

ИНДЕКС УДК 533.6.011.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ С ТВЕРДЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Ерофеев А.И., Никифоров А.П.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского (ЦАГИ),
г. Жуковский
aerofeev@progtch.ru

Аннотация

На вакуумном стенде VAT-103 ЦАГИ проведено экспериментальное исследование воздействия свободномолекулярных потоков азота, гелия, неона и аргона на поверхности образцов, изготовленных из анодированного алюминий – магниевого сплава АМгб и стекла. Рассмотрено влияние скорости и состава потока на силу, действующую на плоскую пластину, при нормальном падении пучка на поверхность.

Проведен анализ имеющихся в литературе экспериментальных результатов, относящихся к взаимодействию высокоскоростных потоков газов с «инженерными» поверхностями. Для величины импульса отраженных потоков получены приближенные аналитические зависимости от энергии набегающего потока.

Методом прямого статистического моделирования решения уравнения Больцмана проведен расчет истечения струи смеси газов в вакуум при условиях, моделирующих рабочие параметры стенда VAT-103. Получены коэффициенты обогащения тяжелого компонента в смесях гелий - аргон и гелий – атомарный кислород при малых числах Рейнольдса. Эти данные были использованы для диагностики параметров потока смеси газов.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INTERACTION THE HIGH-VELOCITY FREE MOLECULAR BEAMS OF ATOMS AND MOLECULES WITH SOLID SURFACES

The interaction of free molecular beams of nitrogen molecules - N_2 , He , Ne , Ar – atoms with the surface of the flat plates were investigated experimentally in the vacuum facility VAT-103 TsAGI. The plates were made of an anodized aluminum-magnesium alloy and glass. The dependency of the force acting on plate upon the velocity and molecular mass at normal incidence are studied.

The available experimental data upon the interaction of high-velocity free molecular nitrogen and argon beams with “engineering” surfaces are analyzed. Approximate representation normal component of the reflected flux moments against the energy of incident flow are obtained.

The flow of gas mixture through a nozzle into vacuum are investigated by the direct simulation Monte Carlo method. These calculations were carried out for operating conditions of VAT-103 facility. The enrichment factors for heavy components in $He-Ar$ and $He-O$ mixtures are obtained at small Reynolds number. These data were used for mixture flow diagnostics.

Введение

Влияние космического пространства на летательные аппараты, функционирующие на различных орбитах в околоземном пространстве, чрезвычайно многообразно (см. например, [1-5]). Эти проблемы активно исследуются на протяжении последнего полувека. Но по-прежнему актуальными являются вопросы силового и теплового воздействия атмосферы Земли на аппараты, проблемы живучести элементов конструкций и технологического обслуживания, особенно в агрессивной среде атомарного кислорода на высотах свыше 200 км, и вопросы, связанные с наличием собственной атмосферы, и т.д. Полеты космических лета-

тельных аппаратов (КЛА) осуществляются на различных высотах, на которых молекулярный состав атмосферы существенно изменяется: на высотах менее 170 км преобладает молекулярный азот, на высотах 200–700 км – атомарный кислород, выше 700 км доминирует гелий. Это обстоятельство требует изучения влияния вида молекул на их взаимодействие с поверхностями. Работа на околоземной орбите стационарной станции сопровождается полетами и отлетами от неё КЛА различного назначения, выхлопные струи двигателей которых также могут воздействовать на поверхность станции. Состав струй может включать молекулы H_2 , H_2O , N_2 , CO , CO_2 и другие компоненты, а относительная скорость молекул струи (относительно станции) имеет величину порядка 3 км/с. Таким образом, необходимы данные о взаимодействии газовых потоков с поверхностями в достаточно широком диапазоне изменения параметров потока по составу и скоростям.

Реальные поверхности космических аппаратов имеют сложную структуру и довольно неопределенный химический состав. Этот состав определяется, с одной стороны, технологическими процессами изготовления и содержания в наземных условиях, а, с другой стороны, многочисленными факторами при функционировании аппаратов на орбите: процессами массовыделения и массопереноса, солнечного и космического излучения и т.д. [5–7]. Условия лабораторного моделирования теплового и силового воздействия газовых потоков на такие «инженерные» поверхности обсуждались, например, в [4, 8]. Одним из основных положений, необходимых для моделирования, является существенное превышение интенсивности высокоскоростного потока рабочего газа над интенсивностью потока остаточного газа в экспериментальной установке [8]. Это условие реализовано в вакуумном стенде ВАТ-103 ЦАГИ [9] и некоторых других установках (например, [10, 11]). Анализ имеющихся в литературе данных будет дан ниже вместе с анализом полученных экспериментальных результатов.

В данной работе основное внимание уделяется изучению отраженных от поверхности потоков атомов и молекул. Такой подход характерен при теоретическом исследовании динамики столкновения моноэнергетических атомов и молекул газа с обтекаемыми поверхностями [1, 12], что позволило выявить основные качественные зависимости процесса от начальной энергии, массы атомов, параметров твердых поверхностей и т.д. Этот подход использовался также в [13, 14] при анализе экспериментальных результатов взаимодействия молекулярного пучка азота с плоскими образцами из различных материалов. Экспериментальная часть работы заключается в измерениях компонентов силы, действующей на плоскую пластину, с помощью 3-х компонентных весов поплавкового типа. В качестве рабочего газа использовался молекулярный азот (N_2), гелий (He), неон (Ne) и аргон (Ar), а в качестве образца – плоские пластины, изготовленные из алюминий – магниевого сплава АМгб и стекла. При работе с одноатомными газами применялась небольшая добавка молекулярного кислорода (до 10% объемного расхода). Это обстоятельство потребовало численного исследования истечения смеси газов через звуковое сопло в вакуум для определения коэффициента обогащения тяжелого компонента в струе, необходимого для диагностики газовых потоков в эксперименте.

1 Экспериментальная установка. Определение параметров рабочего потока

Экспериментальные исследования взаимодействия высокоскоростных свободномолекулярных пучков газов с поверхностью модели проводились на вакуумном стенде ВАТ-103, описание которого дано в [14]. Схема стенда приведена на рис. 1. Смесь газов через расходомеры 1 поступает в форкамеру 2, в которой осуществляется его нагрев высокочастотным разрядом. Параметры газа в форкамере: давление P_0 , температура T_0 . Из форкамеры газ через звуковое сопло истекает в предскиммерную камеру 3. В этой камере производится отсечение большей части вытекающего из форкамеры газа при помощи

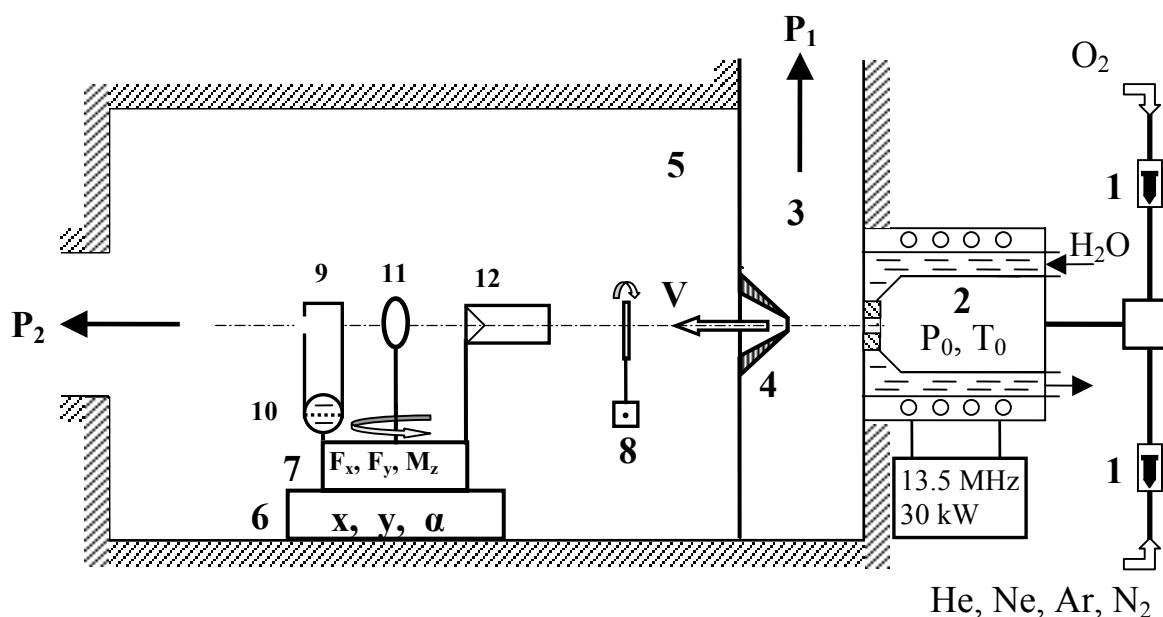


Рис.1. Схема вакуумного стенда VAT-103

высокопроизводительной вакуумной станции – давление газа в предсциммерной камере $(1-5) \cdot 10^{-4}$ тор. Формирование рабочего потока из истекающей из сопла струи газа осуществляется скиммером 4. Далее поток газа попадает в рабочую камеру 5, которая соединена с высоковакуумной станцией, обеспечивающей давление остаточного газа в рабочей камере $\sim 10^{-5}-5 \cdot 10^{-6}$ тор. В рабочей камере размещается экспериментальное оборудование: координатные механизмы 6, трехкомпонентные весы 7, прерыватель потока 8 и др. На столе координатного механизма установлены весы и насадок полного давления 9 с измерительной манометрической лампой 10. Испытуемый образец или модель 11 - диск диаметром 50 мм и толщиной 0.5 мм - закрепляется в центре платформы поплавка трехкомпонентных весов. Полый цилиндр 12 устанавливается на краю платформы поплавка. Поворотный стол координатного механизма позволяет попеременно вводить в поток модель, полый цилиндр и насадок полного давления.

Режимы работы стенда VAT-103 с использованием различных газов приведены ниже в таблице 1.1. Температура газа в подогревателе T_0 изменялась с помощью изменения вкладываемой мощности в разряд. Вариации мощности проводились в пределах $W_a = 4 \div 30$ кВА. Давление в подогревателе зависит от W_a и расхода газа G . Расход регулировался игольчатыми натекателями и изменялся в пределах $0.5 \div 30$ мг/с. Звуковое сопло - вставка выполнена из молибдена с каналом длиной 1-2 мм. В таблице число Рейнольдса,

$$\text{Re}_0 = \frac{\rho_0 a_0 d_*}{\mu_0} \quad (1.1)$$

определенно по диаметру сопла d_* и параметрам газа в форкамере: a_0 , ρ_0 , μ_0 - скорость звука, плотность и коэффициент вязкости, соответственно. Начальный диаметр сопла выбирался равным $d_* = 1$ мм, но в течение экспериментов мог изменяться. Это изменение кон-

тролировалось расходным методом до и после эксперимента подачи газа при комнатной температуре и измерением давления P_0 .

Таблица 1.1

Параметры вакуумного стенда ВАТ-103

Газ	P_0 , торр	T_0 , К	G , мг/с	V_∞ , км/с	Re_0
N_2	50÷100 150÷200	1500÷3000 5000÷6000	10÷25	1.2÷2 4÷5	400÷300 80÷40
$Ar+O_2$	50÷100	2000÷3000	8+(1÷1.5)	1.4÷2.6	80÷50
$Ne+O_2$	100	3000	7+1	2÷2.7	50
He	100÷200	900÷4000	4÷5	3÷7.7	200÷50
$He+O_2$	100÷200	2000÷4000	5+0.5	5.5÷6.5	80÷40

Определение параметров рабочего потока (средней скорости V_∞ и плотности n_∞) проводится с помощью измерения сил, действующих на пробное тело, и измерения интенсивности потока молекул с помощью насадка полного давления. Последний представляет собой цилиндрическую трубку с малым отверстием, присоединенную к ионизационной манометрической лампе, с помощью которой проводится измерение давления в двух положениях: когда отверстие расположено вне потока - p_1 и когда отверстие обтекается потоком

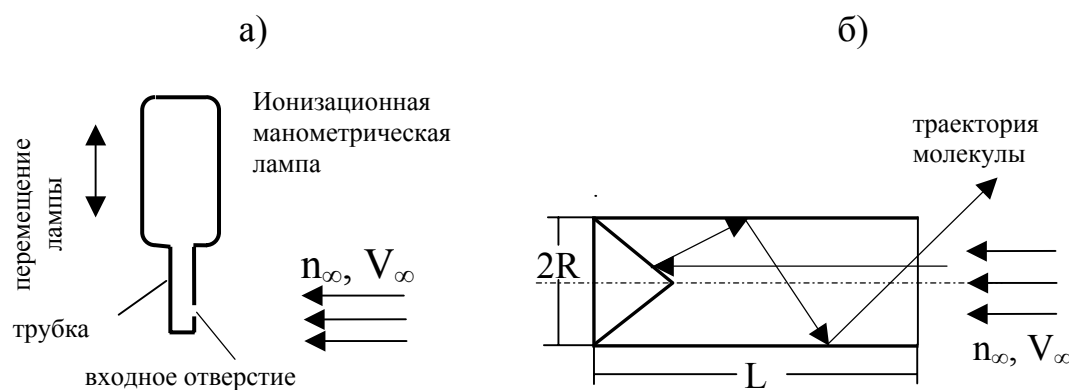


Рис. 2. Схема измерения параметров потока с помощью насадка полного давления (а) и полого цилиндра (б).

рабочего газа - p_2 (см. рис. 2). Приводимые ниже соотношения, с помощью которых определяются параметры рабочего потока, даны для общего случая двухкомпонентного потока, когда скоростные отношения i -ого компонента смеси в набегающем потоке $S_i = V_i / \sqrt{2kT_i / m_i} \gg 1$, а угловой расходимостью потока пренебрегается.

Изменение давления в насадке полного давления, т.е. давление, обусловленное направленным потоком смеси газов за вычетом давления остаточного газа, есть

$$\Delta p = p_2 - p_1 = kT_w(n_{1w} + n_{2w}) \quad (1.2)$$

Здесь n_{iw} - числовые плотности компонентов, T_w - температура газа в насадке полного давления, k - постоянная Больцмана. Соотношение для входящих и выходящих из насадка потоков дает связь между плотностью n_{iw} и плотностью газового компонента n_i в струе

$$n_i V_i = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} n_{iw} u_{iw}, \quad u_{iw} = \sqrt{2 \frac{k}{m_i} T_w} \quad (1.3)$$

Здесь n_i, V_i - числовые плотности и скорости компонентов в струе, u_{iw} - тепловые скорости компонентов в насадке, m_i - массы молекул компонентов. Отношение потоков компонентов в струе можно выразить через отношение потоков в форкамере (индекс 0) и коэффициент обогащения τ

$$\frac{n_2 V_2}{n_1 V_1} = \frac{n_{20} V_{20}}{n_{10} V_{10}} \tau = \frac{G_2}{G_1} \cdot \frac{M_1}{M_2} \tau \quad (1.4)$$

где M_i, G_i - молекулярные массы и массовые расходы компонентов на входе в форкамеру. С учетом (1.3), (1.4) изменение давления запишется в виде

$$\Delta p = 2\sqrt{\pi} k T_w n_1 \frac{V_1}{u_{1w}} \left(1 + \tau \frac{G_2}{G_1} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \right) \quad (1.5)$$

Далее, для определения скоростного напора, необходимо вычислить силу, действующую на полый цилиндр, а именно

$$F = F_1 + F_2 = \left(C_{x1} \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + C_{x2} \frac{\rho_2 V_2^2}{2} \right) A_{cyl} \quad (1.6)$$

где C_{xi} - коэффициент сопротивления, $\rho_i = m_i n_i$, A_{cyl} - площадь миделя. На стенде ВАТ-103 в экспериментах использовался полый цилиндр с коническим дном [15] (рис. 2). Коэффициент сопротивления такого тела при отношении длины цилиндра к радиусу основания $L/R \geq 5$ остается постоянным и может быть выражен в виде

$$C_{xi,cyl} = 2 + \frac{1}{S_i^2} + \frac{\kappa}{V_i} \sqrt{2\pi \frac{k}{m_i} T_{cyl}} = 2 + \frac{1}{S_i^2} + \kappa \sqrt{\pi} \frac{u_{i,cyl}}{V_i} \quad (1.7)$$

Здесь T_{cyl} - температура поверхности цилиндра, $u_{i,cyl}$ - тепловая скорость молекул, соответствующая этой температуре, $\kappa \geq 1$ - параметр, определяющий «факельность» выходящего из цилиндра потока газа, т.е. определяющий отклонение выходящего из цилиндра потока от потока, который бы отражался от плоской поверхности размером, равным входному сечению цилиндра, при полном диффузном отражении. Используя (1.4), для действующей на цилиндр силы имеем

$$\frac{F}{A_{cyl}} = \frac{m_1 n_1 V_1^2}{2} B_F \tag{1.8}$$

$$B_F = 2 \left(1 + \tau \frac{G_2}{G_1} \frac{V_2}{V_1} \right) + \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \tau \frac{G_2}{G_1} \frac{V_2}{V_1} + \kappa_1 \sqrt{\pi} \frac{u_{1,cyl}}{V_1} + \tau \frac{G_2}{G_1} \kappa_2 \sqrt{\pi} \frac{u_{2,cyl}}{V_2}$$

Пусть индекс 1 относится к основному легкому компоненту смеси, а индекс 2 – тяжелому компоненту смеси. Поскольку компонент 2 является небольшой добавкой к основному компоненту смеси, положим

$$\varepsilon = \frac{G_2}{G_1} \ll 1$$

Будем считать, что $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$, $S_1 \approx S_2$ а $V_2/V_1 = 1 + \delta$, причем $\delta \approx \varepsilon$. Пренебрегая членами порядка ε^2 , для (1.8) получаем

$$\frac{F}{A_{cyl}} = \frac{\rho_1 V_1^2}{2} \left\{ (1 + \tau\varepsilon)(2 + S_1^{-2}) + \kappa \sqrt{\pi} \frac{u_{1,cyl}}{V_1} (1 + \tau\varepsilon \sqrt{M_2/M_1}) \right\} \tag{1.9}$$

Расчеты, выполненные методом Монте-Карло при различных законах локального отражения молекул от элементов поверхности, показали, что для параметра κ может быть принята величина $\kappa = 1.1$ [16].

Используя (1.5) и (1.8), можно получить скорость и числовую плотность основного компонента смеси. Для скорости получаем следующее выражение

$$V_1 \left(1 + \frac{1}{2S_1^2} \right) = \sqrt{\pi} u_{1w} \frac{1 + \tau\varepsilon \sqrt{M_2/M_1}}{1 + \tau\varepsilon} \left(\frac{F}{A_{cyl} \Delta p} - \frac{\kappa}{2} \right) \tag{1.10}$$

Как отмечалось выше, давление газа в насадке измеряется с помощью ионизационной манометрической лампы ПМИ-2, показания которой зависят от вида газа. Действительно, давление в лампе и измеряемый вакуумметром ток I связаны соотношением

$$p = K_g I \tag{1.11}$$

где K_g - коэффициент пропорциональности, зависящий от рода газа. Для смеси газов можно получить соотношение, связывающее изменение давления в лампе Δp и изменение тока ΔI , обусловленное рабочим потоком смеси газов, а именно

$$\Delta p = K_{12} \Delta I, \quad K_{12} = K_1 \frac{1 + \tau\varepsilon \sqrt{M_1/M_2}}{1 + \tau\varepsilon \sqrt{M_1/M_2} (K_1/K_2)} \tag{1.12}$$

Для определения K_i проводились тарировки манометрических ламп с помощью градуировочного вакуумного стенда ВГС-1 [17] и непосредственно в рабочей камере с использованием датчика типа «Баратрон», измеряющего абсолютную величину давления. При работе с гелием при комнатной температуре газа в форкамере имеется возможность определения коэффициента K_{He} , используя (1.10) и предельные значения скорости газовой струи, вытекающей из звукового сопла. Для получения необходимых данных по коэффициенту обогащения для газовых смесей, содержащих атомарный кислород, была решена задача об истечении смеси газов в вакуум. Подробно постановка задачи и полученные результаты приведены в п.3. Здесь отметим только, что для смеси $He-O$ в условиях стенда ВАТ-103 коэффициент обогащения τ атомарного кислорода принимался $\tau = 1.7$. Для смесей $Ne-O$

сей $Ne-O$ и $Ar-O$ полагалось $\tau = 1$. При определении параметров потока в однокомпонентной струе в формулах (1.6), (1.9) и (1.12) необходимо положить $\varepsilon = 0$.

2 Результаты эксперимента

Если не интересоваться полем течения около обтекаемого тела, а ограничиться только определением теплового и/или силового воздействия, оказываемого газом на стенку, то в свободномолекулярном течении нет необходимости в знании функции распределения отраженных от поверхности частиц. Это воздействие может быть выражено через коэффициенты аккомодации (σ_i) энергии и импульса или через коэффициенты обмена импульсом (α_i) [1, 18]. Последние определяют полный импульс, переданный элементу поверхности обтекаемого тела набегающим потоком газа. При нормальном падении молекулярных потоков на плоскую модель с изотропной поверхностью тангенциальный импульс отраженного потока равен нулю и силовое воздействие на элемент поверхности определяется только через коэффициенты обмена нормальным импульсом

$$\sigma_n = \frac{P_{ni} - P_{nr}}{P_{ni} - P_{nw}}, \quad \alpha_n = \frac{P_{ni} + P_{nr}}{P_{ni}} \quad (2.1)$$

Здесь P_{ni} - нормальная компонента импульса падающего на поверхность потока, P_{nr} - нормальная компонента импульса отраженного от поверхности потока, P_{nw} - нормальный импульс отраженных частиц при условии, что их функция распределения - максвелловская, соответствующая температуре стенки. Незвестной величиной в (2.1) является нормальный импульс отраженных частиц

$$\beta_n = \frac{P_{nr}}{P_i}, \quad P_i = \frac{\rho_\infty V_\infty^2}{2} (2 + S_\infty^{-2}) \quad (2.2)$$

Величина β_n определяется через измеряемые в ходе эксперимента силы

$$\beta_n = \frac{C_{x,cyl} A_{cyl}}{2A_m} \frac{F_n}{F_{cyl}} - 1 \quad (2.3)$$

Здесь F_n , F_{cyl} - силы, действующие на модель и на полый цилиндр, A_m , A_{cyl} - площадь модели и входного сечения полого цилиндра. Результаты измерения нормального импульса отраженных потоков в зависимости от энергии и рода (массы) молекул газа и материала модели приведены на рис. 3. О погрешности измеренных величин можно судить по разбросу экспериментальных данных либо по указанным в ряде случаев вертикальным отрезкам прямых, которые также основаны на разбросах измеряемых величин. Как следует из рис. 3, погрешность эксперимента может достигать 10-15%.

На рисунках дана также зависимость относительного нормального импульса β_{nw} для случая диффузного отражения потока с температурой, равной температуре модели,

$$\beta_{nw}(T_w, E_\infty) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{kT_w}{E_\infty}} \quad (2.4)$$

Пунктирными линиями на рисунках приведены приближенные зависимости вида

$$\beta_{n,appr} = k_1 \cdot \beta_{nw} [1 + a \cdot (1 - e^{-bE_\infty})] \quad (2.5)$$

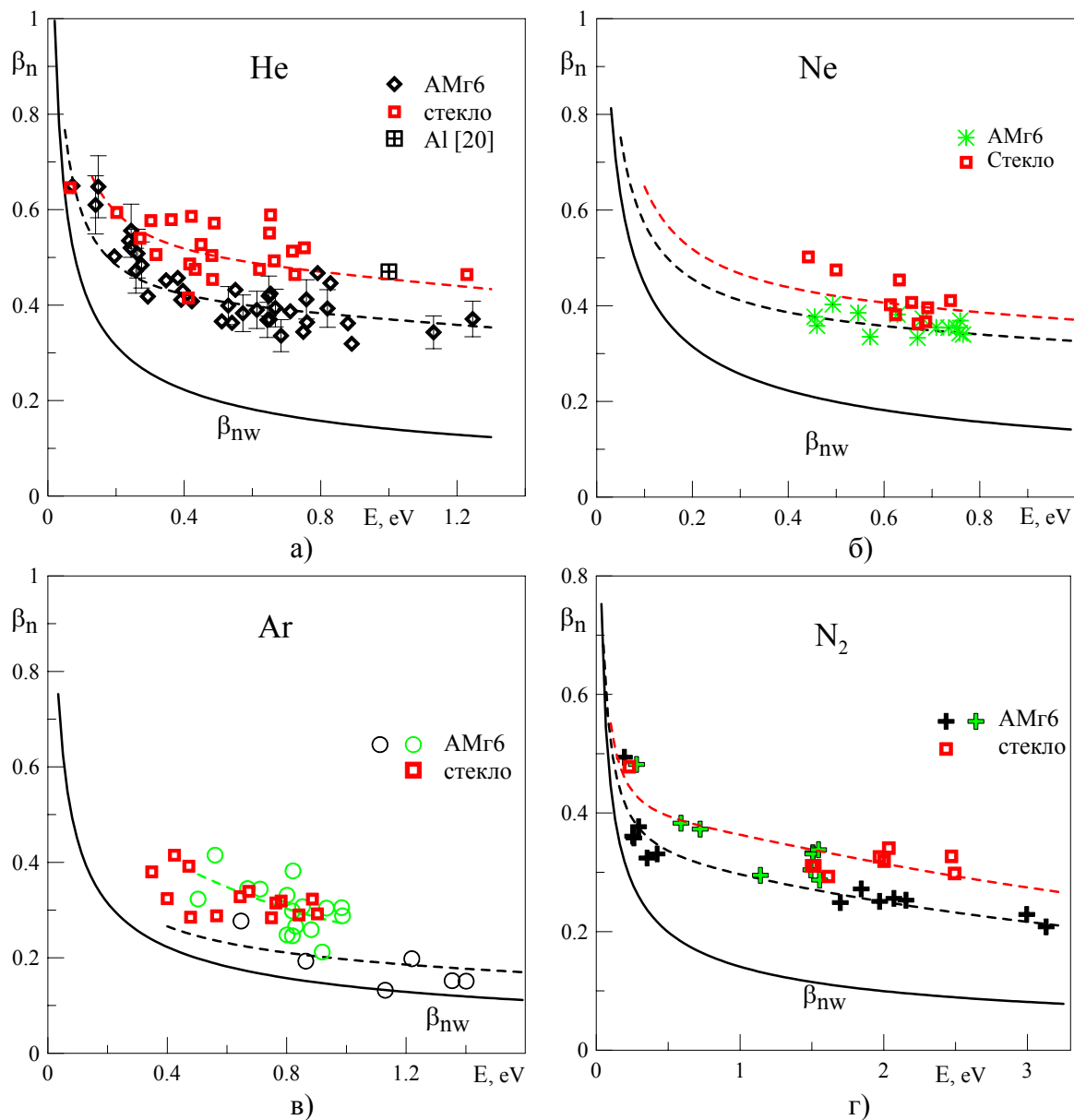


Рис. 3. Зависимости относительного нормального импульса β_n от энергии набегающих молекул при нормальном падении пучка на модели из АМг6 и стекла. Черные и зеленые символы соответствуют двум различным моделям из АМг6.

Параметры k_1, a, b являются функциями рода газа, материала модели и, возможно, зависят от диапазона энергии, в котором получены экспериментальные данные.

Эти зависимости характеризуют основную тенденцию изменения β_n от энергии потока, а именно – с увеличением энергии потока величина относительного нормального импульса уменьшается. Важность выявления такой зависимости определяется возможностью получения оценок для величины β_n в случаях, когда нет экспериментальных данных при заданной величине энергии потока (скорости полета летательного аппарата).

Полученные данные показывают далее, что величина β_n зависит от рода газа. Общая тенденция такова: с уменьшением массы молекул газа величина β_n возрастает. Такая тенденция соответствует теоретическому анализу динамики столкновения молекул газа с атомарно гладкой поверхностью [1, 19], в котором одним из основных параметров является ве-

личина отношения масс молекулы газа M_g и атома твердого тела M_s - $\mu = M_g / M_s$. При $\mu \rightarrow 1$ влияние этого параметра уменьшается. Эта тенденция просматривается и в полученных экспериментальных результатах, в которых влияние молекулярных масс для неона, азота и аргона на величину β_n не столь существенно, как для гелия. Если полагать, что поверхностные слои моделей из анодированного сплава АМгб и стекла состоят из молекул Al_2O_3 и SiO_2 соответственно, то отношение массы неона и средней массы поверхностных атомов близко к единице, а в случае аргона – больше единицы. Влияние структуры поверхности твердого тела на величину β_n также наиболее значительно в случае гелия, для неона различие уменьшается, а для аргона и азота $\beta_n(AMг) \approx \beta_n(\text{стекло})$.

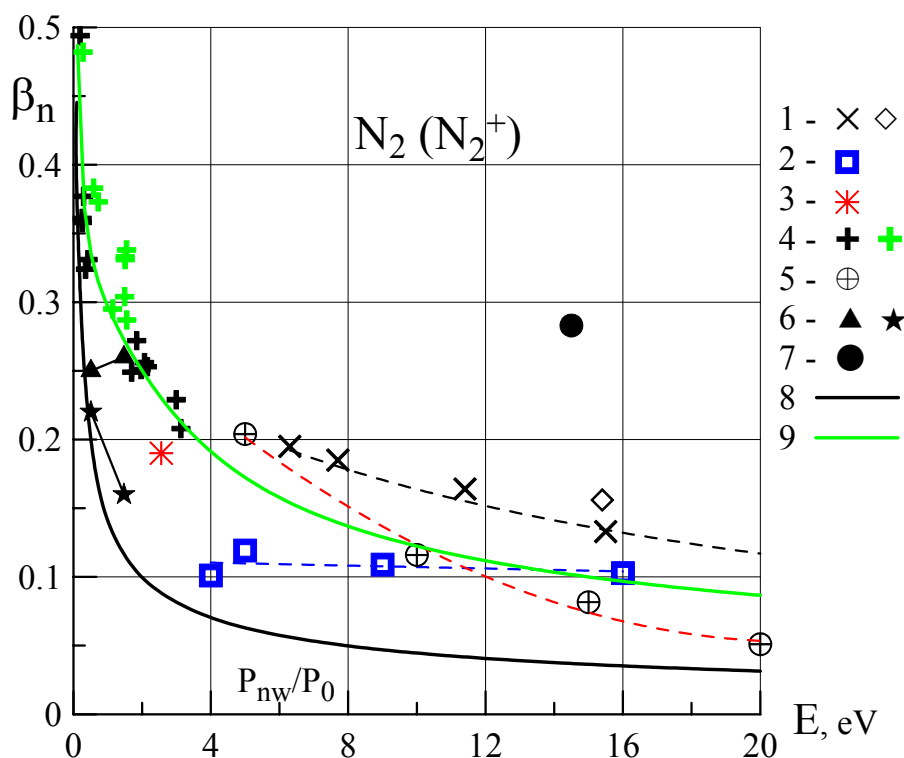


Рис. 4. Зависимость импульса отраженных молекул от энергии потока газа при взаимодействии азота с поверхностями из алюминия и его сплавов.
 1 - [21], 2 - [22], 3 - [14], 4 - данная работа, 5 - [23] (ионы), 6 - [10], 7 - [24] (ионы), 8 - диффузное отражение, 9 - аппроксимация (2.5), $a = 1.75$, $b = 1$, $k_1 = 1$.

На рисунке 3а приведены результаты работы [20], полученные интегрированием измеренной функции распределения отраженных атомов гелия по скоростям. В работе [20] эксперименты проводились с моделями из алюминия. С учетом погрешностей экспериментов и с учетом различия моделей корреляция данных достаточно хорошая. Сопоставление полученных результатов с имеющимися в литературе данными о зависимости $\beta_n(E_\infty)$ для азота и аргона при энергии $E_\infty \leq 20 eV$ для угла падения $\theta = 0$ приведено на рис. 4, 5. Материал поверхности образцов, в основном, алюминий или алюминий – магниевые сплавы. На рисунках приведена и зависимость импульса отраженных молекул при диффузном отражении с температурой поверхности β_{nw} . Имеющиеся данные показывают довольно значительный количественный разброс, но тенденция уменьшения β_n при увеличении энергии прослеживается достаточно ясно.

И в более широком интервале энергий, чем это представлено на рис. 3, зависимость $\beta_n(E_\infty)$ для взаимодействия азота с поверхностью алюминия (и его сплавов) может быть приближенно описана соотношением (2.5) с параметрами $a = 1.75$, $b = 1$, $k_1 = 1$. Эта зависимость приведена на рис. 4.

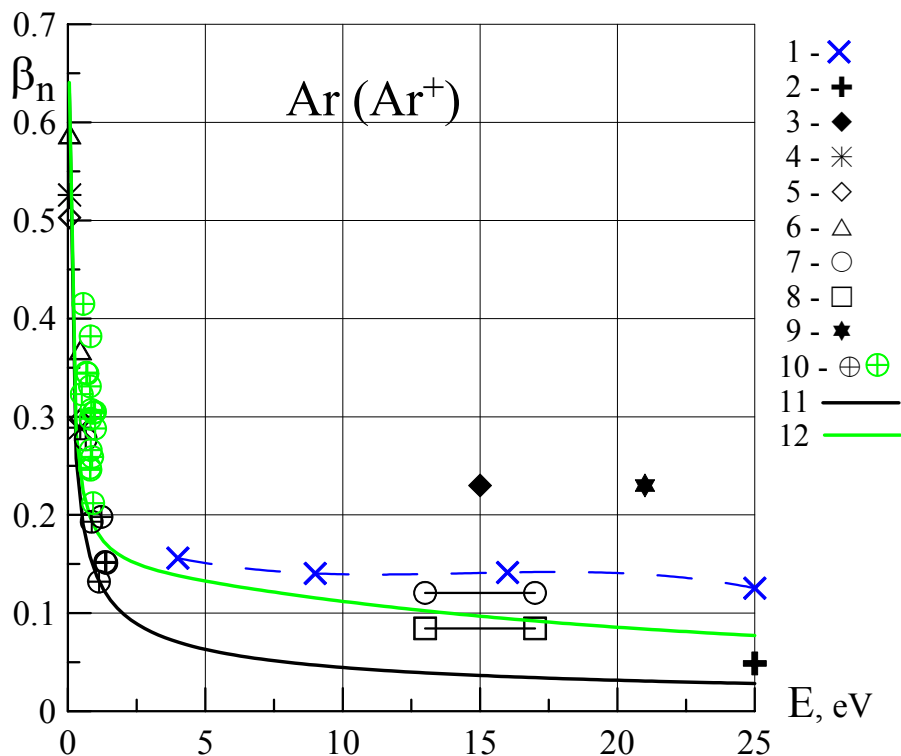


Рис. 5. Зависимость импульса отраженных молекул от энергии потока газа при взаимодействии аргона с различными поверхностями.

1 - *Al* [22], 2 - лак [22], 3 - $Ar^+ \rightarrow Al$ [25], 4 - *Al* (шерох) [11], 5 - *Al* (гладкий) [11], 6 - слюда [11], 7 - АМГ [26], 8 - лавсан [26], 9 - $Ar^+ \rightarrow$ АМГ [24], 10 - АМГ (данная работа), 11 - диффузное отражение, 12 - аппроксимация (2.5), $a = 1.75$, $b = 0.2$, $k_1 = 1$.

Экспериментальные данные по импульсу отраженных атомов при взаимодействии атомов и ионов аргона (Ar) с поверхностью алюминия, его сплавов и некоторых других материалов показывают те же тенденции изменения $\beta_n(E_\infty)$, как и в случае азота (рис.5). Можно отметить лишь более резкий спад зависимости $\beta_n(E_\infty)$ в области энергий $E_\infty \leq 1$ эВ. Также возможно приближенное представление зависимости $\beta_n(E_\infty)$ соотношением типа (2.5) со значением констант $a = 1.75$, $b = 0.2$, $k_1 = 1$.

Кроме данных о взаимодействии нейтральных частиц с поверхностями на рис. 4, 5 приведены данные о взаимодействии соответствующих ионов с поверхностью. Некоторые из этих данных - [23] неплохо согласуются с данными о взаимодействии нейтральных частиц, другие - [24, 25] - сильно отличаются. Несмотря на приводимые в ряде работ доводы об обоснованности замены нейтральных частиц ионами, прямых экспериментальных данных, подтверждающих эти доводы нет [27].

3 Теоретическое определение коэффициента сепарации в струе смеси газов, истекающей в вакуум.

Эксперименты по исследованию взаимодействия высокоскоростного потока смеси газов с поверхностями из различных материалов проводились на стенде ВАТ-103, начиная с 90-х годов прошлого века. В первой серии экспериментов исследовалась деградация материала модели в потоках атомарного кислорода [28]. В этих экспериментах использовалась смесь газов, один из которых – гелий – является основным (мольная доля ~90%) и обеспечивает высокую скорость атомарного кислорода (до 7 км/с). В настоящее время небольшие добавки кислорода (мольная доля до 10%) в основной газ (гелий, неон, аргон) проводятся для обеспечения стабильности разряда в форкамере и расширения режимов его работы, что необходимо для получения потоков в достаточно широком интервале скоростей. Известно, что состав газовой смеси в струе отличается от исходного состава газа в форкамере. По этому вопросу имеется обширная литература (например, большое число публикации содержится в Трудах Международных конференций по динамике разреженных газов, проводившихся в 60-х – 80-х годах прошлого столетия). Однако имеющихся в литературе данных оказалось недостаточно, чтобы ответить на вопрос о величине сепарации газов в потоке в конкретных режимах работы стенда ВАТ-103.

Экспериментальные исследования истечения в вакуум в свободной струе, проведенные в работах [29,30], показали, что в смеси $He + Ar$ при небольших начальных концентрациях аргона (порядка 10%) коэффициент обогащения Ar на оси струи, истекающей из звукового сопла в вакуум, зависит от числа Рейнольдса Re_0 и может достигать величины $\tau = 3.5$. Коэффициент обогащения, введенный в разделе 1- формула (1.4), с учетом равенства скоростей компонентов смеси газов в форкамере, можно написать в виде

$$\tau = \frac{j_h}{j_l} \cdot \frac{n_{l0}}{n_{h0}} \quad (3.1)$$

Здесь j_h, j_l - парциальные потоки тяжелого и легкого компонентов в исследуемой струе, n_{h0}, n_{l0} - парциальные концентрации этих компонентов в исходной смеси. Число Рейнольдса определяется по параметрам газа в форкамере (1.1). Эксперименты показали, что зависимость $\tau(Re_0)$ - немонотонная, а указанное выше максимальное значение τ имеет место при $Re_0 \cong 100$.

Теоретическому исследованию процесс сепарации/обогащения в смеси газов, истекающих из сопла в вакуум, также посвящено достаточно много работ. В работе Шермана [31], основанной на анализе газодинамических уравнений, выявлено влияние различных физических параметров на процесс разделения (отношения масс, мольных концентраций компонентов в исходной смеси, скорости диффузии и др.). Но эксперименты на стенде ВАТ-103 проводятся при числах $Re_0 \cong 100 - 200$. При столь малых числах Рейнольдса необходимо использовать кинетический подход. Имеющиеся теоретические работы, использующие кинетический подход, как правило, исследуют различные вопросы: скорость скольжения, температурная неравновесность и т.д., полагая, что на звуковой линии состав потока не изменился, а скорости компонентов одинаковые.

Ниже задача об истечении смеси газов в вакуум рассматривается в постановке, моделирующей работу стенда ВАТ-103, а решение кинетического уравнения Больцмана проводится методом прямого статистического моделирования [32, 33]. Особенности применяемых в данной работе алгоритмов расчета столкновений молекул изложены в [34].

Постановка задачи заключается в следующем (рис. 6): газовая смесь поступает в форкамеру и через цилиндрическое сопло расширяется в вакуумной камере. Диаметр форкаме-

ры d_f превышал диаметр сопла d_* в 4-5 раз, а ее длина $L_f = 1.2d_f$, длина сопла L_c в проводимых ниже расчетах равнялась его диаметру. Смесь газов через границу Γ_1 втекала в форкамеру с максвелловской функцией по скоростям для каждого компонента. Средняя скорость этого потока $U_{x\infty}$ определялась только в x – направлении, и была одинаковой для обоих компонентов. Величина $U_{x\infty}$ подбиралась таким образом, чтобы согласовывались потоки компонентов в форкамере и сопле. При принятых геометрических размерах скорость

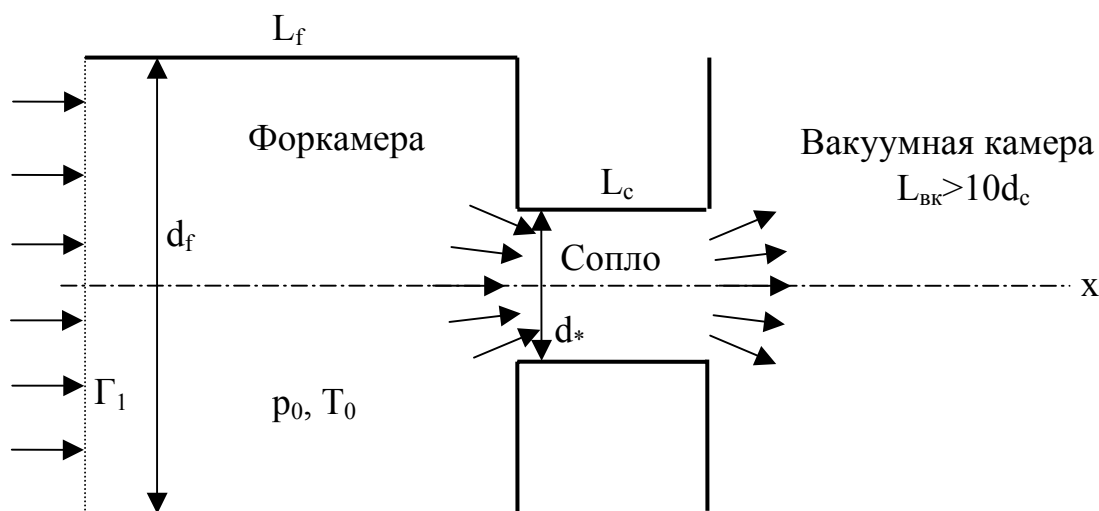


Рис. 6. Расчетная схема истечения смеси газов в вакуум.

$U_{x\infty}$ оказывается малой величиной, соответствующей числу Маха $M_\infty = 0.01 - 0.02$ в зависимости от числа Рейнольдса. Отражение молекул газа от стенок форкамеры и сопла предполагалось диффузным с температурой равной температуре стенок. Температура стенок сопла T_c в общем случае могла отличаться от температуры стенок форкамеры T_f . Это различие характеризуется параметром $t_w = T_c / T_f$: в холодном режиме работы стенда (без нагревания газа в форкамере) - $t_w = 1$, при нагревании газа – горячий режим - $T_f > T_c$ и $t_w < 1$.

При расчете смеси $He + Ar$ сечения столкновения атомов либо принимались одинаковыми, либо - на основе данных [35] - определялись так

$$\sigma_{lh} = 1.3 \cdot \sigma_{ll}, \sigma_{hh} = 1.7 \cdot \sigma_{ll} \quad (3.2)$$

Здесь σ_{ll} , σ_{lh} , σ_{hh} - сечения взаимодействия легких атомов, легких с тяжелыми и тяжелых атомов, соответственно. Во всех случаях принималось, что зависимость коэффициентов вязкости от температуры одинаковая $\mu \propto T^{2/3}$. При расчете гелий – кислородной смеси $He + O$ в большинстве расчетов сечения столкновения всех атомов принимались одинаковыми. В ряде расчетов полагалось

$$\sigma_{lh} = 1.2 \cdot \sigma_{ll}, \sigma_{hh} = 1.44 \cdot \sigma_{ll} \quad (3.3)$$

Результаты расчетов коэффициента обогащения τ от числа Рейнольдса Re_0 для исходного состава смеси $n_{h0} : n_{l0} = 1 : 9$ приведены на рис. 7 вместе с данными экспериментов [29, 30] и теорией [31]. Прежде всего, отметим, что теория Шермана [31] является асимптотической и справедлива при больших значениях числа Рейнольдса ($\varepsilon = 1/Re \rightarrow 0$). Поэтому

распространение ее на малые числа Рейнольдса является скорее демонстрацией возможностей этой теории. Как следует из приведенных данных, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными при соотношении сечений, описываемых соотношениями (3.2). Для одинаковых сечений взаимодействия коэффициент обогащения увеличивается, что вполне объяснимо усилением процесса диффузии в этом случае.

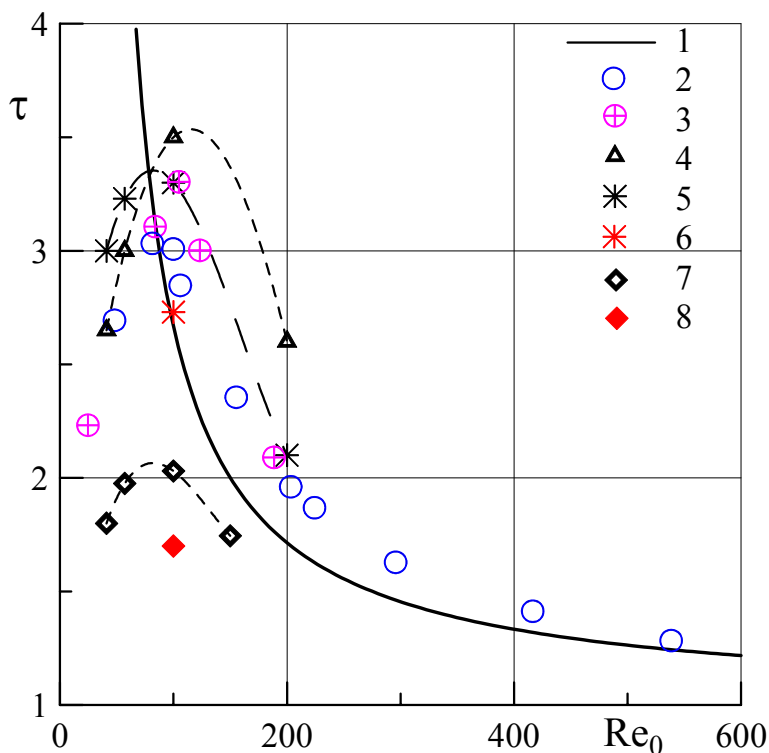


Рис. 7. Зависимость коэффициента обогащения от числа Рейнольдса.

Смесь $He + Ar$: 1 - теория Шермана [31], 2 - работа [29], 3 - [30],

4 - $t_w = 1$, $\sigma_{ij} = const$,

5 - $t_w = 1$, σ_{ij} по (3.2), 6 - $t_w = 0.25$, σ_{ij} по (3.2).

Смесь $He + O$: 7 - $t_w = 1$, $\sigma_{ij} = const$, 8 - $t_w = 0.25$, σ_{ij} по (3.3).

На рисунке 7 приведены и результаты расчетов для смеси $He + O$. В этом случае также как и для предыдущей смеси, $n_{h0} : n_{l0} = 1 : 9$. Как видно из этих данных уменьшение отношения масс в смеси приводит к уменьшению коэффициента обогащения τ пропорционально $\sqrt{M_h / M_l}$, что находится в соответствии с диффузионной теорией. Значительное влияние на величину τ в смеси $He + Ar$ оказывает изменение сечений взаимодействия атомов и различие в температурах стенок форкамеры и сопла. Для смеси $He + O$ более сильным оказалось влияние температуры стенок сопла: при изменении t_w от 1 до 0.25 коэффициент обогащения уменьшился на 18% ($Re_0 = 100$). Вариации сечений столкновения (2.4) для расчета с параметрами $Re_0 = 100$ и $t_w = 0.25$ не привели к сколь либо заметным изменениям коэффициента обогащения по сравнению с расчетам при одинаковых сечениях взаимодействия. Различия составили около 1%. На основе приведенных данных коэффициент обогащения атомарного кислорода в струе смеси газов $He + O$ принимался равным $\tau = 1.7$ в горячем режиме работы стенда ВАТ-103.

Заключение

На основе имеющихся в литературе данных и экспериментальных исследований в вакуумной аэродинамической установке ВАТ-103 проведен анализ взаимодействия высокоскоростных молекул различных газов с твердыми поверхностями. Исходным положением при проведении такого анализа было изучение зависимостей импульсов отраженных молекул от параметров, характеризующих падающий на поверхность поток газа и материал поверхности.

Исследование взаимодействия свободномолекулярных потоков с пластинами из анодированного алюминий – магниевого сплава АМг6 и стекла проводилось при следующих скоростях потоков: азота N_2 – 1.2-4.6 км/с, He – 1.8-7.7 км/с, Ne - 2.0-2.7 км/с, Ar - 1.4-2.6 км/с. Показано, что в этом диапазоне скоростей при нормальном падении потока на поверхность отраженный нормальный импульс тем больше, чем меньше масса и чем меньше энергия молекул в потоке.

Анализ имеющихся экспериментальных данных по взаимодействию высокоскоростных молекул азота и атомов аргона с энергией до 25 эВ с поверхностями алюминия и сплавов алюминия показал, что при угле падения $\theta = 0$ зависимость нормального импульса отраженных от поверхности молекул от энергии набегающего потока E_∞ приближенно может быть описана выражением вида

$$\beta_n = k_1 \beta_{nw} [1 + a(1 - e^{-bE_\infty})].$$

Входящие в эту формулу константы равны: $a = 1.75$, $b = 1$, $k_1 = 1$ - для азота и $a = 1.75$, $b = 0.2$, $k_1 = 1$ - для аргона.

Проведены расчетные исследования истечения струи смеси газов в вакуум при условиях, моделирующих рабочие параметры стенда ВАТ-103. Получены коэффициенты обогащения тяжелого компонента в смесях гелий-аргон и гелий-атомарный кислород при малых числах Рейнольдса при разных сечениях межатомных столкновений и разных температурах стенок форкамеры и сопла. Полученные расчетные данные по коэффициенту обогащения тяжелого компонента использовались для анализа параметров потока на стенде ВАТ-103.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 07-08-00500 и 05-01-00792) и программы поддержки ведущих научных школ (проект НШ-4272.2006.1).

Литература

1. Баранцев Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М.: Наука, 1975, 344 с.
2. Ковтуненко В.М., Камеко В.Ф., Яскевич Э.П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. Киев: Наукова Думка, 1977, 156 с.
3. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. М.: Машиностроение, 1982, 176с.
4. Hurlbut F.C. Gas surface interactions: recent observations and interpretations // Proc. 20st Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Ed. Ching Shen, Peking Univ. Press, Beijing, China, 1997, pp. 355-367.
5. Новиков Л.С. Современное состояние и перспективы исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2т./ Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов.- М.:КДУ,2007, С.10-38.
6. Надирадзе А.Б., Шапошников В.В., Хартов В.В., Максимов И.А., Иванов В.В., Смирнов В.А. Моделирование процессов формирования собственной внешней атмосферы и загрязнения поверхности космических аппаратов. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2т./ Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов.- М.:КДУ,2007, С.39-59
7. Гужова С.К., Новиков Л.С., Черник В.Н., Скурат В.Е. Воздействие атомарного кислорода на материалы и элементы конструкции низкоорбитальных космических аппаратов. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2т./ Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов.- М.:КДУ,2007, С.171-206.
8. Ерофеев А.И., Омелик А.И. Моделирование натуральных аэродинамических условий полета в верхних слоях атмосферы. Труды ЦАГИ, 1975, Вып. 1641, С. 40.
9. Баринов И.С., Жестков Б.Е., Омелик А.И., Орлова З.Т. Аэродинамическая установка со свободномолекулярным потоком и высокой температурой торможения // Теплофизика высоких температур, 1973, Т.ХI, №3, С. 602-608
10. Cook. S.R., Hoffbauer M. A. Absolute momentum accommodation in gas-surface scattering // Proc. 20st Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics. Ed. Ching Shen, 1997, Peking Univ. Press, Beijing, China, P. 467-472.
11. Abuaf N., Marsden D.G.H. Momentum accommodation of Argon in the 0.06 to 5 eV range // Proc. 5th Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics. Ed. Brundin C.L. Academic Press, New York, 1967, V. 1, P. 199-210.
12. Ерофеев А.И. Об обмене энергией и импульсом между атомами и молекулами газа и поверхностью твердого тела // ПМТФ,1967, № 2, С.135-140.
13. Musanov S.V., Nikiforov A.P., Omelik A.I., Freedlender O.G. Experimental determination of impulse transfer coefficients in hypersonic free molecular flow and distribution function recovery of reflected molecules // Proc. 13th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Eds. Belotserkovskii et al., 1982, V. 1, P. 669-676.
14. Freedlender O.G., Nikiforov A.P. Modelling aerodynamic atmospheric effects on the space vehicle surface based on test data // Proc. 2nd Int. Symp. Environmental testing for space programmes, held at ESTEC, 12 – 15 October 1993. (ESA WPP-066).
15. Омелик А.И. Экспериментальное моделирование аэродинамических условий полета орбитального летательного аппарата в свободномолекулярной области. Диссертация на соискание степени доктора техн. наук, ЦАГИ, 1983.
16. Атаманенко А.В. Разработка, сопоставление и использование двух методов определения характеристик обтекания сложных тел молекулярным потоком газа. Дисс. на соискание степени канд. техн. наук, МАИ, 1990.
17. Липин А.В., Титов В.А. Экспансионный стенд для градуировки вакуумметров // Вакуумная техника и технология, 1994, Т. 6, №4, С. 26-31.
18. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М., «Наука», 1967, 440 с.

19. Ерофеев А.И. Расчет столкновения атома газа с поверхностью для различных моделей твердого тела // Ученые записки ЦАГИ, 1972, Т. 3, №5, С. 40-46.
20. Liu S-M., Sharma P.K., Knuth B.L. Satellite drag coefficients calculated from measured distributions of reflected Helium atoms // AIAA Journal, 1979, V. 17, № 12, P. 1314-1319.
21. Boring J.W., Humphris R.R. Momentum transfer to solid surfaces by N₂ molecules in the energy range 7-200 eV // Proc. 6th Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Eds. Trilling L. and Wachman H., 1969, V. 2, P. 1303-1310.
22. Doughty R.O., Schaetzle W.J. Experimental determination of momentum accommodation coefficients at velocities up to and exceeding Earth escape velocity // Proc. 6th Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Eds. Trilling L. and Wachman H., 1969, V. 2, P. 1035-1054.
23. Knechtel E.D., Pitts W.C. Normal and tangential momentum accommodation for Earth satellite conditions // Astronautica Acta, 1973, V. 18, № 3, P. 171-184.
24. Шувалов В.А. О передаче импульса газовых ионов поверхности твердого тела // ПМТФ, 1984, № 3, С. 24-32.
25. Knechtel E.D., Pitts W.C. Experimental momentum accommodation on metal surfaces of ions near and above Earth-satellite speeds // Proc. 6th Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Eds. Trilling L. and Wachman H., 1969, V. 2, P. 1257-1266.
26. Басс В.П., Ефимов Ю.П., Петров О.В. и др. Экспериментальное исследование параметров взаимодействия гиперзвукового нейтрального потока аргона с обтекаемыми поверхностями // Труды VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженного газа, МАИ, 1986, С. 99-103.
27. Collins F.G., Knox E.C. Parameters of Nocilla gas/surface interaction model from measured accommodation coefficients// AIAA Journal, 1994, V. 32, №4, P. 765-773.
28. Nikifirov A.P., Skurat V.E. Kinetics of polyimide etching by supersonic beams consisting of atomic and molecular oxygen mixtures // Chemical physics letters, 1993, Vol. 212, № 1,2, P.43-49.
29. Anderson J. Separation of gas mixtures in free jet // AIChE J., November, 1967.
30. Боровков И.С., Санкович В.М. Сепарация бинарной газовой смеси в свободной струе, истекающей в вакуум // Ученые Записки ЦАГИ, 1970, Том 1, № 3, С. 109 – 113.
31. Sherman F.S. Hydrodynamical theory of diffusive separation in mixtures in free jet // Physics of Fluids, 1965, Vol. 8, No 5, P. 773 – 779.
32. Bird G.A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Oxford Univ. Press, Oxford, 1994.
33. Белоцерковский О.М., Яницкий В.Е. Статистический метод частиц в ячейках для решения задач динамики разреженного газа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. I – 1975, Т. 15, №5, С. 1195-1208. II – 1975, Т. 15, № 6, С. 1553-1567.
34. Гусев В.Н., Ерофеев А.И. Интерференция косого скачка с головной ударной волной при обтекании цилиндра разреженным газом // Известия РАН, МЖГ, 2004, №5, С.171-180.
35. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961, 930 с.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2008 г.