

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. М. Масленников, В. Н. Германюк, Экспериментальное исследование электропроводности в потоке аргона с калием, *ТВТ*, 1965, том 3, выпуск 4, 524–529

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: 100.28.231.85

8 ноября 2024 г., 19:00:43



ра газа на входе в измерительную секцию определялась по тепловому балансу. В отдельном опыте сопоставлялась температура газа — по тепловому балансу и по термомпаре с двумя экранами:

$T_{\text{тепл. бал.}}, ^\circ\text{K}$	1760	1520	1290
$T_{\text{термопара}}, ^\circ\text{K}$	1390	1330	1260

Чем больше температура газа, тем больше разница между данными, полученными различными способами, поскольку при более высоких температурах газа велико излучение термомпары.

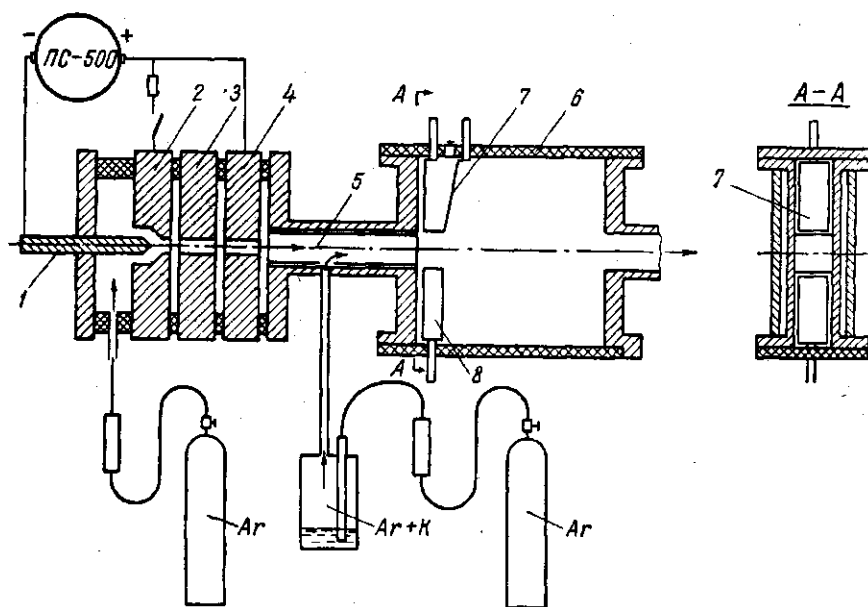


Рис. 1. Схема установки:

1 — катод; 2, 3 — промежуточные электроды; 4 — анод электродугового нагревателя; 5 — смешивательная камера; 6 — измерительная секция; 7 — накаливаемый катод; 8 — анод

Во время опытов мощность дуги поддерживалась постоянной с точностью до 3%. Температура накаливаемого катода измерялась пирометром через окошко в асбодемпной пластине.

При градуировке расхода калия измерялось уменьшение его веса в бачке за определенное время, при этом термомпарой измерялась температура бачка с калием. При проведении экспериментов расход калия контролировался по термомпаре, при этом имелась погрешность измерения не более чем в два раза. Во всех опытах, за исключением специально оговоренных, расход калия составлял 0,5% по весу от расхода аргона.

Равномерность подачи калия по сечению определялась визуально и фотографированием по свечению газа на срезе смешивательной камеры.

**Несамостоятельный разряд.** В этом типе разряда эмиссия электронов из катода поддерживается за счет нагрева катода внешним источником — трансформатором накала. Во всех опытах с накаливаемым катодом площадь его эмиттирующей поверхности равнялась  $0,7 \times 1,5 = 1,05 \text{ см}^2$ , расстояние между электродами 1,7 см.

Следует отметить, что при накаливании одного электрода пара электродов анод — катод работала как плазменный термоэлектронный преобразователь, причем величина э.д.с. достигала 2,5 в, что соответствует разности работ выхода неактивированного электрода и калия. Во время опытов снимались вольтамперные характеристики на постоянном токе.

Область температуры газа  $T_r = 2500-3000^\circ \text{K}$ . На рис. 2 приведены вольтамперные характеристики при накаливаемом молибденовом катоде при изменении его температуры  $T_k$  от  $1300$  до  $2600^\circ \text{K}$  и примерно одинаковой  $T_r = 3000^\circ \text{K}$ . Видно, что чем больше  $T_k$ , тем больше ток между электродами. Это объясняется тем, что около катода образуется слой пространственного положительного заряда и при недостаточной эмиссии с катода значительная часть приложенного напряжения падает на приэлектродный слой. При увеличении температуры катода увеличивается эмиссия электронов, падение потенциала в приэлектродном слое умень-

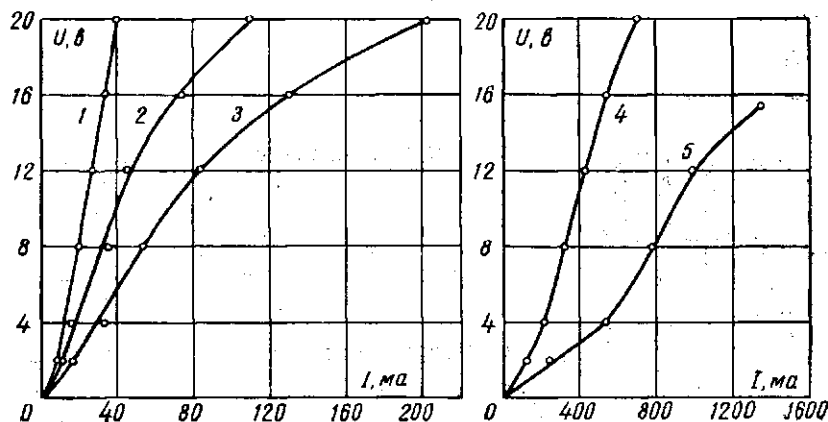


Рис. 2. Характеристики несамостоятельного разряда в потоке  $\text{Ag} + 0,5\% \text{K}$  при  $T_r = 3000^\circ \text{K}$ :

1 —  $T_k = 1290^\circ \text{K}$ ; 2 —  $1440^\circ \text{K}$ ; 3 —  $1600^\circ \text{K}$ ; 4 —  $2470^\circ \text{K}$ ; 5 —  $2520^\circ \text{K}$ ; катод молибденовый

шается и ток между электродами увеличивается. При  $T_k = 1300 \div 1600^\circ \text{K}$  и напряжении  $20 \text{ в}$  измеренные токи достигают величины  $40 \div 200 \text{ ма см}^{-2}$ , что значительно больше токов, которые могут быть получены при таких  $T_k$  с чистого молибденового катода. Эти токи возможны лишь за счет активации катода калием. В пределах до  $20 \text{ в}$  характеристики не имеют зоны насыщения токов, что характерно для активированных катодов. Характеристики снимались лишь до напряжения  $20 \text{ в}$ , так как при больших напряжениях происходил пробой и разряд переходил в самостоятельный.

При  $T_k > 2520^\circ \text{K}$  электропроводность промежутка, определенная по оценочной формуле  $1/R = I/U$ , была  $0,09-0,14 \text{ мо}$ , что значительно меньше электропроводности промежутка, определенной по равновесной электропроводности плазмы без учета электродных падений потенциала ( $1/R \approx 1,1 \text{ мо}$  при  $T_r = 3000^\circ \text{K}$ ). Последнее говорит о том, что при такой температуре катода значительная часть внешнего напряжения все еще падает в приэлектродном слое и ограничивает ток между электродами. Следовательно, электропроводность промежутка ограничивается недостаточной эмиссией с катода.

На рис. 3 приведены характеристики с вольфрамовым катодом. Обращает на себя внимание характеристика, снятая при  $T_k \approx 1170^\circ \text{K}$ , когда достигались токи до  $10 \text{ асм}^{-2}$ . При токе  $10 \text{ а}$  электропроводность промежутка  $1/R = 0,87 \text{ мо}$ , тогда как электропроводность промежутка, определенная по равновесной электропроводности плазмы, составляет  $0,43 \text{ мо}$ . В данном случае электропроводность промежутка не ограничивалась эмиссией с катода. Большие токи эмиссии при относительно низкой  $T_k$  можно объяснить образованием на вольфрамовом катоде поверхностного электроположительного слоя, который сильно уменьшал работу выхода. Характеристики рис. 3, снятые при других  $T_k$ , подтверждают образование и удаление слоев на катоде и их влияние на величину тока. К сожалению,

характеристики, подобные изображенным на рис. 3, при  $T_k = 1170^\circ \text{K}$  воспроизводились редко и наблюдались лишь при  $T_r = 2500\text{--}2700^\circ \text{K}$ .

Область температуры газа  $1600\text{--}1800^\circ \text{K}$ . На рис. 4 приведены характеристики с вольфрамовым катодом при двух  $T_k$ . Чем больше  $T_k$  и ток эмиссии, тем большей оказывается и электропроводность промежутка. Приводим для отдельных точек характеристики отношение электропроводности промежутка, определенной по оценочной формуле  $1/R = I/U$ ,

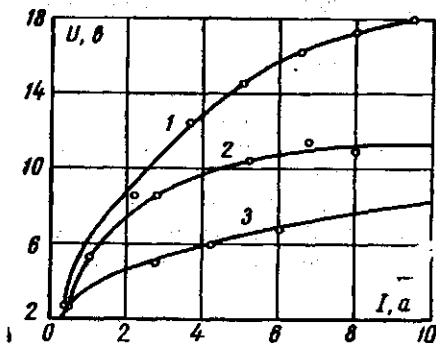


Рис. 3. Характеристики несамостоятельного разряда в потоке  $\text{Ag} + 0,5\% \text{K}$ :

1 —  $T_k = 2510^\circ \text{K}$ ,  $T_r = 2500$ ; 2 —  $\sim 1170$ ,  $2600$ ; 3 —  $\sim 2870$ ,  $2300$ ; катод вольфрамовый

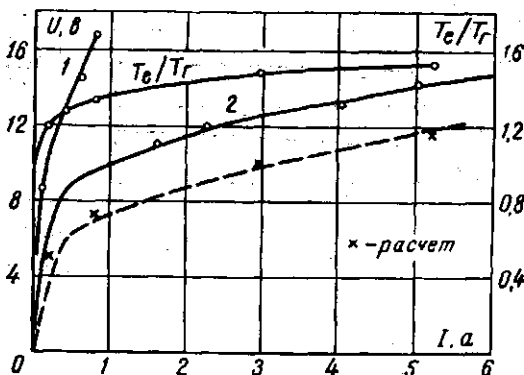


Рис. 4. Характеристики несамостоятельного разряда в потоке  $\text{Ag} + 0,5\% \text{K}$  при  $T_r = 1600^\circ \text{K}$ :

1 —  $T_k = 2520^\circ \text{K}$ ; 2 —  $> 2570^\circ \text{K}$ ; катод вольфрамовый; пояснения см. в тексте

к электропроводности промежутка, рассчитанной по равновесной электропроводности плазмы  $1/R_{\text{равн}} = \sigma S/l = 0,001 \cdot 1,05 / 1,7 = 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ мо}$ , при  $T_k > 2570^\circ \text{K}$

$I, \text{a}$	0,2	0,45	1	2	4	6
$1/R_{\text{измер}}$	48	83	160	290	490	650
$1/R_{\text{равн}}$						

Видно, что при токе  $6 \text{ a}$  наблюдалось увеличение электропроводности в 650 раз. Для оценки электродных падений потенциала был проведен опыт с передвижным анодом. Характеристики, снятые при расстояниях между электродами  $1,7$  и  $0,85 \text{ см}$ , приведены на рис. 5. Из этих характеристик следует, что суммарное анодное и катодное падения напряжения равны примерно  $2,6 \text{ в}$ . За вычетом напряжения  $2,6 \text{ в}$  получена пунктирная кривая рис. 4. Следовательно, погрешность измерения электропроводности по оценочной формуле при  $T_k > 2570^\circ \text{K}$  невелика.

Увеличение электропроводности объясняется разогревом электронов за счет мощности, выделяемой в разряде. Согласно [5], температура электронов определяется по балансу энергии

$$\sigma E^2 = \sum_i (n v_{ei}) \frac{2m \delta_i}{M_i} \frac{3}{2} k(T_e - T_i), \quad (1)$$

где  $T_e$ ,  $n$ ,  $m$  — температура, концентрация и масса электронов;  $T_i$ ,  $M_i$  — температура и масса тяжелых частиц;  $v_{ei}$  — частота столкновений с  $i$ -й тяжелой компонентой;  $\delta_i$  — параметр неупругости;  $\sigma$  — электропроводность;  $E$  — напряженность электрического поля.

Это уравнение отличается от широко применяемого уравнения баланса энергии наличием параметра неупругости  $\delta_i$ . Рассчитанные по (1) температура электронов и вольтамперная характеристика приведены на рис. 4. При расчете принимались следующие величины: сечения

$Q_{Ag} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2$ ,  $Q_K = 4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ,  $\delta_i = 1,6$ ,  $T_i = 1600^\circ \text{ К}$ . Величина  $\delta_i = 16$ , при которой наблюдается удовлетворительное совпадение экспериментальной и расчетной вольтамперной характеристик, хорошо согласуется с данными [6, 9].

В рассматриваемом диапазоне температур газа при максимально допустимой температуре катода, по условию его перегорания при напряжении между электродами 15 в, для различных материалов катода были получены следующие плотности токов: тантал — 1,2, молибден — 3, вольфрам — 6  $\text{асм}^{-2}$ .

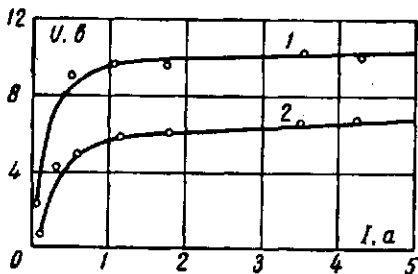


Рис. 5. Характеристики несамостоятельного разряда в потоке  $\text{Ag} + 0,5\% \text{ К}$  при  $T_g = 1700^\circ \text{ К}$ :  
1 — расстояние между электродами 1,7 см; 2 — 0,85; катод вольфрамовый;  $T_K > 2570^\circ \text{ К}$

При достаточно высокой температуре катода и любом из исследованных материалов катода при напряжении 7—8 в изменялся наклон вольтамперных характеристик, причем электропроводность промежутка на более пологом участке характеристики в сотни раз превышала электропроводность промежутка с равновесной плазмой.

В данных опытах разделить это влияние не представлялось возможным и определялось влияние расхода калия на электропроводность всего промежутка. При этом было обнаружено, что на вольфрамовом катоде при  $T_K = 2420^\circ \text{ К}$  уменьшение расхода калия с 0,4 до 0,1% приводило к уменьшению тока через промежуток в сотни раз, тогда как при  $T_K \approx 2670^\circ \text{ К}$  отличие было лишь в несколько раз. По-видимому, уменьшение расхода калия сказывается в первую очередь на процессах на катоде.

Самостоятельный разряд. При температуре газа 1500—2000° К температура катода, нагреваемого потоком газа, оказывается недостаточной для получения нужной плотности тока эмиссии. Поэтому был исследован так называемый самостоятельный разряд. При этом снимались вольтамперные характеристики разряда между двумя вольфрамовыми электродами диаметром 10 мм, из которых один был передвижной, при расстоянии между ними 4 и 18 мм.

Передвижной электрод позволял определить суммарное анодное и катодное падения напряжения, которое для отдельных опытов колебалось в пределах 9 ÷ 15 в. При расстоянии между электродами 4 мм разряд зажигался при напряжении 100—200 в. Чем ниже  $T_g$ , тем большее напряжение требовалось для зажигания. Этот вид разряда мы называем самостоятельным, поскольку нагрев катода происходит за счет энергии разряда. Вместе с тем, этот разряд имеет характерные черты несамостоятельного разряда, поскольку имеются предварительный нагрев газа и его ионизация.

При визуальном наблюдении было установлено, что при  $T_g = 1700^\circ \text{ К}$  и выше разряд носит диффузионный характер и горит по кратчайшему расстоянию между электродами, не сдуваясь потоком газа. При понижении

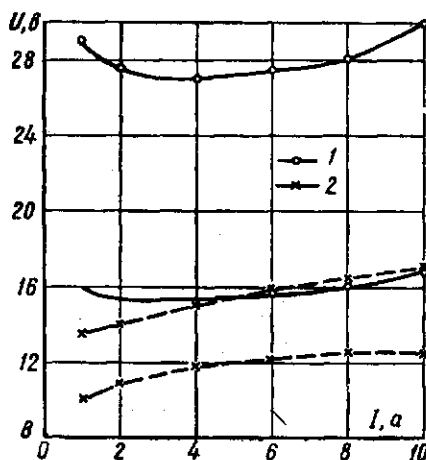


Рис. 6. Характеристики самостоятельного разряда в потоке  $\text{Ag} + 0,5\% \text{ К}$ :  
1 —  $T_g = 1700^\circ \text{ К}$ ; 2 — 2350; вольфрамовые электроды

нии температуры до  $T_r = 1200^\circ \text{K}$  разряд выдувался потоком газа. На рис. 6 приведены характеристики при двух  $T_r$ . Результаты обработки характеристик приведены в таблице.

Удельная электропроводность плазмы рассчитывалась по формуле  $\sigma = j/E$ ; при этом условно принималось, что сечение разряда равно площади электрода и не зависит от тока.

*Зависимость напряженности электрического поля и электропроводности от температуры газа и тока*

$I, \text{a}$	1	2	4	6	8	10
$T, \text{K}$						
	$E, \text{в/см}$					
1400	16,3	16,8	16,9	16,9	16,9	16,9
1700	8,9	8,5	8,6	8,7	8,9	8,9
1800	5,5	6,0	6,1	5,4	5,0	5,0
2350	2,4	2,4	2,4	2,6	2,9	3,0
3630	1,6	1,6	1,5	1,2	--	--
	$\sigma, \text{мв/см}$					
1400	0,08	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75
1700	0,14	0,30	0,60	0,88	1,15	1,43
1800	0,23	0,43	0,84	1,40	2,10	2,54
2350	0,54	1,08	2,16	2,96	3,57	4,23
3660	0,81	1,62	3,40	6,27	--	--

Зависимость напряженности электрического поля от температуры газа качественно объясняется уравнением (1), из которого видно, что заданная величина электропроводности, определяемая температурой электронов, для своего поддержания требует меньшей напряженности электрического поля при более высокой температуре газа.

**Выводы.** 1. В режиме несамостоятельного разряда при  $T_r = 2500 \div 3000^\circ \text{K}$  измеренная электропроводность промежутка оказывается меньше электропроводности промежутка, рассчитанной по равновесной электропроводности плазмы, и ограничивается эмиссией с катода.

2. В режиме несамостоятельного разряда при  $T_r = 1800^\circ \text{K}$  и  $T_k > 2570^\circ \text{K}$  измеренные электропроводности в сотни раз превышают электропроводность промежутка, рассчитанную по равновесной электропроводности плазмы.

3. В режиме самостоятельного разряда по мере понижения  $T_r$  напряженность электрического поля в разряде увеличивается, а электропроводность уменьшается. Во всех случаях измеренная электропроводность намного превышает равновесную. При этом каких-либо ограничений по току, обусловленных недостаточной эмиссией с катода, не наблюдалось.

Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию  
1 VIII 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. I. Mullaneу, P. H. Kudd, N. R. Dibelius. J. Appl. Phys., 32, № 4, 688, 1961.
2. R. Devime, H. Lescoart, Xnguyen Duc., Сб. докладов ВИНТИ, 1963.
3. R. I. Rosa. Phys. Fluids, 4, № 2, 482, 1961.
4. Г. А. Любимов. Прикладная механика и техн. физ., № 5, 1963.
5. J. L. Kerrebrock. Second Symp. Engng. Aspects of MHD, Pennsylvania, Univ., 1961.
6. Robben. Phys. Fluids, 5, № 10, 1306, 1962.
7. А. Е. Шейндлин, В. М. Батенин, Э. И. Асиновский. Доклад на симпозиуме по МДГ, Париж, 1964.
8. Зукоский, Кул, Гибсон. Ракетная техника и космонавтика, № 8, 64, 1964.
9. Керреброк, Хофман. Ракетная техника и космонавтика, № 6, 136, 1964.

УДК 533.915:535.338:546.293

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ПЛАЗМЫ АРГОНА \*

*Э. И. Асиновский, В. М. Батенин*

Описана методика определения коэффициента непрерывного излучения плазмы аргона в интервале длин волн 2500 ÷ 7500 Å при температурах 11 500 ÷ 12 500° К. Сравниваются полученные опытные данные с теорией непрерывного спектра низкотемпературной плазмы Бибермана — Нормана. На основе опытных данных установлена связь смещения в плазме порога фотоионизации с яркостью континуума и оценено сечение фотоионизации с уровня 4s.

Цель настоящей работы — опытное изучение непрерывного спектра плазмы аргона при атмосферном давлении и температурах 10 000 ÷ ÷ 15 000° К. Это исследование стимулировалось необходимостью разработки простого и надежного метода определения температурных полей в неоднородных плазменных источниках (столб дуги, плазменная струя и пр.) в указанной области термодинамических параметров. Использование в этом случае атомных линий аргона, как правило, сильно уширенных, связано с чрезвычайно громоздким и не всегда убедительным учетом фона. Также более сложным применительно к атомным линиям является введение поправок на неизотермичность излучающего слоя.

Исследованию непрерывного спектра аргона был посвящен ряд экспериментальных и теоретических работ [1—5]. В частности, в работе [5] было показано, что когда спектр непрерывного поглощения плазмы обусловлен фотоионизацией возбужденных атомов и свободно-свободными переходами в поле однократно заряженных положительных ионов, коэффициент излучения плазмы определяется следующими уравнениями:

$$\epsilon_{\nu} = \xi(\nu) 6,36 \cdot 10^{-47} \frac{n_e^2}{\sqrt{kT}} \quad \text{при } \nu \leq \nu_{\text{гр}}, \quad (1)$$

$$\epsilon_{\nu} = \xi(\nu) 6,36 \cdot 10^{-47} \frac{n_e^2}{kT} \exp[-h(\nu - \nu_{\text{гр}})/kT] \quad \text{при } \nu \geq \nu_{\text{гр}}, \quad (2)$$

где  $\nu_{\text{гр}}$  — граничная частота, определяемая из схемы термов атома;  $\xi(\nu)$  — множитель, учитывающий специфику многоэлектронных атомов. Для атома аргона величина  $\xi(\nu)$  была вычислена в работе [5].

Представляет интерес определить  $\xi(\nu)$  из экспериментальных данных по яркости непрерывного спектра плазмы аргона [1—4]. Такое определение величины  $\xi(\nu)$  выполнено в настоящей работе. При обработке экспериментальных данных использовался состав плазмы аргона, вычисленный без учета снижения потенциала ионизации атома в плазме.

\* Доложено на Научно-технической конференции НИИВТ 15—17.VI 1964 г.