



## ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 175–184  
*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 175–184  
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-175-184>, EDN: QYOLXM

Научная статья  
УДК 621.3.032.213

### Прогностическая оценка скорости испарения бария с поверхности металлопористого термокатода: математическая модель на основе экспериментальных данных для катодов В- и М-типов

О. Е. Глухова<sup>1,2,3</sup>, Т. М. Крачковская<sup>2</sup>, А. А. Петрунин<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз», Россия, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова И. В., д. 1А

<sup>3</sup>Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Россия, 119991, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д. 2, стр. 4

Глухова Ольга Евгеньевна, доктор физико-математических наук, <sup>1</sup>заведующий кафедрой радиотехники и электродинамики; <sup>2</sup>старший научный сотрудник лаборатории № 2 НПК-12; <sup>3</sup>ведущий научный сотрудник лаборатории биомедицинских нанотехнологий, [glukhovaoe@info.sgu.ru](mailto:glukhovaoe@info.sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5670-2058>, AuthorID: 33028

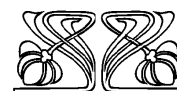
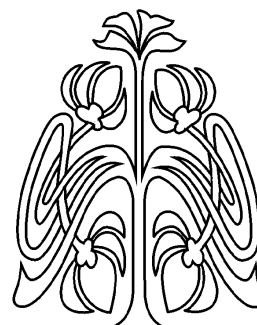
Крачковская Татьяна Михайловна, кандидат технических наук, начальник лаборатории № 2 НПК-12, [elektron.t@bk.ru](mailto:elektron.t@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9348-6219>, AuthorID: 792681

Петрунин Александр Алексеевич, старший преподаватель кафедры радиотехники и электродинамики, [sacha.petrynin@gmail.com](mailto:sacha.petrynin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-2531-0131>, AuthorID: 1158793

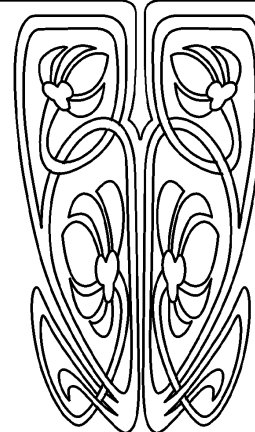
**Аннотация.** Проведен анализ экспериментально установленных закономерностей скорости испарения бария как основного компонента активного вещества с поверхности катодов В- и М-типа. На этой основе разработана прогностическая методика оценки скорости испарения. Её теоретическую основу составляют формула Ленгмюра для скорости потери массы вещества и уравнение Клайперона–Клаузиуса. Методика позволяет найти характеристический набор параметров для рассматриваемого типа катода:  $p_0$  – давление,  $T_0$  – температуру,  $q$  – энергию активации. Эффективность методики доказана предсказанием зависимости скорости испарения бария от температуры для ряда катодов В- и М-типа, при этом погрешность воспроизведения экспериментальных данных составила не более 15%. Впервые проведено моделирование зависимости скорости испарения бария от температуры  $G(T)$  для катода М-типа с углероном (сульфоаддуктом нанокластеров углерода) в составе активного вещества в диапазоне концентраций 0–0.4 мас.%. Установлено, что с увеличением концентрации углерона скорость испарения активного вещества снижается.

**Ключевые слова:** металлопористый катод, скорость испарения, активное вещество, барий, углерон, метод дифференциальной эволюции

**Для цитирования:** Глухова О. Е., Крачковская Т. М., Петрунин А. А. Прогностическая оценка скорости испарения бария с поверхности металлопористого термокатода: математическая модель на основе экспериментальных данных для катодов В- и М-типов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 175–184. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-175-184>, EDN: QYOLXM



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект № FSRR-2026-0006).

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Predictive evaluation of barium evaporation rate from the surface of a porous metal thermionic cathode: A mathematical model based on experimental data for B- and M-type cathodes

O. E. Glukhova<sup>1,2,3</sup>, T. M. Krachkovskaya<sup>2</sup>, A. A. Petrunin<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Joint Stock Company Research and Production Enterprise Almaz, 1A I. V. Panfilov St., Saratov 410033, Russia

<sup>3</sup>I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, 2–4 Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow 119991, Russia

Olga E. Glukhova, glukhovaoe@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5670-2058>, AuthorID: 33028

Tatiana M. Krachkovskaya, elektron.t@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9348-6219>, AuthorID: 792681

Alexander A. Petrunin, sacha.petrynin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2531-0131>, AuthorID: 1158793

**Abstract. Background and Objectives:** Based on the analysis of experimental studies regarding the evaporation rate patterns of the main component of the active substance – barium – from the surface of B- and M-type cathodes, a methodology for the predictive evaluation of its evaporation rate has been developed. **Materials and Methods:** The theoretical foundation of this methodology comprises the Langmuir formula for the rate of mass loss and the Clausius-Clapeyron equation. **Results:** The methodology yields a characteristic set of parameters for a given cathode type:  $p'_0$  (pressure),  $T_0$  (temperature), and  $q$  (activation energy). The effectiveness of the methodology has been demonstrated by predicting the temperature dependence of the barium evaporation rate for several B- and M-type cathodes, with the error in reproducing experimental data not exceeding 15%. New dependencies for the barium evaporation rate  $G(T)$  have been obtained for M-type cathodes containing uglexon (a sulfo-adduct of carbon nanoclusters) within the active substance in the concentration range of 0–0.4 wt%. It has been established that the evaporation rate of the active substance decreases with an increase in uglexon concentration. **Conclusion:** The developed methodology is promising for predicting the application of new nanomaterials in the composition of active substances for various types of thermionic cathodes.

**Keywords:** porous metal cathode, evaporation rate, barium active substance, uglexon, differential evolution method

**Acknowledgements:** The work was supported the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment (project No. FSRR-2026-0006).

**For citation:** Glukhova O. E., Krachkovskaya T. M., Petrunin A. A. Predictive evaluation of barium evaporation rate from the surface of a porous metal thermionic cathode: A mathematical model based on experimental data for B- and M-type cathodes. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 175–184 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-175-184>, EDN: QYOLXM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Металлопористые термокатоды (МПК) являются широко востребованными источниками электронов для различных современных электровакуумных приборов (ЭВП), таких как лампы бегущей волны, клистроны, гиротроны [1, 2]. В зависимости от назначения ЭВП к МПК предъявляются различные требования по плотности эмиссионного тока и его стабильности во времени (долговечности), которые зависят от работы выхода электронов и скорости испарения активного вещества (в основном бария) с поверхности катода [3]. С целью оптимизации работы катода и повышения его эффективности на протяжении нескольких десятилетий до настоящего времени конструкции МПК совершенствуются путем применения различных материалов для металлической матрицы, составов активного вещества и эмитирующей поверхности [3–5]. Наиболее широко известными и исследованными в настоящее время конструкциями являются

катоды В-типа, имеющие пористую вольфрамовую основу, пропитанную активным веществом на основе окислов бария, кальция и алюминия в различных молярных соотношениях, и катоды М-типа, аналогичной конструкции, дополнительно имеющие на своей эмитирующей поверхности пленку металла/металлов платиновой группы толщиной порядка 0.5 мкм [6, 7].

Для катода В-типа установлены основные эмпирические закономерности как влияния конструктивных параметров катодной металлической матрицы (плотности или пористости), так и начальной концентрации и состава активного вещества на скорость испарения бариевой компоненты [6, 8]. Для катодов М-типа закономерности влияния рассматриваемых параметров, качественно совпадая с данными для катодов В-типа, имеют более сложные зависимости, так как на скорость испарения дополнительно влияют состав и толщина эмиссионной пленки металла/металлов платиновой группы [9–11].



Практический интерес представляет выявление подобных закономерностей для новых модификаций катодов М-типа, например, с посадкой перспективных нанокластерных материалов – сульфоддукта нанокластеров углерода (углерона) и полиэдральных фуллереноподобных тороидальных структур (часто называемых в русскоязычной литературе астраленами), обладающих высокой долговечностью [12]. Для решения этой проблемы требуются многочисленные экспериментальные исследования зависимости скорости испарения активного вещества не только от конструктивных параметров катода, но и концентрации нанокластера.

Однако вследствие сложности и большой трудоемкости экспериментальных работ их проведение чрезвычайно затруднено. В связи с этим актуальной задачей в области современной вакуумной эмиссионной электроники является разработка универсальной (пригодной для любого типа МПК) оперативной прогностической методики оценки скорости испарения активного вещества с эмитирующей поверхности. Такая методика необходима для достоверного теоретического прогноза долговечности как самих катодов, так и ЭВП, выполненных на их основе. В настоящее время сведения о разработке такой методики в отечественной и зарубежной научной литературе практически отсутствуют.

Данная работа посвящена разработке методики прогностической оценки скорости испарения бария с поверхности, определяемой типом катода и его индивидуальными параметрами – химическим составом, топологией поверхности и энергией активации эмитирующей поверхности. Методика разрабатывается на примере МПК В- и М-типа с целью дальнейшего прогноза долговечности ЭВП.

### 1. Методика определения скорости испарения бария с поверхности термокатада и его характеристических параметров

Скорость испарения атомов металла  $G$  определяется формулой Ленгмюра для интенсивности потери вещества при данной температуре  $T$  [13, формула 8.1]:

$$G = p \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление насыщенных паров металла (Па),  $M$  – молярная масса испаряющегося вещества (в нашем случае – бария,  $M = 137.327$  г/моль),  $T$  – температура (К),  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Давление насыщенных паров  $p$  определяется из уравнения Клапейрона-Клаузиуса:

$$\ln p = -\frac{q}{kT} + \text{const}, \quad p = p_0 \exp\left(-\frac{q}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $p_0$  – некоторое начальное давление,  $q$  – энергия активации (фактически энергия, необходимая для отрыва от поверхности одного атома в процессе испарения, она может быть определена из квантово-механического моделирования),  $k$  – постоянная Больцмана. С учётом (1) и (2) выражение для скорости испарения можно записать в следующем виде:

$$G = \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} p_0 \sqrt{\frac{1}{T}} \exp\left(-q \cdot 1.16 \cdot \frac{10^4}{T}\right). \quad (3)$$

В формуле (3) величина  $q$  задается в электрон-вольтах, в связи с чем в (3) появляются корректирующие множители. Предположим, что величина  $p_0$  зависит от энергии активации  $q$  по экспоненциальному закону:

$$p_0 = p'_0 \exp(bq), \quad (4)$$

где  $b = 1.16 \cdot \frac{10^4}{T_0}$ . Здесь коэффициент  $b$  при величине  $q$  приводится к виду показателя экспоненты формулы (3). Выражение для скорости испарения приобретает следующий вид:

$$G = \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} p'_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{T}} \exp\left[q \cdot 1.16 \cdot \left(\frac{10^4}{T_0} - \frac{10^4}{T}\right)\right]. \quad (5)$$

Характеристические параметры термокатада  $p'_0$  и  $T_0$  находятся по экспериментальным данным для значений скорости испарения в зависимости от величины  $10^4/T$ . Эти параметры являются индивидуальными для каждого типа катода. Энергия активации  $q$  зависит от вещества и топологии поверхности, с которой испаряется барий, основной компонент активного вещества.

Таким образом, три параметра  $p'_0$ ,  $T_0$  и  $q$  являются определяющими для изучаемого термокатада. Для их поиска в данной работе используется метод дифференциальной эволюции Р. Сторна и К. Прайса [14], который позволяет по экспериментальным зависимостям и виду функции (5) подобрать коэффициенты  $p'_0$ ,  $T_0$  и  $q$ . Это допускающий распараллеливание вычислений параллельный метод прямого (без нахождения производных) поиска минимума функции (в частности, функции (5)), который использует множество из  $NP$   $D$ -мерных векторов-параметров (в нашем случае  $D = 3$ ;  $NP = 20000$ ):

$$x_{i,G}, \quad i = 1, 2, \dots, NP, \quad (6)$$



рассматриваемых как «популяция» для каждого «поколения»  $G$ . Значение  $NP$  – размер «популяции». Он не изменяется в процессе минимизации функции. Начальная «популяция» векторов выбирается случайным образом и должна охватывать всё пространство параметров. Метод дифференциальной эволюции генерирует новые векторы параметров, добавляя взвешенную разницу между двумя векторами популяции к третьему вектору. Авторы метода дифференциальной эволюции назвали эту операцию «мутацией». Для целевого вектора, задаваемого выражением (6), вектор мутации генерируется следующим образом:

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}), \quad (7)$$

где значения случайных индексов  $r1$ ,  $r2$ ,  $r3$  принадлежат целочисленному множеству  $\{1, 2, \dots, NP\}$ ;  $F$  – коэффициент масштабирования, который варьируется от 0 до 1. Параметры мутированного вектора затем смешиваются с параметрами другого заранее определенного вектора, целевого вектора, чтобы получить так называемый пробный вектор [14, формула (3)]

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1})$$

по следующему правилу [14, формула (4)]:

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{если } (\text{rand}(j) \leq CR) \\ & \text{или } j = \text{rnbr}(i), \\ x_{ji,G} & \text{если } (\text{rand}(j) > CR) \\ & \text{или } j \neq \text{rnbr}(i), \end{cases} \quad (8)$$

$j = 1, 2, \dots, D.$

В формуле (8)  $\text{rand}(j)$  является  $j$ -й оценкой генератора случайных чисел с равномерным распределением из промежутка  $[0, 1]$ ;  $CR$  – константа смешивания из промежутка  $[0, 1]$ ;  $\text{rnbr}(i)$  – случайно выбранный индекс из множества значений  $\{1, 2, \dots, D\}$ , гарантирующий, что  $u_{ji,G+1}$  получит хотя бы один параметр из  $v_{ji,G+1}$ . Если пробный вектор даёт меньшее значение функции, чем целевой вектор, пробный вектор заменяет целевой в следующем поколении. Эта последняя операция называется «отбором». Каждый вектор «популяции» должен один раз выступать в роли целевого вектора, чтобы в одном поколении произошло  $NP$  «соревнований». В качестве параметра сходимости была выбрана величина, равная 0.001, параметр мутации изменялся при каждой новой популяции и находился

в диапазоне от 0.5 до 1, константа рекомбинации  $CR$  равна 0.7. Размер популяции в методе дифференциальной эволюции был выбран равным 20000.

Реализация представленной методики определения скорости испарения бария с поверхности катода В-типа демонстрируется на примере обработки экспериментальных данных, опубликованных в работе [8], в частности данных рис. 6–12, 6–13 и 6–17 [8]. На рис. 1 представлены измеренные значения скоростей испарения бария (отдельные фигурные точки) и рассчитанные по ним зависимости (5) – непрерывные кривые. Во вставках показаны данные в логарифмическом масштабе. Рис. 1, а иллюстрирует влияние содержания окиси бария в составе алюмината на скорость испарения бария с пропитанного катода; рис. 1, б – влияние содержания окиси кальция в составе алюмината; рис. 1, в – влияние содержания вольфрамата в прессованном катоде. Ошибка аппроксимации составила 0.5–1%.

Установленные параметры  $p'_0$ ,  $T_0$  и  $q$  для всех рассмотренных катодов В-типа представлены в табл. 1, где также приведены значения  $q_{\text{exp}}$ , указанные в работе [8] при демонстрации измеренных зависимостей скорости испарения бария. Кроме того, указана относительная погрешность  $|\Delta q|/q_{\text{exp}}$  установленных в данной работе значений энергии активации  $q$  по сравнению с  $q_{\text{exp}}$ . Величина погрешности  $\Delta q$  вычислялась как разность значений для скорости  $G$ , полученного в данной работе (5) и приведенного в работе [8] (формула (1–8)). Из данных табл. 1 видно, что погрешность для  $q$  находится в пределах ~4–10%. Качественно изменение  $q$  для данных на рис. 1, а и 1, б соответствуют характеру изменения  $q_{\text{exp}}$  [8]. При этом полученные наборы  $p'_0$ ,  $T_0$ ,  $q$  и формула (5) полностью воспроизводят экспериментально полученные скорости  $G$ , как отмечалось выше.

Указанный в табл. 1 интервал значений параметров  $p'_0$ ,  $T_0$  и  $q$  характерен для катодов В-типа. Экспериментально выявленным из этих параметров является энергия активации  $q$ , величина которой находится в интервале ~ (3–4.5) эВ [8, 15]. В данной работе были также установлены параметры  $p'_0$ ,  $T_0$  и  $q$  для катода типа Ва-W, скорость испарения бария для которых определена в работе [16] при значениях температуры 1000, 1050 и 1100°C. Этот катод идентичен катодам В-типа, поэтому установленные для него параметры  $q = 3.580$  эВ,  $p'_0 = 34.015$  мкПа

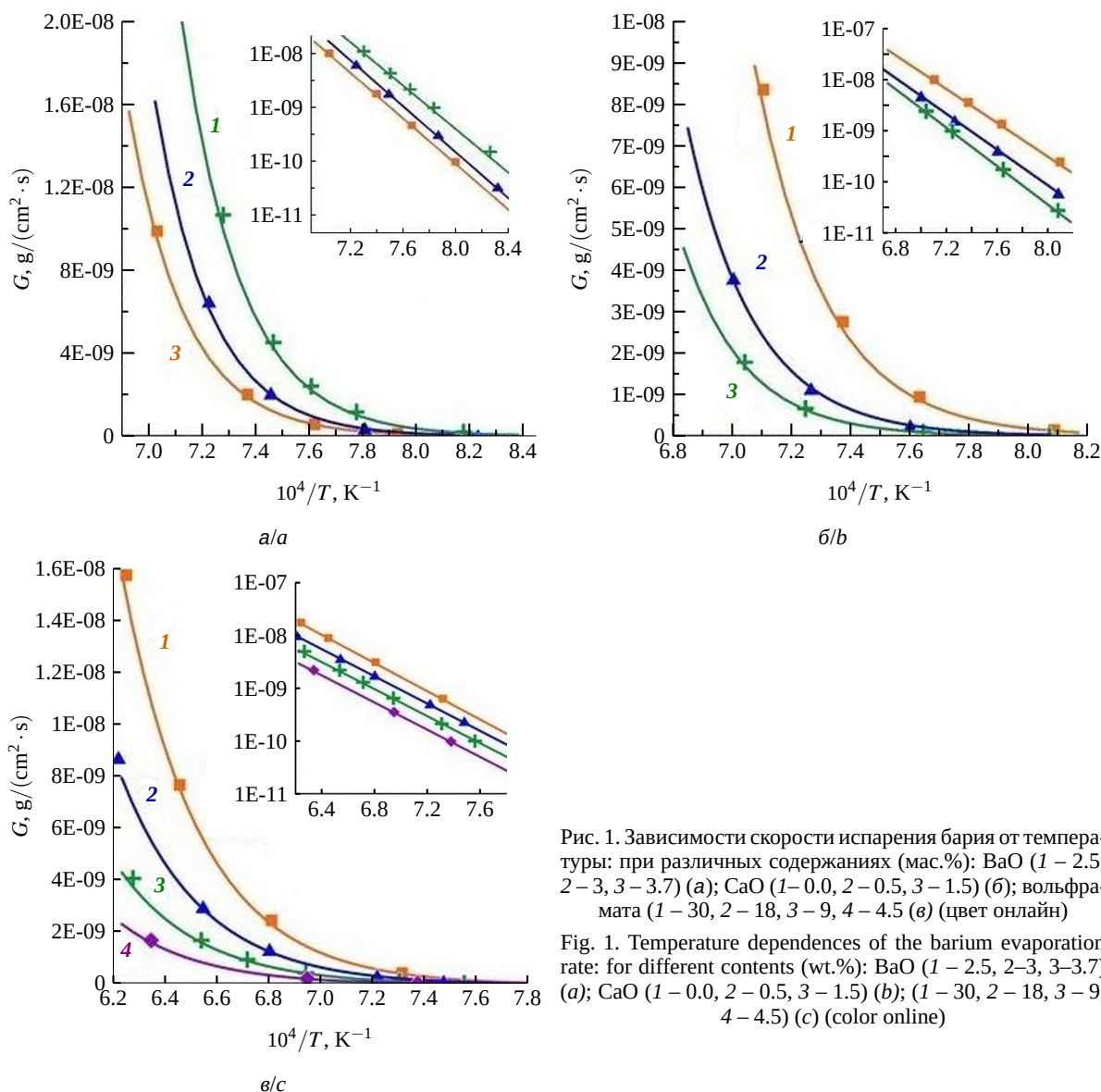


Рис. 1. Зависимости скорости испарения бария от температуры: при различных содержаниях (мас.%) BaO (1 – 2.5, 2 – 3, 3 – 3.7) (а); CaO (1 – 0.0, 2 – 0.5, 3 – 1.5) (б); вольфрамата (1 – 30, 2 – 18, 3 – 9, 4 – 4.5) (в) (цвет онлайн)

Fig. 1. Temperature dependences of the barium evaporation rate: for different contents (wt.%) BaO (1 – 2.5, 2 – 3, 3 – 3.7) (a); CaO (1 – 0.0, 2 – 0.5, 3 – 1.5) (b); (1 – 30, 2 – 18, 3 – 9, 4 – 4.5) (c) (color online)

Таблица 1 / Table 1

**Характеристические параметры катодов В-типа и вольфрамотных катодов**  
**Characteristic parameters of B-type and tungstate cathodes**

мас.% / wt.%	$q$ , eV	$q_{exp}$ [8], eV	$ \Delta q  / q_{exp}$ , %	$p'_0$ , $\mu\text{Pa}$	$T$ , K
BaO					
2.5	4.175	3.81	9.58	14.699	1352.4
3.0	4.206	3.96	6.21	12.745	1329.4
3.7	3.923	3.70	6.03	15.176	1296.1
CaO					
0.	3.651	3.81	4.20	6.720	1313.2
0.5	3.902	4.18	6.70	9.305	1382.0
1.5	4.151	4.48	7.37	5.463	1386.1
Вольфрамот					
30	2.936	–	–	3.930	1379.1
18	2.836	–	–	2.225	1379.1
9	2.814	–	–	3.037	1433.2
4.5	2.830	–	–	1.115	1410.2



и  $T_0 = 1286.2$  К в целом согласуется с данными табл. 1. Определять погрешность в данном случае некорректно, поскольку технологии создания катодов в работах [8] и [16] различны.

## 2. Результаты

В работах [10, 11] представлены измеренные с помощью метода пьезокварцевого взвешивания зависимости скорости испарения бариевой компоненты от температуры для катодов М-типа с разной толщиной Os-Ir-Al покрытия ( $d$ ), пропитанных алюмосиликатом бария-кальция ( $3BaO \cdot 0.5CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 0.5SiO_2$ ) и отличающихся плотностью металлической матрицы  $\rho$ . В данной работе детально рассмотрены шесть видов указанных катодов М-типа с позиции поиска закономерностей влияния на скорость испарения плотности материала катода и его состава.

### 2.1. Построение математической модели для вычисления скорости испарения

Характеристики трех видов катодов (под номерами 1, 2, 3), первоначально отобранных для построения математической модели, представлены в табл. 2 [10]. Выбор этих катодов обусловлен тем, что их химический состав включает весь диапазон рассматриваемых материалов катодов, они имеют одинаковую толщину покрытия  $d$ , но отличаются плотностью  $\rho$ . С использованием разработанной в п. 1 методики, были обработаны экспериментальные данные для скорости испарения бария с эмиссионной поверхности катодов 1, 2, 3. На рис. 2, а отмечены измеренные значения скорости испарения в эксперименте и приведены теоретически установленные закономерности (5). В табл. 2 представлены полученные характеристические наборы  $p'_0, T_0, q$  для катода М-типа [10]. Отклонение аппроксимирующих теоретических зна-

Таблица 2 / Table 2

Характеристические параметры образцов 1–3 катодов М-типа, выявленные на основе измеренных значений скорости испарения

Characteristic parameters of samples 1–3 of M-type cathodes, identified on the basis of measured evaporation rate values

№ катода / Cathode №	$\rho, \text{г/см}^3 / \text{g/cm}^3$	$d, \text{мкм} / \mu\text{m}$	$q, \text{эВ} / \text{eV}$	$p'_0, \text{мкПа} / \mu\text{Pa}$	$T_0, \text{К}$
1	13.85	0.35–0.39	3.058	3.854	1283.9
2	14.05	0.35–0.39	3.506	5.986	1343.2
3	14.22	0.35–0.39	4.312	7.758	1369.3

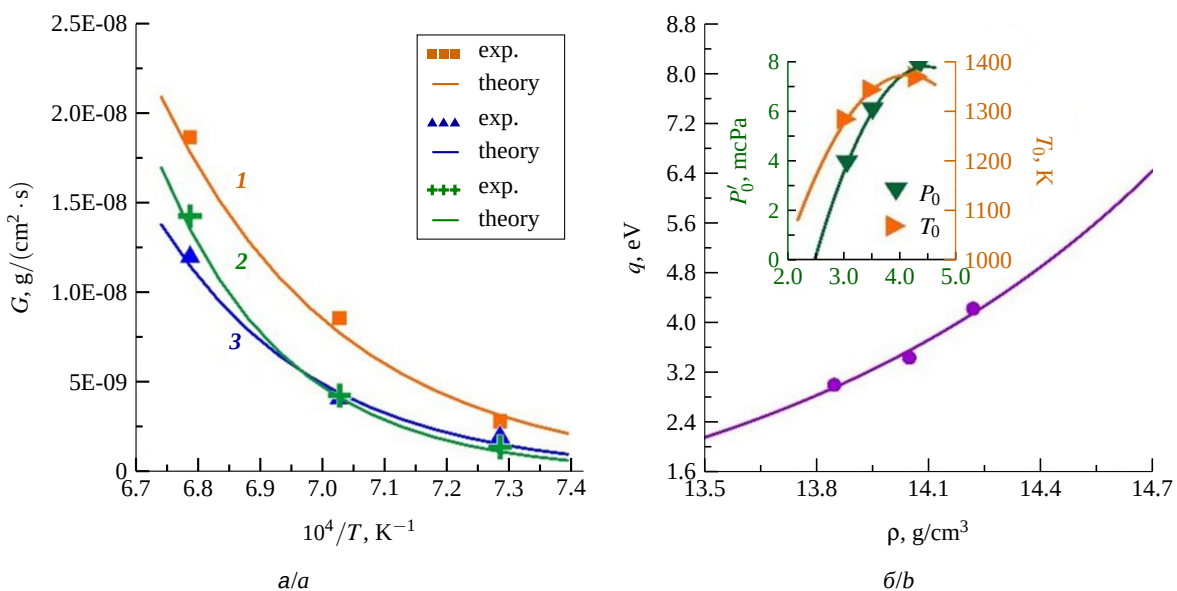


Рис. 2. Зависимости скорости испарения бария с поверхности трех образцов (кривые 1, 2, 3) катодов М-типа от температуры [5] (а); зависимости  $p'_0, T_0, q$  от плотности материала катода (б) (цвет онлайн)

Fig. 2. Temperature dependences of the rate of barium evaporation from the surface of three samples (curves 1, 2, 3) of M-type cathodes [5] (a); dependences of  $p'_0, T_0$  and  $q$  on the density of the characteristic set (b) (color online)



чений составляет не более 1%. На рис. 2, б демонстрируются аналитические зависимости изменения энергии активации с увеличением плотности материала катода  $q(\rho)$ ; на вставке показаны изменения  $p'_0$  и  $T_0$  как функций энергии активации. Для энергии активации аппроксимирующая экспоненциальная функция имеет вид:

$$\ln q = 0.920 \cdot \ln \rho - 11.659, \quad (9)$$

для  $p_0$  и  $T_0$  – квадратичные функции:

$$p_0 = -32.560 + 18.144 \cdot q - 2.039 \cdot q^2, \quad (10)$$

$$T_0 = -25.080 + 655.336 \cdot q - 79.684 \cdot q^2. \quad (11)$$

### 2.2. Прогностическая оценка скорости испарения на основе построенной модели для других видов катодов

В рамках той же математической модели (см. п. 2.1) исследуются закономерности скорости испарения для МПК с тем же химическим составом, но с другими плотностью  $\rho$  и толщиной покрытия  $d$  [11]. В табл. 3 представлены физические параметры катодов с номерами 4, 5 и 6.

На основе выявленных зависимостей (9)–(11) определены тройки параметров  $p'_0$ ,  $T_0$ ,  $q$  характеристического набора для катодов вида 4–6. На основе этих параметров получены аналитические зависимости для скорости испарения  $G$ , графики которых демонстрируются на рис. 3. Визуально можно отметить очень небольшое отклонение точек (измеренных значений  $G$ ) от теоретически выявленных зависимостей (сплошные кривые). Погрешность в каждой точке экспериментально полученной кривой  $G(10^4/T)$  составляет 6–15%.

Продемонстрированная эффективность методики позволяет с определенной степенью точности проводить прогностическую оценку изменения скорости испарения бария для образцов вида 1 катода М-типа с толщиной покрытия

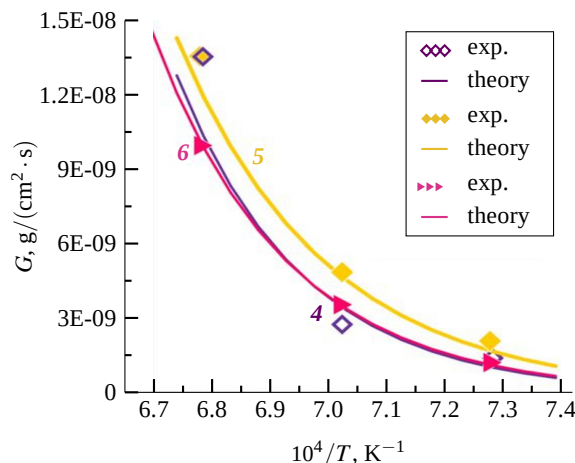


Рис. 3. Зависимость скорости испарения бария с поверхности катода М-типа от температуры для образцов 4–6 [11] (цвет онлайн)

Fig. 3. Temperature dependence of the rate of barium evaporation from the surface of the M-type cathode for samples 4–6 [11] (color online)

0.35–0.39 мкм, отличающихся тем, что в составе алюмосиликата бария-кальция содержится углерон в количестве 0.15–0.40 мас.%.

### 2.3. Математическая модель и прогностическая оценка скорости испарения для металлопористого катода М-типа с углероном

Материал катодов видов 7 и 8 содержит углерон. Для таких катодов в работе [11] приведены измеренные значения скорости испарения бария для двух значений концентрации  $n = 0.15$  и  $n = 0.30$  мас.% углерона при одной и той же плотности W-матрицы  $13.85 \pm 0.01$  г/см<sup>3</sup> и при одинаковой толщине покрытия в интервале 0.35–0.39 мкм. Значения температуры – 1100, 1150 и 1200°C. С применением методики, описанной в п. 2.1, были рассчитаны параметры  $q$ ,  $p'_0$ ,  $T_0$  для этого типа катода с той же концентрацией углерона (табл. 4).

Далее на основе этих данных построена математическая модель для вычисления скорости испарения бария с поверхности катода

Таблица 3 / Table 3

Рассчитанные характеристические параметры образцов 4–6 катодов М-типа  
Calculated characteristic parameters of samples 4–6 of M-type cathodes

№ катода / Cathode No.	$\rho$ , г/см <sup>3</sup> / g/cm <sup>3</sup>	$d$ , мкм / $\mu\text{m}$	$q$ , эВ / eV	$p'_0$ , мкПа / $\mu\text{Pa}$	$T_0$ , К
4	14.17	0.35–0.39	4046	7.466	1372.1
5	14.00	0.50–0.60	3.459	5.800	1338.5
6	14.11	0.50–0.60	3.823	7.012	1366.1



Таблица 4 / Table 4

**Рассчитанные характеристические параметры катода М-типа с углероном**  
**Calculated characteristic parameters of the M-type cathode with ugleiron**

№ катода / Cathode No.	$n$ , мас.% / wt%	$q$ , эВ / eV	$p'_0$ , мкПа / $\mu$ Pa	$T_0$ , К
7	0.15	3.129	9.467	13544
8	0.30	3.520	1.729	13349

в зависимости от концентрации  $n$  углерона в составе матрицы катода. На первом этапе построена функция  $q(n)$  посредством экстраполяции в виде ранее определенной экспоненциальной зависимости (9):

$$\ln q = 0.170 \cdot \ln n + 1.463. \quad (12)$$

На втором этапе построены аналитические функции  $p'_0(n)$  и  $T_0(n)$  на основе квадратичных зависимостей, установленных в п. 2.1:

$$p'_0 = -11.163 \cdot \ln n - 11.711, \quad (13)$$

$$T_0 = -28.075 \cdot \ln n + 1301.1. \quad (14)$$

В рамках данной математической модели проведена прогностическая оценка поведения скорости испарения  $G$  для катодов в зависимости от концентрации углерона при постоянной плотности состава W-матрицы  $13.85 \pm \pm 0.01$  г/см<sup>3</sup>. На рис. 4 представлены рассчитанные зависимости для  $G$  (точками отмечены

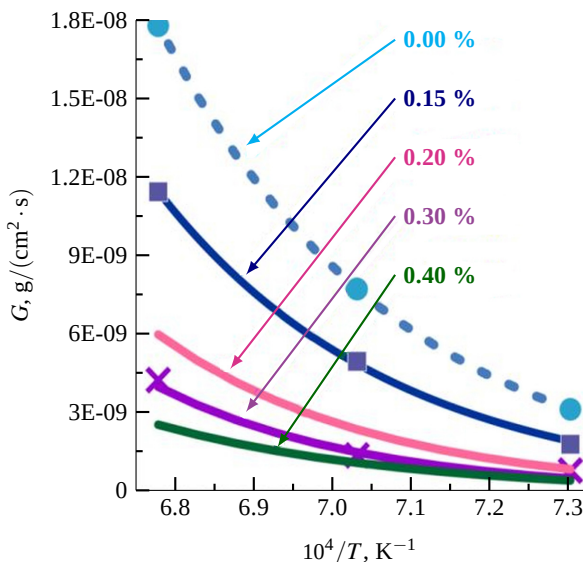


Рис. 4. Зависимость скорости испарения бария от концентрации содержания углерона в составе катода М-типа при одной и той же плотности W-матрицы (цвет онлайн)  
 Fig. 4. Dependence of the barium evaporation rate on the carbon concentration in the M-type cathode at a constant W-matrix density (color online)

данные, полученные на основе эксперимента) при различных значениях концентрации – от 0 до 0.40 мас.%.  
 Из рис. 4 видно, что с увеличением концентрации углерона скорость испарения активного вещества снижается, причем значительное снижение происходит при концентрации 0.2–0.3 мас.%, при дальнейшем увеличении концентрации до 0.4 мас.% снижение становится незначительным.

### Выводы

В работе развита и апробирована методика расчета скорости испарения активного вещества катодов В- и М-типов с различными плотностью, топологией и химическим составом поверхности. Для этого получено выражение для скорости испарения в строгом виде (5) без пренебрежения зависимостью коэффициента при экспоненте от температуры. При выводе выражения (5) получен набор параметров  $p'_0$ ,  $T_0$ ,  $q$ , которые характеризуют данный тип катода и определяют давление, температуру и энергию активации. Поиск параметров  $p'_0$ ,  $T_0$ ,  $q$  проводится на основе обработки экспериментальных данных для скорости испарения бария при различных значениях температуры по методу дифференциальной эволюции Р. Сторна и К. Прайса.

Эффективность методики продемонстрирована на примерах:

- предсказания зависимости скорости испарения бария от температуры для нескольких катодов В-типа [8] и М-типа [11] с погрешностью не более 15%;
- расчета набора параметров  $p'_0$ ,  $T_0$ ,  $q$  для катода В-типа [16], свойства которого по результатам расчёта характеристик близки к свойствам рассмотренного в данной работе образца подобного термокатаода.

С помощью разработанной методики получены новые зависимости скорости  $G(T)$  испарения бария для катода М-типа с углероном в составе активного вещества при различных концентрациях в диапазоне 0–0.4 мас.%. На основе экспериментальных исследований (при фиксированном значении плотности катодной матрицы и концентрации углерона 0.15 и 0.3 мас.%) получены прогностические зависимости  $G(T)$  для указанных термокатодов с концентрацией углерона 0.2 и 0.4. Проведенное прогностическое моделирование показывает, что для катодов М-типа, пропитанных алюмосиликатом бария-кальция с присадкой угле-



рона, с увеличением его концентрации скорость испарения бария снижается, причем значительное снижение происходит при концентрации 0.2–0.3 мас.%; при дальнейшем увеличении концентрации до 0.4 мас.% снижение уже незначительно.

Таким образом, разработанная методика перспективна для прогноза применения новых наноматериалов в составе активных веществ разных типов термокатодов.

### Список литературы

- Roy A. From radar to high-power weapons: Microwave tubes power modern warfare // *Microwave Journal*. 2024. Vol. 67, № 9. P. 124–128.
- Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // *IEEE Journal of Microwaves*. 2021. Vol. 1, iss. 1. P. 260–268. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
- Gärtner G., Knapp W., Forbes R. G., eds. *Modern Developments in Vacuum Electron Sources. Topics in Applied Physics*. Cham : Springer, 2020. Vol. 135. XVIII+597 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7>
- Дюбуа Б. Ч., Королев А. Н. Современные эффективные катоды // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. 2011. Вып. 1 (508). С. 5–24.
- Крачковская Т. М., Сахаджи Г. В., Журавлев С. Д. Современные источники электронов для ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // *Журнал радиоэлектроники*. 2017. № 12 [Электронный журнал].
- Козлов В. И. Эмиссионные свойства и долговечность металлопористых катодов для СВЧ приборов // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ*. М. : ЦНИИ «Электроника», 1983. Вып. 8 (541). 54 с.
- Shroff A. M. Review of dispenser cathodes // *Revue Technique Thomson-CSF*. 1991. Vol. 23. P. 948–1026. <https://doi.org/10.5555/151680.151696>
- Кудинцева Г. А., Мельников А. И., Морозов А. В., Никонов Б. П. *Термоэлектронные катоды*. М. ; Л. : Энергия, 1966. 366 с.
- Зябликова А. Н., Некрасов В. И. Некоторые параметры пропитанных катодов, покрытых осмием // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1970. № 7. С. 157.
- Емельянов А. С., Богачев Р. Ю., Журавлев С. Д., Крачковская Т. М., Шестеркин В. И., Шумихин К. В. Исследование скорости испарения активного вещества металлопористого катода методом пьезоэлектрического резонанса // *Вакуумная техника и технологии – 2022 : труды 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 21–23 июня 2022 г.) / под ред. Д. К. Кострина, С. А. Марцынкова*. СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 24–26.
- Емельянов А. С., Крачковская Т. М., Шестеркин В. И., Журавлев С. Д., Биктимирова Г. Р., Шумихин К. В. Влияние технологических параметров и составов пропитки на скорость испарения активного вещества с поверхности металлопористых катодов // 65 лет деятельности на рынке СВЧ-электроники: итоги и современные тенденции : материалы юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Алмаз». Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2022. С. 33–37.
- Крачковская Т. М., Мельников Л. А., Глухова О. Е., Шунаев В. В., Шалаев П. Д. Металлопористые катоды, модифицированные нанокремнеземом, с высокой долговечностью для применения в приборах СВЧ // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46, вып. 13. С. 36–39. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.13.49593.18315>
- Heaney D. F. Vacuum sintering // *Sintering of Advanced Materials / ed. Z. Z. Fang*. [Amsterdam] : Woodhead Publ., 2010. P. 189–221. <https://doi.org/10.1533/9781845699949.2.189>
- Storn R., Price K. Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // *Journal of Global Optimization*. 1997. Vol. 11, no. 4. P. 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Roquais J. M., Poret F., le Doze R., Ricaud J. L., Monterrin A., Steinbrunn A. Barium depletion study on impregnated cathodes and lifetime prediction // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 215, iss. 1–4. P. 5–17. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00318-0](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00318-0)
- Lai C., Wang J., Zhou F., Liu W., Engelsen D., Miao N. Emission and Evaporation Properties of 75 at% Re-25 at% W Mixed Matrix Impregnated Cathode // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 427. P. 874–882. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.038>

### References

- Roy A. From radar to high-power weapons: Microwave tubes power modern warfare. *Microwave Journal*, 2024, vol. 67, no. 9, pp. 124–128.
- Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, vol. 1, iss. 1, pp. 260–268. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
- Gärtner G., Knapp W., Forbes R. G., eds. *Modern Developments in Vacuum Electron Sources. Topics in Applied Physics*. Springer, Cham, 2020, vol. 135. XVIII+597 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7>
- Dubois B. Ch., Korolev A. N. Modern efficient cathodes. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2011, iss. 1 (508), pp. 5–24 (in Russian).
- Krachkovskaya T. M., Sahadji G. V., Zhuravlev S. D. Modern electron sources for TWTs in millimeter and submillimeter ranges. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, no. 12 (in Russian).
- Kozlov V. I. Emission properties and durability of metal-porous cathodes for microwave devices. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 1. Elektronika SVCh* [Reviews on electronic technology. Ser. 1. Microwave Electronics].



- Moscow, Elektronika Central Scientific Research Institute, 1983, iss. 8 (541). 54 p (in Russian).
7. Shroff A. M. Review of dispenser cathodes. *Revue Technique Thomson-CSF*, 1991, vol. 23, pp. 948–1026. <https://doi.org/10.5555/151680.151696>
  8. Kudintseva G. A., Melnikov A. I., Morozov A. V., Nikonov B. P. *Termoelektronnye katody* [Thermoelectronic cathodes]. Moscow, Leningrad, Energiya, 1966. 366 p. (in Russian).
  9. Zyablikova A. N., Nekrasov V. I. Some parameters of impregnated cathodes coated with osmium. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 1970, no. 7, p. 157 (in Russian).
  10. Emelyanov A. S., Bogachev R. Yu., Zhuravlev S. D., Krachkovskaya T. M., Shesterkin V. I., Shumikhin K. V. Investigation of the evaporation rate of the active substance of a metal-porous cathode by the method of piezoelectric resonance. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologii – 2022: trudy 29-j Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Sankt-Peterburg, 21–23 iyunya 2022 g.)*. Pod red. D. K. Kostrina, S. A. Martsynyukova [Kostrin D. K., Martsynyukov S. A., eds. Vacuum technique and technologies – 2022: Proc. 29th All-Russian Sci.-Tech. Conf. with Int. Participation (St. Petersburg, June 21–23, 2022)]. St. Petersburg, SPbGETU “LETI” Publ., 2022, pp. 24–26 (in Russian).
  11. Emelyanov A. S., Krachkovskaya T. M., Shesterkin V. I., Zhuravlev S. D., Biktimirova G. R., Shumikhin K. V. Influence of technological parameters and impregnation compositions on the evaporation rate of the active substance from the surface of metal-porous cathodes. *65 let deyatel'nosti na rynke SVCh-elektroniki: itogi i sovremennye tendentsii: materialy yubileinoi nauch.-tekhn. konf. AO “NPP ‘Almaz’”* [65 Years of Activity in the Microwave Electronics Market: Results and current trends: Materials of the anniversary sci.-tech. conf. JSC “NPP ‘Almaz’”]. Saratov, Saratov Technical University Press, 2022, pp. 33–37 (in Russian).
  12. Krachkovskaya T. M., Melnikov L. A., Glukhova O. E., Shunaev V. V., Shalaev P. D. Nanocarbon-Modified Metal Porous Cathodes with High Durability for Application in Microwave Devices. *Technical Physics Letters*, 2020, vol. 46, no. 7, pp. 673–676. <https://doi.org/10.1134/S106378502007010X>
  13. Heaney D. F. Vacuum sintering. In: Zhigang Zak Fang, ed. *Sintering of Advanced Materials*. [Amsterdam], Woodhead Publ., 2010, pp. 189–221. <https://doi.org/10.1533/9781845699949.2.189>
  14. Storn R., Price K. Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 1997, vol. 11, no. 4, pp. 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
  15. Roquais J. M., Poret F., Doze R. le, Ricaud J. L., Monterrin A., Steinbrunn A. Barium depletion study on impregnated cathodes and lifetime prediction. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 215, iss. 1–4, pp. 5–17. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00318-0](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00318-0)
  16. Lai C., Wang J., Zhou F., Liu W., Engelsen D., Miao N. Emission and Evaporation Properties of 75 at% Re – 25 at% W Mixed Matrix Impregnated Cathode. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 874–882. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.038>

Поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 07.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 07.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026