

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.327.539

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-124-132

Математическая модель процесса испарения компонентов амальгамы в разрядных источниках излучения

Н.Ю. Петренко¹, С.В. Пучнина^{1,2}, С.А. Гаврилов²

¹АО «Специальное конструкторское бюро «Зенит»,
г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

mikolatrue777@gmail.com

Актуальность создания математической модели испарения компонентов амальгамы в разрядных источниках излучения (лампах) обусловлена зависимостью параметров ИК-излучения разрядных источников специального назначения от давления паров излучающей добавки. Давление, в свою очередь, зависит от размеров и температуры разрядного, катодного и анодного объемов.

В связи с многообразием конструкций газоразрядных ламп предложена система уравнений, позволяющая определить давления паров компонентов амальгамы с учетом конкретного конструктивного исполнения разрядной трубки (горелки) и ее температурного профиля. Описана конструкция разрядного источника ИК-излучения систем защиты летательных аппаратов, для которой приведен расчет давлений паров цезия и ртути. Выявлено влияние массы и состава амальгамы на давление излучающей добавки при фиксированных размерах и температурах разрядного, катодного и анодного объемов.

В результате проведенных расчетов получены зависимости давления паров цезия и ртути от температуры холодной точки горелки при различных массах амальгамы. Выявлены особенности роста давления цезия при переходе из насыщенных паров в ненасыщенные.

Ключевые слова: разрядный источник излучения; математическая модель; амальгама; цезий; давление насыщенных паров; плазмообразующая среда; катодный и анодный объемы.

Для цитирования: Петренко Н.Ю., Пучнина С.В., Гаврилов С.А. Математическая модель процесса испарения компонентов амальгамы в разрядных источниках излучения // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 2. – С. 124–132. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-124-132

Mathematical Model of Components Amalgam Evaporation Process in Discharge Sources of Radiation

N.Yu. Petrenko¹, S.V. Puchnina^{1,2}, S.A. Gavrilov²

¹JSC «Special design bureau «Zenit», Moscow, Russia

²National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

mikolatrue777@gmail.com

The urgency of creating a math model of the amalgam components evaporation in discharge radiation sources (lamps) is determined by dependence of the special purpose discharge source radiation parameters on the irradiative additive vapor pressure, which depends on the dimensions and temperatures of discharge, cathode and anode volumes.

In connection with a variety of discharge lamps constructions, a system of equations, allowing determining the amalgam components pressure, considering the specific design and the temperature profile of a discharge tube, has been presented in this work. The infrared radiation source design of the aircraft protection system has been described in detail. The effect of the amalgam mass and composition upon the pressure of the irradiative additive at fixed dimensions and temperatures of the discharge, cathode and anode volumes has been revealed.

As a result of the performed calculations the dependences of cesium and mercury pressure versus the discharge tube cold point temperature have been obtained. The cesium pressure growth peculiarities at the discharge transmission from saturated vapors to unsaturated ones have been clarified.

Keywords: discharge sources of radiation; mathematical model; amalgam; cesium; saturated vapors pressure; temperature; cathode and anode volumes.

For citation: Petrenko N.Yu., Puchnina S.V., Gavrilov S.A. Mathematical model of components amalgam evaporation process in discharge sources of radiation // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 2. – P. 124–132. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-124-132

Введение. Лампы с разрядом в смеси паров цезия и ртути широко применяются в качестве ИК-источников для систем защиты летательных аппаратов [1, 2]. Надежность работы данного класса ламп определяется стабильностью излучательных характеристик плазмообразующей среды, связанных, в свою очередь, с давлением компонентов над амальгамой металла [3, 4]. В работе [5] предложена математическая модель расчета давления паров цезия и ртути в разрядной трубке (горелке) в зависимости от температур разрядной зоны, заэлектродного объема и состава амальгамы.

Цель настоящей работы – развить сформированную методологию расчета применительно к конкретному устройству разрядного источника. Несмотря на то что основное внимание уделено изучению испарения амальгамы цезия, разработанная модель может быть использована для различного конструктивного исполнения ламп с разрядом в смеси металла (излучающей добавки) с ртутью.

Описание конструкции разрядного источника. Для построения математической модели рассмотрим конструкцию разрядного источника (рис.1). В цилиндрическую сапфировую (лейкосапфировую, корундовую) разрядную оболочку герметично установлены электродные узлы, представляющие собой соединение электрода (катода и анода) с тонкостенным колпачком. Конфигурация катода и анода определяется необходимостью поддержания стабильности разряда, теплофизического состояния оболочек, а в случае амальгамных ламп – обеспечения требуемых температурных режимов заэлектродных зон на расстоянии h_1 и h_2 . Внутренний объем разрядных ламп заполнен цезием или другой излучающей добавкой и ртутью, которые вводятся в виде чистых металлов. Для зажигания разряда горелка дополнительно заполняется ксеноном при давлении 70 мм рт. ст., который на испарение амальгамы не влияет и в расчетах не учитывается.

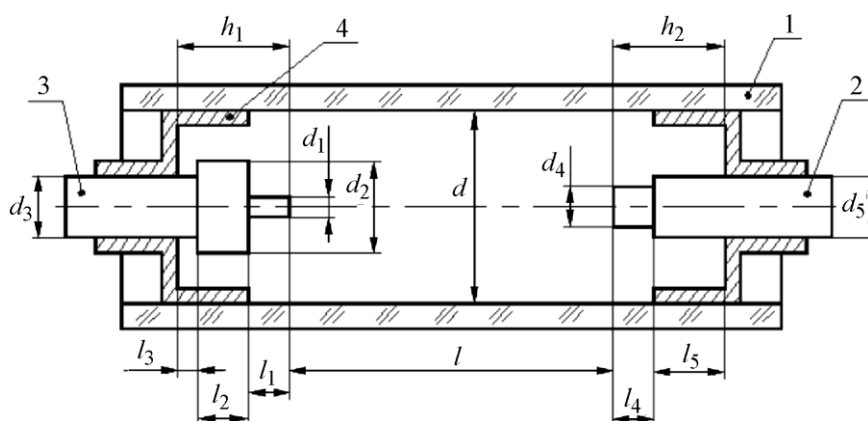


Рис.1. Принципиальная схема горелки лампы СП-2-1500: 1 – сапфировая трубка; 2 – анод; 3 – катод; 4 – ниобиевый колпачок

Fig.1. Discharge tube of SS-2-1500 lamp principal scheme: 1 – sapphire tube; 2 – anode; 3 – cathode; 4 – niobium cap

Построение модели. Для описания процессов испарения амальгамы любого металла усовершенствуем систему уравнений, предложенную в работе [5], выделив из заэлектродного объема горелки катодную и анодную области:

$$G_M + G_{рт} + G_{ам} = G, \quad (1)$$

$$G_M = \frac{P^0 \mu_M X_M}{R_0} \left(\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{кат}}{T_{кат}} + \frac{V_{ан}}{T_{ан}} \right), \quad (2)$$

$$G_{рт} = \frac{P^0 \mu_{рт} X_{рт}}{R_0} \left(\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{кат}}{T_{кат}} + \frac{V_{ан}}{T_{ан}} \right), \quad (3)$$

$$P_M = P^0 X_M, \quad (4)$$

$$P_{рт} = P^0 X_{рт}, \quad (5)$$

$$X_M + X_{рт} = 1, \quad (6)$$

где G_M , X_M и $G_{рт}$, $X_{рт}$ – масса пара и мольная доля металла и ртути соответственно; μ_M , $\mu_{рт}$ – молекулярная масса металла и ртути соответственно; R_0 – универсальная газовая постоянная; V_p , $V_{кат}$, $V_{ан}$, T_p , $T_{кат}$, $T_{ан}$ – объем и температура разрядного промежутка,

заэлектродных катодной и анодной областей соответственно; $G_{ам}$ – масса амальгамы; P_M^0 , $P_{рт}^0$ – давления паров компонентов амальгамы (Па) над индивидуальными веществами, которые рассчитываются по уравнению Антуана [6–8]:

$$\lg P_M^0 = A + \frac{B}{T}. \quad (7)$$

Здесь T – абсолютная температура (К); A , B – справочные константы, индивидуальные для каждого элемента.

Разрядный V_p , заэлектродные катодный $V_{кат}$ и анодный $V_{ан}$ объемы ламп определяются как

$$V_p = \pi \frac{d^2}{4} l, \quad (8)$$

$$V_{кат} = \pi \frac{d^2}{4} h_1 - v_{кат}, \quad (9)$$

$$V_{ан} = \pi \frac{d^2}{4} h_2 - v_{ан}, \quad (10)$$

где d – внутренний диаметр горелки; l – межэлектродное расстояние; h_1 , h_2 – глубина заэлектродных катодной и анодной областей соответственно; $v_{кат}$ и $v_{ан}$ – объем катода и анода.

Так как катод и анод можно в обобщенной форме представить как совокупность цилиндров (см. рис.1), то объем v каждого из них будет равен сумме объемов отдельных цилиндров:

$$v = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n d_i^2 l_i, \quad (11)$$

где d_i , l_i , n – диаметр, высота и количество цилиндров, составляющих катод или анод соответственно.

Известно [6], что мольная доля металла в амальгаме определяется отношением

$$X_M = \frac{n_M}{n_M + n_{рт}} = \frac{m_M/\mu_M}{m_M/\mu_M + m_{рт}/\mu_{рт}}, \quad (12)$$

где n_M , $n_{рт}$ и m_M , $m_{рт}$ – количество вещества и масса излучающей добавки и ртути в амальгаме при работе лампы соответственно.

Следовательно, массы металла и ртути в амальгаме работающей лампы равны:

$$m_M = m_M^0 - G_M, \quad (13)$$

$$m_{рт} = m_{рт}^0 - G_{рт}, \quad (14)$$

где m_M^0 , $m_{рт}^0$ – исходная масса металла и ртути в лампе соответственно.

Подставив уравнение (4) в выражение (2), получим уравнение для определения массы пара металла над амальгамой:

$$G_M = \frac{P_M^0 \mu_M X_M}{R_0} \left(\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{кат}}{T_{кат}} + \frac{V_{ан}}{T_{ан}} \right) = G_M^0 X_M. \quad (15)$$

Подстановка уравнения (5) в выражение (3) с учетом (6) приводит к следующему выражению для массы пара ртути над амальгамой:

$$G_{рт} = \frac{P_{рт}^0 \mu_{рт} X_{рт}}{R_0} \left(\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{кат}}{T_{кат}} + \frac{V_{ан}}{T_{ан}} \right) = G_{рт}^0 X_{рт} = G_{рт}^0 (1 - X_M), \quad (16)$$

где G_M^0 и $G_{рт}^0$ – соответственно масса пара металла и ртути над чистыми металлом и ртутью при фиксированных объемах и температурах разрядной, заэлектродных катодной и анодной областей.

Введение в уравнение (12) массы металла и ртути из уравнений (13) и (14) приводит к формуле для мольной доли излучающей добавки в амальгаме:

$$X_M = \frac{m_M^0 - G_M}{\mu_M} \left(\frac{m_M^0 - G_M}{\mu_M} + \frac{m_{рт}^0 - G_{рт}}{\mu_{рт}} \right)^{-1}. \quad (17)$$

Таким образом, окончательное уравнение для расчета мольной доли металла в амальгаме после подстановки в (17) значений массы паров излучающей добавки и ртути из уравнений (15) и (16) имеет вид

$$X_M = \frac{m_M^0 - G_M^0 X_M}{\mu_M} \left(\frac{m_M^0 - G_M^0 X_M}{\mu_M} + \frac{m_{рт}^0 - G_{рт}^0 (1 - X_M)}{\mu_{рт}} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Для удобства решения уравнения (18) приведем его к виду

$$ar^2 + bX_M + c = 0, \quad (19)$$

$$a = \frac{G_{рт}^0}{\mu_{рт}} - \frac{G_M^0}{\mu_M}, \quad b = \frac{m_M^0}{\mu_M} + \frac{m_{рт}^0}{\mu_{рт}} - \frac{G_{рт}^0}{\mu_{рт}} + \frac{G_M^0}{\mu_M}, \quad c = -\frac{m_M^0}{\mu_M}.$$

Мольная доля не может быть отрицательной, поэтому единственным решением уравнения (19) является формула

$$X_M = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (20)$$

Зная X_M , P_M^0 , $P_{рт}^0$, можно рассчитать давления паров металла и ртути в разрядной трубке в зависимости от температуры и объемов разрядной, катодной и анодной зон (см. уравнения (4)–(6)).

Отметим, что приведенные выражения относятся к случаю расчета давлений насыщенных паров компонентов над амальгамой. При полном испарении амальгамы и переходе к разреду в ненасыщенных парах для расчета давлений излучающей добавки и ртути необходимо использовать преобразованные с учетом конструктивного исполнения лампы уравнения (2) и (3):

$$P_{рт} = m_{рт}^0 R_0 \left[\mu_{рт} X_{рт} \left(\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{кат}}{T_{кат}} + \frac{V_{ан}}{T_{ан}} \right) \right]^{-1},$$

$$P_M = m_M^0 R_0 \left[\mu_M X_M \left(\frac{V_p}{T_p} + \frac{V_{кат}}{T_{кат}} + \frac{V_{ан}}{T_{ан}} \right) \right]^{-1}.$$

Результаты и их обсуждение. Определим основные факторы, влияющие на давление компонентов амальгамы. В качестве объекта исследований будем использовать лампу в парах цезия и ртути, некоторые конструктивные особенности которой рассмотрены в [5].

Исходные данные для расчета разрядного и заэлектродных объемов (см. рис.1) представлены в таблице:

Параметр, мм	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	h_1	l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	h_2
Значение	11	4	9	6	6	9	17	35	14	4	3	10	7	17

Толщина стенки колпачка мала, поэтому при вычислении заэлектродных объемов ею можно пренебречь. Таким образом, исходя из уравнений (8)–(11), с использованием данных таблицы разрядный и заэлектродные объемы равны: $v_{\text{кат}} = 5,15 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$; $v_{\text{ан}} = 7,28 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$, $V_{\text{кат}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $V_{\text{ан}} = 7,86 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$, $V_p = 3,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Из [5] следует, что при удельной электрической мощности разряда 320 Вт/см осевая температура разряда $\approx 5800 \text{ К}$, а температура поверхности горелки $\approx 1100 \text{ К}$. Рассчитанная по этим данным средняя температура $\approx 4500 \text{ К}$. В [9] получены результаты пирометрических измерений температуры поверхности горелки при удельной электрической мощности разряда $\approx 390 \text{ Вт/см}$. Из граничных данных следует, что температуры катодной и анодной зон равны 580 и 720 °С соответственно. Для расчета средних давлений компонентов амальгамы как индивидуальных веществ в горелке подставим минимальную температуру катодной зоны в уравнение (7) для ртути и цезия: $P_{\text{м}}^0 = 40\,393 \text{ Па}$, $P_{\text{рт}}^0 = 1\,917\,022 \text{ Па}$.

Используя полученные значения давления, объема и температуры разрядной, заэлектродной катодной и анодной зон, вычислим массы паров цезия и ртути над чистыми веществами согласно уравнениям (15) и (16): $G_{\text{м}}^0 = 0,00179 \text{ г}$, $G_{\text{рт}}^0 = 0,128 \text{ г}$.

Далее подставим полученные значения масс паров ртути и цезия вместе с исходными дозировками ртути и цезия в уравнение (20) и получим мольную долю цезия в амальгаме при работе лампы: $a = 6,26 \cdot 10^{-4}$; $b = -5,5 \cdot 10^{-4}$; $c = -5,17 \cdot 10^{-5}$. Решая уравнение (19) для мольной доли металла, получаем $X_{\text{м}} \approx 0,963$. По формулам (4)–(6) рассчитаем мольную долю ртути в амальгаме и давление цезия и ртути над амальгамой. В результате имеем $X_{\text{рт}} = 0,037$; $P_{\text{м}} = 38\,911 \text{ Па}$, или 292 мм рт. ст.; $P_{\text{рт}} = 70\,303 \text{ Па}$.

Аналогичным образом можно рассчитать зависимости давлений паров ртути и цезия для широкого интервала температур разрядной и заэлектродных катодной и анодной зон, а также для любых дозровок цезия и ртути. Полученные зависимости представлены на рис.2–4.

На рис.2 показаны зависимости давления паров цезия и ртути от массы амальгамы при соотношении масс ее компонентов $m_{\text{Cs}}: m_{\text{Hg}} = 1:1$. Эти зависимости имеют линейный характер, за исключением давления цезия при дозировке амальгамы 2 мг, при которой весь цезий находится в газовой фазе и, соответственно, лампа работает в насыщенном парах цезия. При увеличении дозировки мольная доля цезия остается в амальгаме практически постоянной, поэтому и давление цезия изменяется незначительно. В то же время почти вся ртуть находится в газовой фазе и ее давление практически линейно растет с ростом дозировки. Зависимости давления паров цезия и ртути при постоянной массе амальгамы линейно растут с увеличением массы цезия или ртути

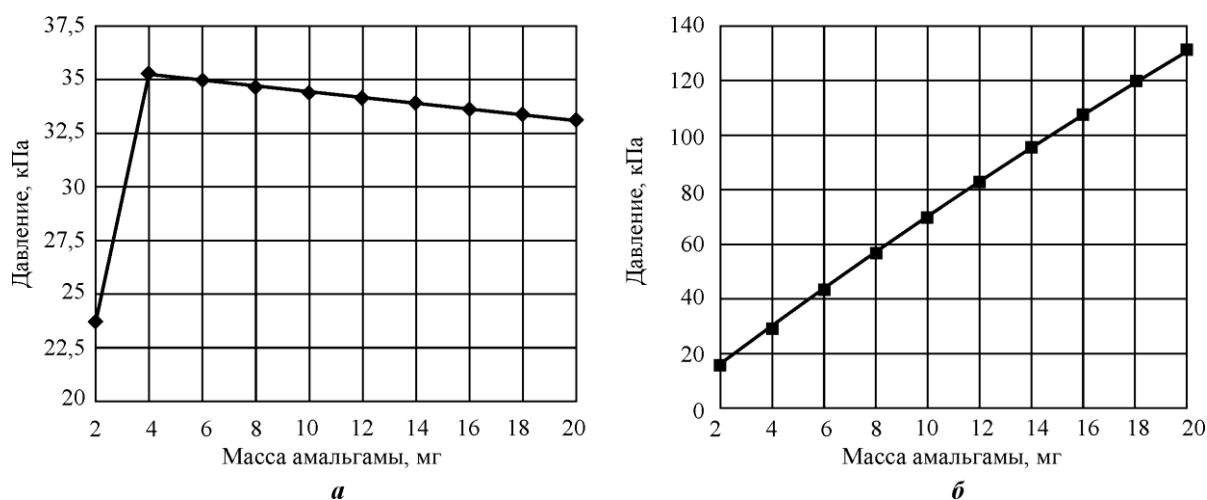


Рис.2. Зависимости давления паров цезия (а) и ртути (б) от массы амальгамы ($m_{Cs}: m_{Hg} = 1:1$)
 Fig.2. Pressure cesium (a) and mercury (b) vs. amalgam mass dependence ($m_{Cs}: m_{Hg} = 1:1$)

соответственно. Из этого факта и рис.2 следует, что для увеличения давления цезия в горелке следует повышать мольную долю цезия в амальгаме при дозировке амальгамы не менее 2 мг. Отметим, что дозировка слабо влияет на давление.

На рис.3 показана зависимость давления паров цезия и ртути ($m_{Cs} = m_{Hg} = 5$ мг) от температуры холодной точки горелки. Температура холодной точки примерно соответствует минимальной температуре холодной зоны. Давление цезия растет в соответствии с законом Антуана (см. уравнение (7)), давление ртути пропорционально ее мольной доле и температуре холодной точки. Для того чтобы излучение в ИК-диапазоне достигло максимума [10], давление цезия должно превышать 200 мм рт. ст. (26,66 кПа), а температура холодной точки должна быть выше 820 К. На рис.4 представлена зависимость давления паров цезия от температуры холодной точки при сравнительно малой дозировке цезия. До температуры 875 К горелка работает в насыщенных парах цезия и давление растет по закону Антуана. Выше этой температуры в ненасыщенных парах цезия давление растет линейно с ростом температуры.

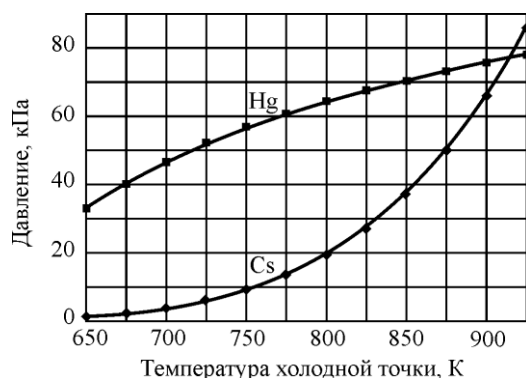


Рис.3. Зависимость давления паров цезия и ртути от температуры холодной точки горелки ($m_{Cs} = m_{Hg} = 5$ мг)

Fig.3. Pressure cesium and mercury vs. cold point temperature dependence ($m_{Cs} = m_{Hg} = 5$ mg)



Рис.4. Зависимость давления паров цезия от температуры холодной точки при переходе разряда из насыщенных паров в ненасыщенные ($T = 875$ К, $m_{Cs} = m_{Hg} = 0,002$ г)

Fig.4. Pressure vapor of cesium vs. cold point temperature dependence from saturated vapors to unsaturated ones ($T = 875$ К, $m_{Cs} = m_{Hg} = 0,002$ g)

Заключение. Предложенная математическая модель испарения компонентов амальгамы в разрядных источниках излучения учитывает конкретное конструктивное исполнение электродных узлов и заэлектродных объемов горелки, а также теплофизические характеристики источников излучения.

Приведенная теоретическая модель может быть использована при расчете давлений паров компонентов наполнения газоразрядных ламп на основе амальгам других металлов.

Литература

1. *Гавриш С.В., Градов В.М., Терентьев Ю.И.* Особенности конструкции и работы ламп с сапфировыми оболочками // Светотехника. – 2008. – №2. – С. 12–18.
2. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей / *С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдюков, Б.А. Константинов и др.* // Светотехника. – 1998. – №3. – С. 22–24.
3. *Рохлин Г.Н.* Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
4. *Гавриш С.В.* О возможности получения импульсного коаксиального Cs-Hg-Xe разряда // Светотехника. – 2012. – №1. – С. 59–61.
5. *Гавриш С.В.* Давление насыщенных паров над амальгамой щелочных металлов в разрядных лампах // ПМТФ. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 92–99.
6. *Никольский Б.П.* Справочник химика. Общие сведения, строение вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника. – М.–Л.: Химия, 1966. – Т. 1. – 1070 с.
7. *Плющев В.Е., Степин Б.Д.* Химия и технология соединений лития рубидия и цезия. – М.: Химия, 1970. – 406 с.
8. *Каландаришвили А.Г.* Источники рабочего тела для термоэмиссионных преобразователей энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 304 с.
9. *Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В., Сурдо А.В.* Исследования температурных полей в разрядных источниках ИК-излучения с сапфировой оболочкой // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2014. – № 1. – С. 49–55.
10. *Katsuya Otani* Pulsed alkali metal vapor discharge lamp with ceramics outer envelope // Patent 487031 (USA), Int. C¹⁴ H 01 J 17/20; H 01J 61/34. Mitsubishi. № 183533. Filed 14.03.88. Date of patent 26. 09. 89.

Поступила 31.05.2017 г.; принята к публикации 16.01.2018 г.

Петренко Николай Юрьевич – инженер-технолог лаборатории Научно-производственного комплекса специальных источников излучения АО «Специальное конструкторское бюро «Зенит» (Россия, 124489, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский проспект, д.10), mikolatru777@gmail.com

Пучнина Светлана Викторовна – начальник лаборатории Научно-производственного комплекса специальных источников излучения АО «Специальное конструкторское бюро «Зенит» (Россия, 124489, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский проспект, д.10), инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, дом 1), svetlanapuchnina@mail.ru

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, директор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, дом 1), rnd@miec.ru

References

1. Gavrish S.V., Gradov V.M., Terent'ev Yu.I. Osobennosti konstrukcii i raboty lamp s sapfirovymi obolochkami [Construction and work peculiar properties of lamps with sapphire shell]. *Svetotekhnika – Lights & Engeneering*, 2008, no. 2, pp. 12–18. (in Russian).

2. Gavrish S.V., Gajdukov E.N., Konstantinov B.A. 132d r. Razryadnye istochniki infrakrasnogo izlucheniya dlya special'nyh celej [Infrared radiation discharge sources for special purposes]. *Svetotekhnika – Lights & Engineering*, 1998, no. 3, pp. 22–24. (in Russian).
3. Rohlin G.N. *Razryadnye istochniki sveta* [Discharge sources of light]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991. 720 p. (in Russian).
4. Gavrish S.V. O vozmozhnosti polucheniya impul'snogo koaksial'nogo Cs-Hg-Xe razryada [Regarding possibility obtaining pulsed coaxial Cs-Hg-Xe discharge]. *Svetotekhnika – Lights & Engineering*, 2012, no.1, pp. 59–61. (in Russian).
5. Gavrish S.V. Davlenie nasyschennyh parov nad amal'gamoj shchelochnyh metallov v razryadnyh lampah [Saturated vapors pressure over alkali metals amalgam in discharge lamps]. *Prykladnaya mekhanika i tekhnicheskaya phisika – Applied mechanics and technical physics*, 2011, vol. 52, iss. 6, pp. 92–99. (in Russian).
6. Nikol'skij B.P. *Spravochnik himika. Obshchie svedeniya, stroenie veshchestva, svojstva vazhnejshih veshchestv, laboratornaya tekhnika* [Handbook of chemist, Vol. 1]. Moscow – Leningrad, Khimiya Publ., 1966. 1070 p. (in Russian).
7. Plyushchev V.E., Stepin B.D. *Himiya i tekhnologiya soedinenij litiya rubidiya i ceziya* [Chemistry and technology lithium rubidium and cesium compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1970. 406 p. (in Russian).
8. Kalendarishvili A.G. *Istochniki rabocheho tela dlya termoemissionnyh preobrazovatelej energii* [Working body sources for thermo emission energy transmitters]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1993. 304 p. (in Russian).
9. Gavrish S.V., Loginov V.V., Puchnina S.V., Surdo A.V. Issledovaniya temperaturnyh polej v razryadnyh istochnikah IK-izlucheniya s sappirovoj obolochkoj [Temperature field research in infrared radiation discharge source with sapphire shell]. *Oboronniy complex – nauchno - tekhnicheskomu progressu Rossii – Defense Complex to Scientific and Technical Progress of Russia*, 2014, no. 1, pp. 49–55. (in Russian).
10. Katsuya Otani. *Pulsed alkali metal vapor discharge lamp with ceramics outer envelope*. Patent 487031 (USA), Int. C 1⁴ H 01 J 17/20; H 01J 61/34. Mitsubishi. no. 183533, 1989.

Submitted 31.05.2017; accepted 16.01.2018.

Petrenko Nikolay Yu. – engineer-technologist, Research and production complex of special radiation sources JSC «Special design bureau «Zenit» (Russia, 124489, Moscow, Zelenograd, Panfilovskiy pr. 10), e-mail: mikolatru777@gmail.com

Puchnina Svetlana V. – head of laboratory, Research and production complex of special radiation sources JSC «Special design bureau «Zenit» (Russia, 124489 Moscow, Zelenograd, Panfilovskiy prospect 10), engineer of the Institute of Perspective Materials and Technologies (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1) svetlanapuchnina@mail.ru

Gavrilov Sergey A. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Vice-rector for scientific work, head of the Institute of Perspective Materials and Technologies (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), rnd@miec.ru