

разряда. Найдено, что воздействие разряда на воздушную среду в каверне приводит к связыванию азота воздуха и образованию растворимых в воде окислов азота.

*Авторы благодарят И. А. Косого за полезные обсуждения работы.*

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранд N02-02-17209.*

## Литература

1. Sugiarto A., Sato M.// Thin Solid Films. 2001. V. 386. P. 295–299.
2. Wen Y. Z., Liu H. J., Liu W. P., Jiang X. Z.// Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2005. V. 5. № 2. P. 137–146.
3. Borodin V., Osipov N.// Plasma physics and Plasma Technology: IV Int. Conference. Minsk. Belarus. 2003. Contributed papers. P. 756.
4. Демьяненко Е. А., Карифов А. К., Шепелев И. И. и др. Способ очистки сточных вод нефтехимических и нефтеперепроцессинговых установок. № 2003100012. Бюл. изобретений. № 23. 2003. С. 11.

работывающих производств от растворенных фенолов и нефтепродуктов: Патент РФ 2099290// Б. И. 1997. № 35. С. 15.

5. Lee H. Y., Uhm H. S., Choi H. N. et al.// J. Korean Physical Society. 2003. V. 42. P. S880.

6. Вилюк К. В., Нагель Ю. А.// Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 5. С. 88–94.

7. Шмелев В. М., Евтухин Н. В., Че Д. О.// Химическая физика. 1996. Т. 15. № 3. С. 140.

8. Шмелев В. М., Евтухин Н. В., Козлов Ю. Н., Бархударов Э. М.// Там же. 2004. Т. 23. № 9. С. 77–84.

9. Anpilov A., Barkhudarov E., Bark Y. et al.// J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 1.

10. Bark Y., Barkhudarov E., Kozlov Y. et al.// Ibid. 2000. V. 33. P. 1.

11. Anpilov A. M., Barkhudarov E. M., Christofi N., Kopev V. A., Taktakishvili M. I., Zadiraka Yu.// Lett., Appl., Microbiol. 2002. V. 35. P. 90–94.

12. Anpilov A. M., Barkhudarov E. M., Christofi N., Kopev V. A., Kosy I. A., Taktakishvili M. I., Zadiraka Yu.// Journal of water and Health. 2005. № 2 (4). P. 267–277.

13. Шмелев В. М., Марголин А. Д.// Теплофизика высоких температур. 2003. Т. 41. № 4. С. 1.

14. Гриш Г. Спектроскопия плазмы. — М.: Мир, 1978. С. 378.

*Статья поступила в редакцию 4 мая 2005 г.*

## Surface discharge inside of an air cavity in water

V. M. Shmelev

Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov

General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*The spreading the surface discharge inside of an air cavity in water was studied. It was found two stages of the surface discharge development, reflecting initial forming the low current non equilibrium corona discharge with its following conversion in the equilibrium high current spark discharge. The area of existence of the uncompleted surface discharge was found. The electron density ( $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) in the high current discharge phase and changing in the water hydrogen factor were measured.*

УДК 537.525.5

## Метод определения коэффициента диффузии ртути в разрядных трубках

B. K. Свешников

Мордовский государственный педагогический институт им. М. Е. Евсеева, г. Саранск, Россия

*Рассмотрен метод определения коэффициента диффузии ртути в инертном газе, основанный на регистрации изменения концентрации ртути, диффундирующей вдоль разрядной трубы (РТ). Приведена схема установки и изложена методика измерений.*

Известные методы определения коэффициента диффузии, основанные на измерении скорости конденсации металла из парогазовой смеси, длительны во времени и не применимы для измерений непосредственно в газоразрядных приборах [1].

В данной работе предлагается метод определения коэффициента диффузии ртути в аргоне, основанный на регистрации изменения ртути, диффундирующей вдоль РТ.

В плазме ртутного разряда низкого давления массоперенос ртути при постоянной температуре

происходит под действием переменного электрического поля и градиента концентрации. В случае, когда исследуемый участок трубы отстоит от насыщенной парами ртути области с концентрацией  $N_0$  на расстоянии  $h_0$ , по аналогии с [2] удовлетворяется неравенство

$$h_0 > \frac{bE}{6f}. \quad (1)$$

Концентрация  $N$  ртути связана с коэффициентом  $D$  диффузии и временем  $t$  соотношением

$$N = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{h_0}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (2)$$

где  $b$  — подвижность ионов ртути в разряде;

$E$  — напряженность электрического поля;

$f$  — частота переменного напряжения.

Формула (2) является решением уравнения диффузии для одномерного случая. Ее использование предполагает, что концентрация  $N_0$  насыщенных паров ртути к началу проведения измерений принимает установившееся значение. Согласно [3] определение коэффициента диффузии по формуле (2) в условиях одномерной задачи возможно, когда длина  $h$  разрядной трубы значительно больше диффузионной длины  $\lambda$ , т. е.

$$h \gg \lambda. \quad (3)$$

Диффузионная длина для трубы цилиндрической формы радиуса  $R$  находится из формулы [4]

$$\frac{1}{\lambda^2} = \left(\frac{2,4}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2. \quad (4)$$

Тогда (3) с учетом (4) примет вид

$$h^2 \gg \frac{R^2}{2,4} (1 - \pi^2). \quad (5)$$

Поскольку для большинства конструкций разрядных трубок  $R < 5 \cdot 10^{-2}$  м, значение правой части неравенства (5) близко к нулю, поэтому

$$h^2 \gg \frac{R^2}{2,4} (1 - \pi^2),$$

т. е. в случае, когда

$$L \gg 1,2 R. \quad (6)$$

Значение  $D$  может быть найдено из формулы (2).

Концентрация ртути в процессе его диффузии в разряде может быть определена по световому потоку, пропорциональному мощности резонансного излучения линий ртути. Мощность

излучения может быть определена по формуле В. А. Фабриканта [5], которую можно свести к каноническому виду

$$W = h\nu N_e N_u g_B v,$$

где  $h\nu$  — энергия кванта испускаемого света;

$$\overline{g_B} = 2,72 g_B (V_m) \left( \frac{V_B}{a^2} + \frac{2}{a^3} \right) \frac{(e/kT_e)^2}{U_m - U_B} \exp\left(-\frac{eU_B}{kT_e}\right);$$

$N_e$  — концентрация электронов в разряде;

$$a = \frac{1}{U_m - U_B} - \frac{e}{kT_e};$$

$$v = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}} \quad \text{— средняя скорость электронов}$$

плазмы;

$g_B(U_m)$  — максимальное значение эффективного сечения возбуждения атома;

$U_B$  — потенциал возбуждения резонансного уровня;

$U_m$  — потенциал, при котором эффективное сечение приобретает максимальное значение;

$T_e$  — температура электронов.

При малых плотностях разрядного тока  $j < 40 \text{ A/m}^2$  и давлении инертного газа порядка 2 кПа электронные температуры в инертном газе и в его смеси близки по величине. Поэтому при постоянной плотности разрядного тока справедливо выражение

$$\frac{F}{F_0} = \frac{W}{W_0} = \frac{N}{N_0}, \quad (7)$$

где  $F, F_0$  — световые потоки, соответствующие концентрациям ртути  $N_u$  и  $N_0$  в разряде.

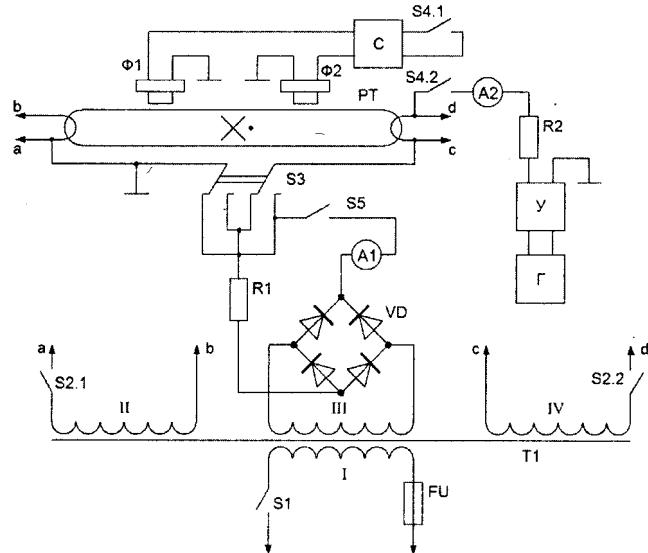
Тогда (2) с учетом (9) примет вид

$$\frac{F}{F_0} = \operatorname{erfc} \frac{h_0}{2\sqrt{Dt}}. \quad (8)$$

Таким образом, в случае, когда выполняются условия (1) и (6), при установившемся значении давления насыщенных паров ртути в разрядной трубке коэффициент диффузии в разряде переменного тока можно определить по времени  $t$  и отношению световых потоков в области, насыщенной парами ртути, и с участка, расположенного от нее на расстоянии  $h_0$ .

Определение коэффициента диффузии в РТ осуществляется после обеднения ее анодной области ртутью с помощью катафореза. Для этого на РТ подается постоянное напряжение с выпрямителя, выполненного на диодах VD (рисунок). Тумблер S3 предназначен для изменения

полярности постоянного напряжения, прикладываемого к электродам РТ. В целях облегчения зажигания разряда в схеме предусмотрен нагрев электродов напряжением, снимаемым с обмоток II и IV трансформатора Т1. В этом случае тумблер S2 ставится в положение "включено".



**Схема установки для определения коэффициента диффузии ртути в разрядных трубках:**

Ф1, Ф2 — фрагменты; РТ — разрядная трубка;  
У — усилитель; Г — генератор

После обеднения анодной области ртутью тумблер S4 переводится в положение "включено". В РТ возбуждается разряд на частоте 400 Гц (тумблеры S2, S5 находятся в положении "включено"). На этой частоте амплитуда колебаний ионов ртути составляет  $10^{-8}$  м, что практически не сказывается на точности проводимых измерений.

Разрядная трубка питается переменным напряжением, снимаемым с выхода усилителя У, вход которого соединяется с измерительным генератором Г.

Световой поток излучения разряда измеряется в относительных единицах с помощью кремниевых фотоэлементов Ф1 и Ф2. Линейные размеры применяемых нами фотоэлементов составляли  $(10 \cdot 6) \cdot 10^{-3}$  м. Для селективного выделения резонансных линий ртути из излучаемого разряда спектра применялся светофильтр. Фотоэлемент Ф1 предназначен для регистрации ртутного излучения в зоне, насыщенной парами ртути. С фотоэлемента Ф2, установленного на фиксированном расстоянии  $h_0$  от Ф1, снимается сигнал, величина которого определяется концентрацией ртути в трубке в заданный момент времени. Электрические сигналы, снимаемые с фотоэлементов Ф1 и Ф2, поступают для записи на вход двухканального самопишувшего прибора (С) Н338-2.

Для измерения коэффициента диффузии ртути в РТ устанавливается разрядный ток, плот-

ность которого не превышает  $40 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . За начало отсчета времени  $t$  диффузии ртути в трубке при расчете  $D$  по формуле (8) берется время, которому соответствует установившееся значение давления насыщенных паров ртути, регистрируемого фотоэлементом Ф2.

Из полученных диаграмм определяются значения сигналов, пропорциональные световым потокам, а также время диффузии по установленной скорости движения ленты. Далее для отношения световых потоков  $F/F_0$ , времени  $t$  и расстояния  $h_0$  рассчитывается коэффициент диффузии по формуле (8).

Определение коэффициента диффузии осуществлялось на РТ, изготовленных на базе люминесцентных ламп типа ЛБ-20 без люминофорного покрытия. Диаметр трубки составлял  $3,8 \cdot 10^{-2}$  м, длина  $6 \cdot 10^{-1}$  м. Измерения проводили на частоте 400 Гц при силе разрядного тока  $10^{-1}$  А, что удовлетворяет условиям (1) и (3). Расстояние между фотоэлементами было выбрано равным  $h_0 = 0,12$  м.

Значение коэффициента диффузии ртути в РТ рассчитано по формуле (8) для  $t = 7,2 \cdot 10^3$  с, отношение световых потоков  $F/F_0 = 0,44$  составило  $D = 10,29 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Найденное значение коэффициента диффузии сравним с теоретическим. Оно определяется по [6]

$$D = \frac{2}{3d^2 p} \sqrt{k^3 T^3 / T^3 m},$$

где  $d$  — диаметр атома ртути;

$p$  — парциальное давление аргона;

$K$  — постоянная Больцмана;

$T$  — температура трубки;

$m$  — масса атома ртути.

Расчетное значение коэффициента диффузии ртути для значений  $d = 5,1 \cdot 10^{-10}$  м;  $p = 266,6$  Па;  $m = 3,36 \cdot 10^{-25}$  кг;  $T = 300$  К равно  $D = 10,9 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Сравнение полученных данных с результатами расчетов показывает, что расхождение в определении коэффициента диффузии не превышает 6 %.

Рассмотрим источники возможных погрешностей при определении коэффициента диффузии ртути в аргоне предложенным способом.

Относительная погрешность в нахождении коэффициента диффузии по формуле (8) определяется относительными погрешностями  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ , связанными с погрешностью в определении светового потока и с временем диффузии ртути в инертном газе. Поскольку относительные погрешности  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  не зависят и их значения соответствуют одинаковым доверительным вероятностям, то погрешность  $\gamma$  в определении коэффициента диффузии может быть вычислена

как среднеквадратичное указанных относительных погрешностей

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}. \quad (9)$$

Теперь определим относительную погрешность  $\gamma_1$  в определении светового потока. Она связана с нелинейностью амплитудной характеристики усилителя самописца Н338-2 (в случае идентичности характеристик применяемых фотоэлементов и постоянства температуры РТ в процессе измерений). Для ширины канала записи, равной  $7 \cdot 10^{-2}$  м, она приведет к изменению светового потока на 4 % [7]. Относительная погрешность  $\gamma_2$  в определении коэффициента диффузии ртути в аргоне за счет неточности измерения времени также определяется погрешностью самописца. Согласно [7] относительная погрешность самописца по записи времени составляет  $\gamma_2 = 6\%$ .

Рассчитанная по (9) среднеквадратичная относительная погрешность  $\gamma$  коэффициента

диффузии ртути в аргоне составляет 3,2 %. Это значение менее 6 %, что дополнительно подтверждает достоверность предложенного метода.

Таким образом, предложенный метод можно использовать для измерения коэффициента диффузии металлов в инертных газах и их смесях.

### Л и т е р а т у р а

1. Арефьев К. М., Борщанский В. М. и др. Термофизические свойства газов. — М.: Наука, 1973. С. 49.
2. Свешников В. К. Миграция натрия в разряде переменного тока// Изв. вузов. Сер. Физика. 1985. № 2. С. 3—9.
3. Карапухин В. В., Соколов И. А., Кузнецов. — М.: Металлургия, 1982. С. 53.
4. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. — М.: Наука, 1980. С. 85.
5. Грановский В. Я. Электрический ток в газе. — М.: Наука, 1971. — 544 с.
6. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. — Киев: Высш. шк., 1981. — 264 с.
7. Бердичевский М. Г., Иванцов В. А., Лапин Б. А., Якубов М. Г. Электроизмерительные самопищающие приборы. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 160 с.

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2004 г.

## Method of determining the diffusion coefficient of mercury in discharging tubes

V. K. Sveshnikov

Mordovian State Pedagogical Institute, Saransk, Russia

*The article describes the method of determining the diffusion coefficient of mercury in discharging tubes. The method is based on registration the changes in the level of concentration of mercury diffusing along the discharging tube. The scheme illustrates the process of installation, also there is given the measuring technology.*

УДК 537.527

## Плавление пластинчатого электрода в дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом (начало процесса)

B. O. Bushma, B. F. Kubarev, D. V. Kalashnikov

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

*Рассмотрена задача плавления металла электрода с удалением расплава. Показано, что в начале сварки существует стационарный режим плавления.*

В дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом электрическую дугу можно отнести к короткой дуге, так как влияние интенсивно расходуемого электрода на ее характеристики весьма существенно [1].

Согласно классической теории [2] при оценке теплового воздействия электрической дуги на металл в дуге выделяют три характерные области: катодную, анодную и столб дуги.

Существующие данные о неравномерности распределения суммарной энергии дуги по зонам, как и само деление, весьма условны, а при сварке на переменном токе различие между катодной и анодной областями при средней оценке исчезает.

Энергия теплового потока в тело катода (анода) расходуется на нагрев, плавление и испарение.