

УДК 532.529

DOI: 10.15372/PMTF202315322

СТРУЙНОЕ ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ВАКУУМ

В. Н. Ярыгин, В. Г. Приходько, И. В. Ярыгин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mails: yarygin@itp.nsc.ru, prihodko@itp.nsc.ru, yarygin@gorodok.net

Представлен краткий обзор выполненных в Институте теплофизики СО РАН экспериментальных исследований газодинамики сверхзвуковых струй малой плотности, включая создание вакуумного газодинамического комплекса, разработку электронно-пучковых и лазерных методов диагностики, изучение влияния эффектов вязкости и неравновесности на область свободного сверхзвукового расширения и на ударно-волновую структуру недорасширенных струй. Рассмотрены проблемы и представлены примеры моделирования на вакуумных стендах силового, теплового и загрязняющего воздействия натуральных струй двигателей ориентации на элементы конструкций космических аппаратов и орбитальных станций.

Ключевые слова: вакуумные газодинамические установки, методы диагностики, струйное истечение газа в вакуум, неравновесные процессы, моделирование струй двигателей космических аппаратов

Введение. Интерес к исследованию сверхзвуковых струйных течений разреженного газа возник в конце 40-х гг. XX в. в связи с развитием авиационной и ракетно-космической техники. Активное формирование научной тематики и научных коллективов первых институтов Сибирского отделения Академии наук СССР, включая Институт теплофизики (с 1994 г. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН)), совпало исторически с выдающимися достижениями СССР в освоении космоса: запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. и полетом Ю. А. Гагарина 12 апреля 1961 г. Одно из таких новых научных направлений исследований ИТ СО РАН — динамика разреженных газов — сформировалось и получило развитие под руководством тогда молодого ученого, ныне академика РАН А. К. Реброва.

А. К. Ребров внес определяющий вклад в разработку и создание вакуумного газодинамического комплекса Института, постановку и проведение фундаментальных и практических исследований струйных течений малой плотности, а также в процесс установления международных связей и сотрудничества в этой области. В результате Институт теплофизики стал известным в мире центром исследований в области молекулярной газодинамики [1], признанием чего явилось проведение на его базе в 1982 г. первого в СССР 13-го Международного симпозиума по динамике разреженных газов.

В настоящей работе приводится краткое описание вакуумного газодинамического комплекса (ВГК) ИТ СО РАН, разработанных методов диагностики и некоторых результатов исследований газовых и газокапельных струйных течений малой плотности, а также

приложений к струям двигателей ориентации космических аппаратов, включая Международную космическую станцию (МКС).

1. Вакуумный газодинамический комплекс и методы диагностики газовых и газокапельных течений. Первый вакуумный стенд для исследований струй малой плотности был запущен в 1964 г. [2] и, несмотря на относительно небольшой объем рабочей камеры ($0,04 \text{ м}^3$), позволил изучить принципиальные проблемы получения и диагностики сверхзвуковых течений разреженного газа (плазменный подогрев газа, методы криоконденсационной откачки, электронно-пучковая диагностика излучения в оптической и рентгеновской областях спектра). В 1973 г. была введена в эксплуатацию первая очередь вакуумного газодинамического комплекса, состоявшего из четырех газодинамических стендов различного назначения, включая генератор молекулярного пучка. Позднее были построены крупномасштабные установки ВИКА (1980 г.) и ВИКИНГ (1985 г.) объемом 40 и 150 м^3 соответственно, существенно расширившие возможности для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области термогазодинамики разреженных сред. В дальнейшем вакуумный газодинамический комплекс ИТ СО РАН был включен в перечень уникальных научных установок [3].

Методы диагностики потоков разреженного газа весьма разнообразны и специфичны. В тех случаях, когда возможно (при умеренных разрежениях (приблизительно до 10^3 Па)), используются традиционные методы аэрогазодинамики — оптические, зондовые измерения статического и полного давлений, массовой скорости, энтальпии и температуры торможения и т. д. При более низких давлениях эти методы либо становятся непригодными, либо требуют введения поправок, часто превышающих измеряемую величину. Достаточно информативным для исследований течений разреженного газа является ставший традиционным метод электронного пучка, который заключается в анализе процессов, сопровождающих прохождение пучка быстрых электронов через исследуемую среду. Возбуждение энергетических уровней атомов и молекул, диссоциация, ионизация, рассеяние электронов на ядрах атомов, а также торможение их в кулоновском поле ядра приводят к появлению излучения в широком спектральном диапазоне — от инфракрасного до рентгеновского. Метод обладает высоким пространственным разрешением (порядка 1 мм^3), позволяет определять такие параметры, как плотность, парциальные концентрации компонентов, поступательную температуру, температуру, соответствующую внутренним степеням свободы, а также визуализировать структуру течения исследуемых потоков.

Схема установки для проведения электронно-пучковых измерений приведена на рис. 1. Измерительный комплекс включает электронную пушку, генерирующую электронный пучок с энергией электронов порядка 20 кэВ и силой тока порядка 1 мА . Минимальная длина волны излучения, возбуждаемого первичными электронами пучка с энергией 20 кэВ при прохождении через исследуемую среду, составляет $0,6 \text{ \AA}$, что соответствует области ультрамягкого рентгеновского излучения двух видов: тормозного и характеристического. Тормозное рентгеновское излучение возникает при взаимодействии электронов с кулоновским полем ядра атома, а характеристическое — вследствие ударной ионизации электронами внутренних оболочек атома. Электронный пучок одновременно с рентгеновским возбуждает излучение также в оптической области спектра: от ультрафиолетового до инфракрасного. Диагностический комплекс позволяет регистрировать излучение во всем диапазоне спектра. Более подробно проведенные методические исследования описаны в работе [4], в которой основное внимание уделено исследованию возможностей и ограничений электронно-рентгеновского метода измерения локальной плотности по интенсивности тормозного рентгеновского излучения. В отличие от традиционного электронно-оптического метода использование данного метода измерений локальной плотности не оказывает влияния на результаты измерений температуры газа, определения его химического состояния,

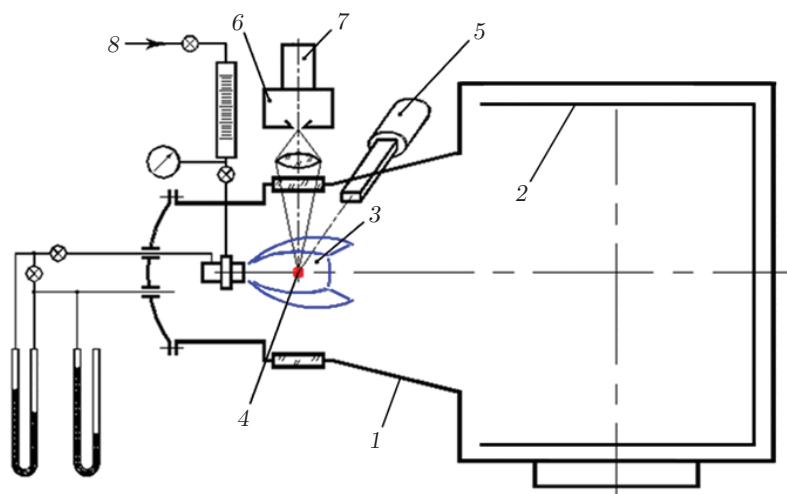


Рис. 1. Схема установки для проведения электронно-пучковых измерений:

1 — вакуумная камера, 2 — криопанель, 3 — струя, 4 — электронный пучок, 5 — рентгеновский детектор, 6 — монохроматор, 7 — фотоэлектронный умножитель, 8 — подача газа

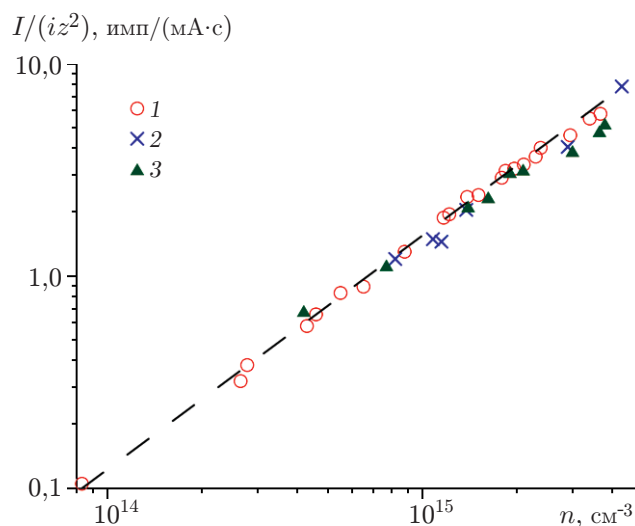


Рис. 2. Универсальная тарировочная зависимость интенсивности тормозного рентгеновского излучения от концентрации газа для аргона (1), азота (2), кислорода (3)

степени диссоциации и ионизации и может применяться для диагностики высокотемпературных, включая плазменные, потоков малой плотности. Проведенные исследования позволили установить зависимость от определяющих параметров интенсивности тормозного рентгеновского излучения I , представленную в обобщенном виде на рис. 2 (i — сила тока пучка, n — концентрация газа, z — порядковый номер элементов мишени, в качестве которых использовались Ag , N_2 , O_2). Универсальный характер зависимости интенсивности тормозного рентгеновского излучения от определяющих параметров $I \sim inz^2$ позволяет расчетным путем получать тарировочные зависимости для любых сред, включая смеси, если известен их атомарный состав, а также применять электронно-рентгеновский метод для исследования сверхзвуковых струй паров жидкостей, для которых практически

невозможно традиционным методом получить тарифовочную зависимость в статических условиях. В настоящей работе этот подход реализован при исследовании струй паров воды [5]. Заметим, что использование паров воды в качестве рабочего тела при проведении модельных газодинамических экспериментов позволяет при наличии охлаждаемого жидким азотом криогенного насоса получить в вакуумной камере предельно низкие (менее 10^{-7} Па) давления при большой скорости откачки, определяемой площадью крионасоса.

Кроме электронно-пучковой диагностики газовых потоков были развиты также лазерные методы диагностики газовых и газокапельных потоков, что существенно расширило возможности для проведения экспериментальных исследований струй малой плотности. Лазерная диагностика газовых потоков проводилась с использованием метода теневой визуализации и метода измерения локальной плотности газа, основанного на рэлеевском рассеянии света с временным разрешением $2 \cdot 10^{-8}$ с, пространственной локализацией 10^{-6} см³ и минимальной измеряемой плотностью азота 10^{16} см³ [6]. В случае газокапельных потоков использование лазерной диагностики позволило реализовать метод визуализации капельной фазы, а также получения функций распределения капель по размерам, направлениям и скоростям в сверхзвуковом газокапельном потоке за срезом сопла при истечении в вакуум [7].

2. Струйное истечение газа в вакуум и затопленное пространство. При свободном расширении газа в покоящуюся среду с малым противодавлением задание типа газа, температуры T_0 , давления торможения p_0 , геометрии сопла (диаметров критического d_* и выходного d_a сечений сопла, полуугла раскрытия Θ_a либо профиля его сверхзвуковой части), а также условий в окружающем пространстве (типа газа, его температуры T_∞ и давления p_∞) полностью определяет поле газодинамических параметров в струе, а также набор и характер физических процессов и эффектов, в том числе вязкости, разреженности и неравновесности, на всех этапах формирования структуры течения. Наличие вязкости приводит к возникновению пограничного слоя на стенках сверхзвуковой части сопла, а также слоя смешения вдоль границы струи с ламинарным или турбулентным режимом течения в зависимости от определяющего числа Рейнольдса. В ряде работ, посвященных исследованию подобия сильно недорасширенных струйных течений (см., например, [8]), показано, что для зоны смешения с окружающим газом, зоны сдвиговых течений за диском Маха и ядра потока в качестве определяющего может быть принято число Рейнольдса $Re_L = Re_* / \sqrt{N}$ (Re_* — число Рейнольдса, определяемое по параметрам в критическом сечении сопла; $N = p_0/p_\infty$ — перепад давлений), позволяющее классифицировать течения по видам. В работе [8] предложена следующая классификация режимов течения:

- 1) $Re_L > 10^4$ (турбулентный режим течения в слое смешения);
- 2) $10^3 < Re_L < 10^4$ (переход от ламинарного к турбулентному режиму течения в слое смешения);
- 3) $10^2 < Re_L < 10^3$ (ламинарный режим течения в слое смешения);
- 4) $Re_L < 10^2$ (переход от ламинарного режима течения к режимам, при которых проявляются эффекты разреженности);
- 5) $Re_L < 10$ (переход к режиму рассеяния, вырождение ударных волн по плотности).

Следует отметить, что при сохранении режима течения внутри сопла (числа Рейнольдса Re_*) режим течения в недорасширенной струе за соплом может радикально меняться при понижении давления в окружающем пространстве (увеличении p_0/p_∞), переходя от сплошного режима к режиму рассеяния.

Проведенные исследования выполнены при значениях числа Рейнольдса $Re_L = 3,2 \div 3,0 \cdot 10^4$ и температурного фактора $T_0/T_\infty = 0,5 \div 20,0$, т. е. охватывают все указанные выше режимы течения по числу Рейнольдса Re_L . На рис. 3 представлены результаты исследования влияния Re_L на осевые распределения относительной плотности в струе аргона

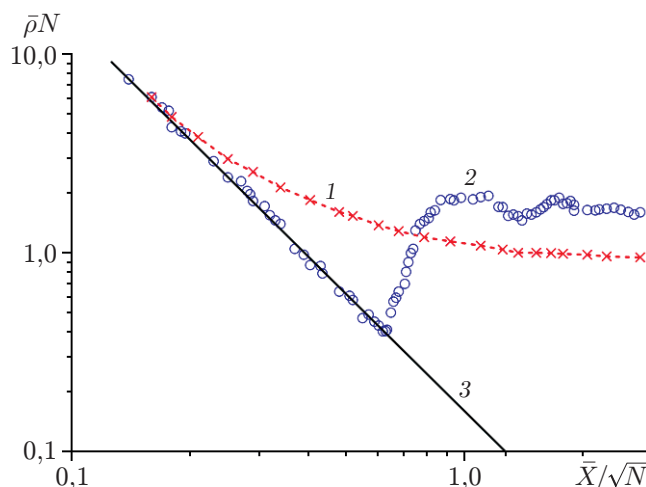


Рис. 3. Осевые распределения плотности в струе аргона за звуковым соплом при различных значениях числа Рейнольдса струи:

1 — $Re_L = 3,2$, 2 — $Re_L = 100$, 3 — изоэнтропа для $\kappa = 1,67$

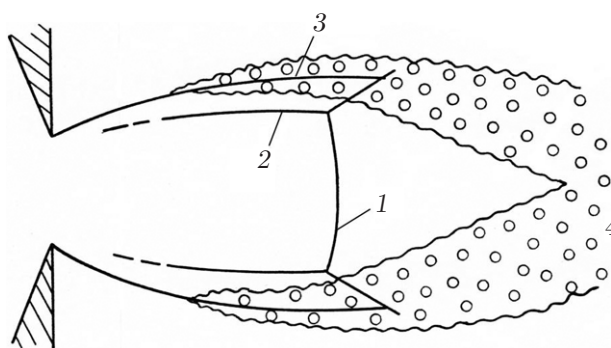


Рис. 4. Пульсационная структура течения в турбулентной струе при $Re_L = 10^4$:

1 — диск Маха, 2 — висячий скачок уплотнения, 3 — граница струи, 4 — область турбулентного течения

за звуковым соплом (κ — отношение удельных теплоемкостей). Видно, что характер истечения существенно изменяется при изменении Re_L : если при $Re_L = 100$ в недорасширенной струе за звуковым соплом имеет место область свободного изоэнтропического расширения с образованием замыкающего скачка уплотнения (диска Маха), то при $Re_L = 3,2$ струя переходит в режим рассеяния молекул истекающего газа на молекулах окружающего газа.

Постановка исследований турбулентных режимов истечения недорасширенных струй возможна благодаря созданию импульсного локального метода измерения плотности, основанного на рэлеевском рассеянии света. С использованием этого метода исследована структура течения начального участка струи за звуковым соплом. Измерены величина и область существования турбулентных пульсаций плотности [9]. На рис. 4 показаны зарождение и развитие турбулентных пульсаций плотности в струе азота за звуковым соплом с диаметром критического сечения $d_* = 3,05$ мм при $Re_L = 10^4$. Также были исследованы масштабные характеристики турбулентных пульсаций плотности. Показано, что процессы переноса в турбулентном слое смешения осуществляются путем обмена скоплениями молекул (молей, квазичастиц) с характерным размером, приблизительно равным 100 длинам свободного пробега молекул [9]. Создание метода теневой визуализации по рэлеевскому рассеянию позволило также получить мгновенные (с временным разрешением

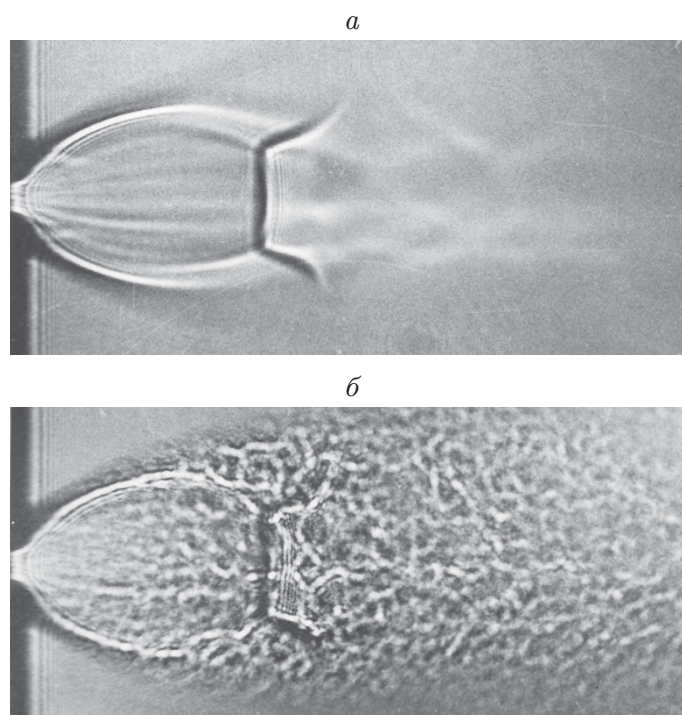


Рис. 5. Осредненное (*а*) и мгновенное (*б*) поля течения для сверхзвуковой турбулентной струи, полученные с помощью метода теневой визуализации

ем $t = 3 \cdot 10^{-8}$ с) и осредненные ($t = 10^{-2}$ с) поля течения для сверхзвуковой турбулентной струи при $Re_L = 3 \cdot 10^5$ (рис. 5).

Как указывалось выше, на характер сверхзвукового струйного истечения газов в вакуум помимо вязкости могут оказывать влияние “энергоемкие” процессы гомогенной конденсации и колебательной релаксации. Эти исследования проводились с использованием электронно-пучковой визуализации структуры течения и измерений локальной плотности, очень чувствительной к этим процессам. Результаты экспериментов, в которых использовались атомарные (Ar, Kr) и молекулярные (CO_2) газы [10], показали, что гомогенная конденсация (при малых температурах торможения) атомарных и молекулярных газов может определяющим образом влиять как на характер сверхзвукового истечения, приводя к многократному уменьшению плотности в ядре струи, так и на ударно-волновую структуру недорасширенной струи в целом, приводя к переходу от течения с обычной x -образной конфигурацией за сверхзвуковым соплом к течению с диском Маха (рис. 6).

На течение в недорасширенной струе молекулярных газов, например CO_2 , кроме гомогенной конденсации может оказывать влияние колебательная релаксация, также приводящая к изменению (понижению) относительной плотности. При этом, как показывают результаты экспериментов, на зависимости $\rho/\rho_0(T_0)$ возникает максимум, что обусловлено конкуренцией процессов конденсации и колебательной релаксации: при низких температурах торможения определяющим процессом в формировании расширения струи CO_2 является конденсация; в дальнейшем по мере увеличения T_0 становится существенным возбуждение колебательных степеней свободы, приводящее сначала к замедлению роста ρ/ρ_0 в области влияния конденсации, а затем, после перехода через максимум — к уменьшению относительной плотности. Область максимального значения $\rho/\rho_0(T_0)$ характеризуется одновременным протеканием процессов конденсации и колебательной релаксации, оказывающих противоположное влияние на изменение соотношения ρ/ρ_0 .

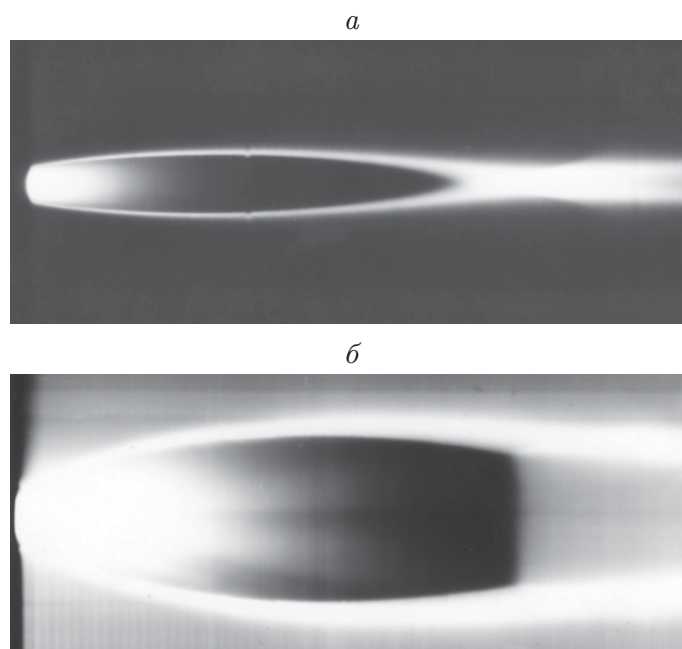


Рис. 6. Электронно-пучковая визуализация струи аргона за сверхзвуковым соплом: *а* — в отсутствие конденсации ($T_0 = 640$ К), *б* — при наличии конденсации ($T_0 = 159$ К)

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать важный вывод, что целенаправленное использование неравновесных процессов гомогенной конденсации и колебательной релаксации позволяет в определенных пределах изменять условия истечения и получать требуемое распределение локальных плотностей в сверхзвуковых недорасширенных струях.

Проведенные исследования позволили также сформулировать интегральный метод моделирования натуральных струй двигателей космических аппаратов, в котором в качестве основного параметра подобия используется характерный угол расширения струи, что существенно увеличивает возможности газодинамического моделирования на вакуумных стендах.

3. Струйное истечение газокapельных потоков в вакуум. Несмотря на то что исследования газокapельных потоков представляют самостоятельный научный интерес, в настоящей работе, как указывалось выше, постановка и проведение этих исследований инициированы решением проблемы внешнего загрязнения космических аппаратов, в основном МКС, струями двигателей ориентации. При моделировании процессов загрязнения внешней поверхности МКС струями двигателей ориентации рассматривается истечение пристенной пленки жидкости совместно с газовым потоком из сверхзвукового сопла в вакуум. Заметим, что в настоящее время пристенные пленки жидкости, как гравитационные, так и движущиеся под действием газового потока, достаточно подробно исследованы при дозвуковых скоростях спутного газового потока. В данной задаче учитывается наличие высокоскоростного, вплоть до сверхзвукового, спутного газового потока при течении внутри сопла, а также взрывообразного распада жидкости при попадании в вакуум (фазовый взрыв). В соответствии с целями исследования были развиты методы диагностики пристенной пленки жидкости при движении со спутным газовым потоком внутри сопла и при истечении в вакуум, которые позволили провести следующие измерения:

— толщину и скорости пристенной пленки жидкости внутри сопла с помощью зондов емкостного типа;

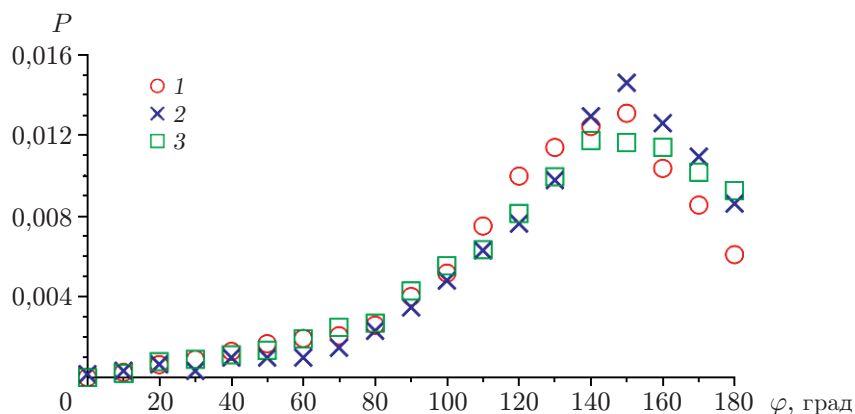


Рис. 7. Распределение капель по направлениям для различных форм кромки сопла:
1 — круглая, 2 — острая, 3 — прямая

— суммарного и мгновенного расходов жидкости с помощью мерной емкости и видеосъемки с последующим кадровым анализом записи;

— углового распределения капельной фазы за срезом сопла путем осаждения на бумажные подложки и использования метода спектрофотометрии для получения количественных данных о массе капельной фазы и ее суммарном расходе в струе;

— температуры пленки жидкости, формирующейся на внешней поверхности сопла, с помощью малогабаритных полупроводниковых датчиков.

Данные методы позволили также визуализировать течение капельной фазы за срезом сопла, а затем определить функции распределения капель по размерам, направлениям и скоростям с использованием подсветки галогенными лампами и полупроводниковым лазером.

В целом получена достаточно полная информация о параметрах пристенной пленки жидкости при взаимодействии со спутным газовым потоком внутри сопла и структуре течения в струе за сверхзвуковым соплом при истечении в вакуум. Рассмотрим наиболее характерные результаты экспериментальных исследований.

Одним из главных результатов экспериментов является обнаружение особенностей поведения пристенной пленки жидкости на выходной кромке сопла, а именно: в отличие от случая истечения в атмосферу при истечении в вакуум пристенная пленка не только распадается на капли, но и поворачивается на угол, равный 180° , и начинает подниматься по внешней поверхности сопла даже против силы тяжести [11]. Обнаруженный эффект позволил объяснить причину загрязнения присопловой поверхности МКС при работе двигателей ориентации. Проведенные эксперименты позволили также получить количественные данные о предельной температуре охлаждения вышедшей на поверхность сопла пленки жидкости, а также пространственное распределение капель и их распределения по размерам, направлениям и скоростям. Установлено, что в условиях проведенных экспериментов капли имеют характерные значение скорости и размер (приблизительно 1 м/с и 200 мкм соответственно) и вылетают преимущественно под углом $\varphi = 150^\circ$ относительно оси струи, создавая обратный поток (рис. 7) (P — плотность вероятности). Также заметим, что функции распределения несущественно зависят от формы выходной кромки сопла.

4. Моделирование струй двигателей ориентации космических аппаратов и орбитальных станций. Созданная экспериментальная база и полученные результаты исследования сверхзвуковых недорасширенных струй малой плотности обеспечили возможности для решения конкретных практических задач космической тематики. Наибо-

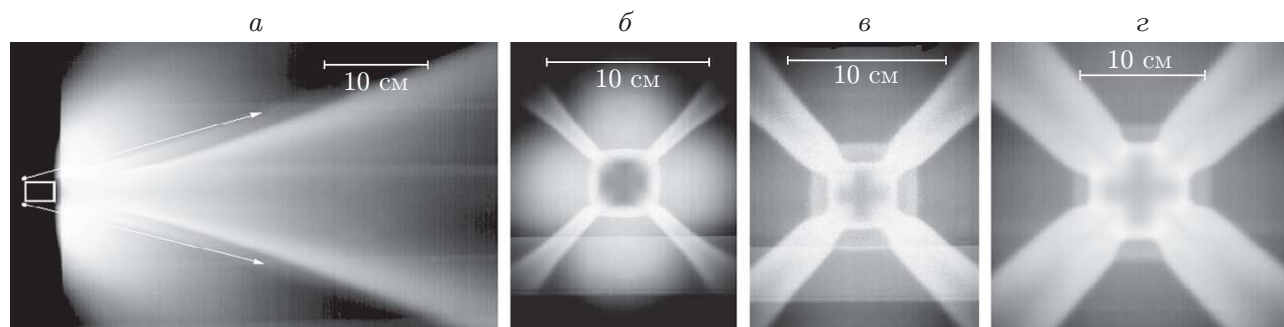


Рис. 8. Визуализация волновой структуры поля течения за моделью с четырехсопловой компоновкой:

a — вид сбоку, $b-d$ — поперечные сечения на различных расстояниях от кромки сопла (b — $\bar{X} = 40$, c — $\bar{X} = 80$, d — $\bar{X} = 130$)

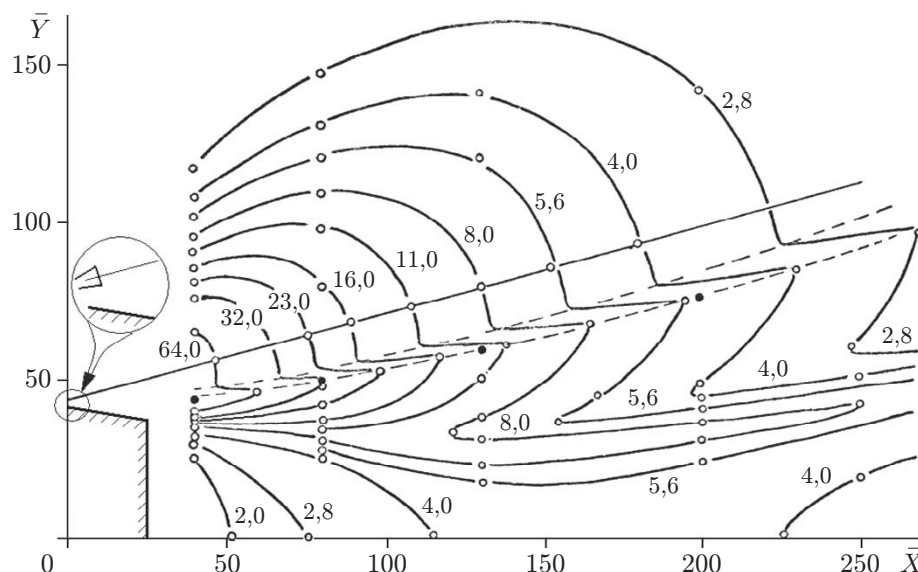


Рис. 9. Изолинии плотности (изохоры) $(\rho/\rho_0) \cdot 10^6$ за моделью с четырехсопловой компоновкой

более результативными оказались проведенные совместно с Ракетно-космической корпорацией “Энергия” им. С. П. Королева исследования силового, теплового и загрязняющего воздействия выхлопных факелов двигателей ориентации на космических аппаратах и орбитальных станциях, начиная с программы “Союз — Аполлон” (1975 г.) и заканчивая программой МКС [12]. Эти исследования включали электронно-пучковую визуализацию и измерения плотности в продольном и поперечном сечениях за моделями реальных многосопловых блочных компоновок. Поскольку при свободном расширении газа в вакуум его скорость достигает предельного значения, распределение плотности, по сути, определяет силовое и тепловое воздействие факела двигателя ориентации на попадающие в поле течения элементы конструкции космического аппарата и орбитальной станции. Результаты подобных экспериментов представлены на рис. 8, 9, для четырехсопловой компоновки, реализованной при стыковке космических аппаратов “Аполлон” и “Союз”. Наблюдается образование скачков уплотнения вследствие взаимодействия соседних струй и областей свободного расширения. Результаты исследования для других вариантов блочных струй приведены в [13].

Постановка и результаты моделирования процессов внешнего загрязнения космических аппаратов, главным образом МКС, струями двигателей ориентации достаточно подробно представлены в [14]. Основными результатами этих исследований являются определение физического механизма загрязнения и выработка рекомендаций по радикальному снижению уровня загрязнений, справедливость которых подтверждена натурными экспериментами [15].

Заключение. Созданный по инициативе и при активном участии академика А. К. Реброва вакуумный газодинамический комплекс ИТ СО РАН позволил провести широкий спектр фундаментальных исследований молекулярной газодинамики и кинетики неравновесных процессов и решить ряд важных практических задач. В настоящей работе представлена лишь небольшая часть исследований, выполненных авторами. Реальный спектр и тематика проведенных на ВГК ИТ СО РАН исследований значительно шире и продолжают развиваться в соответствии с новыми научными задачами и вакуумными технологиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Ярыгин В. Н., Ребров А. К. Некоторые проблемы молекулярной газодинамики // Вестн. АН СССР. 1984. № 4. С. 79–85.
2. Ребров А. К., Ярыгин В. Н. Вакуумная газодинамическая установка с электродуговым подогревом газа // Теплофизика высоких температур. 1967. № 1. С. 182–183.
3. Вакуумный газодинамический комплекс ИТ СО РАН. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://ckp-rf.ru/catalog/usu/200981/>.
4. Жаркова Н. Г., Кузнецов Л. И., Ребров А. К., Ярыгин В. Н. Измерение плотности разреженного газа и плазмы с помощью электронного пучка // Теплофизика высоких температур. 1976. № 1. С. 17–20.
5. Yarygin N. V., Skovorodko P. A., Gorchakova N. G., et al. The effect of homogeneous condensation on gasdynamics and IR radiation of carbon dioxide and water vapour free jets // Rarefied gas dynamics: Proc. of the 14th Intern. symp., Tsukuba (Japan), July 16–20, 1984. Tokyo: Univ. of Tokyo Press, 1984. V. 2. P. 951–958.
6. Кутателадзе С. С., Новопашин С. А., Перепелкин А. Л., Ярыгин В. Н. Тонкая структура течения сверхзвуковой недорасширенной турбулентной струи // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295, № 3. С. 556–558.
7. Приходько В. Г., Ярыгин И. В., Ярыгин В. Н. Визуализация структуры течения и измерение функций распределения капель по размерам, направлениям и скоростям в газокпельном потоке, истекающем из сопла в вакуум // Оптические методы исследования потоков: Тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва (Россия), 28 июня — 1 июля 2005 г. М.: Моск. энергет. ин-т, 2005. С. 182–185.
8. Авдудевский В. С., Иванов А. В., Карпман И. М. и др. Влияние вязкости на течение на начальном участке сильно недорасширенной струи // Докл. АН. 1971. Т. 197, № 1. С. 46–49.
9. Новопашин С. А., Перепелкин А. Л., Ярыгин В. Н. Пульсационная структура слоя смешения недорасширенных струй // ПМТФ. 1987. № 3. С. 124–126.
10. Жаркова Н. Г., Проккоев В. В., Ребров А. К., Ярыгин В. Н. Неравновесное расширение углекислого газа при температурах торможения до 1200 К // ПМТФ. 1976. № 5. С. 41–45.
11. Приходько В. Г., Чекмарев С. Ф., Ярыгин В. Н., Ярыгин И. В. Сверхзвуковое истечение газа из сопла в вакуум с пристенной пленкой жидкости: эффект подъема пленки по наружной поверхности сопла против сил тяжести // Докл. АН. 2004. Т. 394, № 5. С. 618–620.

12. **Ярыгин В. Н., Герасимов Ю. И., Крылов А. Н. и др.** Газодинамика космических кораблей и орбитальных станций (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 3. С. 345–372.
13. **Ярыгин В. Н.** Защита от ракетных выхлопов // Наука из первых рук. 2011. № 1. С. 20–27.
14. **Ярыгин В. Н., Приходько В. Г., Ярыгин И. В.** Моделирование в вакуумных камерах струй двигателей ориентации космических аппаратов // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 5. С. 134–143.
15. **Герасимов Ю. И., Ярыгин В. Н.** Газодинамические защитные устройства для двигателей ориентации космических аппаратов и орбитальных станций. Концепция, модельные и натурные эксперименты // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2016. Т. 17, № 4. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-4/articles/671/>.

*Поступила в редакцию 30/V 2023 г.,
после доработки — 7/VI 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*
