

СТРУКТУРА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ ПЛАЗМЫ, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ ГРУППЫ КАПИЛЛЯРНЫХ РАЗРЯДОВ

В.В. Кузенов

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Москва, 119526, проспект Вернадского, 101-1*

Аннотация

Произведено численное моделирование и предварительный анализ плазмодинамических процессов, протекающих при импульсном взаимодействии нескольких струй плазмы, истекающих из системы капиллярных разрядов. Численная реализация плазмодинамической модели основана на неортогональных структурированных сетках с использованием схем расщепления по физическим процессам и направлениям. Решение расщепленных уравнений Рейнольдса находится с помощью разработанного в работе варианта нелинейной квазилинейной компактной дифференциально-разностной схемы повышенного порядка точности, которая в пространственно гладкой части численного решения позволяет достигнуть 7-й порядок точности.

STRUCTURE INTERACTION OF A PULSED PLASMA JET ISSUING FROM A CAPILLARY DISCHARGE GROUP

V.V. Kuzenov

Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119526

The numerical method of building regular adaptive cells in arbitrary spaces is presented. This method allows to build regular cells in volumes, where irregular cells are usually used. Some variants of plasma outflow are analyzed in cells, which were created using this numerical method.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для получения импульсных струй плазмы на практике часто используется капиллярный разряд с испаряющейся стенкой (КРИС), представляющий собой мощный искровой разряд, осуществляемый через цилиндрический канал в диэлектрике. Известно также, что импульсный капиллярный разряд является одним из сравнительно простых способов получения плазмы. При этом данный тип разряда характеризуется продолжительной, достаточно устойчивой в атмосфере плазменной структурой импульсной струи.

Химический состав плазмы КРИС, истекающей из канала струи, как правило, определяется составом материала стенки цилиндрического канала в диэлектрике. В случае использования текстолитового капилляра исследуемая плазма имеет следующий атомный состав: 47% водорода, 37% углерода, 16% кислорода ($H_4C_{37}O_{16}$). Для оргстекла (ПА) – $H_8C_5O_2$. Однако при первоначальной инициации плазмы (с помощью металлических проводников) внутри цилиндрического канала КРИС, истекающая через выходное сечение плазма в основном будет состоять из материала проводника.

Интерес к этому типу эрозийного разряда в последнее время возрос в связи с исследованиями так называемых энергоёмких плазменных образований (ЭПО) [1], а также ряда аэрофизических приложений [9].

Отметим также, что на основе КРИС может быть создана плазменная мишень, предназначенная для проведения экспериментальных исследований по

взаимодействию пучков тяжелых ионов с ионизованным веществом [2].

В настоящее время также представляет интерес разработка микродвигателей [3, 4] для коррекции орбит спутников, использующих в качестве рабочего тела относительно плотную плазму и позволяющих создавать минимально возможный единичный вектор тяги. Настоящая работа способствует поиску эффективного решения задачи ориентации малогабаритного космического аппарата и созданию новых типов космических двигателей малой тяги с минимальным весогабаритными характеристиками и энергопотреблением.

В данной работе система импульсных капиллярных разрядов [1] представляла собой межэлектродную вставку из текстолитового цилиндра диаметром 150 мм и высотой 50 мм, с осевым и системой щелевых отверстий, являющихся рабочими каналами капиллярных разрядов, электродов и корпуса. Электроды выполнены в виде плоских стальных пластин, один из которых закрывал с одной стороны канал капиллярного разряда. Первоначальной пробой плазмы осуществлялся с помощью электровзрыва внутри капилляра металлических проводников. В качестве плазмообразующих веществ использовался алюминий, медь или свинец.

В работе рассматриваются отдельные результаты численного моделирования процессов взаимодействия, системы импульсных струй вытекающих из капиллярных разрядов в окружающую среду (воздух при атмосферном давлении).

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проведении расчетов газодинамические параметры, истекающей из канала капиллярного разряда в затопленное пространство или в спутные плазменные струи определялись на основе приближенной математической модели. Математическая модель плазодинамических процессов внутри канала капиллярного разряда построена из условия того, что вкладываемая из емкостного накопителя энергия электрическая мощность излучается оптически плотной плазмой, а вся электрическая энергия переходит в тепловую энергию плазмы, которая истекает со звуковой скоростью через срез капиллярного разряда.

Математическая модель процессов, возникающих при взаимодействии импульсных струй плазмы из капиллярных разрядов, основана на многокомпонентных однотемпературных радиационных уравнениях Рейнольдса. Для решения системы уравнений конечно-разностным методом вводится произвольная криволинейная система координат.

Для определения пространственно-временного положения контактной границы, отделяющей плазму аблирующего материала преграды от плазмы окружающей среды, используется метод фиктивной примеси. Для этого в систему выше приведенных уравнений вводится дополнительное уравнение ($\rho_g \in [0,1]$):

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \vec{V} \nabla \rho_g = 0$$

Конечно-разностный метод, используемый для расчета газодинамической части системы уравнений, основан на модификации метода Годунова и пространственном расщеплении уравнений Навье–Стокса, записанных в произвольной криволинейной системе координат. При аппроксимации конвективной составляющей векторов потоков на границах расчетной ячейки применялась процедура расчета распада разрыва разработанная Годуновым с использованием реконструкции сеточной функции (внутри расчетной ячейки), которая была взята из работы [5]. Данная модификация метода Годунова позволяет повысить порядок аппроксимации конечно-разностной схемы до 7-го. При этом “вязкая” часть системы уравнений Навье–Стокса определялась также явным образом с использованием реконструкции сеточной функции, которая соответствует работе [5]. Разработанные вычислительные коды используют многоблочную многосеточную технологию расчетов на неортогональных структурированных сетках.

Расчет, входящих в данную систему уравнений термодинамических $e(T, \rho)$, $P(T, \rho)$ и оптических $\chi_i(T, \rho)$ параметров рабочих сред проводился, в рамках приближения локального термодинамического равновесия с использованием компьютерной системы ASTEROID, разработанной в работах [6, 7, 10-13].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Конкретные расчеты проведены для группы алюминиевых (Al) струй, истекающей из системы каналов КРИС в затопленное пространство, заполненное воз-

духом, который изначально находится при нормальных условиях. Время наступления максимума разрядного тока равно $t_{\max} = 25$ мкс. Значение полной энергии запасаемой в емкостном накопителе энергии для отдельного варианта КРИС составляло величину 2.7 кДж, диаметр канала капиллярного разряда равен 10 мм, длина канала отдельного КРИС 50 мм, расстояние между отдельными КРИС равно 60 мм.

На рис. 1–2 представлены зависимости от времени t [мкс] продольной скорости v [м/с] (рис. 1) и температуры T [К] (рис. 2), которые соответствуют теплофизическим параметрам в выходном сечении отдельного КРИС. Зависимости, приведенные на рис. 1–2 используются в качестве краевых условий при проведении численных расчетов.

Расчетная область, при проведении двумерных расчетов в системе координат r, z и ξ, η представляла собой прямоугольник. Адаптируемые сетки строились по аналогии с [14,15]. В нижней части рисунка располагаются выходные сечения каналов КРИС. Через эту плоскую поверхность эрозионный поток плазмообразующих веществ (в расчетах Al) втекает в расчетную зону. Сверху она была ограничена прямой линией, на которой задаются не возмущающие условия на выходящий из расчетной области поток: $\partial^2 \vec{f} / \partial x_n^2 = 0$, где $\vec{f} = \{\rho, u, v, e\}$ и x_n – координата нормальная к граничной поверхности.

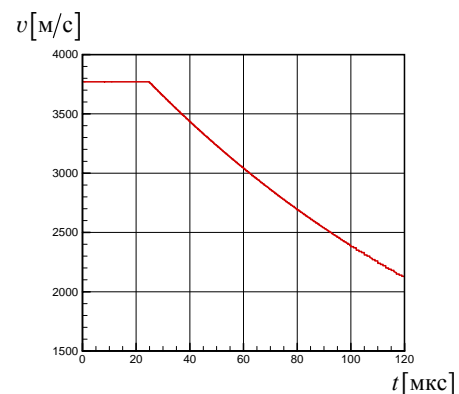


Рис.1. Значения скорости v [м/с] истекающей плазмы на срезе для отдельного варианта КРИС от времени t [мкс]

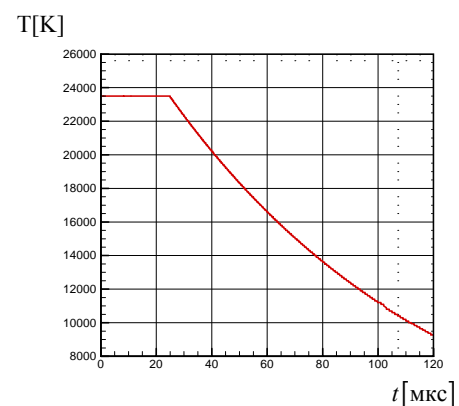


Рис.2. Значения температуры T [К] истекающей плазмы на срезе для отдельного варианта КРИС от времени t [мкс]

Пространственное положение данной прямой определяется из условия того, чтобы возмущения чис-

ленного решения, возникающие на верхней границе расчетной области от выходящего потока не искажали течение вблизи среза канала капиллярного разряда. С правой стороны область интегрирования ограничивается осью симметрии, на которой задаются соответствующие условия симметрии течения плазмы капиллярного разряда. С левой стороны располагается поверхность, находящаяся на достаточном удалении от оси симметрии, так чтобы на ней можно было задавать граничные условия, соответствующие условиям на бесконечности в невозмущенной газовой среде.

Экспериментальные [1] и теоретические [4] исследования импульсной струи, истекающей через срез одиночного капиллярного разряда, показывают, что в области смешения струи и окружающей газовой среды формируются тороидальные долгоживущие вихревые структуры. Одним из основных и важных свойств тороидального вихря (ТВ) является то, что он проходит в неограниченной среде до своего распада большие расстояния по сравнению с облаком (плазмы, газа, жидкости) такого же размера, что и вихрь. Так, пройденное ТВ расстояние до своего распада может достигать величины $z_{\max} \approx (60 \div 150) R_0$ в зависимости от их начальных параметров (R_0 – начальный радиус ТВ).

Определенный интерес для практики представляют численные исследования взаимодействия системы импульсных струй, вытекающих из группы расположенных рядом КРИС.

На рис. 3–6 приведены двумерные пространственные распределения температуры T [K], давления P [атм]. Пространственные распределения, приведенные на рис. 3–4 соответствуют началу взаимодействия периферийных частей импульсных струй плазмы, истекающих из системы КРИС. В первую очередь это взаимодействие затрагивает внешние ударные волны, отделяющие плазму каждого КРИС от газовой среды (воздух), находящейся в затопленном пространстве. В этой области происходит столкновение двух ударных волн с заметным увеличением значений газодинамических параметров в зоне взаимодействия (давлением и плотность возрастают приблизительно в два раза) [8]. При этом вне зоны взаимодействия (для данного момента времени) термогазодинамические параметры КРИС соответствуют значениям в факеле одиночного капиллярного разряда.

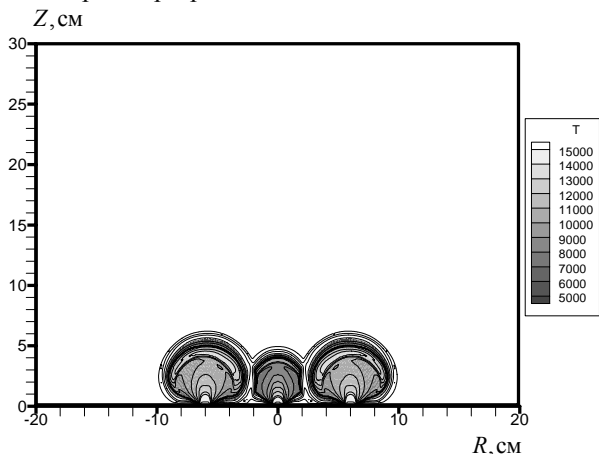


Рис.3. Пространственное распределение температуры T [K] в системе импульсных струй КРИС на момент времени $t = 18.5$ мкс

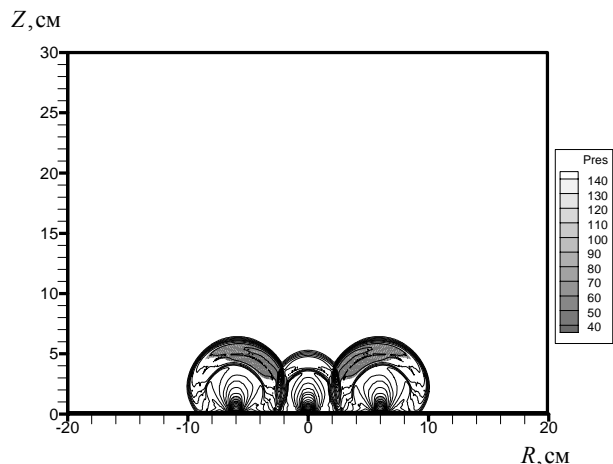


Рис.4. Пространственное распределение давления P [атм] в системе импульсных струй КРИС на момент времени $t = 18.5$ мкс

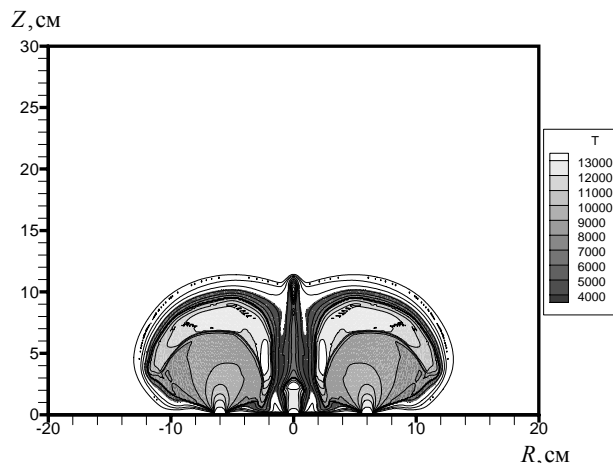


Рис.5. Пространственное распределение температуры T [K] в системе импульсных струй КРИС на момент времени $t = 41.6$ мкс

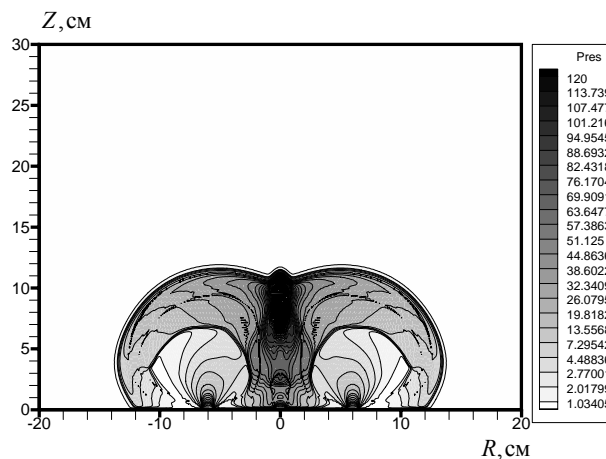


Рис.6. Пространственное распределение давления P [атм] в системе импульсных струй КРИС на момент времени $t = 41.6$ мкс

Из пространственных распределений, приведенных на рис. 5–6 следует, что к моменту $t = 41.6$ мкс плазменный факел системы КРИС составляет единое целое с заметными структурными особенностями. Так, например процесс взаимодействия системы КРИС приводит к образованию вблизи оси системы области

($r \approx 0.5$ см) с повышенным, относительно окружающей среды, давлением (≈ 160 раз) и плотностью (≈ 10 раз). Давление в этой области “запирает” (на данный момент времени) истечение плазменной струи из КРИС, которая расположена на оси системы. В последующие моменты времени в этой зоне формируется узконаправленная струя, которая имеет повышенную, по сравнению с периферийными КРИС, осевую скорость движения факела. Видно также, что на данной стадии развития объединенного плазменного факела тороидальной вихревой структуры пока не наблюдается.

Здесь следует отметить, все отмеченные явления требуют дальнейшего подробного и всестороннего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель системы импульсных плазменных струй, истекающей в затопленное пространство, основанная на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах. Численно исследованы радиационные и газодинамические процессы, возникающей в системе КРИС, которые истекают в затопленное пространство. Произведены расчеты всех основных газодинамических и излучательных параметров системы КРИС.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН и на базовой кафедре МФТИ «Физическая и химическая механика» в рамках проекта РФФИ № 07-01-00133 (разработка пространственной модели движения химически реагирующего газа), в рамках международного Российско-Итальянского проекта РФФИ № 09-08-92422-КЭа (разработка компьютерных радиационно-столкновительных моделей) и программы сотрудничества РАН и CNR, а также в рамках Программы фундаментальных исследований РАН (создание моделей физико-химической кинетики высокотемпературных газовых потоков) и Программы министерства образования и науки Российской Федерации РНПВШ 2.1.1/4693 (создание гибридных радиационно-столкновительных моделей аэрофизики).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

P, ρ, T – давление, плотность и температура;
 M – число Маха;
 q_1, q_2, q_3 – система криволинейных координат;
 g – фундаментальный определитель
 Индексы:
 i – порядковый номер орта системы координат

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаринов М.Н., Камруков А.С., Кожевников И.В., Козлов Н.П., Росляков И.А. Генерация крупномасштабных излучающих вихревых структур при торможении импульсных плазменных струй в воздухе. // ЖТФ, 2008, т.78, вып.5, С.38–46
2. Голубев А.А., Зукакишвили Г.Г., Канцырев А.В., Сасоров П.В., Черкасов А.Е. Плазменная мишень на основе сильноточного разряда в капилляре. // XXVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 19-23 февраля 2001 г

3. Любченко Ф.Н., Феденев А.В., Чумаков А.Н., Босак Н.А., Тарасенко В.Ф., Панченко А.Н. Результаты исследований и перспективы создания лазерно-плазменных микродвигателей // Сборник научных трудов VIII Международ. симп. по радиационной плазмодинамике. - М.: ООО НИЦ “Инженер”. – 2009. – С. 262-265.
4. Кузенов В.В. Отдельные структурные особенности течения импульсного факела капиллярного разряда // Труды XXXIV академических чтений по космонавтике «КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – С. 198–199.
5. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Математическая модель взаимодействия лазерных пучков высокой энергии импульса с плазменной мишенью, находящейся в затравочном магнитном поле// Препринт ИПМех РАН № 942. - М.: ИПМех РАН. – 2010. – 56 с.
6. Surzhikov S.T. Computing System for Solving Radiative Gasdynamic Problems of Entry and Re-Entry Space Vehicles// Proceedings of the 1st International Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry; 8-10 October 2003, Lisbon, Portugal. ESA- 533, December 2003. Pp. 111–118.
7. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. М.:Изд.-во,2004, 543 с.
8. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. М.: Изд-во, 2003, 335 с.
9. Shang, J., Kimmel, R.L., Menart, J., Surzhikov, S.T. Hypersonic Flow Control Using Surface Plasma Actuator. Journal of Propulsion and Power. 2008. Vol.24. No.5. Pp.923-934.
10. Surzhikov, S.T., Howell, J.R. Monte-Carlo simulation of radiation in scattering volumes with line structure. Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1998. Vol.12. No. 2. Pp. 278–281.
11. Surzhikov, S.T. Radiative-convective heat transfer of a spherically shaped space vehicle in carbon dioxide. High Temperature. 2011. Vol.49. No.1. Pp.92–107.
12. Суржиков С.Т. Расчет обтекания модели космического аппарата MSRO с использованием кодов NERAT-2D и NERAT-3D// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-003.pdf>
13. Суржиков С.Т. Трехмерная вычислительная модель аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-002.pdf>
14. Кузенов В.В. Использование регулярных адаптивных сеток для анализа импульсных сверхзвуковых струй плазмы// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-016.pdf>
15. Котов М.А., Кузенов В.В. Создание сложных поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов системы САПР// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-039.pdf>