

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ В ВАКУУМ

С помощью метода “пробных частиц” (МПЧ) решения уравнения Больцмана рассматривается задача внутреннего течения в сопле Лавала с последующим расширением струи в окружающее пространство. Проведен сравнительный анализ результатов расчета газодинамических параметров внутри сопла и прилегающей к нему области с экспериментальными и расчетными данными других авторов. Сделан вывод о перспективности МПЧ и возможности его применения для моделирования не только внешнего обтекания преград, но и внутренних течений струй, свободно вытекающих из вакуумной камеры через сопло.

За допомогою методу “пробних часток” (МПЧ) розв’язку рівняння Больцмана розглядається задача внутрішнього плинину в соплі Лавала з наступним розширенням струменя в навколишній простір. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку газодинамічних параметрів усередині сопла й прилягаючої до нього області з експериментальними і розрахунковими даними інших авторів. Зроблено висновок щодо перспективності МПЧ та можливості його застосування для моделювання не тільки зовнішнього обтікання перешкод, але й внутрішніх плиннів струменів, що вільно витікають із вакуумної камери через сопло.

The problem of an internal flow through the Laval nozzle resulting in the jet expansion in the environment is examined using the method of trial particles (MTP) for solution of the Boltzmann equation. A comparative analysis of the results of calculations of gas dynamical parameters in the nozzle and its adjacent zone is made using the experimental and analytical data of other authors. Conclusions are drawn regarding the prospects of MTP and its use not only for simulation of an external flow of obstacles, but also internal jets free-flowing out of the vacuum chamber through nozzle.

Методы Монте-Карло широко применяются в динамике разреженных газов для расчета силовых нагрузок на тела различной формы и газодинамических параметров в их окрестности. Для малых значений чисел Кнудсена применение этих методов сталкивается с трудностями, связанными с необходимостью использования достаточно больших объемов времени и памяти современных ЭВМ. Указанные трудности являются общими для всех известных методов решения кинетических уравнений. В связи с этим, одной из первоочередных проблем вычислительной динамики разреженного газа является поиск эффективных алгоритмов и методов.

Развиваемый в данной работе метод пробных частиц является одной из разновидностей статистических методов решения уравнения Больцмана в стационарной постановке. С его помощью были решены различные одномерные, двухмерные задачи дозвуковой и сверхзвуковой газовой динамики и наиболее сложные задачи трехмерного обтекания пространственных тел произвольной формы в режимах от свободномолекулярного до близкого к сплошносредному. Результаты этих решений докладывались на Международных школах-семинарах “Модели и методы аэродинамики” и частично опубликованы в монографии [1].

В данной работе с помощью метода пробных частиц (МПЧ) решается задача внутреннего течения в сопле Лавала с последующим расширением струи в окружающее пространство. В качестве объекта моделирования выбрана струя одноатомного газа (гелия), истекающая в вакуум из сопла двигателя малой тяги (ДМТ). Условия расчета соответствовали эксперименту, изложенному в [2]. Параметры на границе входа в ДМТ соответствовали параметрам торможения в вакуумной камере: $T_0 = 286$ К; $P_0 = 461,5$ Па. Полный массовый расход через сопло $\dot{m} = 0,746$ мг/сек. Площадь выходного сечения конического сопла с углом полураствора $\theta = 20^\circ$ в четыре раза превосходила площадь критического сечения. Радиус выходного сечения $r_a = 2,5$ мм. Расчет проводился

© В.П. Басс, Л.Л. Печерица, 2011

Техн. механика. – 2011. – № 4.

в рамках осесимметричной задачи на равномерной прямоугольной сетке. Розыгрыш молекул осуществлялся с границы Γ входа в камеру ДМТ внутрь расчетной области, геометрия которой представлена на рис. 1. Размеры области варьировались: предельные расстояния в осевом направлении составляли 300 мм, а в радиальном – 10 мм. При пересечении частицей жесткой границы a моделировалось диффузное отражение с коэффициентом аккомодации энергии, равным единице. При пересечении границы расчетной области b частица исключалась из рассмотрения. В том случае, если в результате интерференции частица возвращалась в сечение входа в ДМТ, для сохранения расхода через сопло \dot{m} моделировалось зеркальное отражение частицы от границы Γ .

В рассматриваемом МПЧ, являющемся развитием метода Хэвиленда – Власова, размеры ячеек не должны превышать местную длину свободного пробега молекулы. Как показали расчеты МПЧ на мелкой сетке, местная длина свободного пробега внутри камеры ДМТ менялась в пределах $0,04 \text{ мм} \leq \lambda \leq 0,05 \text{ мм}$; в расширяющейся части сопла $0,05 \text{ мм} \leq \lambda \leq 0,2 \text{ мм}$; при $x/r_a = 150 \text{ мм}$ $\lambda \sim 1,7 \text{ мм}$. Использование в проведенных расчетах равномерной прямоугольной сетки разбиения вынуждало корректировать размеры ячеек в зависимости от размеров расчетной области. Для расчетов внутри сопла размеры ячеек брались соизмеримыми с длиной пробега в критическом сечении; на расстояниях от среза сопла $\leq 10 r_a$ – соизмеримыми с длиной пробега на срезе сопла, а в дальнем поле струи – порядка длины свободного пробега в близлежащей к соплу области.

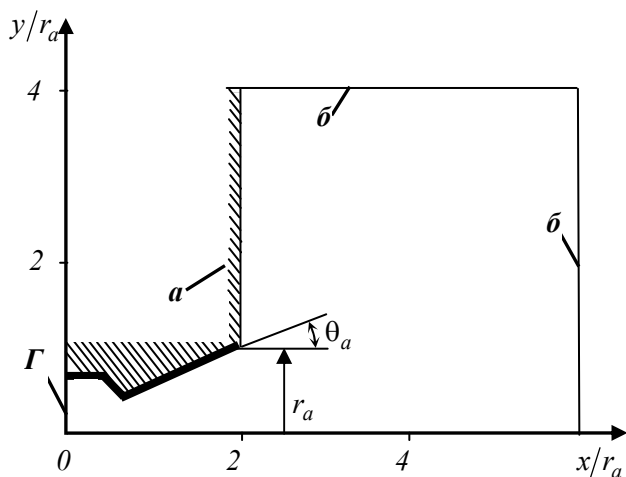


Рис. 1

С помощью МПЧ были определены числа Маха, относительные плотности и потоки массы газа внутри расчетной области. Расчет МПЧ осуществлялся на длинной узкой области, размеры которой составляли 300 мм ($120 r_a$) в осевом и 10 мм ($4 r_a$) в радиальном направлении от входа в камеру ДМТ. Линейный размер расчетной ячейки – 1 мм.

Сходимость результатов достигалась на четвертой итерации при объеме выборки $5 \cdot 10^5$ испытаний. Время счета одной итерации на ПЭВМ типа PENTIUM-IV 2400 MHz (BUS 533 MHz) 1000 MB (SDRAM PC-266) не превышало 75 минут. Полученные значения параметров сравнивались с имеющимися экспериментальными данными и результатами прямого моделирования методом Монте-Карло (ПММК) [2, 3].

Распределения потока массы газа $\langle \rho \cdot V \rangle$ вдоль оси струи показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, расчетные значения $\langle \rho \cdot V \rangle$ МПЧ в осевых точках критического сечения и сечения Γ (обозначенные кружочками) незначительно превышают соответствующие удельные массовые расходы \dot{m} , полученные осреднением по рассматриваемым сечениям (обозначены ромбиками).

ми), что обусловлено неравномерным характером распределения потока газа по сечению струи с максимумом на оси симметрии.

Удовлетворительное соответствие МПЧ результатам аппроксимации массового потока в дальнем поле струи [2, 4] (сплошная линия) наблюдается для $x \geq 1$ см, т. е. на расстояниях $2r_a$ от выходного сечения сопла. Практически полное согласие (с точностью до статистических погрешностей) достигается при $x \geq 8r_a$ от среза сопла. На данных расстояниях расчетные значения массового потока на оси струи хорошо согласуются также с экспериментальными данными [2], обозначенными на рис. 2 треугольниками.

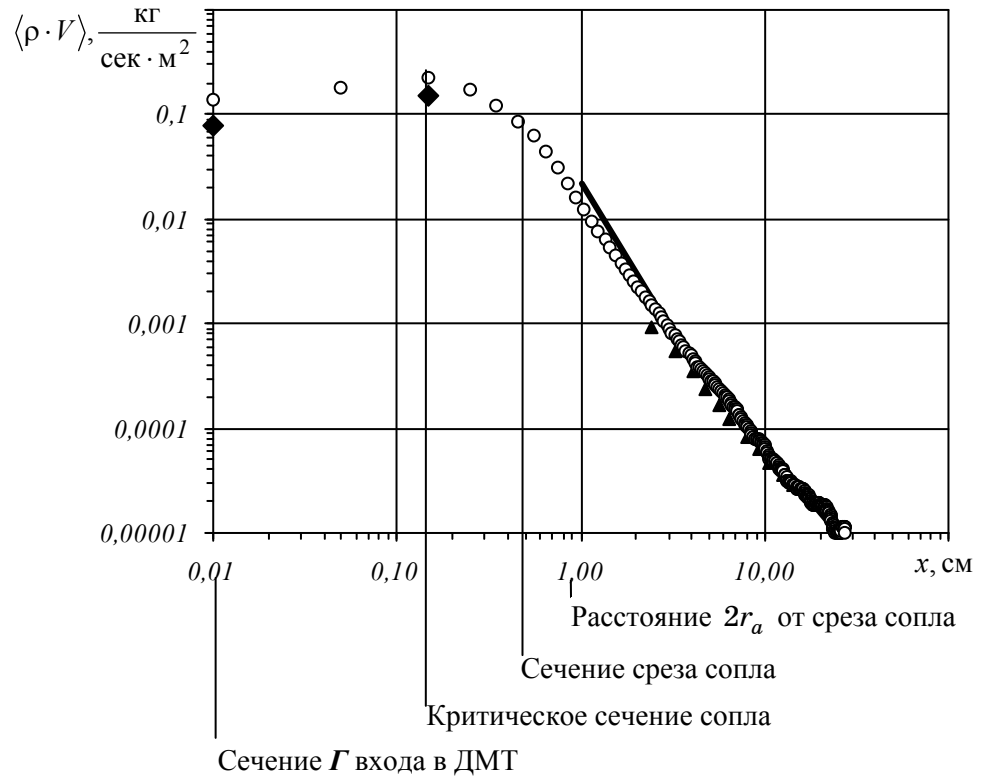


Рис. 2

Изолинии распределения чисел Маха внутри сопла и прилегающей к нему области приведены на рисунке 3. Нижняя полуплоскость изолиний получена с помощью МПЧ, верхняя – с помощью ПММК, дающим решение поставленной задачи нестационарным методом Берда. Пунктиром обозначены данные работы [2], сплошной линией – результаты [3].

Размеры расчетной области, приведенной на рисунке 3, составляли 6,6 мм ($2,64r_a$) и 3,5 мм ($1,4r_a$). Общее число расчетных ячеек – $5 \cdot 10^3$ при линейном размере ячейки $\sim 0,07$ мм. Для качественного построения изолиний было достаточно $5 \cdot 10^5$ испытаний. Время счета одной итерации составило ~ 3 часа, что обусловлено большим количеством блужданий частиц внутри камеры ДМТ на мелкой расчетной сетке.

Сравнение изолиний чисел Маха, полученных с помощью МПЧ и ПММК внутри сопла, показывает, что наилучшее согласие результатов наблюдается с данными работы [3]. В [3] расчетная область разбивалась на 5 подобластей с

неравномерной расчетной сеткой из 525 ячеек. Используемая в МПЧ прямоугольная сетка имела достаточно мелкое разбиение (5000 ячеек), что дало возможность получить результаты, близкие к [3].

Полученные результаты внутри сопла и на оси струи позволили существ-

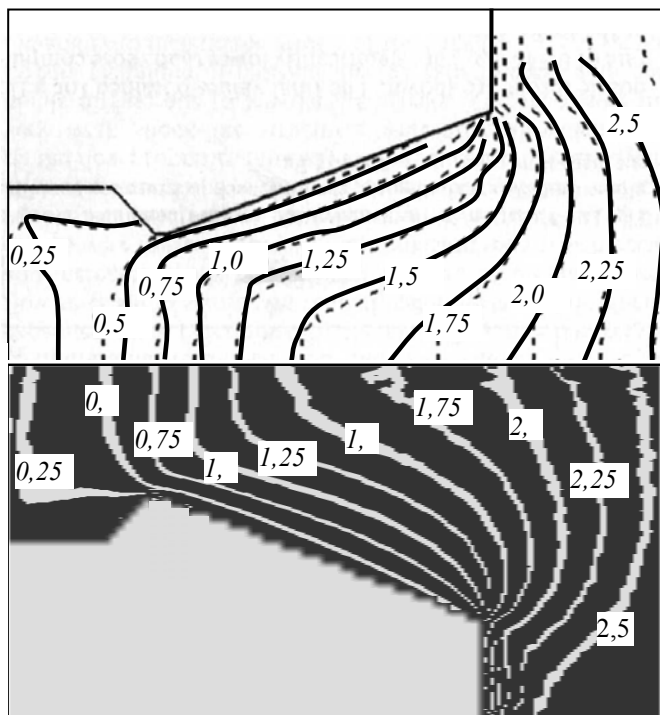


Рис. 3

венно увеличить размеры расчетной области вдоль линии среза сопла. На рисунках 4 и 5 приведено сравнение изолиний чисел Маха M и относительной плотности ρ/ρ_0 МПЧ (нижняя полуплоскость) с соответствующими результатами ПММК [3] (верхняя полуплоскость). Изолинии строились в области с максимальными размерами 150 мм ($60 r_a$) и 100 мм ($40 r_a$). Шаг расчетной сетки по соответствующим осям составлял 0,15 мм и 0,2 мм. Время счета одной итерации не превышало 130 минут для $5 \cdot 10^5$ испытаний.

Сравнение результатов, полученных рассматриваемыми методами, показывает их хорошее соответствие. Небольшие отличия изолиний $M = 1,75$ МПЧ от соответствующих изолиний внутри сопла на рисунке 3 обусловлены различиями в размерах расчетных ячеек. Изолинии плотности на удалении от оси сопла для МПЧ и ПММК полностью идентичны. Незначительные расхождения изолиний в приосевой зоне объясняются отличиями при выборе расчетной сетки, размеров ячеек и самих алгоритмов рассматриваемых методов.

Проведенный анализ полученных с помощью МПЧ распределений газодинамических параметров внутри сопла и в его окрестности позволяет сделать вывод о применимости данного метода для подготовки и решения более широкого класса задач типа программы ЭПАС [5], где моделировались течения в струях управляющих двигателей корабля “Аполлон” и их взаимодействия с элементами конструкции корабля “Союз” при стыковке этих кораблей.

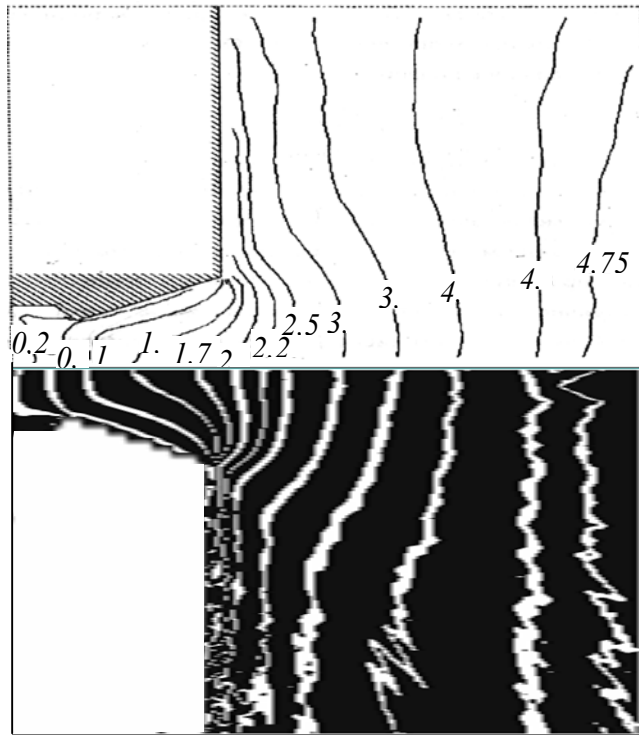


Рис. 4

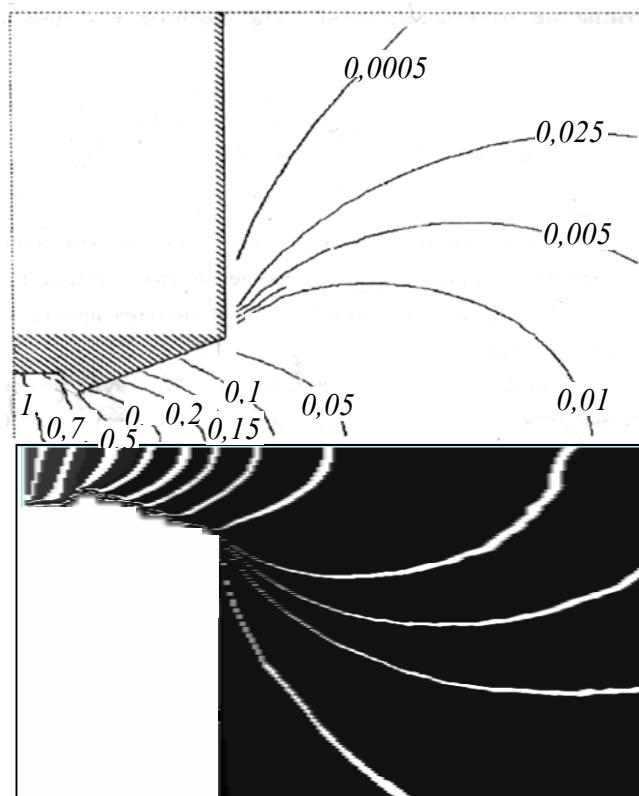


Рис. 5

1. *Басс В. П.* Молекулярная газовая динамика и ее приложения в ракетно-космической технике / *В. П. Басс.* – Киев : Наук. думка, 2008. – 272 с.
2. *Boyd I. D.* Particle simulations of helium microthruster flows / *I. D. Boyd, Y. R. Jafray, J. V. Dukel* // *J. of Spacecraft and Rockets.* – 1994. – V. 31, №2. – P. 271 – 277.
3. *Гришин И. А.* Параллелизация по данным прямого моделирования Монте-Карло в молекулярной газовой динамике / *И. А. Гришин, В. В. Захаров, Г. А. Лукьянов.* – С.-Петербург, 1998. – 32 с. (Препринт / Министерство науки и технологий Российской Федерации ; Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных ; 03-98).
4. *Jafray Y. R.* Aeronomy CoExperiments on DragFree Satellites with Proportional Thrusters : GP-B and STEP / *Y. R. Jafray* // Ph. D. : Dept. of Aeronautics and Astronautics : Thesis. – Stanford : Stanford University, 1992.
5. *Антохин В. М.* Исследование на модели обтекания космического корабля «Союз» реактивными струями управляющих двигателей корабля «Аполлон» / *В. М. Антохин, Ю. П. Балашов, Ю. И. Герасимов* и др. // *Изв. РАН. МЖГ.* – 1997. – № 3. – P. 124 – 133.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
г. Днепропетровск

Получено 11.09.10,
в окончательном варианте 15.10.10