

УДК 621.327.532.

В. К. Свешников, докт. техн. наук,
В. Г. Васильченко, асп.
 ФГБОУ ВПО «Мордовский
 государственный педагогический
 институт им. М. Е. Евсевьева»
 кафедра физики и методики
 обучения физике
 430007, Россия, Республика
 Мордовия, г. Саранск,
 ул. Студенческая, 11а, +7(8342) 33-
 92-82, WWG_962@mail.ru

ВЛИЯНИЕ УТЕЧКИ НАТРИЯ В НАТРИЕВОЙ ЛАМПЕ НА ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Введение. В процессе эксплуатации натриевых ламп происходит убыль натрия из объема разрядной трубки (РТ). Следствием потери натрия из газоразрядного промежутка является ухудшение электрических и световых характеристик ламп и их преждевременный выход из строя. В связи с этим одной из актуальных проблем в производстве натриевых ламп является прогнозирование продолжительности работы изготовленных ламп. Одним из чувствительных параметров убыли натрия из натриевых ламп в процессе их эксплуатации является напряжение на лампе [1].

По изменению напряжения на лампе со временем и ионному току натрия, отбираемого с поверхности разрядной трубки косвенно можно судить о качестве РТ [2].

Ниже приводится временная зависимость напряжения на лампе от изменения состава амальгамы за счет диффузионной утечки натрия из РТ.

Зависимость напряжения на лампе от времени и параметров структуры оболочки разрядной трубки

Причинами убыли натрия из объема РТ являются: 1. Химическое взаимодействие натрия с конструктивными элементами РТ. 2. Диффузионная утечка ионов натрия через оболочку керамической РТ.

Наиболее вероятным процессом химического взаимодействия оксида Al_2O_3 из которого состоит оболочки РТ с натрием Na следует считать обменную реакцию, в результате которой окисел восстанавливается до металла, а натрий окисляется



Замедление реакции между Al_2O_3 и Na , а, следовательно, и убыль натрия в процессе работы лампы возможна в случае, когда температура керамической трубки выше температуры амальгамы натрия на $50-70^{\circ}C$ [3].

В обзоре [4] отмечено, что натрий оксидное покрытие электродов не отравляет.

Убыль натрия из объема разрядной трубки происходит вследствие его диффузионной утечки по границам и зернам керамической оболочки РТ [5].

Электролитический перенос натрия через оболочку РТ лампы экспериментально установлен Е. Ф. Винером [6]. Методом магнетрона нами подтвержден ионный характер эмиссии натрия с поверхности разрядной трубки натриевой лампы [7].

Установим временную зависимость $U_{л}$ напряжения на лампе от коэффициента диффузии D и параметров структуры a и b керамической оболочки РТ при следующих допущениях:

1. Отчет времени t ведется от момента времени, соответствующего максимальному значению световой отдачи лампы.
2. Значение коэффициента диффузии D ионов натрия через оболочку РТ постоянно во времени.

Максимальной световой отдаче лампы соответствует амальгама натрия от 0,7 до 0,75 атомных долей [3]. Момент времени t_0 , которому соответствует максимальная световая отдача изготовленной лампы, достигается, тренировкой РТ электрическим разрядом.

Допущение 2 имеет место в промежутке работы РТ, когда ее температура практически постоянна. В этом случае, изменение содержания натрия в амальгаме при максимальной световой отдаче лампы за время ее работы не должно превышать 0,1 атомной доли [8].

Для нахождения временной зависимости напряжения на лампе воспользуемся соотношением:

$$U_{л} = U_{ак} + El_{э} \quad (2)$$

где $U_{ак}$ – анодно-катодное падение напряжения; E – градиент потенциала в плазменном столбе разряда; $l_{э}$ – расстояние между электродами.

Катодное падение потенциала в натриевых лампах больше, чем анодное, поэтому средний потенциал плазмы вблизи электродов при работе лампы на переменном токе положителен [5].

Градиент потенциала E , входящий в (2) для расчета напряжения на лампе, может быть определен по эмпирической формуле, записанной в системе СИ [9]

$$E \approx 5 \cdot 10^3 \mu_{Na}^{-2} \left(\frac{T - 273}{1000} \right)^4 I_p^{-0.2} \quad (3)$$

где μ_{Na} – атомная доля натрия в амальгаме; T – температура холодной зоны РТ, I_p – разрядный ток.

Расчет E по формуле (3) дает значение с точностью в пределах 15% при изменении μ_{Na} от 0,6 до 0,8 ат. долей, T от 550 до 800⁰С, тока от 2 до 8 А и диаметра РТ от 6 до 14 мм [9].

Разрядный ток определяется следующим соотношением:

$$I_p = \frac{W}{K_{л} U_{л}} \quad (4)$$

где $K_{л}$ – коэффициент мощности.

Атомная доля μ натрия в амальгаме, входящая в (2) с учетом [10] определяется формулой

$$\mu = \left(1 + 0,115 \frac{M_{Hg}}{M_{Na}} \right)^{-1} . \quad (5)$$

Масса Q , диффундировавшего через РТ за время t натрия, с учетом допущений 1 и 2, определенная из уравнения Фика, равна:

$$Q = BDt . \quad (6)$$

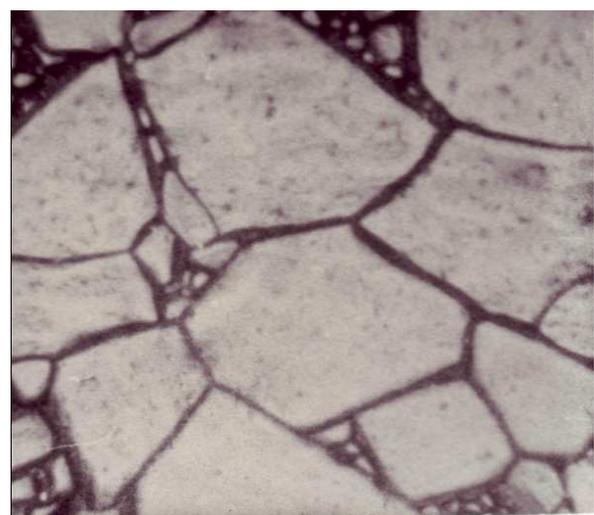
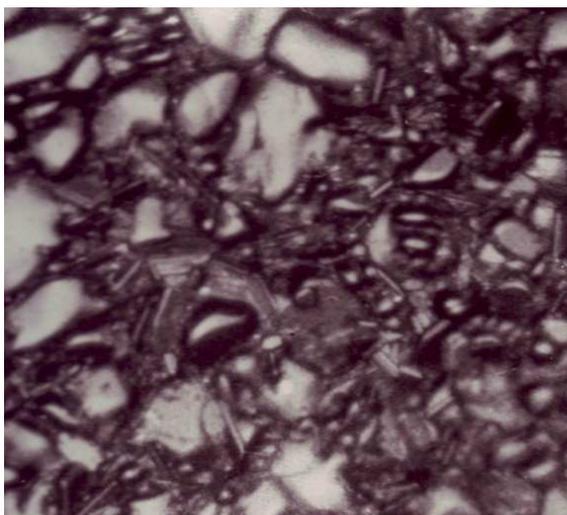
Здесь $B = \frac{2\pi l A n_0}{N_A (\ln r_2 - \ln r_1)}$, n_0 – средняя концентрация атомов натрия по сечению РТ;

A – атомный вес натрия; l – длина РТ; N_A – число Авогадро; r_1 , r_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы РТ, D – эффективный коэффициент диффузии натрия.

Согласно [11], атомная доля натрия $\mu(t)$, содержащаяся в РТ в момент времени t определяется по формуле:

$$\mu(t) = \left(1 + 0,115 \frac{M_{Hg}}{M_{Na} - BDt} \right)^{-1} . \quad (7)$$

Эффективный коэффициент диффузии в формулах (6) и (7) зависит от структуры оболочки разрядной трубки натриевых ламп, которая изготавливаются на основе поликристаллической окиси алюминия. Структура оболочки трубок формируется в результате протекания многоступенчатых физических процессов: формовка, сушка, спекание, термообработка. Она характеризуется следующими параметрами: шириной границы между кристаллами b и величиной зерна a . Различные структуры поликристаллической окиси алюминия представлены на рисунке 1.



а)

б)

Рис. 1 – Структура поликристаллической окиси алюминия:

а) мелкозернистая, б) крупнозернистая

Эффективный коэффициент D диффузии натрия для поликристаллической окиси алюминия связан с размерами a , b и коэффициентом диффузии по границам зерен соотношением [5]:

$$D = \frac{4b^2}{a^2} D_{zp} \quad (8)$$

Подставим (3), (4), (7) и (8) в (2) получим

$$U_{л} = U_{ак} + 5 \cdot 10^{-9} \left(1 + 0.115 \frac{M_{Hg}}{M_{Na} - 4Bb^2 D_{zp} t / a^2} \right)^2 l_{г} (T - 273)^4 (W / K_{л} U_{л})^{-0.2} . \quad (9)$$

В натриевых лампах высокого давления величина анодно-катодного падения потенциала, по данным работы [12] равна 4В. Поскольку $El_{г} > 80$, поэтому в данном случае напряжение на лампе с погрешностью менее 3% можно рассчитать по формуле:

$$U_{л} = \left[5 \cdot 10^{-9} \left(1 + 0.115 \frac{M_{Hg}}{M_{Na} - 4Bb^2 D_{zp} t / a^2} \right)^2 l_{г} (T - 273)^4 (K_{л} / W)^{0.2} \right]^{1.25} . \quad (10)$$

Из (10) следует, что напряжения на лампе зависит от структуры оболочки и коэффициента диффузии натрия по границам зерен.

Экспериментальная проверка соотношения (10) осуществлялась на партии натриевых ламп ДНаТ-400 состоящей из 5 штук. Разрядные трубки из поликристаллической окиси алюминия дозировались ксеноном до давления 2,6 кПа и амальгамой натрия массой 2,4 кг, с 30% содержанием в ней натрия.

Дефектная партия РТ имела мелкозернистую недоспеченную структуру оболочки с размерами зерен от 5 до 60 мкм. Трубки из этой партии имеют сравнительно высокое значение коэффициента диффузии, усредненное значение для партии ламп составляет $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Разрядные трубки были наполнены амальгамой натрия, содержание которого составляло 0,6 ат. долей.

Контрольная партия РТ имела крупнозернистую структуру с размерами зерен от 40 до 100 мкм. Амальгама натрия содержала 0,72 ат. долей натрия. Усредненный коэффициент диффузии составлял $6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

Для расчета напряжения на лампе по формуле (9) брались следующие исходные данные: внешний диаметр РТ – $8,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; внутренний – $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l = 0.11 \text{ м}$; $M_{Hg} = 5.1 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$; $M_{Na} = 1.89 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$; $n = 3.91 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$; $K_{л} = 0,85$; $W = 400 \text{ Вт}$; $T = 923 \text{ К}$; $l_{г} = 0,075 \text{ м}$; коэффициент диффузии для РТ с мелкозернистой структурой составляет $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, а крупнозернистой $6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

В таблице 1 приведены экспериментальные и расчетные значения изменения напряжения на лампе от времени ее работы соответственно для дефектной и контрольной партии:

Таблиця 1

Данные	Продолжительность работы лампы, ч							
	100		1000		2000		3000	
	дефек- тная	контро- льная	дефек- тная	контро- льная	дефек- тная	контро- льная	дефек- тная	контро- льная
Расчетные	100,6	100	108,5	104	119,8	108,6	135,6	114
Эксперимен- тальные	101	97	107	100,6	114	101,7	121	103

Из таблицы 1 следует, что напряжение контрольной партии после 3000 часов работы составляет 103 В, тогда как дефектной 121 В, разница измеренных напряжений составляет 18 В. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными в определении напряжения на лампе для контрольной и дефектной партии не превышает 12%. Что может служить одним из информативных параметров для контроля РТ.

Таким образом, по изменению напряжения на лампе со временем и ионному току натрия, отбираемого с электрода, расположенного на колбе натриевой лампы, можно косвенно судить о продолжительности работы лампы.

Выводы

1. Причиной увеличения напряжения на натриевой лампе в процессе ее эксплуатации является диффузионная утечка ионов натрия разрядной трубки.
2. Установлена временная зависимость напряжения на лампе U_n от коэффициента диффузии D и параметров структуры a и b керамической оболочки РТ
3. Полученное выражение для временной зависимости напряжения на лампе совместно с ионным током натрия можно использовать для косвенного контроля качества РТ натриевых ламп.

Литература

1. Волкова, Е. Б. К вопросу о выборе и воспроизводимости рабочего режима натриевых ламп высокого давления / Е. Б. Волкова, Г. Н. Рохлин // Светотехника. – 1980. – №8. – С. 5-7.
2. А.С. 1285443 СССР, М.Кл. Н01 К 9/42. Способ контроля качества разрядных трубок газоразрядных ламп / В. К. Свешников, В. С. Мордюк, С. Н. Громова (СССР). Опубл. 23.01.87. Бюл-Н 3.
3. Пат. 3453477 США. Alumina-ceramic sodium vapour lamp / R. E. Hanneman, P. J. Jorgenson, D. M. Speros.
4. Сорокин, О. В. Воздействие различных веществ на термоэмиссионные свойства оксида / О. В. Сорокин // электронное приборостроение. М.-Л.: Энергия. – 1968. с. 479
5. Мордюк, В. С. К расчету временной зависимости световой отдачи натриевых ламп высокого давления / В. С. Мордюк // Светотехника. – 1976. – № 2. – С. 20.
6. Wyner, E. F. Electrolysis of sodium through alumina arc tubes / E.F. Wyner // J.Illum.Eng.Soc. - 1979. - Vol.8.№3. - P.166-171.
7. Васильченко, В. Г. Метод определения удельного заряда иона натрия / В. Г. Васильченко // Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2012», 9-13 апреля 2012 г.: [материалы] / Отв. ред. А.И. Андреев [и др.] [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2012. – 1 электрон. Опт. Диск (DVD-ROM); 12 см. – Систем. Требования: ПК с процессором 486+; Windows 95; дисковод DVD-ROM; Adobe Acrobat Reader. ISBN 978-5-317-04041-3
8. Denbigh, P. L. Effect of sodium/mercury ratio and amalgam temperature on the efficacy of 400 W high-pressure sodium lamps / P.L Denbigh // Lighting Res. Technol. – 1974. – Vol.6.№2. – P. 62-68.
9. Волкова, Е. Б. Инженерный расчет натриевых ламп высокого давления / Е. Б. Волкова, Г. Н. Рохлин // Светотехника. – 1979. – №4. – С. 1-3.
10. Аносов, В. Я. Основы физико-химического анализа / В. Я. Аносов, М. И. Озерова, Ю. А. Фиалков. - М.: Наука. – 1976. - 504 с.

11. Свешников, В.К. Выбор информативных параметров для контроля утечки натрия из разрядных трубок натриевых ламп / В.К Свешников //Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1991. – Вып.4. – С. 87-91

12. Denbigh, P. L. Electrode fall and electric field measurement in High-pressure Sodium discharge / P. L. Denbigh, D. O. Wharmby // Light. Res. And Technol. – 1976. – Vol. 8. – № 3. – P. 141-145

ВПЛИВ ВИТОКУ НАТРІЮ В НАТРІЄВИХ ЛАМПАХ НА ПАДІННЯ НАПРУГИ

В. К. Свешніков, В. Г. Васильченко

У роботі наводиться тимчасова залежність напруги на лампі ДНаТ-400 від коефіцієнта дифузії і параметрів структури оболонки розрядної трубки (РТ). Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними у визначенні напруги на лампі не перевищує 12%. Результати дослідження можуть бути використані для непрямого контролю якості розрядних трубок натрієвих ламп.

IMPACT SODIUM LEAKS IN SODIUM LAMPS FOR VOLTAGE DROP

V. K. Sveshnikov, V. G. Vasilchenko

In the paper the time dependence of the voltage across the lamp DNaT-400 on the diffusion coefficient and the parameters of the shell structure of the discharge tube (RT). The discrepancy between the calculated and experimental data to determine the voltage across the lamp does not exceed 12%. The results can be used to indirectly control the quality of discharge tubes sodium lamps.