



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Шувалов, Н. П. Резниченко, А. В. Гаврилов, Исследование параметров взаимодействия потока разреженной плазмы с электропроводящими поверхностями с помощью термоанемометрических зондов, *ТВТ*, 1981, том 19, выпуск 3, 649–651

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.211.24.175

9 ноября 2024 г., 13:26:39



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 533.932:533.601.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА
РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ

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

Термоанемометрические зонды успешно используются для диагностики частичного ионизованного газа. Применение их позволяет определять комплекс локальных значений параметров плазмы, таких, как температуры электронов и нейтралов, концентрации заряженных и нейтральных частиц, потенциал пространства [1, 2]. Точность измерения параметров разреженной плазмы с помощью термоанемометрических зондов в значительной степени определяется знанием величины коэффициента аккомодации энергии частиц и работы выхода. В [3] предложена методика определения коэффициента аккомодации энергии ионов α_i потока разреженной плазмы, точность измерения которого также существенно зависит от величины работы выхода χ . Значения работы выхода, приводимые в литературе, не всегда соответствуют состоянию поверхности зонда в период измерений; положение усугубляется для зондов, изготовленных из сплавов. Представляется целесообразным при проведении измерений определять значения коэффициентов аккомодации энергии и работы выхода, соответствующие данному состоянию поверхности и режиму исследований, независимым образом.

В данной работе исследована возможность независимого определения значений работы выхода и коэффициентов аккомодации энергии ионов, соответствующих конкретному режиму измерения, при бомбардировке поверхности термоанемометрических зондов.

В [3] для определения коэффициентов аккомодации энергии при бомбардировке поверхности термоанемометрических зондов ионами потока разреженной плазмы использовалось соотношение, полученное из уравнения энергетического баланса, записанного для двух точек с равной температурой $T_w^A (V < 0) = T_w^B (V > 0)$ на температурной характеристике $T_w = T_w(V)$, снимаемой синхронно с вольт-амперной $I_\Sigma = I_\Sigma(V)$ характеристикой

$$(I_e^A / e) \{h_i - \chi(1 + \gamma_i) + \alpha_i(W_i + e|V^A|)\} = (I_e^B / e) (W_e + e|V^B| + \chi). \quad (1)$$

Здесь h_i — потенциал ионизации; γ_i — коэффициент вторичной эмиссии; W_α — энергия, переносимая частицей сорта α на поверхность раздела плазма — слой; I_α — зондовый ток; V — разность потенциалов, пробегаемая частицей в приэлектродном слое.

С другой стороны, коэффициент аккомодации энергии ионов может быть определен как отношение воспринимаемой зондом мощности к номинальной мощности потока ионов

$$\alpha_i = P_{\text{воспр}} / P_{\text{ном}} = P_e^B / P_0 = I_e^B (W_e + e|V^B| + \chi) / (I_{0i} W_i), \quad (2)$$

где $P_0 = I_{0i} W_i / e$; I_{0i} — ионный ток насыщения на зонд, ориентированный перпендикулярно вектору скорости набегающего потока. При этом воспринимаемая зондом мощность также определяется из уравнения энергетического баланса для двух точек с равными температурами на температурной характеристике ($P_i^A \approx P_e^B = P_{\text{воспр}}$).

Соотношения (1), (2) позволяют определять в процессе измерений коэффициент аккомодации энергии ионов

$$\alpha_i = \frac{h_i + (1 + \gamma_i)(W_e + e|V^B|)}{W_i \{I_{0i}/I_i^A - (1 + e|V^A|/W_i) + (1 + \gamma_i)I_{0i}/I_e^B\}} \quad (3)$$

и работу выхода

$$\chi = \frac{h_i - (W_e + e|V^B|) [1 - (1 + e|V^A|/W_i) I_i^A / I_{0i}] I_e^B / I_i^A}{1 + \gamma_i + [1 - (1 + e|V^A|/W_i) I_i^A / I_{0i}] I_e^B / I_i^A} \quad (4)$$

независимым образом.

Экспериментальные исследования проводились на плазменной газодинамической установке в потоке разреженной плазмы, генерируемом ускорителем с ионизацией

Таблица 1

Материал поверхности	Работа выхода, эВ				Рекомендуемое значение из [9]
	N ₂ ⁺	Ar ⁺	Kr ⁺	Xe ⁺	
Al	4,28	4,17	4,22	4,24	4,25
Ti	4,09	4,16	4,2	—	3,95
V	4,11	4,15	4,16	4,14	4,12
Cu	4,2	4,43	4,46	4,37	4,40
Nb	4,04	4,02	—	4,09	3,99
Mo	4,27	4,31	4,33	4,31	4,3
Ag	4,31	4,28	4,28	—	4,3
Ta	4,15	4,11	—	—	4,12
Pt	5,29	5,35	5,32	5,26	5,32
Au	4,37	4,47	4,44	—	4,30
Pb	4,0	4,15	—	3,96	4,0

Таблица 2

Материал поверхности	Работа выхода, эВ				$\alpha_i^{N_2^+}$
	N ₂ ⁺	Ar ⁺	Kr ⁺	Xe ⁺	
AMg6-M	4,04	3,99	4,01	3,98	0,912
D16T	4,10	4,05	4,09	4,09	0,915
12X18H10T	4,26	—	4,05	4,13	0,715
2X13	4,32	4,43	4,28	4,22	0,73
Сталь 25	4,67	4,61	4,62	4,65	0,848
Si (элемент СБ)	4,61	4,67	4,58	4,69	0,917

рабочего тела электронным ударом. В качестве рабочих газов использовались азот, аргон, криптон и ксенон высшей очистки. Ускоренный поток плазмы интенсивностью $\sim 10^{15} - 10^{17}$ см⁻²с⁻¹ поступал в рабочую камеру, давление остаточных газов в которой составляло $\sim (1 - 1,3) \cdot 10^{-4}$ Па. Измерения выполнялись при давлении в рабочей камере $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ Па.

Для измерения параметров взаимодействия потока разреженной плазмы с электропроводящими поверхностями использовался плоский термоанемометрический зонд, выполненный в виде диска $\delta \approx 0,12$ мм с рабочей поверхностью диаметром 3,5 мм, к тыльной стороне которого присоединены элементы токоподвода и термопара. Боковая поверхность датчика, термопара и элементы токоподвода изолировались от контакта с плазмой керамической трубкой. Перед проведением экспериментов датчик предварительно тарировался в термостате; определялась зависимость $T_w = T_w(E)$, где E — термо-э.д.с. термопары.

Вольт-амперные характеристики $\lg I_c = f(V)$ имели четко выраженный прямолинейный участок. Это позволило определить температуру электронов $T_e \approx 4$ эВ обычным способом [4].

Потенциал плазмы Φ_0 определялся методом второй производной, а также по электронной части зондовой характеристики, построенной в полулогарифмическом 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 , найденными с применением многоэлектродного зонда-анализатора, а также со значениями W_i , рассчитанными в предположении, что ускоряющий потенциал равен разности между потенциалом анода источника и локальным потенциалом плазмы. Разброс полученных значений W_i не превышал $\pm 4,5\%$.

Гребенка датчиков с рабочими поверхностями, изготовленными из различных материалов, помещалась в высокоскоростной поток частично ионизованного газа. Для контроля локальных значений рабочих параметров потока и ориентации датчиков относительно вектора скорости потока U_∞ использовался тонкий цилиндрический зонд, изготовленный из молибденовой нити диаметром 0,04 и длиной 2,3 мм. Пик ионного тока, измеряемого таким зондом при вращении вокруг горизонтальной и вертикальной осей, соответствует ориентации зонда вдоль по потоку.

Зонды изготавливались из чистых металлов с атомной массой материала от 27 до 197, а также из некоторых технических материалов, таких, как алюминийевые сплавы AMg6-M, D16T, нержавеющей стали 2X13, 12X18H10T, сталь 25 и кремниевый

элемент панелей солнечных батарей. Рабочие поверхности зондов из чистых металлов соответствовали седьмому классу чистоты. Поверхности датчиков из технических материалов соответствовали рабочему состоянию поверхностей этих материалов [5].

При измерениях особое внимание уделялось чистоте поверхности зондов. Непосредственно перед проведением измерений рабочие поверхности датчиков облучались потоком плазмы, а также в течение 15–20 мин подвергались принудительной бомбардировке электронами при ~150 В и прогреву до температур, при которых не происходит разрушения материала зонда и термопары. Поскольку для некоторых материалов прогрев рабочих поверхностей датчиков до таких температур неэффективен как средство очистки поверхности, то в дополнение к прогреву рабочих поверхностей датчиков использовалась ионная бомбардировка. Для этого ионная ветвь зондовой характеристики снималась, начиная с потенциалов ~–200 В. Для оценки коэффициентов вторичной эмиссии γ_i использовались данные [6–8].

Измерения проводились в потоках разреженной плазмы со скоростями ионов N_2^+ , Ar^+ , Kr^+ и He^+ $U_\infty \approx 10$ км/с. Температура поверхности зондов при измерениях ~310–320 К. Результаты измерения работы выхода χ на поверхностях чистых металлов, полученные с использованием соотношения (4), приведены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 приведены рекомендуемые для поликристаллов этих материалов значения χ из [9]. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что полученные значения работы выхода χ практически не зависят от молекулярной массы бомбардирующего исследуемую поверхность иона. Результаты измерений не зависят также и от энергии ионов потока, если $W_i \leq 60$ эВ.

В табл. 2 приведены значения коэффициента аккомодации энергии ионов азота $\alpha_i^{N_2^+}$ при $U_\infty \approx 8,2$ км/с и значения работы выхода χ , измеренные в потоках N_2^+ , Ar^+ , Kr^+ и He^+ , для поверхностей технических материалов. Значения коэффициентов аккомодации $\alpha_i^{N_2^+}$, найденные с использованием соотношения (3), удовлетворительно согласуются со значениями $\alpha_i^{N_2^+}$ для этих материалов, полученными в [10].

Сюда следует добавить также значения $\alpha_i^{N_2^+}$ для алюминия и молибдена $\alpha_{Al}^{N_2^+} \approx 0,931$ и $\alpha_{Mo}^{N_2^+} \approx 0,693$, которые удовлетворительно согласуются с расчетными значениями $\alpha_{Mo}^{N_2^+} \approx 0,682$ при $U_\infty \approx 10$ км/с и $\alpha_{Fe}^{N_2^+} \approx 0,838$ при $U_\infty \approx 7,5$ км/с [7]. Следует отметить, что алюминиевые сплавы АМг6-М и Д16Т содержат соответственно алюминия 91,2–92,5 и 93,1–94,7%, а нержавеющие стали 2Х13, 12Х18Н10Т и сталь 25 содержат ~86,1, 72,9 и 99,1% Fe.

Результаты исследований свидетельствуют о возможности определения коэффициентов аккомодации энергии ионов и работы выхода при бомбардировке электропроводящих поверхностей потоком разреженной плазмы независимым образом, что позволяет избавиться от погрешностей измерения α_i , обусловленных влиянием неточностей определения χ .

Институт механики АН УССР
г. Днепропетровск

Поступило в редакцию
3.III.1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Хазен А. М., Шувалов В. А. Определение параметров частично ионизованного газа термоанемометром. – ЖТФ, 1966, т. 36, № 2, с. 377.
2. Бугрова А. И., Версоцкий В. С. и др. Аппаратура для измерения локальных параметров потоков плазмы термоанемометрическим зондом. – ТВТ, 1973, т. 11, № 4, с. 892.
3. Шувалов В. А., Резниченко Н. П., Губин В. В. Применение термоанемометрических зондов для измерения коэффициентов аккомодации энергии потока разреженной плазмы. – ТВТ, 1978, т. 16, № 5, с. 931.
4. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: Гостехиздат, 1952.
5. Ковтуненко В. М., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. Киев: Наукова думка, 1977.
6. Добрецов Л. Н., Гонолюмова Н. П. Электронная и ионная эмиссия. М.: Наука, 1968.
7. Баранцев Р. Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М.: Наука, 1975.
8. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. М.: Мир, 1967.
9. Фоменко В. С., Подчерняева И. А. Эмиссионные и адсорбционные свойства материалов. М.: Атомиздат, 1975.
10. Губин В. В., Резниченко Н. П., Шувалов В. А. Исследование коэффициентов аккомодации положительных ионов потока разреженной плазмы на поверхностях некоторых материалов. – ПМТФ, 1979, № 6, с. 115.