

УДК 533.6.011

110-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе посвящается

О границах влияния неравновесных процессов на струйное истечение газов в вакуум

В.Н. Ярыгин

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

E-mail: yarygin@itp.nsc.ru

В статье отражен вклад академика С.С. Кутателадзе в обоснование и создание инженерных методов расчета электродуговых плазмотронов на основе подходов теории подобия и анализа размерностей. Представлены обобщенные вольт-амперная и тепловая характеристики однокамерного плазмотрона как с обычным водяным, так и с пористым охлаждением анода, а также некоторые результаты исследования высокотемпературных, включая плазменные, недорасширенных сверхзвуковых струй малой плотности.

Ключевые слова: электродуговые плазмотроны, инженерные методы расчета, плазменные струи, истечение в вакуум, неравновесные процессы.

Введение

Динамика разреженных газов как одно из направлений газовой динамики начала формироваться в конце 40-х годов в связи с развитием авиационной и ракетно-космической техники. Историческими вехами стали запуск в СССР первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. и полет Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 г. В Институте теплофизики исследования в области динамики разреженных газов были инициированы и получили развитие в 60-е годы — годы становления этого нового направления. Был взят курс на создание базы крупномасштабных вакуумных газодинамических установок, постановку и проведение фундаментальных и прикладных исследований, а также установление и развитие международных связей и сотрудничества в данной области. В результате Институт теплофизики стал известным в мире центром исследований в области молекулярной газодинамики [1], признанием этого факта явилось проведение на его базе в 1982 г., впервые в СССР, 13-го международного симпозиума по динамике разреженных газов.

В работе [2], посвященной 90-летию академика РАН А.К. Реброва — инициатора и руководителя работ по данной тематике, был приведен краткий обзор истории создания вакуумного газодинамического комплекса (ВГК ИТ СО РАН), методов диагностики, а также некоторых результатов фундаментальных и прикладных исследований применительно к моделированию струй двигателей управления и ориентации космических кораблей и космических станций. В настоящей статье представлен опыт разработки

и использования электродуговых плазмотронов в качестве высокотемпературных нагревателей для вакуумных газодинамических установок. Также приведены некоторые результаты исследований влияния неравновесных процессов на струйное истечение газов в вакуум. Основной упор сделан на установлении границ влияния процессов гомогенной конденсации и колебательной релаксации на газодинамику сверхзвуковых недорасширенных струй малой плотности.

Газодинамические источники

Для проведения исследований струйных течений в возможно широком диапазоне изменения режимных параметров по температуре, давлению и расходу ВГК ИТ СО РАН был оснащен омическими и электродуговыми подогревателями. Уместно отметить, что высокие значения КПД, относительная простота конструкции, отсутствие принципиальных ограничений по мощности, диапазону давлений, химическому составу нагреваемой среды способствовали быстрому расширению областей применения электродуговых плазмотронов, в том числе при проведении теплофизических и газодинамических исследований. Достаточно подробно история и результаты создания и использования электродуговых плазмотронов изложены в 20-томной серии монографий «Низкотемпературная плазма», вышедшей в 1990–2004 гг. под редакцией академика М.Ф. Жукова [3].

Несмотря на простоту принципиальной схемы электродуговых нагревателей, рабочий процесс в них, определяемый взаимодействием магнитоэлектрических, тепловых и газодинамических явлений, очень сложен. С другой стороны, количество независимых переменных, определяющих рабочий процесс в плазмотроне, близко к числу первичных размерностей. Поскольку именно в этих случаях методы теории подобия и анализа размерностей оказываются наиболее эффективными [4], то приложение таких методов к анализу условий подобия физических процессов, протекающих в плазмотронах, позволило существенно продвинуться в направлении создания общих методов их проектирования.

Основными зависимостями любого электродугового плазмотрона как генератора низкотемпературной плазмы являются его вольт-амперная и тепловая характеристики (зависимости напряжения горения и КПД от режимных параметров). Эти зависимости в критериальном виде из анализа размерностей были получены впервые в работах [5–7], где, по сути, были решены принципиальные вопросы обобщения вольт-амперных и тепловых характеристик. Особенностью проведенных автором исследований плазмотронов и обобщение их вольт-амперных характеристик и данных по КПД является широкий диапазон давлений в дуговой камере. В представленной работе рассматриваются плазмотроны однокамерной схемы как с обычным водоохлаждаемым, так и с пористым охлаждением анода. В качестве плазмообразующего рабочего газа использовались Ar, He, N₂, CO₂ с расходами 0,1–1,0 г/с. При этом давление в камере торможения изменялось в диапазоне $p_0 = (0,05–3,0) \cdot 10^5$ Па, а среднemasовая температура газа $T_0 \leq 5 \cdot 10^3$ К.

Соответствующие результаты проведенных экспериментов, где в качестве рабочего газа применялся аргон, в обобщенном виде приведены на рис. 1 и 2. Полученные в диапазоне величин $Re = (0,35–11) \cdot 10^3$, $Kn = (0,14–14,5) \cdot 10^{-4}$, $I^2/(Gd) = (3–656) \cdot 10^2$, $\tilde{j}_{ст} = 0,014–1,125$, $d = 0,4–1,6$ критериальные зависимости имеют вид:

$$\frac{Vd}{I} = 10^4 \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^{-0,75} Re^{-0,5} \left(\frac{1}{1 + \tilde{j}_{ст}} \right)^{-2,6},$$

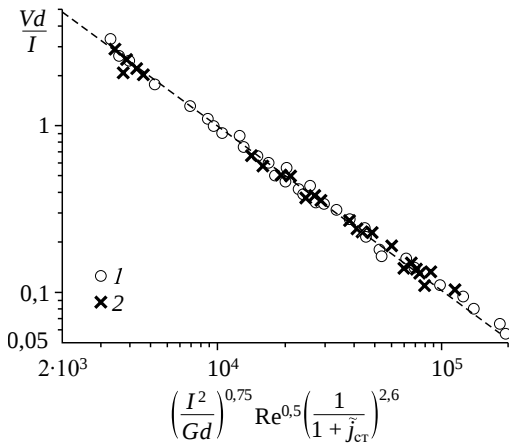


Рис. 1. Обобщенная вольт-амперная характеристика плазмотронов.

1 — водоохлаждаемый анод,
2 — анод с пористым охлаждением.

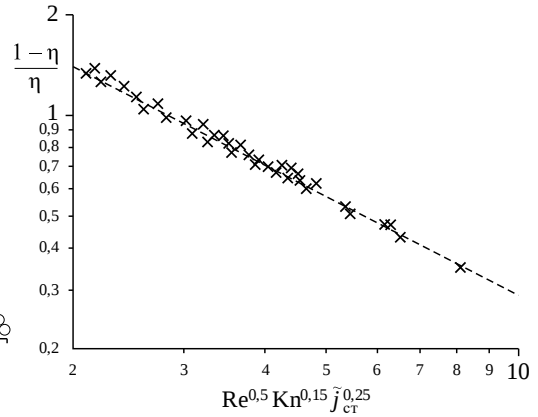


Рис. 2. Тепловая характеристика плазмотрона с пористым охлаждением анода.

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 2,9 \text{Re}^{-0,5} \text{Kn}^{-0,15} \tilde{j}_{\text{ct}}^{-0,25}.$$

Здесь Re , Kn — числа Рейнольдса и Кнудсена, I — ток дуги в амперах, V — напряжение в вольтах, G — расход газа в г/с, d — диаметр анода в см, $\eta = G\Delta h / VI = 1 - Q / VI$, где Q — потеря тепла в электроды, $\tilde{j}_{\text{ct}} = \rho_{\text{ст}} w_{\text{ст}} / \rho_0 w_0$ — относительная массовая скорость поперечного потока газа через пористую стенку.

Методы диагностики

Создание и изучение электродуговых плазмотронов для вакуумных газодинамических установок позволило провести цикл исследований высокотемпературных, включая плазменные, недорасширенных струй за звуковыми и сверхзвуковыми соплами. Эти исследования были выполнены с использованием электронно-пучковой диагностики. Основная идея метода электронного пучка состоит в спектральном анализе излучения, возбуждаемого при прохождении пучка быстрых электронов через исследуемую среду. При характерных параметрах электронного пучка (энергия электронов — 20 кэВ, ток — 1 мА) спектральный диапазон возбуждаемого излучения простирается от рентгеновского до инфракрасного. Для исследования плазменных струй был развит электронно-рентгеновский метод измерения локальной плотности (по интенсивности тормозного и характеристического излучения), свободный от влияния собственного излучения струи [2].

Достаточно полную библиографию по электронно-пучковой диагностике (455 источников) можно найти в работе [8].

Сверхзвуковые струи малой плотности

При истечении газа из звукового или сверхзвукового сопел в пространство с малым абсолютным давлением, в пределе в пустоту, возможно существенное проявление эффектов вязкости, разреженности и неравновесности как на область свободного сверхзвукового расширения, так и на ударно-волновую структуру. Для выбранного рода газа характер и глубина влияния указанных эффектов полностью определяется заданием условий в источнике (температура, давление, расход, число Маха) и в окружающем

пространстве (состав, давление, температура). Наличие вязкости приводит к возникновению пограничного слоя на стенках сопла, а также слоя смешения вдоль границы струи с ламинарным или турбулентным режимами течения либо с переходом к режиму рассеяния, в зависимости от определяющего числа Рейнольдса Re_L [2]. Из неравновесных процессов в рассматриваемых условиях на газодинамику сверхзвуковых недорасширенных струй определяющее влияние могут оказывать гомогенная конденсация (для атомарных и молекулярных газов) и колебательная релаксация (для молекулярных газов). В данной работе влияние этих процессов исследовалось на основе электронно-пучковых измерений локальной плотности, очень чувствительной к их протеканию. Формальным подтверждением этому может служить приведенная на рис. 3 зависимость относительной плотности от числа Маха для различных отношений удельных теплоемкостей κ . Видно, что при числах $M \leq 1$ плотность малочувствительна к изменению κ , в то время как для сверхзвуковых течений влияние κ на изменение плотности существенно. Например, при изменении κ от 1,67 до 1,20 в струе с числом Маха $M = 4$ локальная плотность падает примерно в 10 раз. В экспериментах использовались как атомарные (в основном Ar), так и молекулярные (в основном CO_2) газы.

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты экспериментов по влиянию температуры торможения на относительную плотность в недорасширенной струе CO_2 . В этих экспериментах подогрев газа до температур около 1200 К осуществлялся с помощью омического подогревателя, до более высоких температур — с помощью электродугового плазмотрона. На графиках видно появление максимума на зависимости $\rho/\rho_0(T_0)$, что обусловлено конкуренцией процессов конденсации и колебательной релаксации, а именно: при относительно низких температурах торможения определяющим процессом в формировании расширения CO_2 является гомогенная конденсация; в дальнейшем по мере роста T_0 становится заметным возбуждение колебательных степеней свободы, приводящее сначала к замедлению роста ρ/ρ_0 в области влияния конденсации, а затем после перехода через максимум — к понижению относительной плотности. Область максимума $\rho/\rho_0(T_0)$ характерна одновременным протеканием процессов гомогенной конденсации и колебательной релаксации, противоположно влияющих на изменение ρ/ρ_0 . Также на рис. 4 штриховыми линиями показана относительная плотность

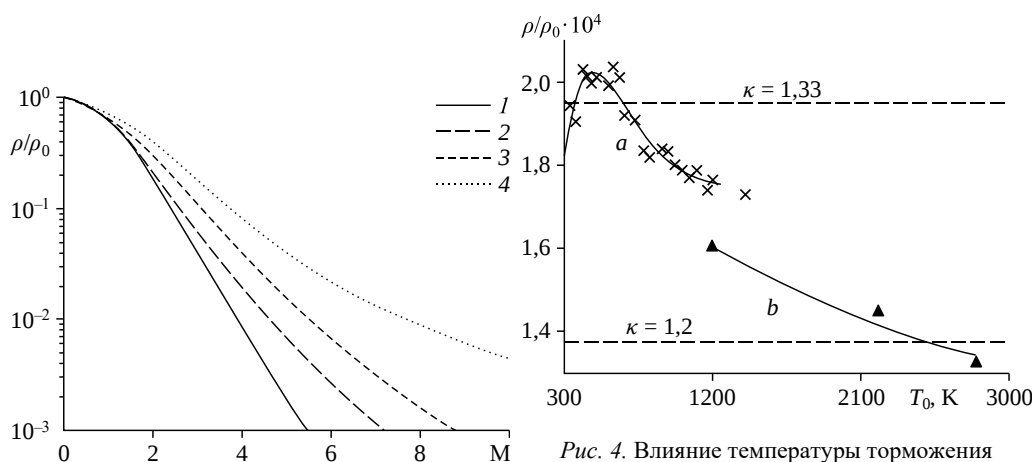


Рис. 3. Зависимости относительной плотности от числа Маха (M) для $\kappa = 1,2$ (1), 1,33 (2), 1,4 (3), 1,67 (4).

Рис. 4. Влияние температуры торможения на относительную плотность на оси струи CO_2 за звуковым соплом.

a — подогрев газа омическим нагревателем, b — подогрев газа с помощью плазмотрона.

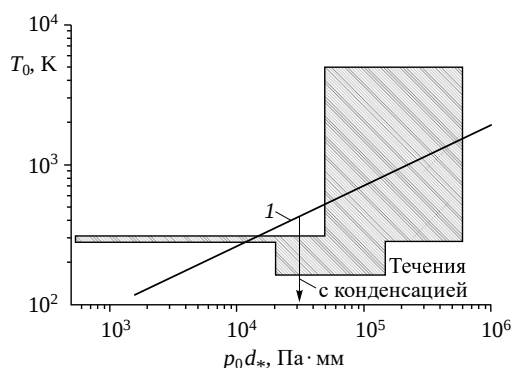


Рис. 5. Граница влияния процессов гомогенной конденсации (1) на струйное истечение Ag в вакуум.

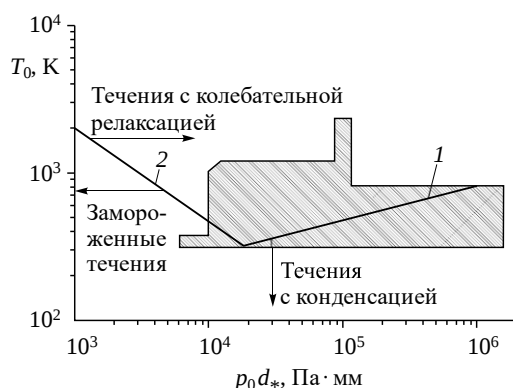


Рис. 6. Границы влияния процессов гомогенной конденсации (1) и колебательной релаксации (2) на струйное истечение CO₂ в вакуум.

при изоэнтропическом (без влияния неравновесных процессов) истечении газа с показателями адиабаты $\kappa = 1,2$ и $\kappa = 1,33$.

Важно отметить, что появление конденсированной фазы в потоке (кластеров) вызывает в дополнение к гомогенной и гетерогенную колебательную релаксацию [9].

Итоговым результатом проведенных исследований является установление границ влияния процессов гомогенной конденсации и колебательной релаксации на струйное истечение газа в вакуум. Соответствующие результаты в координатах определяющих параметров $(T_0 - p_0 \cdot d_*)$ приведены для Ag и CO₂ на рис. 5 и 6. Кривые 1 и 2 построены по результатам экспериментов данной работы и соответствуют условиям, когда «замораживание» неравновесных процессов наступает при числах Маха $M \leq 1$. В этих случаях во всей сверхзвуковой области течения газ расширяется с постоянным значением отношения удельных теплоемкостей κ , а влияние конденсации и колебательной релаксации на струю отсутствует. Температурная зависимость кривой 2 принята соответствующей Ландау – Теллеровской, а температурные зависимости кривых 1 построены по результатам исследований работы [10].

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что целенаправленное использование неравновесных процессов гомогенной конденсации и колебательной релаксации дает возможность изменять условия истечения и получать требуемое распределение локальных плотностей в сверхзвуковых недорасширенных струях, что практически важно при моделировании натуральных струй двигателей управления космических аппаратов.

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Ярыгин В.Н., Ребров А.К. Некоторые проблемы молекулярной газодинамики // Вестн. АН СССР. 1984. № 4. С. 79–85.
2. Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В. Струйное истечение газовых и газокпельных потоков в вакуум // Прикл. механика и технич. физика. 2023. Т. 64, № 5. С. 59–69.
3. Низкотемпературная плазма. Серия монографий в 20 томах под редакцией академика Жукова М.Ф. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. 2004.
4. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, Сибирской отделение, 1982. 280 с.
5. Кутателадзе С.С., Ясько О.И. Обобщенные характеристики электродуговых подогревателей // Инж.-физ. журн. 1964. Т. 7, № 4. С. 25–28.

6. Даутов Г.Ю., Жуков М.Ф. Некоторые обобщения исследований электрических дуг // Прикл. механика и технич. физика. 1965. № 2. С. 97–105.
7. Кутателадзе С.С., Ребров А.К., Ярыгин В.Н. О влиянии конвективного теплообмена на характеристики плазмотрона // Прикл. механика и технич. физика. 1967. №1. С. 157–160.
8. Gochberg L.A. The electron beam fluorescence technique in hypersonic aerothermodynamics // 18th AIAA Aerospace Ground Testing Conf. AIAA Paper. No. 94-2635. 1994. 42 p.
9. Востриков А.А., Миронов С.Г., Ребров А.К., Семячкин Б.Е. Исследование колебательной релаксации молекул CO₂ в гетерогенной системе газ-кластер // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 6. С. 1356–1359.
10. Hagen O.F., Obert W. Cluster formation in expanding supersonic jets: effect of pressure, temperature, nozzle size, and test gas // J. Chem Phys. 1972. Vol. 56, No. 5. P. 1793–1802.

*Статья поступила в редакцию 4 июля 2024 г.,
после доработки — 18 июля 2024 г.,
принята к публикации 31 июля 2024 г.*