

РГБ ОД

18 ДЕК 2001

На правах рукописи

Захаров Владимир Валентинович

ПРЯМОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОНТЕ-КАРЛО ИСТЕЧЕНИЯ СТРУЙ
ИЗ СВЕРХЗВУКОВЫХ СОПЕЛ В ВАКУУМ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ
РЕЙНОЛЬДСА И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ
ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2000

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете (ВОЕНМЕХ) им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург).

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Лукьянов Г.А.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Смирнов Е.М.

кандидат физико-математических наук, с.н.с. Шмидт А.А.

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2000 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 063.38.15 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29, корп. 1, кафедра гидроаэродинамики.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2000 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук, доцент

Зайцев Д.К.

В 253.333.80,03

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Диссертация посвящена исследованию методом прямого моделирования Монте-Карло (ПММК) газодинамики истечения газа из сверхзвуковых сопел в вакуум при характерных числах Рейнольдса (Re) от 1 до 10^4 и взаимодействия истекающих струй с прилежащими к соплу поверхностями.

Актуальность проведенных исследований связана с проблемой оценки силового, теплового и иного воздействия струй бортовых ракетных двигателей космических летательных аппаратов (КЛА) на элементы конструкции КЛА и их бортовую аппаратуру. В диссертации рассматривается определенный раздел данной проблемы: газовые струи, истекающие в вакуум из сопел малых размеров, что соответствует условиям функционирования сопел газовых микроракетных двигателей (МРД). Актуальность исследования данного класса струйных течений в последнее время существенно возрастает в связи с расширением применения КЛА с малыми и очень малыми массами, использующими газовые МРД. Вместе с тем, значение темы диссертации не ограничивается указанной прикладной областью. Можно указать целый ряд других важных приложений: струйные вакуумные технологии, газодинамические лазеры, формирование мишеней для молекулярных пучков и т.д.

В рассматриваемых задачах важную роль играют эффекты разреженности и неравновесности течения. Течения данного типа не могут быть полностью описаны с помощью традиционных газодинамических подходов (уравнений Эйлера или Навье-Стокса). Экспериментальное исследование подобных течений затруднительно. В настоящее время общепризнанным методом решения задач подобного типа является метод ПММК. Трудоемкость расчетов течений методом ПММК обуславливает актуальность разработки высокоэффективных алгоритмов расчета для многопроцессорных вычислительных систем (МВС).

Основные цели настоящей работы:

1. Разработка алгоритма и программы ПММК истечения разреженного газа в вакуум из сверхзвуковых сопел и взаимодействия струй с прилежащими поверхностями. Разработка алгоритма параллелизации ПММК для МВС.
2. Проведение численных исследований течения в ближнем поле и периферийной области струй одноатомного и двухатомного газа, истекающих из сверхзвуковых сопел в вакуум, в диапазоне характерных чисел $Re=1\div 10^4$. Получение полной и систематической количественной информации о газодинамических параметрах течения, выявление

основных закономерностей течения в соплах, ближнем поле и периферийной области струй, обобщение полученных результатов.

3. Проведение численных исследований взаимодействия струй одноатомного и двухатомного газа, истекающих из сверхзвукового сопла в вакуум, с прилегающей плоской поверхностью параллельной оси струи в диапазоне характерных чисел $Re_* = 70 \div 1500$. Исследование влияния Re_* на газодинамические параметры течения у преграды, силовое и тепловое воздействие на преграду.

4. Проведение предварительных численных исследований эффективности защиты поверхностей КЛА от воздействия струй МРД с помощью цилиндрических сопловых защитных экранов (СЗЭ). Получение количественной информации о газодинамических параметрах течения в МРД с СЗЭ, влияния СЗЭ на тяговые характеристики МРД, эффективности защиты поверхностей от струйного воздействия для геометрии и условий истечения газового МРД с тягой менее 0.1 Н.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан и реализован эффективный алгоритм параллелизации ПММК по данным для МВС с общей памятью;
2. Впервые выполнено исследование методом ПММК задачи о истечении одноатомного газа в вакуум из звукового источника в диапазоне чисел Kn от ∞ до 10^{-4} ;
3. Впервые методом ПММК проведено систематическое исследование истечения одноатомного и двухатомного газов в вакуум из сверхзвуковых сопел в диапазоне чисел $Re_* = 1 \div 10^4$, характерных для условий функционирования сопел МРД КЛА;
4. Впервые методом ПММК проведено исследование взаимодействия струй одноатомного и двухатомного газа, истекающих из сверхзвукового сопла в вакуум, с плоской поверхностью параллельной оси струй при числах $Re_* = 70 \div 1500$ и малых расстояниях от поверхности до сопла;
5. Впервые проведено численное исследование эффективности экранирования поверхностей КЛА с помощью СЗЭ от струйного воздействия газовых МРД.

Достоверность полученных результатов подтверждается внутренними тестами, сравнениями с результатами других авторов и имеющимися экспериментальными данными.

Практическая ценность. Практическая значимость диссертационной работы связана с тем, что результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании КЛА, использующих микроракетные двигатели, для оценки воздействия струй

МРД на элементы конструкции КЛА и их аппаратуру. Результаты исследования истечения из МРД и взаимодействия сверхзвуковой струи, истекающей в вакуум, с плоской преградой параллельной оси струи, включены в научно-технические отчеты (1997, 1998, 1999 г.) по программе “Проблемы МСС-2”, входящей в Федеральную космическую программу, в рамках НИР “Разработка системы параметрического анализа газодинамических нагрузок КЛА от струй РД на начальных этапах проектирования”.

Результаты исследования эффективности защиты элементов КЛА от струйного воздействия с помощью СЗЭ включены в отчеты (1997, 1998 г.) по гранту по фундаментальным исследованиям в области авиационной и ракетно-космической технике “Исследование эффективности защиты поверхностей КЛА от воздействия струй бортовых РД с помощью сопловых экранов” (рук. Лукьянов Г.А.).

Разработанный алгоритм параллелизации по данным может быть использован для высокоэффективного расчета течений разреженного газа на МВС с общей памятью. Алгоритм параллелизации ПММК по данным был использован при выполнении работ по гранту РФФИ (1999 г.) по направлению “Программное обеспечение современных высокопроизводительных вычислительных систем” — “Разработка алгоритмов двухуровневой параллелизации прямого моделирования Монте-Карло для решения нестационарных задач молекулярной газовой динамики” (рук. Лукьянов Г.А.).

На защиту выносятся следующие разработки и результаты:

1. Параллельный алгоритм ПММК для МВС с общей памятью.
2. Результаты численного моделирования, анализа и теоретического обобщения для задачи о истечении одноатомного газа из стационарного звукового источника в вакуум в диапазоне чисел $Kn = \infty \div 10^{-4}$.
3. Результаты численного моделирования, анализа и обобщения для задачи о истечении одноатомного и двухатомного газов в вакуум из сверхзвуковых сопел в диапазоне чисел $Re_* = 1 \div 10^4$.
4. Результаты численного моделирования и анализа для задачи о взаимодействии струй одноатомного и двухатомного газов, истекающих в вакуум из сверхзвуковых сопел в диапазоне чисел $Re_* = 70 \div 1500$, с прилегающей плоской поверхностью параллельной оси струи.
5. Результаты поискового исследования эффективности защиты поверхностей КЛА от воздействия струй газовых МРД с помощью цилиндрических СЗЭ для типичного газового МРД с тягой менее 0.1 Н.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- XVII Всероссийском семинаре по течениям газа и плазмы в соплах, струях и следах, Санкт Петербург, Россия, 18-20 июня 1997 года;
 - XVIII Всероссийском семинаре по течениям газа и плазмы в соплах, струях и следах, Санкт Петербург, Россия, 21-23 июня 2000 года,
 - II международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях, Санкт-Петербург, Россия, 22-26 июня 1998 года,
 - III международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях, Истра-Москва, Россия, 3-7 июля 2000 года,
 - 7th International Conference, HPCN Europe 2000 Amsterdam The Netherlands, April 1999,
 - 8th International Conference, HPCN Europe 2000 Amsterdam The Netherlands, May 2000,
 - X юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Переславль-Залесский, Россия, 7-12 июня 1999 года,
 - Объединенном семинаре по высокопроизводительным вычислениям (СПбГУ и ИВВиБД) 14 марта 2000 года,
- а также на семинарах БГТУ и ИВВиБД.

Публикации. По теме диссертации опубликовано восемнадцать печатных работ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 95 наименований. Полный объем диссертации – 147 стр.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность вопросов, рассматриваемых в диссертации, представлено современное состояние исследований истечения газа из сопел микро ракетных двигателей и взаимодействия струй с поверхностями КЛА. Сформулированы цели диссертации, перечислены основные положения выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке модификации численного алгоритма метода ПММК, используемой для проведения расчетов и разработке параллельного алгоритма для МВС с общей памятью.

Представлена краткая характеристика метода ПММК. Сформулированы требования метода к вычислительным ресурсам компьютера — памяти и производительности для рассматриваемого класса задач. Описаны основные процедуры и модели метода ПММК используемые в работе: NTC схема, потенциал межмолекулярного взаимодействия VHS, модель Ларсена-Боргнакке поступательно-

вращательного обмена энергией, модель Максвелла взаимодействия газа с поверхностью тела и др.

Описаны модификации численного метода ПММК:

- 1) Многозонная косоугольная неравномерная сетка. Адаптация сетки к градиентам течения производится с помощью коэффициентов сжатия-растяжения. Аналитическое описание сетки позволяет реализовать эффективный алгоритм индексации частиц.
- 2) Процедура проверки частиц на столкновение с границей. Расчетная область разбивается равномерной сеткой, размер ячеек которой больше максимального пробега частицы на временном шаге. Каждая ячейка содержит индекс списка, определяющего с какими границами частица из данной ячейки может столкнуться, находящегося в общем массиве. Данная процедура позволяет значительно уменьшить число частиц проверяемых на столкновение с границей и число проверяемых границ.
- 3) Интерфейс между подобластями. Расчетная область разделяется на подобласти, которые рассчитываются последовательно. Параметры потока на выходной границе одной подобласти являются входными данными для следующей подобласти. Оптимальные значения шага по времени и представительности вычислительных частиц используются в каждой подобласти.

Представлена классификация существующих параллельных алгоритмов ПММК для МВС. Описаны алгоритм параллелизации ПММК по данным (ППД) для МВС с общей памятью, схемы статической и динамической балансировки загрузки процессоров. Алгоритм ППД основан на использовании общей памяти для параллельной работы процессоров без явной передачи данных. Моделирование на временном шаге проходит в два этапа. На первом этапе проводится генерация частиц на границах области, передвижение частиц в пространстве и обработка столкновений с границами, индексация частиц по ячейкам расчетной сетки. На этом этапе каждый процессор работает с заданными ему частицами. На втором этапе проводятся столкновения в ячейках, выборка параметров. На этом этапе каждый процессор работает с заданными ему ячейками (и находящимися в них частицами). После завершения каждого этапа проводится синхронизация. Для обеспечения равной загрузки процессоров разработаны статическая и динамическая балансировка загрузки процессоров (БЗП). При статической БЗП ячейки между процессорами распределяются поровну вероятностным образом, что при достаточно большом числе ячеек позволяет обеспечить равномерную загрузку процессоров в течение всего расчета. Динамическая БЗП проводит балансировку загрузки процессоров во время расчета.

Алгоритм ППД является существенно более простым для реализации, чем традиционные алгоритмы параллелизации, основанные на декомпозиции расчетной области.

Исследование эффективности разработанного параллельного алгоритма проведено на МВС SPP-1600 (8 процессоров, общая память 4 Гб). При статической БЗП алгоритм показал эффективность более 80% при числе процессоров от 1 до 8, при динамической БЗП алгоритм показал эффективность более 90%.

Вторая глава посвящена исследованию истечения одноатомного газа в вакуум из стационарного звукового источника.

Для исследования основных закономерностей расширения газа в вакуум предложена простейшая газодинамическая модель звукового источника (плоского и осесимметричного), задаваемая соответствующими параметрами газа в его выходном сечении. Эта модель для выбранного газа имеет единственный определяющий параметр — характерное число $Kn = \lambda/r$, где λ — длина свободного пробега на поверхности источника, r — полувысота или радиус источника.

Моделировалось истечение одноатомного газа (гелия). На поверхности источника задавалась стационарная и постоянная по координате y максвелловская функция распределения по скоростям $\bar{f}(u, v, w)$ для частиц, вылетающих из источника ($u > 0$):

$$f_e = \frac{n_e}{(2\pi RT_e)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(u - u_e)^2 + v^2 + w^2}{2RT_e}\right]. \quad (1)$$

Здесь n_e , T_e и u_e — равновесные значения концентрации, температуры и среднemasсовой скорости газа на поверхности источника; R — газовая постоянная. Число Маха $M_e = u_e/a_e = 1$, скорость звука $a_e = \sqrt{\gamma RT_e}$. Частицы, падающие на поверхность источника, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

В начальный момент времени давление в расчетной области равно нулю. В качестве граничных условий на внешней поверхности расчетной области использовано условие «конденсирующей стенки».

Исследование выполнено для плоского и осесимметричного истечения в диапазоне чисел $Kn = 10^{-4} \div \infty$. Для сравнения в качестве предельного случая $Kn \rightarrow 0$ приведено решение для идеального совершенного газа ($\gamma = 1.67$).

Моделирование показало, что картина истечения реального одноатомного газа в вакуум существенным образом зависит от характерного числа Kn и принципиально отличается от картины истечения

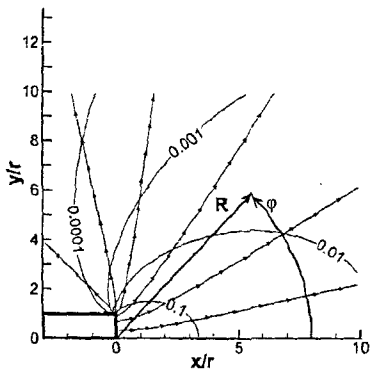


Рис.1 Поле относительной плотности и линии тока ($Kn=0.1$).

для модели идеального совершенного газа. При любом конечном числе Kn газ заполняет все пространство за срезом источника (рис.1). При числе $Kn \approx 0.1$ отношение потока в левое полупространство ($x < 0, y/r \geq 1$) к потоку из источника достигает максимума и составляет примерно 0.0065.

Изменение числа Kn качественно по-разному влияет на поле плотности в приосевой и периферийной областях течения (рис.2.а). В периферийной области течения имеет место немонотонная

зависимость относительной плотности от числа Kn (при $Kn \approx 0.1$ относительная плотность в периферийной области максимальна).

При $Kn \rightarrow 0$ (континуальное расширение идеального газа) скорость и число M с увеличением φ монотонно растут, температура падает, а температура торможения остается постоянной. При истечении в вакуум реального газа и конечных значениях чисел Kn вид угловых распределений параметров газа имеет качественно иной вид (рис.2.б). На основании анализа результатов расчетов можно выделить два характерных режима истечения газа в вакуум. Первый режим наблюдается при достаточно малых числах Kn ($Kn < 10^{-2}$). Для этого режима характерно наличие за срезом источника некоторой приосевой квазиконтинуальной области течения, в пределах которой сохраняется качественный вид угловых распределений характерный для случая $Kn \rightarrow 0$. За пределами этой

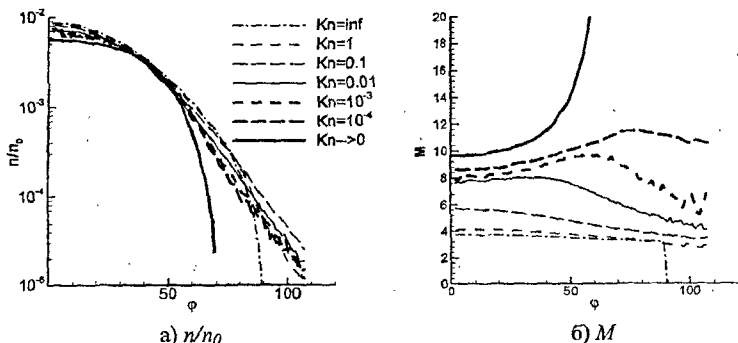


Рис.2 Угловые распределения параметров на сфере с $R=10r$.

области происходит качественное изменение вида угловых зависимостей. После достижения максимума при некотором значении φ далее наблюдается монотонное уменьшение V , M и T . Второй режим соответствует числам $Kn > 0.1$. Для этого режима характерны отсутствие за срезом источника квазиконтинуальной области и иной вид угловых распределений параметров качественно аналогичный случаю $Kn = \infty$. Значения V , M , T и T_{00} монотонно уменьшаются с увеличением φ от оси симметрии. В диапазоне чисел Kn $0.01 \div 0.1$ наблюдается переход от первого режима ко второму.

Третья глава посвящена исследованию истечения из сверхзвуковых сопел в вакуум. Рассматривалось истечение одноатомного (гелия) и двухатомного (азота) газов. Исследован диапазон чисел Re_* от 1 до 10^4 . Диапазон рассмотренных параметров соответствует параметрам типичных газовых МРД с тягой до 0.5 Н. Основное внимание уделено моделированию течения в периферийной области.

Моделировалось стационарное осесимметричное истечение газа из сверхзвуковых сопел конической геометрии и различных степенях расширения в вакуум. На входе в камеру сопла для частиц с $u > 0$ моделировалась функция $f_e(1)$ распределения по скоростям $\vec{V}(u, v, w)$. В этой функции n_e , T_e и u_e — концентрация, температура и среднемассовая скорость газа на входе в камеру. В качестве граничных условий на поверхностях сопла использовалась модель диффузного отражения с полной аккомодацией энергии. Частицы, пересекающие входную границу с $u \leq 0$, и частицы, пересекающие внешние границы области моделирования за срезом сопла, исключались из процедуры моделирования. При моделировании истечения азота на входе в камеру сопла для влетающих в область частиц внутренняя энергия e_r определялась из функции распределения:

$$f_{e_r} = \exp\left(-\frac{e_r}{k \cdot T_e}\right). \quad (2)$$

Здесь k — постоянная Больцмана. Предполагалось, что в рассмотренном диапазоне температур у азота возбуждены только вращательные степени свободы.

Исследования показали, что в рассмотренном диапазоне параметров картина течения в струе существенным образом зависит от числа Re_* . Качественно влияние числа Re_* на угловые распределения газодинамических параметров аналогично тому, что наблюдалось в случае истечения гелия из звукового источника (рис.3). В отличие от случая истечения из звукового источника в присоединенной и периферийной (углы

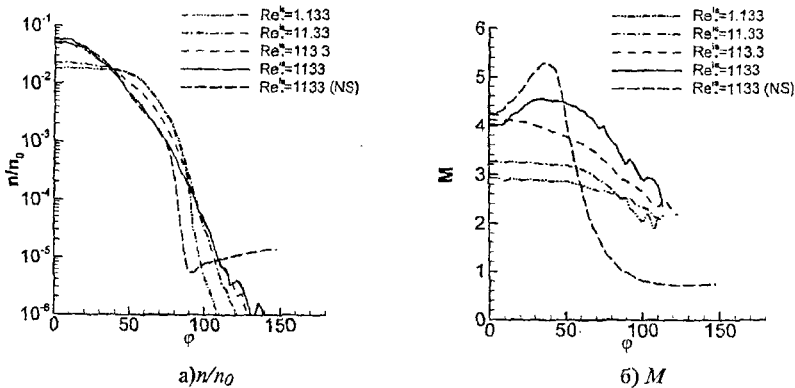


Рис.3 Угловые распределения параметров на сфере с $R=2r_d$.

разворота больше 100°) областях увеличение числа Re_* сопровождается монотонным ростом относительной плотности.

Как и в случае истечений из звукового источника угловые распределения параметров газа принципиально отличаются от угловых распределений для идеального совершенного газа. С увеличением угла разворота в периферийной зоне наблюдается уменьшение V/V_{max} и числа M . Результаты расчетов показывают также, что имеют место два характерных режима истечения. Первый режим соответствует числам $Re_* \geq 10^3$. Для этого режима характерно наличие за срезом сопла некоторой приосевой квазиконтинуальной области течения, в пределах которой сохраняется качественный вид угловых распределений характерный для истечения идеального совершенного газа. За пределами этой области происходит качественное изменение вида угловых зависимостей. После достижения максимума при некотором значении угла разворота далее наблюдается монотонное уменьшение V , M и T . Второй режим соответствует числам $Re_* < 10^3$. Для этого режима характерно отсутствие за срезом источника квазиконтинуальной области и иной вид угловых распределений. Значения V , M и T монотонно уменьшаются с увеличением угла разворота газа. В диапазоне чисел $Re_* = 10^2 + 10^3$ наблюдается переход от первого режима ко второму.

Моделирование истечения азота показало, что общая картина течения по соплу и за срезом сопла в целом аналогична картине течения для гелия. При $Re_* > 100$ течение в соплах близко к равновесному, вращательная T_{rot} и поступательная T_t температуры близки. С уменьшением чисел Re_* (при $Re_* < 100$) степень поступательно-вращательной неравновесности быстро увеличивается.

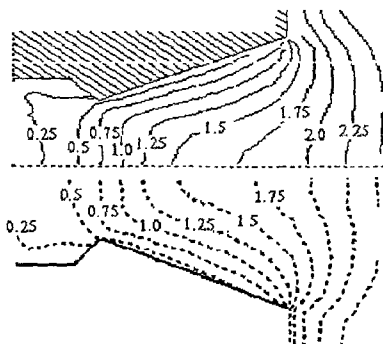


Рис.4 Поле чисел M . Верх рисунка расчет настоящей работы, низ — расчет Boyd I.D. и др. 1994.

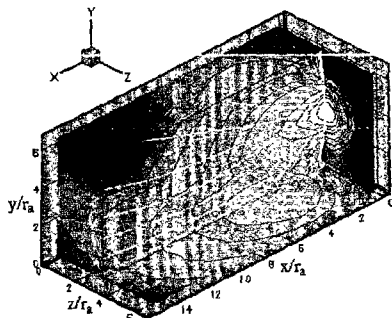


Рис.5 Поле относительной плотности и линии тока в плоскости растекания (N_2 , $Re_*^{*2}=805$, $h/r_a=3.18$, $T_{wp}/T_0=0.46$).

За срезом сопла течение во всех случаях имеет (или приобретает) неравновесный характер. Сравнение полей T_{tr} и T_{rot} показывает, что их вид качественно различен. Степень неравновесности (разность между T_{rot} и T_{tr}) быстро возрастает с удалением от среза сопла и увеличением угла разворота газа. Струйный поток при больших углах разворота характеризуется очень большой степенью неравновесности. В частности обратный поток образуется молекулами практически сохранившими их вращательную энергию на срезе сопла.

Сопоставление результатов ПММК с результатами экспериментов и расчетами других авторов (тем же методом) показало хорошее согласие результатов (рис.4). Сопоставление результатов ПММК с результатами решения полной системы уравнений Навье-Стокса показало, что в диапазоне рассмотренных чисел Re_* невозможно корректное использования континуальных подходов для моделирования течения в периферийной области.

В четвертой главе рассматривается взаимодействие струй одноатомного и двухатомного газов, истекающих в вакуум из сверхзвуковых сопел конической геометрии, с плоской поверхностью параллельной оси струи. Исследование выполнено для трех конических сопел при $M_a=2\div 5.3$ в диапазоне чисел $Re_* = 70\div 1500$, для вариантов горячего ($T_0=700\div 1500$ К) и холодного ($T_0=300$ К) газов, для холодной преграды ($T_{wp}=300$ К) и возвышения сопла над преградой $h/r_a=3.2\div 5$. Большинство расчетов проведено для размеров расчетной области $15\times 7\times 7\cdot r_a$ (рис.5).

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе проводилось моделирование течения в сопле (осесимметричная

постановка). На втором этапе проводилось моделирование взаимодействия струи с преградой (трехмерная постановка). Входными данными для второго этапа являлись значения параметров газа на срезе сопла, полученные на первом этапе. В качестве граничных условий на поверхности преграды использовалась модель диффузного отражения с полной аккомодацией энергии.

Выполнен расчет полей газодинамических параметров (n , v , T , M) и параметров на преграде (давления p , трения τ , продольной τ_x и поперечной τ_z компоненты трения, теплового потока q).

Моделирование показало, что давление p , трение τ , τ_x и тепловой поток q имеют явно выраженный максимум в плоскости симметрии на некотором расстоянии от среза сопла. Поперечное трение τ_z имеет два максимума симметричных относительно линии растекания.

Анализ результатов расчетов показывает, что структура течения около преграды существенно зависит от числа Re_* . Изменение чисел Re_* в исследованном диапазоне существенно влияет на поля трения и теплового потока, но относительно слабо влияет на поле давления на преграде. Уменьшение чисел Re_* приводит к уменьшению максимума давления и сдвигу его положения ближе к соплу. С уменьшением чисел Re_* относительная роль сил трения и величина относительных локальных и интегральных тепловых потоков возрастает.

Анализ выполненных расчетов позволяет сделать следующие выводы. Максимум трения τ сдвигнут относительно максимума p вниз по течению. В точке максимума давления давление существенно больше трения, с удалением от точки максимума давления отношение p/τ монотонно возрастает. Точка растекания в плоскости симметрии лежит ближе к соплу, чем точка максимума давления p . Положение максимума теплового потока примерно совпадает с положением максимума давления.

Проведено сопоставление результатов полученных из ПММК с данными экспериментальных исследований и результатами расчетов, выполненных другими методами. Сопоставление показало удовлетворительное согласие.

В пятой главе излагаются результаты исследования методом ПММК эффективности защиты поверхностей КЛА от струйного воздействия газовых МРД с помощью СЗЭ цилиндрической формы. Идея использования СЗЭ для защиты поверхностей КЛА от струйных потоков газов от бортовых МРД предложена Лукьяновым Г.А.

Исследование выполнено для гелиевого МРД с $S_2/S_* = 4.0$, $\theta_a = 20^\circ$, $Re_*^{из} = 1100$ и трех вариантов экранов: экран - 1 ($l_s = 0.5 d_a$, $d_s = 2.0 d_a$), экран - 2 ($l_s = 1.0 d_a$, $d_s = 2.0 d_a$), экран - 3 ($l_s = 0.5 d_a$, $d_s = 3.0 d_a$). Для характеристики

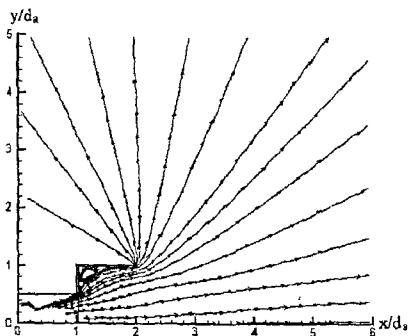


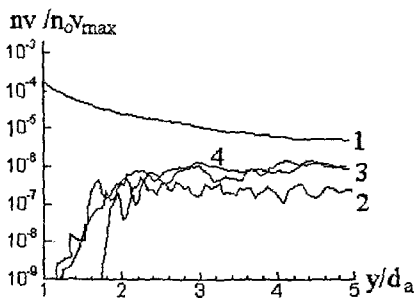
Рис.6 Влияние экрана на картину течения (линии тока). Экран – 2.

экранирования введен параметр характеризующий эффективность экранирования $S_q = q/q_0$, где q и q_0 - значения параметров течения при наличии и отсутствии экрана.

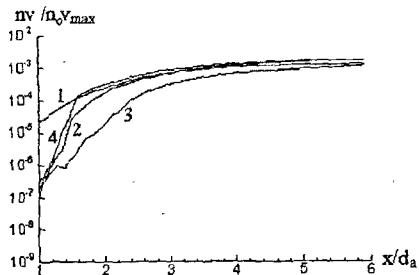
Моделирование показало, что установка экрана слабо влияет на течение в приосевой области и существенно изменяет течение в периферийной области струи. Влияние экрана на характер течения увеличивается с увеличением угла разворота газа и сводится к

уменьшению в периферийной области не только плотности, но и скорости газа, и, следовательно, суммарного потока частиц.

Увеличение длины экрана приводит к более интенсивному развороту газа на кромке экрана. Увеличение диаметра экрана, напротив уменьшает интенсивность разворота. Это существенным образом определяет спектр линий тока обратного потока (рис.6).



а) Поток в плоскости среза сопла $x/d_a=1$



б) Поток на линии $y=2 d_a$

Рис.7 Распределение параметров. 1 – сопло без экрана; 2 – экран-1; 3 – экран-2; 4 – экран-3.

Установка экрана приводит к снижению за экраном плотности, скорости, потоков массы и импульса. В плоскости среза сопла установка экрана приводит к существенному уменьшению относительного потока $n v / n_0 v_{max}$ при всех значениях y (см. рис. 7.а). Экранирующий эффект S_{nv} в данной области равен приблизительно $8 \div 10$ при $y/d_a = 3 \div 5$ (экраны 2 и 3) и 50 для экрана 1. Малым значениям y соответствуют существенно большие значения S_{nv} . При $y/d_a < 2$ экранирующий эффект по потоку превышает два

порядка. Экранирование вдоль линии $y=const$ начинается при достаточно больших углах разворота газа, превышающих $45^\circ \div 60^\circ$ для разных экранов (см. рис.7.6). Увеличение длины экрана приводит к увеличению зоны экранирования.

Эффективность различных экранов различна для разных областей экранирования. Поэтому выбор геометрии экрана определяется конкретной постановкой задачи экранирования (положением в пространстве и ориентацией защищаемой поверхности).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы. К основным результатам настоящей работы относятся:

1. Разработана программа моделирования двумерных и трехмерных стационарных течений разреженного газа. Разработанные модификации численного алгоритма метода ПММК позволили существенно снизить требования к вычислительным ресурсам.

2. Разработан эффективный параллельный алгоритм параллелизации по данным для МВС с общей памятью. Разработаны статическая и динамическая балансировки загрузки процессоров. Исследована эффективность разработанного параллельного алгоритма. При использовании динамической БЗП эффективность алгоритма более 90% на 8 процессорах.

3. Проведено ПММК истечения одноатомного газа в вакуум из стационарного звукового источника в диапазоне чисел $Kn=10^{-4} \div \infty$.

Исследования показали, что картина истечения реального одноатомного газа в вакуум существенным образом зависит от характерного числа Kn . Имеется два характерных режима истечения газа в вакуум с различной газодинамической структурой. Первый режим реализуется при $Kn < 10^{-2}$. Второй режим реализуется при $Kn > 0.1$. В диапазоне чисел Kn $0.01 \div 0.1$ наблюдается переход от первого режима ко второму. Изменение числа Kn качественно по-разному влияет на поле плотности в приосевой и периферийной областях течения. В периферийной области течения имеет место немонотонная зависимость относительной плотности от числа Kn .

4. Методом ПММК проведено систематическое исследование течения в соплах, ближнем поле и периферийной области струй одноатомного и двухатомного газов, истекающих из сверхзвуковых конических сопел в вакуум при числах $Re=1 \div 10^4$.

Исследования показали, что картина истечения реального газа в вакуум из сверхзвуковых сопел существенным образом зависит от значения характерного числа Re . Как и в случае истечения газа из звукового источника наблюдаются два режима истечения с различной

газодинамической структурой. Первый режим охватывает диапазон чисел $Re \geq 10^3$. Второй режим реализуется при $Re \leq 10^3$. В диапазоне чисел $Re = 10^2 \div 10^3$ происходит переход от первого режима ко второму. Течение в периферийной области струй азота характеризуется очень высокой степенью неравновесности и высокими значениями вращательной температуры.

Сопоставление результатов моделирования методом ПММК с результатами экспериментальных и теоретических исследований (выполненных тем же методом) подтверждают достоверность полученных результатов. Сопоставление с результатами решения полной системы уравнений Навье-Стокса показывает, что в диапазоне рассмотренных чисел Re невозможно корректное использование континуальных подходов для решения задач о течении в периферийной области.

5. Методом ПММК выполнены численные исследования силового и теплового воздействия струй, истекающих из сверхзвуковых сопел в вакуум, на шлюскую преграду параллельную оси струи.

Исследования показали, что изменение чисел Re в исследованном диапазоне существенно влияет поля трения и тепловых потоков, но относительно слабо на поля давления на преграде.

Результаты ПММК и их сопоставление с данными экспериментов и другими расчетами показали, что разработанные алгоритм и программа обеспечивают эффективное моделирование данного пространственного течения и позволяют получить все газодинамические параметры в поле течения и на поверхности преграды.

6. Проведено поисковое исследование эффективности экранирования поверхностей КЛА от воздействия струй гелиевого МРД ($Re = 1100$) с помощью сопловых защитных экранов цилиндрической формы. Исследование показало высокую эффективность экранирования области за экраном. Эффективность экранирования по потокам газа для больших углов разворота, превышающих 110° , достигает величин порядка 100 и более.

Список основных работ по теме диссертации:

1. Гришин И.А., Захаров В.В., Лукьянов Г.А. Параллелизация по данным прямого моделирования Монте-Карло в молекулярной газовой динамике. С.-Петербург, препринт ИВВиБД №3-98, 1998, 32 с.
2. Богданов А.В., Быков Н.Ю., Гришин И.А., Захаров В.В., Лукьянов Г.А., Ханларов Гр.О. Алгоритмы двухуровневой параллелизации ПММК для решения нестационарных задач молекулярной газовой динамики, С.-Петербург, препринт ИВВиБД №10-98, 1999, 24 с.

3. Богданов А.В., Быков Н.Ю., Гришин И.А., Захаров В.В., Лукьянов Г.А., Ханларов Гр.О. Алгоритмы двухуровневой параллелизации ПММК для решения нестационарных задач молекулярной газовой динамики. Математическое моделирование, том 12 №6 2000, с. 95-101.
4. A.V. Bogdanov, I.A. Grishin, Gr.O. Khanlarov, G.A. Lukianov and V.V. Zakharov, Algorithm of Two-Level Parallelization for Direct Simulation Monte Carlo of Unsteady Flows in Molecular Gasdynamics. Lecture Notes in Computer Science, Vol.1593. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1999).
5. Khanlarov G.O., Lukianov G.A., Malashonok D.Yu., Zakharov V.V. Parallel DSMC on Shared and Hybrid Memory Multiprocessor Computers. Lecture Notes in Computer Science, Vol.1823. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (2000). pp. 584-588.
6. Захаров В.В., Лукьянов Г.А., Ханларов Гр.О. «Параллельные алгоритмы прямого моделирования Монте-Карло в молекулярной газовой динамике», методическое пособие ИВВиБД, 1999, 46 с.
7. В.В. Захаров, Г.А. Лукьянов Прямое моделирование Монте-Карло стационарного истечения одноатомного газа из звукового источника в вакуум // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез. докл. XVIII Международного семинара (С.-Петербург, Россия, 21-23 июня 2000). - С.-Петербург: БГТУ, 2000.- с. 64.
8. В.В. Захаров, Г.А. Лукьянов Моделирование неравновесного истечения газа в вакуум из стационарного источника // Тезисы докладов Третьей международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2000), Истра-Москва, 3-7 июня 2000 г. - М.: МИ ИУ, 2000. с. 162.
9. Захаров В.В., Лукьянов Г.А. Прямое моделирование Монте-Карло течения в соплах микроракетных двигателей, работающих в вакууме // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез. докл. XVII Всероссийского семинара (С.-Петербург, 18-20 июня 1997). - С.-Петербург: БГТУ, 1997.- с. 27.
10. Быков Н.Ю., Захаров В.В., Лукьянов Г.А. Прямое моделирование Монте-Карло стационарного истечения в вакуум струй микроракетных двигателей // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез. докл. XVII Всероссийского семинара (С.-Петербург, 18-20 июня 1997). - С.-Петербург: БГТУ, 1997.- с. 43.
11. Захаров В.В. Параллельное прямое моделирование Монте-Карло неравновесного истечения в вакуум струй газа. Вестник молодых ученых. Серия Прикладная математика и механика №1 1999. 104-110 с.

12. Горбачев Ю.Е., Захаров В.В., Лукьянов Г.А. Прямое моделирование Монте-Карло неравновесного истечения в вакуум струй одноатомного и двухатомного газа, Математическое моделирование, том 11 №9 1999, с. 38-44.
13. В.В. Захаров, Г.А. Лукьянов, Г.А. Поляков, Ю.В. Рахманов Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия струи, истекающей в вакуум, с поверхностью параллельной оси струи // II международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (С.-Петербург, 22-26 июня 1998 г.): Тезисы докладов. - Москва: МАИ, 1998. - с. 79.
14. В.В. Захаров, Г.А. Лукьянов Прямое моделирование Монте-Карло взаимодействия струи МРД с плоской параллельной преградой // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез. докл. XVIII Международного семинара (С.-Петербург, Россия, 21-23 июня 2000). - С.-Петербург: БГТУ, 2000.- с. 74.
15. В.В. Захаров, Г.А. Лукьянов Исследование эффективности защиты поверхностей КЛА от воздействия струй МРД с помощью сопловых защитных экранов // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез. докл. XVIII Международного семинара (С.-Петербург, Россия, 21-23 июня 2000). - С.-Петербург: БГТУ, 2000.- с. 73.