

14. Зарвин А. Е., Шарафутдинов Р. Г. Измерение параметров молекулярного пучка в присутствии остаточного газа. — В кн.: Динамика разреженных газов. Новосибирск, изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1976.
15. Scinner G. T., Moysis J. Experimental study of the collimation problem in a high-intensity molecular beam. — «Phys. Fluids», 1965, vol. 8, N 3.

УДК 533.932—533.601.18 : 539.198

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АККОМОДАЦИИ ЭНЕРГИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПОТОКА РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Губин, Н. П. Резниченко, В. А. Шувалов

(Днепропетровск)

При исследовании особенностей взаимодействия тел с газовыми потоками одним из наиболее существенных параметров является коэффициент аккомодации энергии частиц потока на поверхности тела. Лабораторные измерения коэффициентов аккомодации сопряжены с трудностями получения потоков со скоростями, близкими к скоростям движения тел в ионосфере. В данной работе приведены результаты измерения значений α_i для широкого диапазона скоростей потока $u_\infty \cong 6,5 - 25$ км/с.

Выбор исследуемого тела определяется как требованиями наличия бесстолкновительного режима течения, так и техническими удобствами измерений в потоке. Наиболее удобным, очевидно, является насадок с плоской рабочей поверхностью. Уравнение энергетического баланса для рабочей поверхности такого насадка, ориентированной перпендикулярно вектору скорости набегающего потока, запишется в виде [1]

$$Q_n + Q_\alpha + J + A\varepsilon\sigma(T_0^4 - T_w^4) - \frac{\partial}{\partial x} \left(-AK_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) = 0,$$

где $Q_\alpha = Q_i = (\dot{I}_i/e)\{\xi + \alpha_i(W_i + e|V|) - \gamma_i\kappa\}$ при $V < 0$; $Q_\alpha = Q_e = (\dot{I}_e/e)(2kT_e + e|V| + \kappa)$ при $V > 0$; $Q_\alpha = Q_i + Q_e$ при $V \leq 0$. Здесь Q_n — полное количество тепла, переданное зонду нейтралами за единицу времени; Q_α — количество тепла, переданное зонду заряженными частицами; J — энергия электрического нагрева; A — площадь поверхности; ε — коэффициент излучения; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\xi = h_i - \kappa$ — разность между энергией ионизации и работой выхода электрона; γ_i — коэффициент вторичной эмиссии; T_0 — температура стенок рабочей части установки; K_w — коэффициент теплопроводности; $\dot{I}_{e,i}$ — зондовый ток; W_i — энергия ионов, переносимая на границу раздела плазма — слой; V — разность потенциалов, пробегаемая частицей в приэлектродном слое.

В ходе эксперимента при работе с термоанемометрическими зондами одновременно снимаются две характеристики: $T_w = T_w(V)$ — температурная и $\dot{I}_\Sigma = \dot{I}_\Sigma(V) = \dot{I}_e + \dot{I}_i$ — вольт-амперная. На температурной характеристике всегда имеются точки с равными температурами при разных потенциалах зонда $T_w^A(V^A < 0) = T_w^B(V^B > 0)$ [1]. Из уравнения энергетического баланса для таких точек получим $Q_i^A = Q_e^B$ или

$$\frac{I_i^A}{e} \{ \xi + \alpha_i (W_i + e | V^A |) - \gamma_i \kappa \} = \frac{I_e^B}{e} (2kT_e + e | V^B | + \kappa).$$

Это соотношение позволяет определять коэффициент аккомодации энергии ионов α_i на материале рабочей поверхности термоанемометрических зондов.

Экспериментальные исследования проводились на плазменной газодинамической установке в потоке частично ионизованного газа низкой плотности, генерируемом плазменным ускорителем с ионизацией рабочего тела электронным ударом. Схема источника такого типа приведена в [2]. Работа источника характеризовалась следующими параметрами: разрядный ток $\sim 0,1-8,0$ А, разрядное напряжение относительно корпуса рабочей камеры ~ -120 В, максимальная напряженность магнитного поля в центре на оси источника ~ 650 Э.

Ускоренный поток плазмы интенсивностью $j_{\infty} \simeq 10^{15} - 10^{17}$ ион/см²·с поступал в рабочую камеру, давление остаточных газов в которой составляло $\sim 7 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Измерения выполнялись для широкого диапазона энергии ионов потока при давлении в рабочей камере $(0,87-1,6) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Напряженность магнитного поля в точке измерения не превосходила ~ 5 Э.

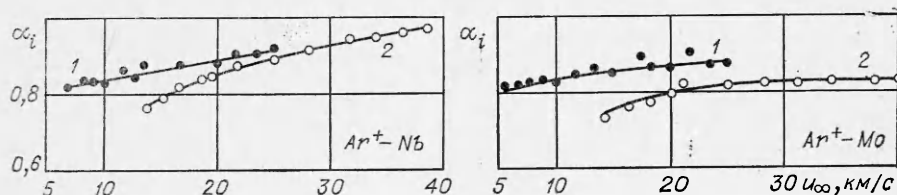
Для измерения коэффициентов аккомодации энергии ионов использовался плоский термоанемометрический зонд, выполненный в виде диска $\delta = 0,12$ мм с рабочей поверхностью диаметром 3,5 мм, к тыльной стороне которого присоединены нить токоподвода диаметром 0,1 мм и термопара диаметром 0,15 мм. Боковая поверхность датчика, термопара и элементы токоподвода изолировались от контакта с плазмой керамической трубкой.

Вольт-амперные характеристики $\lg \dot{I}_e = f(V)$ имели четко выраженный прямолинейный участок. Это позволило определить температуру электронов $T_e \simeq 2,5-4,1$ эВ обычным способом [3].

Потенциал плазмы ϕ_0 определяется методом второй производной, а также по электронной части зондовой характеристики, построенной в полупрологарифмическом масштабе. Это определило достаточно высокую точность измерения энергии ионов потока W_i , переносимой частицами к поверхности раздела плазма — слой. Полученные значения удовлетворительно согласуются со значениями W_i , вычисленными в предположении, что ускоряющий потенциал равен разности между потенциалом анода источника и локальным потенциалом плазмы. Разброс полученных значений W_i не превосходит $\pm 4,5\%$.

Гребенка датчиков с рабочими поверхностями, изготовленными из различных материалов, помещалась в высокоскоростной поток частично ионизованного газа низкой плотности. Для контроля локальных значений рабочих параметров потока и ориентации датчиков относительно вектора скорости потока u_{∞} использовался тонкий цилиндрический зонд, изготовленный из молибденовой нити диаметром 0,09 и длиной 4,0 мм. Пик ионного тока, измеряемого таким зондом при вращении вокруг горизонтальной и вертикальной осей, соответствует ориентации зонда вдоль по потоку [4].

Зонды изготавливались из молибдена, ниобия, алюминия, алюминиевых сплавов АМг6-М, Д16Т, обычных сталей 2 Х 13, 12 Х 18Н10Т, ст. 25 и кремниевого элемента панелей солнечных батарей. Рабочие поверхности зондов из Мо и Nb соответствовали седьмому классу чистоты, поверхности остальных зондов — рабочему состоянию поверхностей этих материалов [5]. Непосредственно перед проведением измерений рабочие поверхности зондов облуживались потоком плазмы, а также в течение 15—20 мин подвергались принудительной бомбардировке электронами при положитель-

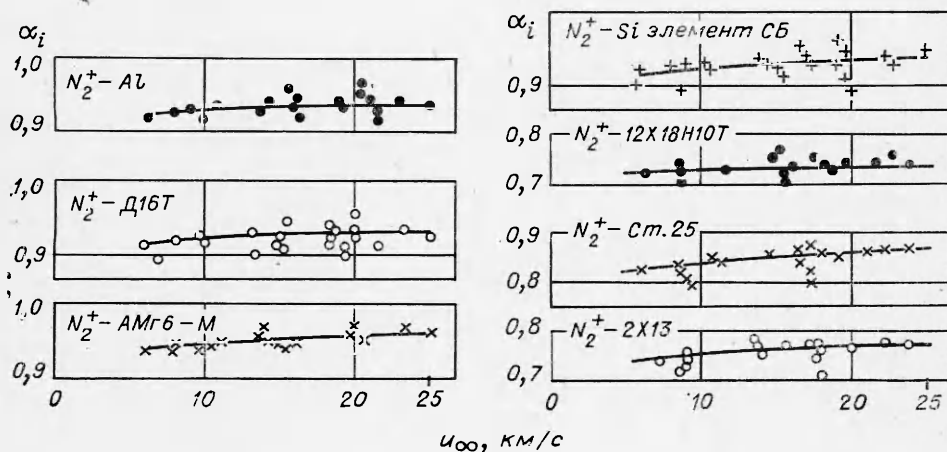


Фиг. 1

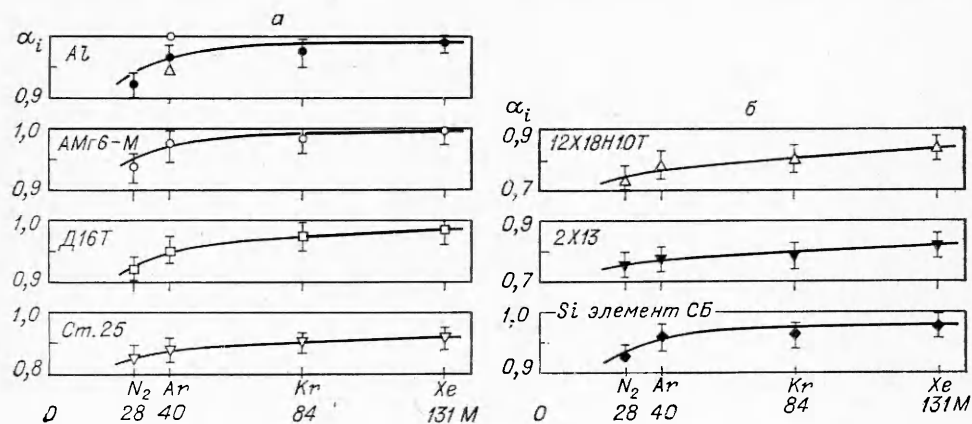
ных потенциалах ~ 250 В и прогреву до температур, при которых не происходит разрушение материала зонда. Работа выхода чистых материалов определялась по табличным данным [6], для оценки коэффициента вторичной эмиссии γ_i использовались данные [7].

Результаты измерения коэффициентов аккомодации ионов Ar^+ на молибдене и ниобии показаны на фиг. 1. Точки кривой 2 — результаты измерения α_i калориметрическим методом работы [8]. Следует отметить, что при определении α_i точки кривой $T_w = T_w(V)$ выбирались таким образом, чтобы $e|VA| \ll W_i$. При энергиях ионов $W_i \ll 20$ эВ для определения α_i использовалось соотношение $(Q_i + Q_e)^A = Q_e^B$, где $Q_e = (\dot{I}_e/e)(2kT_e + \kappa)$. В этом случае электронный ток $\dot{I}_e^A$ определялся с помощью линейной экстраполяции ионной ветви зондовой характеристики. Приведенные данные свидетельствуют об удовлетворительном соответствии результатов измерения α_i для Ar^+ на Mo и Nb, выполненных независимыми методами. Кроме того, результаты измерений на Mo (кривая 1) удовлетворительно согласуются со значениями $\alpha_i = 0,75 \pm 0,05$ и $\alpha_i = 0,81; 0,84$ для ионов Ar^+ с энергиями $W_i \simeq 21\text{--}141$ эВ, полученными в [9, 10]. Результаты измерения коэффициентов аккомодации энергии ионов N_2^+ на поверхностях других материалов приведены на фиг. 2. Общим для этой серии измерений является увеличение α_i с ростом скорости потока. Последнее качественно согласуется с результатами измерений коэффициента аккомодации нейтралов воздуха в интервале чисел Маха 1,5—3,0 на проволоке вольфрам-ренийевого сплава, покрытого золотом и палладием [11].

Фиг. 3 иллюстрирует характер изменения α_i ионов N_2^+ , Ar^+ , Kr^+ и Xe^+ при $u_\infty \simeq 10$ км/с. Для Ar^+ на Al светлая точка — результаты



Фиг. 2



Фиг. 3

работы [10], треугольник — данные [9]. Температура поверхности зондов при измерениях равнялась $T_w = 304\text{--}318$ К. Для контроля температуры поверхности зондов при измерении α_i перед проведением экспериментов датчики предварительно тарировались в термостате, определялась зависимость $T_w = T_w(E)$, где E — ЭДС термопары. Практически на всех материалах с ростом молекулярного веса M бомбардирующего поверхность иона наблюдается увеличение коэффициента аккомодации. На фиг. 3 обозначен разброс значений α_i для различных серий измерений. Погрешность измерений α_i не превосходит $\sim 7,5\%$ для чистых металлов и $\sim 10\%$ для сплавов. Некоторое увеличение погрешности для сплавов обусловлено неопределенностью выбора значений работы выхода χ и коэффициента вторичной эмиссии γ_i .

Поступила 5 VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Хазен А. М., Шувалов В. А. Применение термоанемометра — зонда Ленгмюра для диагностики разреженной плазмы. — ТВТ, 1969, т. 7, № 5.
2. Сапожников Г. И. Экспериментальные исследования потока ускоренных ионов и его взаимодействия с обтекаемыми моделями. — Учен. зап. ЦАГИ, 1971, т. 2, № 1.
3. Грановский В. А. Электрический ток в газе. М., Гостехиздат, 1952.
4. Sanmartin J. R. End effect in Langmuir probe response under ionospheric satellite conditions. — «Phys. Fluids», 1972, vol. 15, N 6.
5. Ковтуненко В. М., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. Киев, «Наукова думка», 1977.
6. Физико-химические свойства элементов. Киев, «Наукова думка», 1965.
7. Добрецов Л. Н., Гомоюмова Н. И. Электронная и ионная эмиссия. М., «Наука», 1968.
8. Гусев К. И., Рыжов Ю. А., Шкарбан Н. И. Измерение коэффициента аккомодации энергии при бомбардировке металлов положительными ионами инертных газов. — В кн.: Аэродинамика разреженных газов. Л., изд. Ленингр. ун-та, 1974, № 7.
9. Compton K. T. Accommodation coefficient of gaseous ions at cathodes. — «Proc. Nat. Acad. Sci.», 1932, vol. 18, N 4.
10. Compton K. T., Lamar E. S. A test of the classical «Momentum transfer theory of accommodation coefficients of ions at cathodes». — «Phys. Rev.», 1933, vol. 44, N 9.
11. Перов С. П. Измерение коэффициента аккомодации воздуха на металлических нитях. — «Труды ЦАО», 1965, вып. 61.