа в расчетной области $x \in (0, l_{vc})$, $y \in (0, d_{vc})$ и заданным граничным условиям:

$$\text{при } x \in (0, d_{hf}) \text{ и } y \in (0, d/2) \quad \partial\varphi = 0;$$

$$\text{при } x \in (0, l_{vc}) \quad \frac{\partial\varphi}{\partial y} = 0;$$

$$\text{при } x \in (d_{ag}, d_{ag} + \delta) \quad \varphi = \varphi_s;$$

$$\text{при } x \in (d_{gc}, d_{gc} + \delta) \quad \varphi = \varphi_a;$$

где l_{vc} , d_{vc} — длина и диаметр вакуумной камеры соответственно.

Плотность энергии электрического поля определяется уравнением:

$$q_v = \frac{1}{2} \int (E \cdot D) dF, \quad (2)$$

где D — вектор электрического смещения:

$$D = E \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

ε — коэффициент диэлектрической проницаемости.

Предполагается, что основным механизмом тепловыделения является область в зазоре между сеточными элементами ИОС; напряженность электрического поля и плотность тепловой энергии, в текущей системе координат (рис. 2) совпадает с полем и энергией в системе координат, представленной на рис. 1. Плотность тепловой энергии (2) обусловлена только величиной разности потенциалов электростатического поля и не зависит от газодинамических параметров рассматриваемого течения тем самым рассматривается фиксированная область энерговыведения.

При указанных выше допущениях решение задачи о динамике газа с учетом нестационарного переноса тепла будет использоваться следующая система уравнений, включающая в себя уравнение движения Навье — Стокса [32]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial t}; \\ \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) &= \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) &= \\ &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + u_x \frac{\partial U}{\partial x} + u_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) &= \\ &= -\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \nabla(\lambda \nabla T) + q_v; \\ p &= \rho RT; \end{aligned} \quad (4)$$

где u_x , u_y — проекции скорости по осям x и y ;

ρ — плотность;

p — давление;

μ — коэффициент динамической вязкости;

U — внутренняя энергия;

T — температура;

λ — коэффициент теплопроводности.

Система уравнений (4) определяет поля скорости, температуры и давления с учетом конвективного движения разреженного газа. Граничные условия, позволяющие решить данную систему, являются следующими: на границе соприкосновения сплошной среды с твердой стенкой — величина проекций скорости равна нулю:

$$u_x, u_y = 0,$$

а температура и нормальная составляющая теплового потока являются непрерывными функциями:

$$T = T_w, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n}, \quad (5)$$

где индекс w — обозначает параметры, отнесенные к твердой стенке.

На входе в расчетную модель задаются следующие параметры: осевая скорость u_x и температура T_0 невозмущенного газового потока, мощность объемного энергоснабжения q_v , рассчитанная по уравнению (2) и дополняющая систему уравнений (4), — уравнение теплопроводности в виде:

$$\nabla^2 T = \frac{-q_v}{a} \quad (6)$$

При расчете течений необходимо учитывать эффекты вязкостных сил, действующих от неподвижной стенки на перемещающуюся сплошную среду. Рассматривая течение разреженного газа, принимается во внимание тот факт, что вязкость разреженных газов не зависит от давления и имеет степенную зависимость от температуры. Для чего вводится в расчет зависимость коэффициента динамической вязкости разреженного газа от температуры, используя уравнение Чэпмена — Энскога [33]:

$$\mu = 2,6693 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{M \cdot T}}{\sigma^2 \Omega_\mu} \quad (7)$$

где M — молярная масса газа;

Ω_μ — интеграл столкновений, определяемый с помощью потенциала Штокмайера;

σ — диаметр эффективного поперечного сечения соударения молекул.

Результаты расчетов

Расчетная область моделирования представляла собой пространство, ограниченное стенками вакуумной камеры и сеточными элементами ИОС. Построение области моделирования осуществлялось посредством задания линейных координат расчетной области.

Для решения уравнения (1) используется пяти-точечная разностная схема для эллиптических уравнений на сетке с одинаковым шагом по осям x и y в виде [34]:

$$\varphi^k(i, j) = \frac{\varphi^{k-1}(i-1, j) - 2\varphi^{k-1}(i, j) + \varphi^{k-1}(i+1, j)}{h^2} + \frac{\varphi^{k-1}(i, j-1) - 2\varphi^{k-1}(i, j) + \varphi^{k-1}(i, j+1)}{l^2}$$

где i, j — координаты узлов сетки по осям x и y ;

h, l — шаг узлов по соответствующим осям x и y .

Для отыскания решения данной системы уравнений (4–6) использовались прямые методы математической физики, в частности, систему уравнений (4), описывающую газодинамику газа, решают с помощью метода Бубнова — Галеркина [20, 25], а уравнение (6) аппроксимируют с помощью явно-невной разностной схемы [34]. Причем уравнение (6) будет решаться прежде, чем система (4), т.к. величины коэффициент вязкости и температура явно входят в систему (4).

Коэффициенты разложения определяются из интегральных условий, выражающих ортогональность невязки к каждой базисной функции. Таким образом, задача сводилась к решению системы алгебраических уравнений для коэффициентов разложения.

Общий вид расчетной сетки для численного моделирования расчетной области представлен

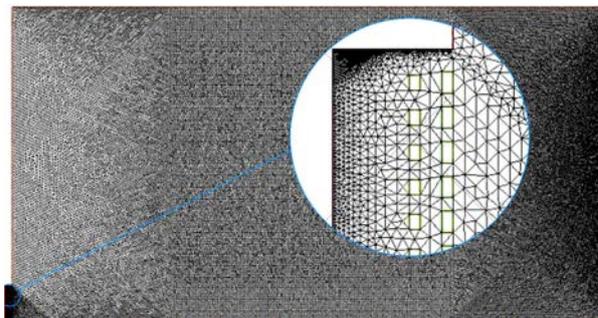


Рис. 3. Конечно-элементная модель расчетной области
Fig. 3. Finite element model of the computational domain

на рис. 3. Общее количество элементов расчетной области изменялось от 300 тыс. до 500 тыс. ячеек.

Исходные значения величины потенциала на сеточных элементах были приняты равными 600 В. Результаты расчетов представлены контурами распределения потенциала (рис. 4а), напряженности (рис. 4б) и плотности энергии (рис. 4в) электростатического поля. Согласно полученным результатам, вектор напряженности поля направлен перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям, что свидетельствует о верной постановке задачи и ее решении.

Моделирование газодинамики струи нейтрального разреженного газа осуществлялось при следующих граничных условиях:

- формирование горизонтальной составляющей скорости, равной $u_x = 5$ м/с со стороны левого торца расчетной области (рис. 2);

- установление условия открытого (выходного) канала [35] $p = 0$ со стороны правого торца расчетной области;

- установление условия прилипания потока $V = 0$ и непрерывности функции температуры и теплового потока (5) на граничных элементах расчетной области.

Решение системы уравнений (4) позволило получить результаты, представленные на рис. 5а. Из рис. 5а следует, что наиболее высокая температура наблюдается вблизи сеточных элементов ИОС, по причине непосредственной близости локального источника тепловыделения. Более низкая температура наблюдается в расчетной области и с течением времени (нестационарностью процесса истечения) не меняется.

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований были получены параметры струи ионизированного разреженного газа, ускоренного ИОС прототипа, что дало представление о линейных и поперечных размерах струи. Сравнение результатов моделирования температурного поля (рис. 5а) с экспериментальными результатами термограмм (рис. 5б) прототипа микродвигателя свидетельствуют о том, что поперечное распределение температуры в обоих случаях одинаково. Диаметральный размер в обоих случаях составляет ≈ 50 мм. Однако продольное распределение температуры различно (рис. 6). Так, для математического моделирования установившееся значение температуры струи составляет 18°C при линейном размере струи, равном ≈ 57 мм. В случае эксперимента установившееся значение температуры составляет $18,3^\circ\text{C}$ при

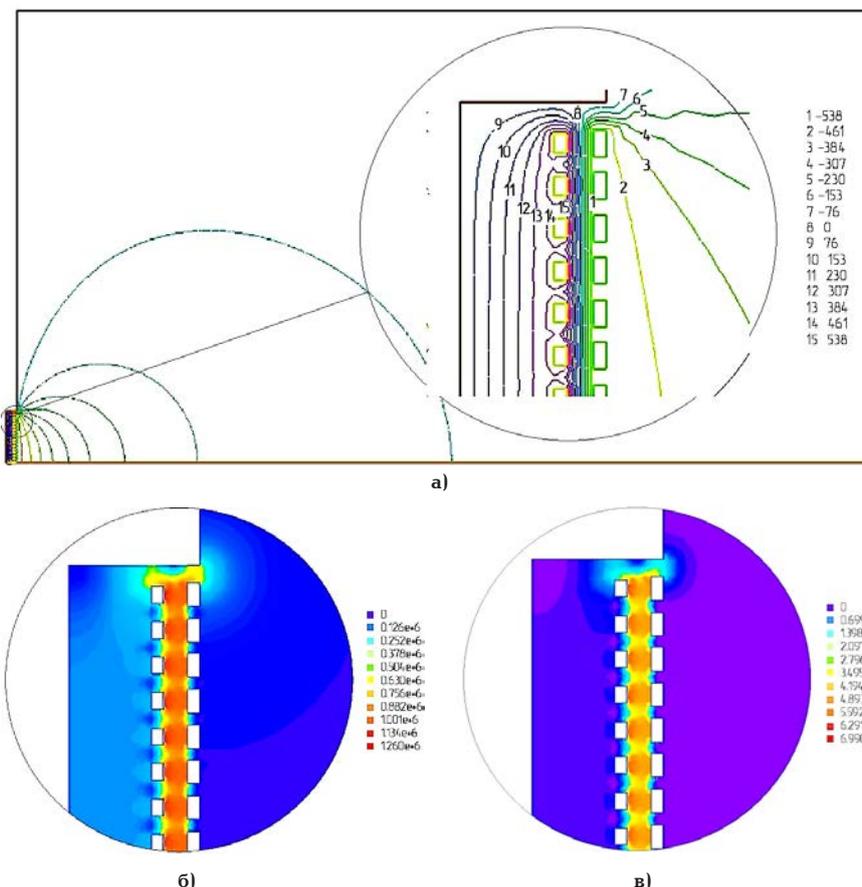


Рис. 4. Изолинии электростатического потенциала (а), поле напряженности (б) и плотности энергии (в) электрического поля между сеточными элементами ионно-оптической системы

Fig. 4. Isolines of electrostatic potential (a), field strength (b) and energy density (c) of the electric field between the grid elements of the ion-optical system

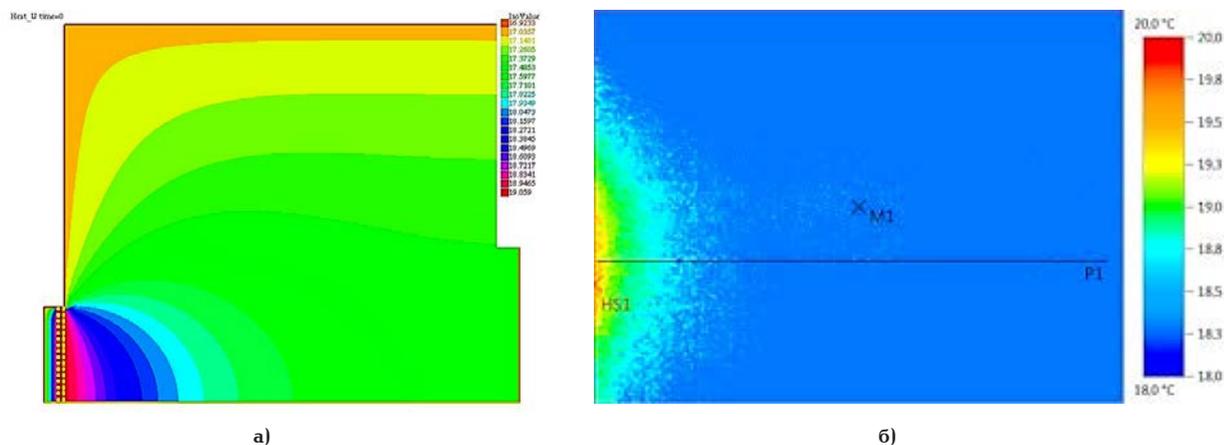


Рис. 5. Температурное поле (а) и термограмма (б) струи нейтрального разреженного газа, истекающая из прототипа микродвигателя

Fig. 5. Temperature field (a) and thermogram (b) of a jet of neutral rarefied gas flowing out of a prototype microthruster

длине, равной 70 мм. Данное различие линейных размеров струй в продольном распределении свидетельствует о том, что кроме подвода энергии к газу в зазоре между сеточными элементами ионно-оптической системы присутствует еще один источник энергии, который увеличивает скорость струи и, соответственно, глубину проникновения струи в фоновый газ. Данным источником может являться величина переменного ускоряющего напряжения, возникающего в тороидальном резонаторе. Поток ионизированного газа, взаимодействуя с перемен-

ным полем, получает приращение энергии, что в математической модели может быть представлено как подвод дополнительной тепловой энергии к газу. В представленном математическом моделировании данный момент исключен, т.к. рассматривается только работа ионно-оптической системы.

Дополнительное увеличение скорости ионизированного потока может быть обусловлено появлением многозарядных ионов при последовательном пересечении ускоряющих зазоров (зазор переменного напряжения и зазор постоянного напряжения

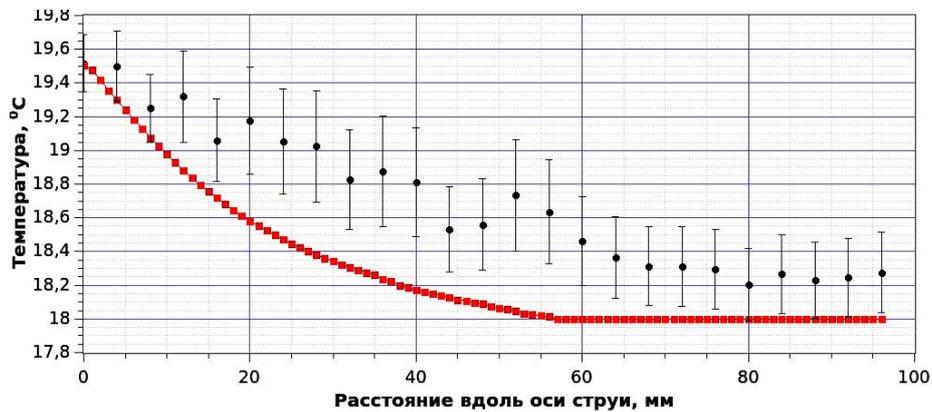


Рис. 6. График изменения температуры по оси ионно-оптической системы струи нейтрального разреженного газа
 Fig. 6. Graph of temperature change along the axis of the ion-optical system of a jet of neutral rarefied gas

ИОС), рассмотренное авторами в ходе проведения экспериментальных исследований [4]. С большой долей вероятности имеют место оба процесса: резонаторное ускорение и повышение заряда ионов.

Разработанная численная модель позволяет исследовать пространственную структуру потока смеси плазмы и нейтрального газа в цилиндрических каналах и микроканалах в зависимости от скорости потока и плотности тепловой энергии. Модель позволяет учитывать влияние как конструктивных особенностей расположения конструктивных параметров сеточных элементов ионно-оптической системы, а также параметров течения нейтрального газа.

Выводы и заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что подход к исследованию таких течений с использованием численного моделирования является обоснованным. Струя нейтрального газа, протекающая через сеточные элементы ионно-оптической системы, имеет достаточно сложный пространственный характер вследствие неравномерности распределения параметров в продольном и поперечном направлениях. Дальнейшим этапом исследования является доработка математической модели с целью учета различных факторов и сокращения числа принятых допущений.

Современные средства численного моделирования позволяют проводить различные анализы, исследовать процессы с учетом различных факторов, что обеспечивает частичную замену натурных испытаний вычислительным экспериментом. Последний можно использовать также на этапе проектирования конструкции микродвигателя космического аппарата для определения оптимальных конструктивных параметров конструкции и течений. В части лабораторного исследования новых образцов микродвигателей численный метод позволяет произвести отсечение известных воздействий от суммарного воздействия с целью определения уровня неизвестного изучаемого воздействия. При этом результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными. В данной работе экспериментальная глубина проникновения струи прототипа ускорительного микродвигателя в фоновый газ сравнивается с моделированной глубиной проникновения одной из ускоряющих систем

прототипа ИОС. Параметры ИОС (напряжение, ток) легко определяются приборными средствами в процессе эксперимента, что нельзя сказать о параметрах переменного напряжения в ускоряющем зазоре тороидального резонатора. Соответственно, численное моделирование позволяет оценить вклад переменного напряжения в энергию ионизированного потока.

Список источников

1. Levchenko I., Xu S., Mazouffre S. [et. al.]. Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma-based space electric propulsion // Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27 (2). P. 020601. DOI: 10.1063/1.5109141.
2. Niu X., Liu H., Yu D. An integrative mathematical model of microwave ion thruster for mHz-frequency thrust noise analysis // Chinese Journal of Aeronautics. 2024. Vol. 37 (4). P. 121–136. DOI: 10.1016/j.cja.2023.11.015.
3. Myers R. Overview of major US industrial electric propulsion programs // Proc. of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Jul. 11–14 July 2004. Florida, 2004. P. 1–7. DOI: 10.2514/6.2004-3331.
4. Вавилов И. С., Федянин В. В., Ячменев П. С. [и др.]. Теоретико-экспериментальные исследования прототипа резонаторного сверхвысокочастотного ионного двигателя для космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2024. № 2 (45). С. 106–119. EDN: LZSNKM.
5. Вавилов И. С., Жариков К. И., Ячменев П. С. [и др.]. Калориметрические исследования СВЧ ионного двигателя // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 118–127. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-118-127. EDN: UVLBD.
6. Kaufman H. R. Technology of electron-bombardment ion thrusters // Advances in Electronics and Electron Physics. Colorado: Academic Press, 1975. Vol. 36. P. 265–373.
7. Абгарян М. В., Бишаев А. М., Рыков В. А. О моделировании струи разреженной плазмы на основе кинетических уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2023. Т. 63, № 12. С. 1984–1992. DOI: 10.31857/S0044466923120025. EDN: ZVAIWT.
8. Воронич И. В., Титарев В. А. Численный анализ течения разреженного газа через систему коротких каналов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2023. Т. 63, № 12. С. 1942–1959. DOI: 10.31857/S0044466923120281. EDN: RGYZZW.
9. Напалков О. Г., Кустова Е. В., Сайфутдинов А. И. Исследование СВЧ-разряда в воздухе на основе расширенной гидродинамической модели // Физико-химическая кинетика

в газовой динамике. 2023. Т. 24, № 5. С. 1–17. DOI: 10.33257/PhChGD.24.5.1063. EDN: LBPRUT.

10. Шемахин А. Ю., Желтухин В. С., Шемахин Е. Ю. Математическое моделирование ВЧ-разряда пониженного давления с продувом газа в нелокальном приближении: электро- и плазменная динамика // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 5. С. 1368–1376. EDN: ROXIMJ.

11. Sharipov F. Numerical simulation of rarefied gas flow through a thin orifice // Journal of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 518. P. 35–60. DOI: 10.1017/S0022112004000710.

12. Boyd Iain D. [et. al.]. Particle Simulation of Hall Thruster Plumes in the 12V Vacuum Chamber. IEPC -2005-138 / Proc. of 29 IEPC. Oct. 31 – Nov. 4, 2005. New Jersey, 2005.

13. Kirichenko A. Ya., Martynuk S. P., Motornenko A. P. [et. al.]. A spherical microwave discharge induced at atmospheric pressure // Technical Physics Letters. 2002. Vol. 28 (8). P. 645–647. DOI: 10.1134/1.1505538.

14. Шапошников В. А., Гусев А. В., Суханов А. Ю. [и др.]. Математическое моделирование газодинамических и тепловых явлений в процессе плазмохимической конверсии SiCl₄ в СВЧ-разряде // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 3 (1). С. 159–164. EDN: RAPWUP.

15. Торопов Г. П., Хартов С. А. Модель распространения струи плазменного двигателя при его испытаниях в вакуумной камере с учетом влияния электрического поля // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18, № 2. С. 83–88. EDN: NTERQZ.

16. Торопов Г. П., Хартов С. А. Математическая модель распространения струи плазменного ускорителя в объеме вакуумной камеры // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15, № 4. С. 16. EDN: JUUGBD.

17. Кузелев М. В., Поезд А. Д., Рухадзе А. А. [и др.]. Математическое моделирование процессов в плазменном СВЧ-генераторе // Математическое моделирование. 1989. Т. 1, № 11. С. 34–40.

18. Красовская Л. И., Брич М. А. Моделирование структуры плазменных потоков в трехструйных электродуговых реакторах // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40, № 3. С. 365–375.

19. Шарипов Ф. М., Селезнев В. Д. Движение разреженных газов в каналах и микроканалах: моногр. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 230 с. ISBN 5-7691-1968-3.

20. Вычислительные методы в динамике разреженных газов: сб. ст. / Под ред. В. П. Шидловского. Москва: Мир, 1969. 276 с.

21. Иванов М. С., Кашковский А. В., Гимельшейн С. Ф., Маркелов Г. Н. Статистическое моделирование разреженных гиперзвуковых течений от свободно-молекулярного до околоконтинуального режимов течения // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4, № 3. С. 251–268.

22. Sharipov F., Gramani Cumin L. M., Kalempa D. Plane couette flow of binary gaseous mixture in the whole range of the Knudsen number // European Journal of Mechanics – B/Fluids. 2004. Vol. 23 (6). P. 899–906. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2004.03.002.

23. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. 2-е изд., доп. Москва: Наука, 1982. 294 с.

24. Коган М. Н. Динамика разреженного газа: кинетическая теория. Москва: Наука: Глав. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1967. 440 с.

25. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. Москва: Наука, 1984. 520 с.

26. Желтухин В. С., Шемахин А. Ю. Расчет газодинамики струй ВЧ-плазмы пониженного давления // Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки. 2011. Т. 153, № 4. С. 135–142. EDN: OWZGJD.

27. Kandlikar S. G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. Vol. 26 (2–4). P. 389–407. DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00150-4.

28. Cheng L., Mewes D. Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels // International Journal of Multiphase Flow. 2006. Vol. 32. P. 183–207. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.10.001.

29. Thome J. R. Boiling in microchannels: a review of experiment and theory // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2004. Vol. 25 (2). P. 128–139. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2003.11.005.

30. Cheng L., Ribatski G., Thome J. R. Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps: Fundamentals and Applications // Applied Mechanics Reviews. 2008. Vol. 61 (5). P. 050802. DOI: 10.1115/1.2955990.

31. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2 т. Т. 1. Основные положения и общие методы. Москва: Мир, 1991. 504 с.

32. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. Москва: Наука, 1986. 736 с.

33. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса: пер. с англ. Москва: Химия, 1974. 687 с.

34. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1977. 656 с.

35. Adam aigo M. Numerical solution of Navier Stokes equation using control volume and finite element method // International Journal of Applied Mathematical Research. 2016. Vol. 5 (1). P. 63–68. DOI: 10.14419/ijamr.v5i1.5616.

ЖАРИКОВ Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 9469-0544

ORCID: 0000-0002-4966-1788

AuthorID (SCOPUS): 57192074889

ResearcherID: E-9087-2014

Адрес для переписки: freeorchids@mail.ru

ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3468-6744

AuthorID (РИНЦ): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Для цитирования

Жариков К. И., Вавилов И. С. Численное моделирование струи разреженного газа, истекающего из ионно-оптической системы ионного двигателя // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 1. С. 83–91. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-83-91. EDN: ZMUNJY.

Статья поступила в редакцию 10.02.2025 г.

© К. И. Жариков, И. С. Вавилов

NUMERICAL SIMULATION OF A RAREFIED GAS JET EMANATING FROM AN ION-OPTICAL SYSTEM OF THE MICROTHRUSTER

K. I. Zharikov, I. S. Vavilov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

A jet of ionized rarefied gas escaping from an ion-optical system of a prototype resonator RF-ion thruster into the surrounding space with low background pressure is considered. After a number of assumptions, the escaping jet is replaced in the first approximation by a neutral rarefied gas, which allows us to characterize the flow satisfying the hypothesis of flow continuity. The equations describing the motion of a continuous medium are solved numerically using the Bubnov–Galerkin method, which is used in rarefied gas dynamics. Non-stationary heat transfer is taken into account due to the interaction of the gas flow with a local heat release region in the gap between the grid elements of the ion-optical system. The heat release mechanism is described by the heat conduction equation, which is solved together with the gas dynamics equations. The obtained calculation results are compared with the experimental data. The conducted modeling made it possible to obtain the spatial structure of the neutral rarefied gas flow in the cylindrical channels and microchannels of the microthruster. By comparing the obtained spatial structure with the real thermal imaging picture of the jet, it is possible to estimate the contribution of the resonator acceleration to the total energy of the jet.

Keywords: numerical simulation, rarefied gas, axisymmetric flow, heat release, jet, thermogram, flow structure.

References

1. Levchenko I., Xu S., Mazouffre S. [et. al.]. Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma-based space electric propulsion. *Phys. Plasmas*. 2020. Vol. 27 (2). P. 020601. DOI: 10.1063/1.5109141. (In Engl.).
2. Niu X., Liu H., Yu D. An integrative mathematical model of microwave ion thruster for mHz-frequency thrust noise analysis. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. Vol. 37 (4). P. 121–136. DOI: 10.1016/j.cja.2023.11.015. (In Engl.).
3. Myers R. Overview of major US industrial electric propulsion programs // Proc. of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Jul. 11–14 July 2004. Florida, 2004. P. 1–7. DOI: 10.2514/6.2004-3331. (In Engl.).
4. Vavilov I. S., Fedyanin V. V., Yachmenev P. S. [et al.]. Teoretiko-eksperimental'nyye issledovaniya prototipa rezonatornogo sverkhvysokochastotnogo ionnogo dvigatelya dlya kosmicheskikh apparatov [Theoretical and experimental studies of a prototype microwave resonator ion thruster for spacecraft]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. Space Technique and Technologies*. 2024. No. 2 (45). P. 106–119. EDN: LZSNKM. (In Russ.).
5. Vavilov I. S., Zharikov K. I., Yachmenev P. S. [et al.]. Kalorimetricheskiye issledovaniya SVCH ionnogo dvigatelya [Calorimetric studies of microwave ion thruster]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 118–127. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-118-127. EDN: UVLBLD. (In Russ.).
6. Kaufman H. R. Technology of electron-bombardment ion thrusters // *Advances in Electronics and Electron Physics*. Colorado: Academic Press, 1975. Vol. 36. P. 265–373. (In Engl.).
7. Abgaryan M. V., Bishayev A. M., Rykov V. A. O modelirovani stui razrezhennoy plazmy na osnove kineticheskikh uravneniy [On the Simulation of a Rarefied Plasma Jet on the Basis of Kinetic Equations]. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*. 2023. Vol. 63, no. 12. P. 1984–1992. DOI: 10.31857/S0044466923120025. EDN: ZVAIWT. (In Russ.).
8. Voronich I. V., Titarev V. A. Chislennyy analiz techeniya razrezhenno gaza cherez sistemu korotkikh kanalov [Numerical Analysis of Rarefied Gas Flow through a System of Short Channels]. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*. 2023. Vol. 63, no. 12. P. 1942–1959. DOI: 10.31857/S0044466923120281. EDN: RGYZZW. (In Russ.).
9. Napalkov O. G., Kustova E. V., Sayfutdinov A. I. Issledovaniye SVCH razryada v vozdukhe na osnove rasshirennoy gidrodinamicheskoy modeli [Study of microwave discharges in air on the basis of extended fluid-dynamic model]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike. Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*. 2023. Vol. 24, no. 5. P. 1–17. DOI: 10.33257/PhChGD.24.5.1063. EDN: LBPRUT. (In Russ.).
10. Shemakhin A. Y., Zheltukhin V. S., Shemakhin E. Yu. Matematicheskoye modelirovaniye VCh razryada ponizhenno davleniya s produvom gaza v nelokal'nom priblizhenii: elektro- i plazmodinamika [Mathematical simulation of a high-frequency low-pressure discharge with gas injection in non-local approximation: electro- and plasmadynamics]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. Vol. 94, no. 5. P. 1336–1343. DOI: 10.1007/s10891-021-02415-5. EDN: ROXIMJ. (In Russ.).
11. Sharipov F. Numerical simulation of rarefied gas flow through a thin orifice. *Journal of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 518. P. 35–60. DOI: 10.1017/S0022112004000710. (In Engl.).
12. Boyd Iain D. [et. al.]. Particle Simulation of Hall Thruster Plumes in the 12 V Vacuum Chamber. IEPC -2005-138 / Proc. of 29 IEPC. Oct. 31–Nov. 4, 2005. New Jersey, 2005. (In Engl.).
13. Kirichenko A. Ya., Martynyuk S. P., Motornenko A. P. [et. al.]. A spherical microwave discharge induced at atmospheric pressure. *Technical Physics Letters*. 2002. Vol. 28 (8). P. 645–647. DOI: 10.1134/1.1505538. (In Engl.).

14. Shaposhnikov V. A., Gusev A. V., Sukhanov A. Yu. [et al.]. Matematicheskoye modelirovaniye gazodinamicheskikh i teplovykh yavleniy v protsesse plazmokhimicheskoy konversii SiCl₄ v SVCH-razryade [Mathematical simulation of gas-dynamic and thermal phenomena in plasma-chemical conversion of SiCl₄ in a microwave discharge]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2013. No. 3 (1). P. 159–164. EDN: RAPWUP. (In Russ.).
15. Toropov G. P., Khartov S. A. Model' rasprostraneniya strui plazmennogo dvigatelya pri yego ispytaniyakh v vakuumnoy kamere s uchetom vliyaniya elektricheskogo polya [Model of plasma thruster jet propagation in vacuum chamber during testing considering electric field influence]. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. *Aerospace MAI Journal*. 2011. Vol. 18, no. 2. P. 83–88. EDN: NTERQZ. (In Russ.).
16. Toropov G. P., Khartov S. A. Matematicheskaya model' rasprostraneniya strui plazmennogo uskoritelya v ob'yeme vakuumnoy kamery [A mathematical model of jet expansion inside vacuum chamber for plasma accelerator]. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. *Aerospace MAI Journal*. 2008. Vol. 15, no. 4. P. 25–34. EDN: JUUGBD. (In Russ.).
17. Kuzelev M. V., Poyezd A. D., Rukhadze A. A. [et al.]. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v plazmennom SVCH generatore [Mathematical modelling of processes in plasma UHF generator]. *Matematicheskoe Modelirovaniye*. 1989. Vol. 1, no. 11. P. 34–40. (In Russ.).
18. Krasovskaya L. I., Britch M. A. Modelirovaniye struktury plazmennykh potokov v trekhstruynykh elektrodugovykh reaktorakh [Modeling of the Structure of Plasma Flows in Three-Jet Electric-Arc Reactors]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2002. Vol. 40, no. 3. P. 365–375. (In Engl.).
19. Sharipov F. M., Seleznev V. D. Dvizheniye razrezhennykh gazov v kanalakh i mikrokanalakh [Movement of rarefied gases in channels and microchannels]. Ekaterinburg, 2008. 230 p. ISBN 5-7691-1968-3. (In Russ.).
20. Shidlovskiy V. P. Vychislitel'nyye metody v dinamike razrezhennykh gazov [Computational methods in the dynamics of rarefied gases]. Moscow, 1969. 276 p. (In Russ.).
21. Ivanov M. S., Kashkovskiy A. V., Gimel'sheyn S. F., Markelov G. N. Statisticheskoye modelirovaniye razrezhennykh giperzvukovykh techeniy ot svobodno — molekulyarnogo do okolocontinual'nogo rezhimov techeniya [Statistical modeling of rarefied hypersonic flows from free-molecular to near-continuous flow regimes]. *Teplofizika i aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 1997. Vol. 4, no. 4. P. 343–354. (In Russ.).
22. Sharipov F., Gramani Cumin L. M., Kalempa D. Plane couette flow of binary gaseous mixture in the whole range of the Knudsen number. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 2004. Vol. 23 (6). P. 899–906. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2004.03.002. (In Engl.).
23. Ermakov S. M., Mikhaylov G. A. Statisticheskoye modelirovaniye [Statistical Modeling]. 2nd ed., supplemented. Moscow, 1982. 294 p. (In Russ.).
24. Kogan M. N. Dinamika razrezhennogo gaza: kineticheskaya teoriya [Dynamics of a rarefied gas: kinetic theory]. Moscow, 1967. 440 p. (In Russ.).
25. Belotserkovskiy O. M. Chislennoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred [Numerical modeling in continuous media mechanics]. Moscow, 1984. 520 p. (In Russ.).
26. Zheltukhin V. S., Shemakhin A. Yu. Raschet gazodinamiki struy VCH-plazmy ponizhennogo davleniya [Calculation of gas dynamics of streams of a radio-frequency plasma at low pressure]. Uchenyye zapiski kazanskogo universiteta. Ser. Fiziko-matematicheskoye nauki. *Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series*. 2011. Vol. 153, no. 4. P. 135–142. EDN: OWZGJD. (In Russ.).
27. Kandlikar S. G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2002. Vol. 26 (2–4). P. 389–407. DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00150-4. (In Engl.).
28. Cheng L., Mewes D. Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels. *International Journal of Multiphase Flow*. 2006. Vol. 32. P. 183–207. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.10.001. (In Engl.).
29. Thome J. R. Boiling in microchannels: a review of experiment and theory. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2004. Vol. 25 (2). P. 128–139. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2003.11.005. (In Engl.).
30. Cheng L., Ribatski G., Thome J. R. Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps: Fundamentals and Applications. *Applied Mechanics Reviews*. 2008. Vol. 61 (5). P. 050802. DOI: 10.1115/1.2955990. (In Engl.).
31. Fletcher K. Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkostey. V 2 t. T. 1. Osnovnyye polozheniya i obshchiye metody [Computational methods in fluid dynamics. In 2 vols. Vol. 1. Fundamentals and general methods]. Moscow, 1991. 504 p. (In Russ.).
32. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoreticheskaya fizika. V 10 t. T. 6. Gidrodinamika [Theoretical Physics. In 10 vols. Vol. 6. Hydrodynamics]. Moscow, 1986. 736 p. (In Russ.).
33. Berd R., St'yuart V., Layftut E. Yavleniya perenosy [Transfer phenomena]: trans. from English. Moscow, 1974. 687 p. (In Russ.).
34. Samarskiy A. A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow, 1977. 656 p. (In Russ.).
35. Adam aigo M. Numerical solution of Navier Stokes equation using control volume and finite element method. *International Journal of Applied Mathematical Research*. 2016. Vol. 5 (1). P. 63–68. DOI: 10.14419/ijamr.v5i1.5616. (In Engl.).

ZHARIKOV Konstantin Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 9469-0544
ORCID: 0000-0002-4966-1788
AuthorID (SCOPUS): 57192074889
ResearcherID: E-9087-2014
Correspondence address: freeorchids@mail.ru
VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 3468-6744
AuthorID (RCSI): 518332
AuthorID (SCOPUS): 56610211900
ResearcherID: B-2634-2014

For citations

Zharikov K. I., Vavilov I. S. Numerical simulation of a rarefied gas jet emanating from an ion-optical system of the microthruster. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 83–91. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-83-91. EDN: ZMUNJY.

Received February 10, 2025.

© K. I. Zharikov, I. S. Vavilov