



# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. А. Горелова, В. А. Горелов, Л. А. Кильдюшова, Измерение электропроводности воздуха за падающей и отраженной ударной волной электродным методом, *ТВТ*, 1969, том 7, выпуск 1, 18–24

<https://www.mathnet.ru/tvt6607>

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

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

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.170

20 мая 2025 г., 03:23:02



УДК 533.932:533.6.011.72

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА ЗА ПАДАЮЩЕЙ И ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ЭЛЕКТРОДНЫМ МЕТОДОМ

*М. А. Горелова, В. А. Горелов, Л. А. Кильдюшова*

При помощи системы электродов измерена электропроводность воздуха за фронтом падающей и отраженной ударной волны ( $T = 4000\text{—}9000^\circ\text{K}$ ). Определена вольт-амперная характеристика межэлектродного промежутка, и методом эквивалентной емкости получено значение эффективной толщины приэлектродного слоя. Из результатов экспериментов рассчитано значение ионной концентрации  $n_i$  за фронтом ударной волны.

В отличие от методов измерения электропроводности  $\sigma$  за фронтом сильных ударных волн, основанных на эффектах взаимодействия потока плазмы с электромагнитным полем, прямой метод определения  $\sigma$  при помощи электродов, находящихся в контакте с плазмой, не нашел широкого применения. Это можно объяснить тем, что первые эксперименты, проведенные без учета влияния приэлектродных слоев, не дали удовлетворительных результатов [1, 2].

В [3] для измерения  $\sigma$  была применена система из двух плоских электродов и измерительного зонда, помещенного вблизи одного из электродов (катода). Ток на электроды индуцировался при движении плазмы через поперечное магнитное поле. При помощи такой системы удалось провести измерение электропроводности, сохраняя основное преимущество электродного метода — высокое пространственное разрешение и простоту.

В настоящей работе рассматривается метод, в котором напряжение на электроды подается от внешнего источника.

Эксперименты проведены в электроразрядной ударной трубе без диафрагмы с цилиндрической разрядной камерой [3]. Внутренний диаметр канала трубы 57 мм, длина 2,1 м. Начальное давление исследуемого газа (воздуха) 0,3—1,5 мм рт. ст. Число Маха ударной волны  $12 \div 26$ . Продолжительность течения воздуха, нагретого в ударной волне (продолжительность пробки), от 2 до 20 мксек.

На рис. 1 представлена блок-схема эксперимента по измерению электропроводности  $\sigma$  воздуха за падающей ударной волной. Измерительная система, расположенная в двух метрах от разрядной камеры, состояла из пары плоских латунных электродов размерами  $5 \times 15$  мм и толщиной 0,1 мм. Величина межэлектродного промежутка 10 мм. На расстоянии в 2—3 мм от отрицательного электрода (катода) помещался измерительный вспомогательный электрод — проволочка диаметром 0,1 мм. Электродная система размещалась на оси канала при помощи клиновидной державки, электроды были вынесены вперед от нее на 70 мм. Нерабочие поверхности электродов и зонда изолировались клеем БФ-2. Оценочные расчеты и съемка обтекания электродной системы камерой СФР-2М показали, что система не вносит заметных возмущений в поток плазмы между электродами.

При измерении  $\sigma$  за отраженной волной применялась система, несколько отличная от рассмотренной выше. Электроды крепились в центре отражающего диска, как показано на рис. 2. Размеры электродов: длина (вдоль оси канала) — 2,1 мм; ширина — 7 мм, толщина — 0,1 мм; расстояние между ними 6 мм. Для уменьшения влияния проводимости пристеночного слоя на диске электроды были укреплены так, что между их задней кромкой и поверхностью диска оставался зазор в 1 мм, а в месте

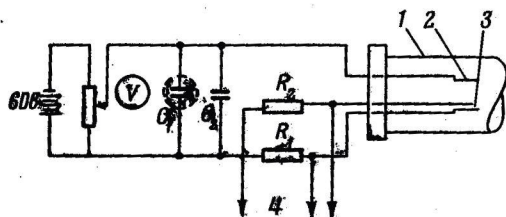


Рис. 1

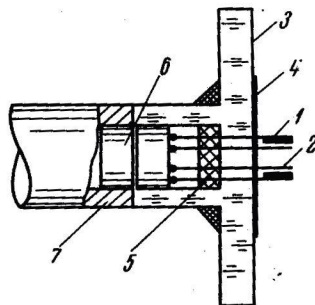


Рис. 2

Рис. 1. Блок-схема эксперимента по измерению электропроводности воздуха за падающей ударной волной

1 — канал трубы; 2 — электроды; 3 — вспомогательный электрод; 4 — выход к осциллографу ОК-17М,  $C_1 = 1000 \text{ мкф}$ ,  $C_2 = 2,0 \text{ мкф}$

Рис. 2. Схема крепления электродов при измерении электропроводности за отраженной волной

1 — электроды, 2 — вспомогательные электроды, 3 — отражающий диск, 4 — слюда, 5 — заливка эпоксидной смолой, 6 — разъем, 7 — экранирующая трубка

расположения электродов на диск была наклеена пластинка из слюды. Между электродами были установлены два вспомогательных электрода (вольфрам, диаметр 0,1 мм), измеряющие разность потенциалов в точках, расстояние между которыми  $\sim 4 \text{ мм}$ .

Схема регистрации разности потенциалов вспомогательными электродами для уменьшения электростатических наводок была также изменена. Электроды соединялись с первичной обмоткой высокочастотного трансформатора. Сигнал, снимаемый с вторичной обмотки, подавался на вход усилителя осциллографа ОК-17М через катодный повторитель. Анализ СФР-грамм картины отражения ударной волны показал, что при начальных давлениях  $p_0 \geq 0,5 \text{ мм рт. ст.}$  применяемая электродная система не входит в контакт с толкающим газом за время измерения.

Обе вышеприведенные системы находились под плавающим потенциалом относительно земли.

На рис. 3, а и б показаны типичные осциллограммы тока между плоскими электродами и сигналов со вспомогательных электродов при экспериментах за падающей и отраженной ударными волнами. На осциллограмме рис. 3, а четко проявляется «пробка» воздуха, нагретого в ударной волне, и область толкающего газа. Начальные выбросы на осциллограммах вызваны наличием градиента потенциала во фронте волны. На осциллограммах рис. 3, б после небольшого начального выброса сигнал на токовом луче резко возрастает до значения, соответствующего току за падающей волной. Примерно через 2 мксек начинается возрастание сигнала, обусловленное приходом в межэлектродную область отраженной волны. Максимального значения ток достигает через 3,5 мксек. Именно за это время отраженная волна, двигаясь со скоростью  $\sim 800 \text{ м/сек}$  (измеренное значение скорости отраженной волны), отходит от диска примерно на 3 мм. Максимальное значение тока сохраняется в течение 2 мксек,

а затем начинается его резкий спад. Сигнал со вспомогательных электродов (рис. 3, б) отличается пульсирующей формой. Величина разности потенциалов между электродами — десятые доли вольта, в то время как потенциал плавающего зонда  $\sim 2,5$  в. Поэтому любые неоднородности за отраженной волной сказываются заметным образом.

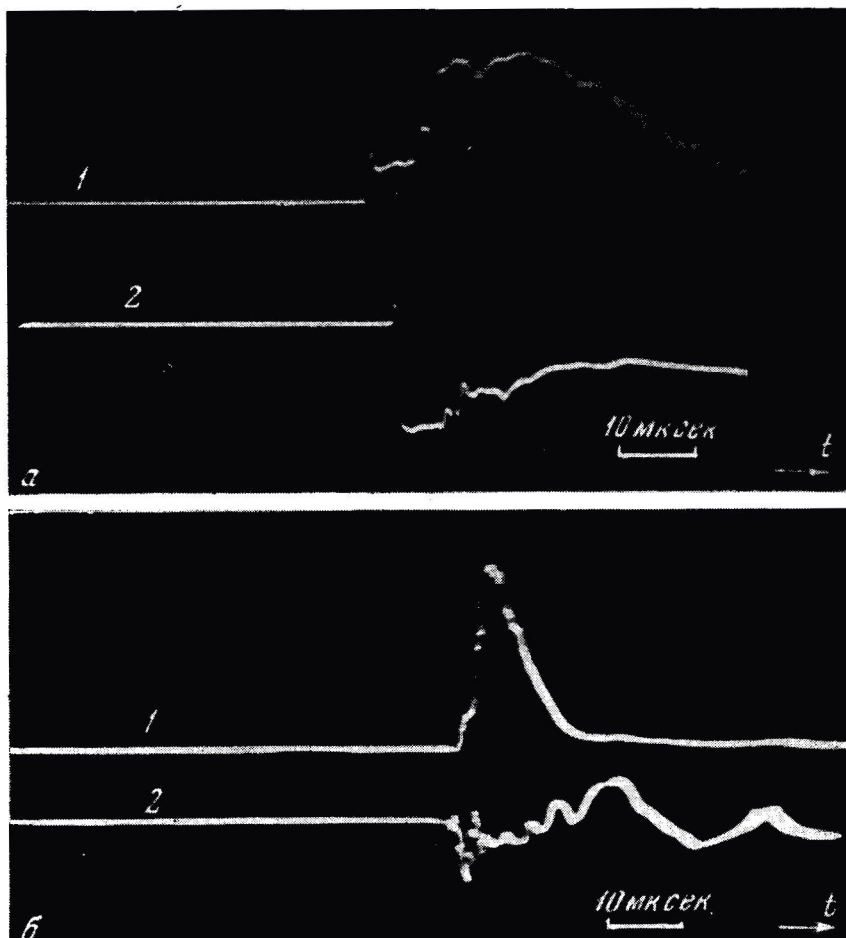


Рис. 3. Типичные осциллограммы

а —  $p_0 = 0,5$  мм рт. ст.,  $M_s = 20$ ; б —  $p_0 = 1,0$  мм рт. ст.,  $M_s = 15$ ; 1 — осциллограмма тока, 2 — сигнал со вспомогательного электрода (на рис. 3, а луч 2 несколько смещен)

При обработке осциллограмм измерялись значения тока в пробке за падающей волной, его максимальное значение при измерениях  $\sigma$  за отраженной волной и соответствующие значения разности потенциалов между анодом и вспомогательным электродом в первом случае и между вспомогательными электродами — во втором. Электропроводность вычислялась по формуле

$$\sigma = Id/VS, \quad (1)$$

где  $d$  — расстояние анод — вспомогательный электрод при измерении за падающей волной и между вспомогательными электродами за отраженной;  $V$  — разность потенциалов на участке  $d$ ;  $S$  — площадь электродов (контрольные опыты с электролитом в условиях эксперимента показали, что учет растекания токовых линий не вызывает ошибки, превышающей погрешность эксперимента  $\sim 20\%$  при измерении  $\sigma$ ).



На рис. 4 значения  $\sigma$ , вычисленные по формуле (1) из результатов экспериментов, сравниваются с расчетными кривыми  $\sigma = f(T, p)$  [4], результатами измерения  $\sigma$  бесконтактным методом в работах [5, 6] и электродным методом в поперечном магнитном поле [3]. Видно, что вплоть до  $\sigma = 10$  мо/см электродный метод дает результаты, хорошо согласующиеся с результатами, полученными другими методами. Согласие с расчетом также удовлетворительное, хотя и можно отметить завышенное значение расчета по сравнению с экспериментом в области 8000—10 000° К.

На рис. 5 представлена вольт-амперная характеристика электродного промежутка, полученная при экспериментах за падающей ударной волной. Интересно провести сравнение полученной вольт-амперной характеристики с соответствующим расчетом по работе [7]. Использовалась формула

$$j = \frac{j_i - j_e \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right)}{1 - \frac{1}{2}\left(1 - \psi\left[\sqrt{\frac{2e\phi}{kT}}\right]\right)} \quad (2)$$

где  $j_i = 0,49n_i e \sqrt{kT/m_i}$ , (2a) где  $j_i$  — плотность ионного тока по работе [8];  $j_e \approx \sqrt{m_i/m_e} j_{e0}$  — плотность хаотического электронного тока;  $\psi$  — интеграл вероятности;  $\phi$  — прикатодное падение потенциала.

Формула (2) получена при пренебрежении током эмиссии с катода. В рассматриваемом диапазоне температур предполагалась преобладающая роль ионов  $\text{NO}^+$ . Значение  $n_i$  вычислено с использованием [9]. Расчет вольт-амперной характеристики проводился следующим образом: для ряда значений  $\phi$  находилась величина  $j$  по (2) и затем по формуле

$$(R_1 + r)j = V - \phi \quad (3)$$

рассчитывалась вольт-амперная характеристика, показанная на рис. 5 штрих-пунктирной кривой. В формуле (3)  $r$  — сопротивление плазмы,  $V$  — приложенное напряжение (прианодное падение потенциала из-за малости не учитывалось). Принимая во внимание неточность, с которой определяются реальные значения  $j_i$  и  $j_e$ , согласие эксперимента с расчетом можно признать вполне удовлетворительным. Существенно нелинейная вольт-амперная характеристика свидетельствует о боль-

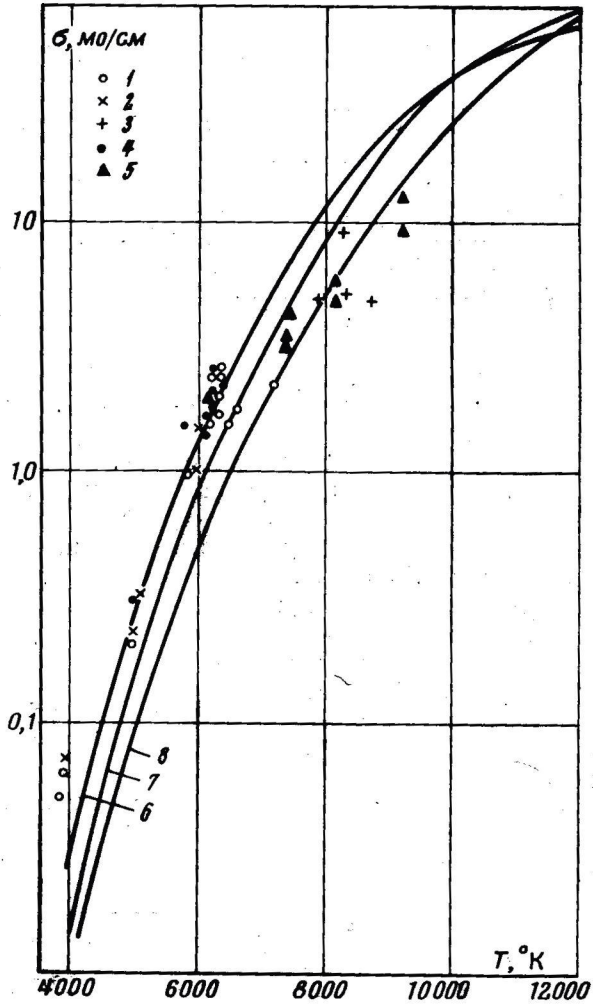


Рис. 4. Зависимость электропроводности от температуры и давления

1 — результаты работы [3], 2 — отдельные результаты работы [5], 3 — работа [6], 4 — измерения за падающей волной, 5 — за отраженной волной; 6 — давление  $10^4$ , 7 —  $10^5$ , 8 —  $10^6$  н/м<sup>2</sup>

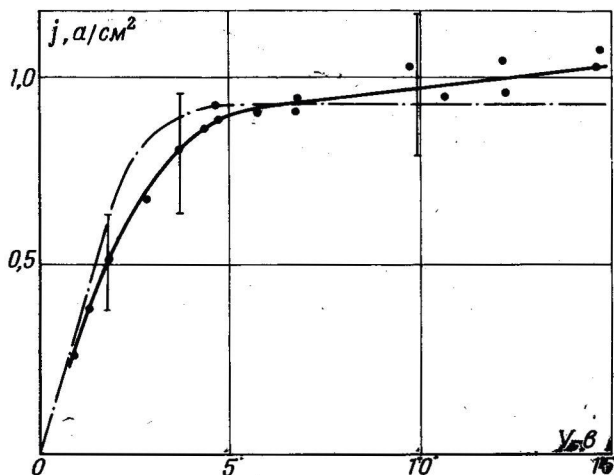


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика

шой роли приэлектродных слоев с пространственным зарядом в процессе протекания тока между электродами в условиях эксперимента. Представляет интерес измерение толщины прикатодного слоя падения потенциала  $\lambda_h$ . Известно, что величина  $\lambda_h$  должна быть порядка длины Дебая, однако непосредственный точный расчет последней затруднителен, поскольку в условиях эксперимента приэлектродные слои заключены внутри пограничного слоя (оценочная величина максимальной толщины ламинарного пограничного слоя на электродах  $\sim 10^{-2}$  см).

Измерение эффективной толщины приэлектродного слоя проведено по методу, предложенному в работе [10].

В случае, когда электродная система работает в режиме насыщения вольт-амперной характеристики, падение потенциала в приэлектродном слое составляет большую часть приложенного напряжения (например,  $\varphi \approx 9$  в при  $V = 10$  в), при этом распределение потенциала в слое в первом приближении может считаться линейным (по данным работы [8], в этом линейном слое сосредоточено  $\sim 80\%$  падения потенциала). Такой слой при подаче на электроды переменной составляющей напряжения может быть представлен в виде некоторой емкости  $C_h$ , зашунтиро-

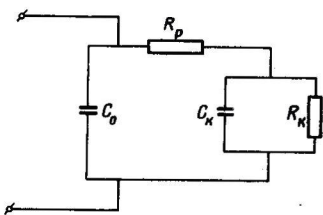


Рис. 6

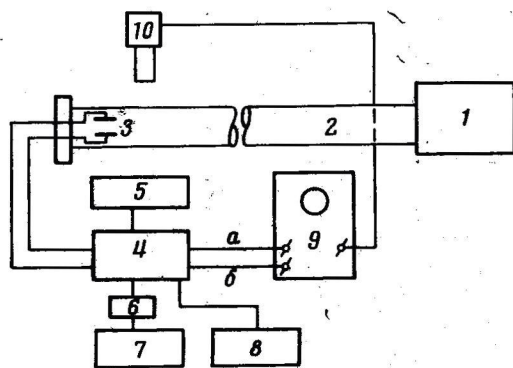


Рис. 7

Рис. 6. Эквивалентная схема

Рис. 7. Блок-схема эксперимента по измерению толщины прикатодного слоя

1 — разрядная камера, 2 — канал, 3 — электроды, 4 — усилитель с катодным повторителем, 5 — генератор ГЗ-7А, 6 — фильтр-пробка, 7 — блок постоянного напряжения, 8 — контроль уровня в.ч. сигнала, 9 — ОК-17М, 10 — блок с ФЭУ для запуска ОК-17М, а — измерение тока, б — измерение напряжения

ванной сопротивлением прикатодного слоя  $R_h$ . В результате система электродов в потоке плазмы может быть рассмотрена в виде эквивалентной

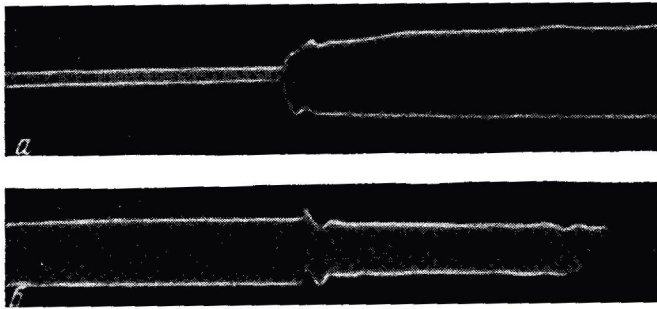


Рис. 8. Типичные осциллограммы высокочастотного тока и напряжения на электродах

*a* — напряжение, *b* — ток,  $p_0 = 1,0$  мм рт. ст.,  $f = 6$  мГц,  $M_s = 15$

схемы, показанной на рис. 6, где  $C_0$  — емкость измерительной цепи и электродной системы. В отличие от [10], здесь не учитывается приборное падение.

Импеданс приведенной схемы при подаче переменного напряжения с частотой  $\omega$  имеет вид

$$|Z| = \frac{\{(R_p + R_h + \omega^2 C_h^2 R_h^2 R_p)^2 + \omega^2 [C_0 (R_p + R_h)^2 + C_h R_h^2 (1 + \omega^2 C_0 C_h R_p^2)]^2\}^{1/2}}{(1 - \omega^2 C_0 C_h R_h R_p)^2 + \omega^2 [C_h R_h + C_0 (R_p + R_h)]^2} \quad (4)$$

В условиях эксперимента  $R_h \gg R_p$  ( $R_p \approx 1,0$  ом,  $R_h \approx 100$  ом). Из (4) следует формула для величины амплитудного значения тока, сходная с полученной в работе [10]:

$$I = \omega (C_h + C_0) \{1 + [\omega^2 R_h^2 (C_h + C_0)^2]^{-1}\}. \quad (5)$$

При достаточно больших  $\omega$  это выражение сводится к очевидной формуле

$$I = \omega (C_h + C_0). \quad (6)$$

Из (6) следует, что критерием корректности вышеприведенной схемы является линейная зависимость  $I$  от  $\omega$ .

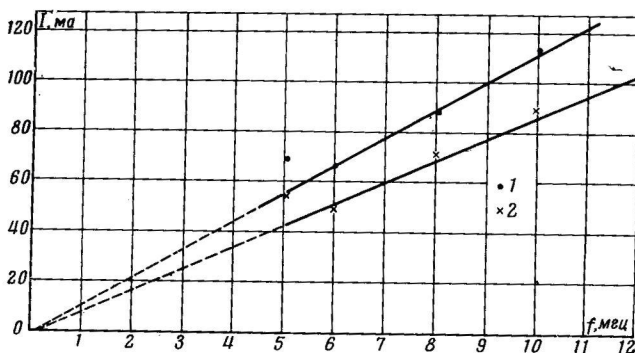


Рис. 9. Зависимость  $I_{\max} = f(\omega)$

1 —  $p_0 = 0,5$  мм рт. ст.; 2 —  $p_0 = 1,0$  мм рт. ст.

Эксперимент по измерению толщины прикатодного слоя состоял в приложении к электродам высокочастотного сигнала постоянной амплитуды  $I$  в приложенном постоянном напряжении, соответствующем режиму насыщения вольт-амперной характеристики и нахождении зависимости  $I_{\max} = f(\omega)$ . На рис. 7 показана блок-схема эксперимента. В. ч. сиг-



нал подавался на электроды от генератора ГЗ-7А через усилитель на 6П13С и катодный повторитель на ГУ-29 с понижающим трансформатором на выходе. Схема обеспечивала получение сигнала с напряжением до 5 в при токе 2 а и частоте до 10 мгу. Использовалась та же электродная система, что и при измерении проводимости.

На рис. 8 приведены типичные осциллограммы высокочастотного тока и напряжения на электродах, а на рис. 9 — полученная из экспериментов за-

$p_0$ , мм рт. ст.	$M_s$	$n_{i\text{эксп}} \cdot 10^{-14}$	$n_{i\text{теор}} \cdot 10^{-14}$
0,3	26	2	6
0,5	20	0,8	0,9
0,7	18	0,6	0,8
1,0	15	0,4	0,4
1,5	13	0,1	0,1

висимость  $I_{\text{макс}} = f(\omega)$ ; линейная в диапазоне 5—10 мгу. Величина  $C_h$  находилась как из наклона графика  $I = f(\omega)$ , так и по формуле (6) из результатов отдельных измерений.  $C_0$  определялась по начальному уровню сигнала (см. рис. 8). Среднее значение эффективной толщины прикатодного слоя  $\lambda_h$ , вычисленное по формуле плоского конденсатора, оказалось

равным  $\lambda_h = 3,7 \cdot 10^{-5}$  см при  $p_0 = 0,5$  мм рт. ст.,  $M_s = 19$  и  $\lambda_h = 4,8 \cdot 10^{-5}$  см при  $p_0 = 1,0$  мм рт. ст. и  $M_s = 15$ . Соответствующие расчетные значения радиуса Дебая в потоке плазмы за ударным фронтом  $\lambda_D = 6,2 \cdot 10^{-5}$  и  $7,8 \cdot 10^{-5}$  см. Величина  $\lambda_h \approx 0,6\lambda_D$ , что согласуется с результатами работы [10], где для потока аргона при  $T = 3000\text{—}6000^\circ\text{K}$  получено  $\lambda_h \approx 0,4\lambda_D$ . Отметим, что при изменении величины постоянного напряжения от 4 до 12 в изменения толщины слоя не обнаружено.

Удовлетворительное согласие между экспериментальной и расчетной вольт-амперной характеристиками позволяет, по-видимому, сделать определенные выводы о возможности измерения электродным методом ионной концентрации  $n_i$ . В этом случае электроды можно рассматривать как двойной электростатический зонд с плоскими электродами. Значение  $n_i$  может быть получено в том случае, если выполняется условие  $\lambda_i/\lambda_h > 1$ , где  $\lambda_i$  — средняя длина свободного пробега иона вблизи поверхности электрода. (Отметим, что в потоке плазмы за ударной волной  $\lambda_i = 6 \cdot 10^{-4}$  см при  $p_0 = 0,5$  мм рт. ст. и  $\lambda_i = 4 \cdot 10^{-4}$  см при  $p_0 = 1,0$  мм рт. ст. и условие  $\lambda_i/\lambda_h > 1$  выполняется.)

Не рассматривая подробно вопрос о величине  $\lambda_i$  вблизи поверхности электрода, можно провести вычисление  $n_i$  по зондовой теории (2а) с последующим сравнением полученных значений  $n_i$  с табличными [9]. Результаты вычисления  $n_i$  представлены в таблице. Видно, что расхождение с табличными значениями находятся в пределах погрешности зондового метода. Отметим в заключение, что расчет  $n_i$  методом, предложенным в [11] для случая, когда осуществляется диффузионный режим работы зонда, дает значения  $n_i$ , на два порядка превышающие табличные.

ЦАГИ

Поступила в редакцию  
18 VIII 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. Sakuntala, A. Engel, R. G. Fowler. Phys. Rev., 118, № 6, 1459, 1960.
2. H. I. Nagamatsu, R. F. Sheer. Phys. Fluids, 4, № 9, 1073, 1961.
3. М. А. Горелова, В. А. Горелов. Теплофизика высоких температур, 6, № 5, 1968.
4. Р. М. Севастьянов, М. Д. Здункевич. Инж. ж., 5, № 2, 227, 1965.
5. L. Lamb, S. C. Lin. J. Appl. Phys., 28, № 7, 754, 1957.
6. Ю. В. Макаров, А. М. Максимов. Ж. техн. физ., 36, № 2, 280, 1966.
7. Г. А. Любимов. ПМТФ, № 5, 24, 1963.
8. S. A. Self. Phys. Fluids, 6, 1762, 1963.
9. А. С. Предводителев и др. Таблицы термодинамических функций воздуха. Изд-во АН СССР, 1957.
10. I. A. Nation, D. Simpson. Brit. J. Appl. Phys., 16, № 11, 1705, 1965.
11. В. М. Захаров и др. Ж. техн. физ., 30, № 4, 1960.