

Исследование оксидного катода в качестве безрасходного катода-компенсатора электроракетных двигателей

© А.С. Бенклян, А.А. Ляпин, Г.К. Клименко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведены испытания лабораторной модели термоэмиссионного оксидного катода в диодной схеме. Основной целью было получение эмиссионных характеристик лабораторной модели и исследование процессов активации эмиттера. Актуальность исследования обусловлена повышенным интересом к возможности применения безрасходных термоэмиссионных катодов в качестве катодов-компенсаторов электроракетных двигателей (ЭРД). Во время испытаний фиксировались следующие параметры: давление в вакуумной камере и ток эмиссии на анод-коллектор. Регулировались ток накала эмиттера и напряжение, прикладываемое между анодом-коллектором и эмиттером. Зазор между эмиттером и анодом-коллектором был выставлен перед началом эксперимента и составлял 2 мм. Измерение тока эмиссии происходило в диапазоне температур эмиттера от 600 до 1260 °С. Контроль температуры эмиттера осуществлялся инфракрасным и оптическим пирометрами. В ходе работы было выявлено три процесса активации эмиттера: температурой, временем и напряжением. Процессы активации температурой и временем широко известны в отличие от процесса активации напряжением, для которого в настоящее время нет однозначного теоретического объяснения.

Ключевые слова: термоэмиссионный катод, катод-компенсатор, оксидный катод, эмиттер, активация эмиттера, электроракетный двигатель, ионный двигатель

Введение. Для нормальной работы ионного двигателя необходим катод-компенсатор (КК), поставляющий поток электронов для нейтрализации объемного положительного заряда ионов, истекающих из ЭРД [1]. В качестве катодов-компенсаторов современных двигателей применяют плазменные полые катоды, в которые необходимо подавать плазмообразующее вещество. Оно непосредственно не создает тяги, но обеспечивает возникновение плазменного «мостика» между КК и струей ионов для транспортировки электронов и дополнительно нагревает эмиттер за счет ионной бомбардировки, позволяя снизить мощность нагревателя КК после выхода на рабочий режим.

В современных ЭРД для нормальной работы плазменного полого катода расходуется от 2 до 10 % общего количества запасенного рабочего вещества. Для таких современных космических задач ЭРД, как межпланетные перелеты и использование межорбитального буксира, потребляемое КК количество газа является существенным.

В настоящее время идут работы по поиску и адаптации нового рабочего вещества для ЭРД, поскольку широко применяемый в качестве

рабочего вещества ЭРД газ ксенон весьма дорог и ежегодное мировое производство ксенона ограничено. Перспективным рабочим веществом считают йод [2], поэтому активно ведут работы по созданию двигательной установки, использующей его в качестве рабочего вещества [3]. Один из таких проектов — компактный ЭРД (iSat) [4].

Основные преимущества использования йода в качестве рабочего вещества для ЭРД заключаются в том, что йод на несколько порядков дешевле ксенона, а тяга и удельный импульс ЭРД на йоде близки тяге и удельному импульсу на ксеноне [5].

Недостатками йода как рабочего вещества ЭРД являются: необходимость в дополнительном нагреве системы подачи рабочего вещества [6] (для предотвращения конденсации йода на стенках системы подачи) и химическая активность йода, что не позволяет применять существующие конструкции КК. Решением проблемы может послужить использование безрасходного КК (БКК). В настоящее время проводятся работы по исследованию возможности применения БКК в качестве КК для ЭРД [7] и исследования тепловых процессов на электродах БКК [8].

Цель данной работы — исследование возможности применения оксидного катода в качестве КК ЭРД, а также исследование процессов активации оксидного эмиттера. Для этого разработаны лабораторная модель оксидного БКК и стенд для ее испытаний.

Методы и материалы. При использовании БКК необходим постоянно работающий нагреватель катода и эффективный эмиттер электронов. Наиболее эффективными эмиттерами в настоящее время являются оксидные катоды, дающие высокую плотность тока эмиссии при умеренных температурах и достаточном ресурсе работы [9]. Одним из недостатков оксидного катода является необходимость его активирования после нахождения в воздушной среде перед началом его работы в космосе (в вакууме). Поэтому для БКК должна быть предусмотрена и проведена операция активирования эмиттера перед началом эксплуатации БКК и ЭРД.

Разработка лабораторной модели БКК. Для исследования процессов активирования БКК была разработана и изготовлена лабораторная модель БКК, схема которой представлена на рис. 1, а общий вид модели — на рис. 2.

Модель БКК состоит из корпуса 1, в котором закреплен эмиттер с нагревателем 4, а также из коллектора-анода 2. Зазор между эмиттером и анодом-коллектором обеспечивается с помощью керамического кольца 3. Перед началом испытаний был установлен зазор 2 мм между эмиттером и коллектором-анодом. На коллектор подавался положительный потенциал относительно эмиттера, и по значению пришедшего на него тока оценивалась эмиссия с катода.

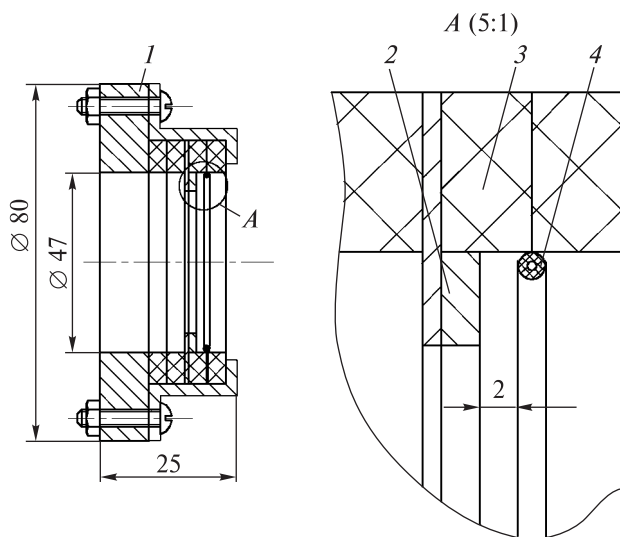


Рис. 1. Схема лабораторной модели БКК

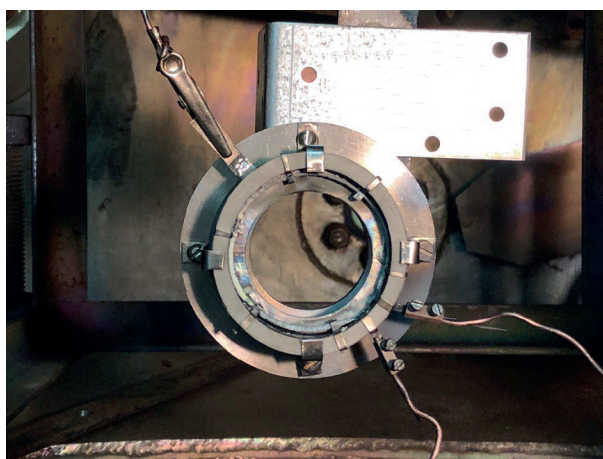


Рис. 2. Общий вид лабораторной модели БКК

Эмиттер представлял собой многослойную навивку из вольфрамовой проволоки диаметром 40 мкм, намотанной на вольфрамовый kern, выполненный из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм. Общая длина керн с навивкой составляла 135 мм. Полученный эмиттер имел развитую рабочую поверхность. Внешний диаметр керн с навивкой составлял 1,5 мм. В зазоры между витками помещалась суспензия, состоящая из карбоната бария и нитролака, выступающего в роли биндера. Kern являлся прямонакальным нагревателем.

Согласно [10], во время нагрева эмиттера в вакууме (давление $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па) при 470 К начиналось выделение CO и CO₂ из суспензии. Разложение нитролака заканчивалось при 850 К. При 870 К

начиналось разложение карбоната кальция, а при более высоких температурах происходило разложение углекислого бария на оксид бария и углекислый газ.

Разработка стенда для испытания лабораторной модели БКК.
Для проведения испытаний лабораторной модели БКК применялась установка, блок-схема которой представлена на рис. 3.

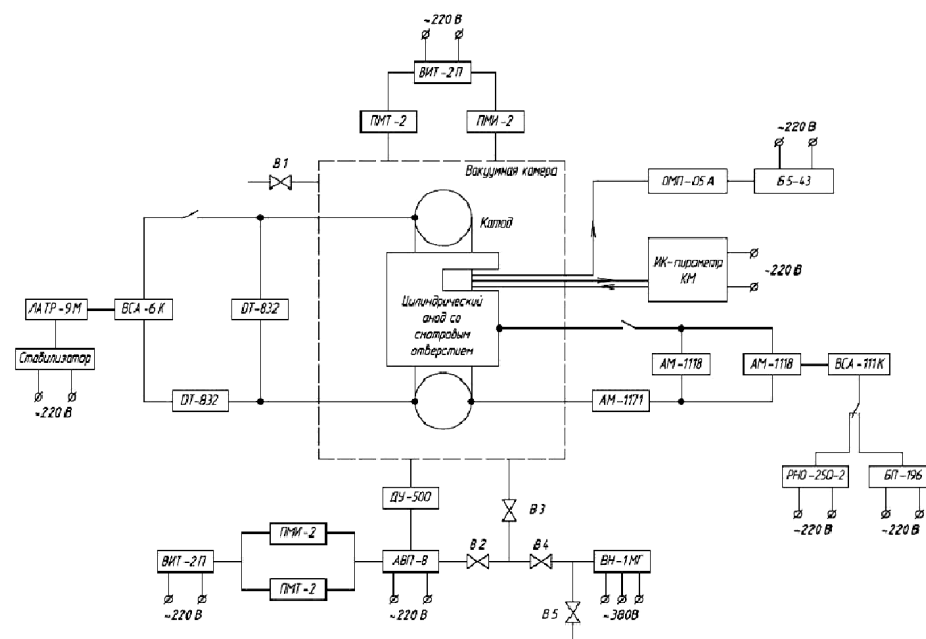


Рис. 3. Блок-схема установки для испытаний лабораторной модели БКК

Установка состояла из вакуумной камеры с токоподводами и смотровым окном, золотникового насоса ВН-1МГ, диффузионного насоса АВП-8, высоковакуумного затвора ДУ-500, вакуумных клапанов В1-В5, вакуумметров ВИТ-2П, термопарного и ионизационного манометрических преобразователей ПМТ-2 и ПМИ-2, выпрямительных устройств ВСА-6К, ВСА-111К, источников напряжения Б5-43 и БП-196, лабораторных автотрансформаторов РНО-250-2 и ЛАТР-9М, мультиметров АМ-1171, АМ-1118, ДТ-832, инфракрасного (ИК) пирометра типа КМ и оптического пирометра ОМП-054.

Модель БКК размещалась в вакуумной камере, которая затем откачивалась до давления $(2,6...3,6) \cdot 10^{-3}$ Па, к нагревателю подводился постоянный ток в диапазоне 0...18,1 А при напряжении накала в диапазоне 0...7,2 В, на коллектор-анод подавалось постоянное напряжение в диапазоне 0...400 В, и измерялся эмиссионный ток. Температура эмиттера регулировалась в диапазоне 600...1260 °С током накала и измерялась оптическими пирометрами.

Обсуждение результатов исследования. Экспериментально была получена зависимость эмиссионного тока от приложенного между эмиттером и коллектором-анодом напряжения, температуры эмиттера и времени выдержки эмиттера при определенных режимах (температура и напряжение). Полученные данные представлены графически в виде циклограммы эмиссионного тока на рис. 4.

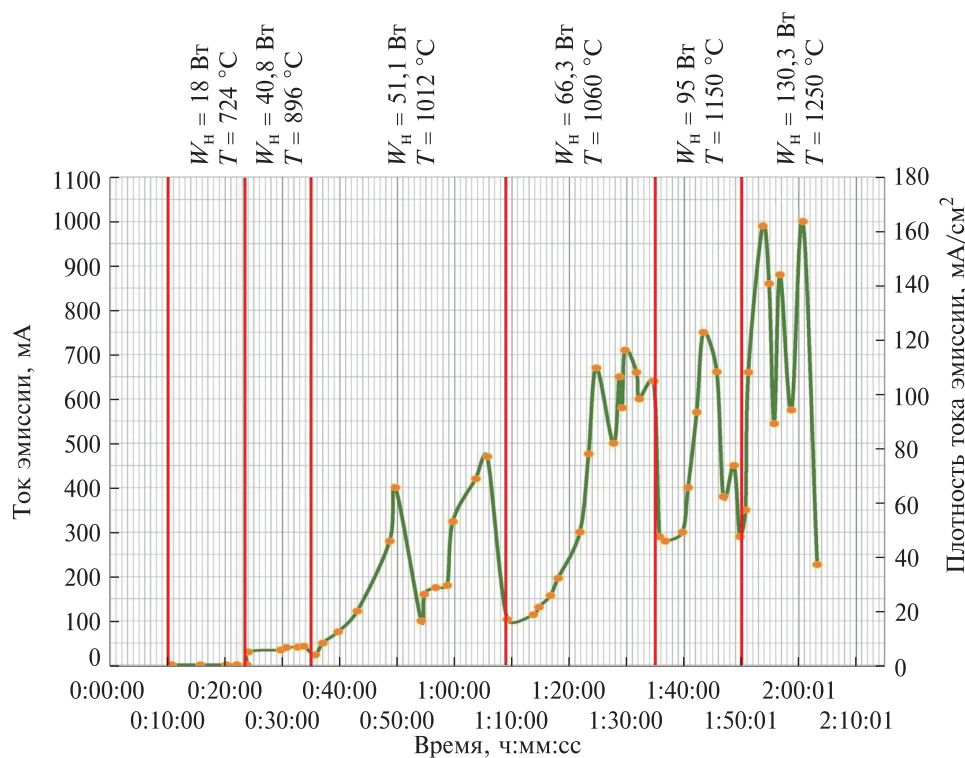


Рис. 4. Циклограмма эмиссионного тока

Циклограмма разделена на участки в зависимости от температуры эмиттера T и мощности W_n , вкладываемой в нагрев эмиттера.

Испытания начинались с активации эмиттера температурой (нагревом эмиттера). Нагрев осуществлялся ступенчато, с постепенным повышением мощности накала. В процессе нагрева наблюдалось резкое ухудшение вакуума в камере, вызванное выгоранием биндера и разложением карбоната бария. На рис. 5 представлен процесс обезгаживания эмиттера (p — давление в камере, W_n — мощность, вкладываемая в нагрев эмиттера).

По завершении обезгаживания эмиттера давление в камере установилось на уровне $(2,6...3,6) \cdot 10^{-3}$ Па. Процесс активации эмиттера температурой наблюдался и после обезгаживания эмиттера: при неизменной температуре эмиттера и напряжении между эмиттером и анодом-коллектором отмечался постепенный рост эмиссионного тока.

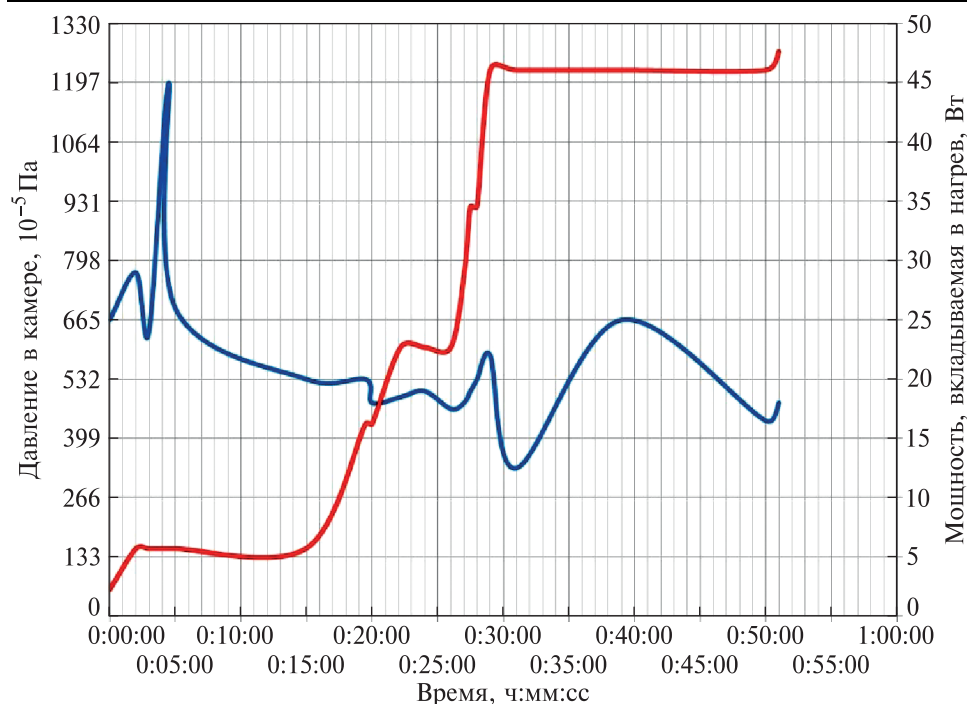


Рис. 5. Процесс обезгаживания эмиттера:
— — давление; — — мощность

Был выявлен процесс активации эмиттера временем: при выдержке эмиттера при фиксированной температуре, мощности нагрева и постоянном напряжении между эмиттером и коллектором-анодом значение тока эмиссии постепенно повышалось.

В ходе испытаний был выявлен процесс активации эмиттера напряжением. Данное явление наблюдалось в широком диапазоне температур и заключалось в следующем: при постоянной температуре эмиттера и мощности, вкладываемой в нагрев эмиттера, значения тока эмиссии увеличивались в 1,5–2,5 раза после кратковременного повышения напряжения между эмиттером и коллектором-анодом и последующим понижением напряжения до исходного значения. Время выдержки эмиттера при повышенном напряжении составляло несколько секунд. Это хорошо видно на вольт-амперных характеристиках (при фиксированной температуре) лабораторной модели БКК, приведенных на рис. 6–8. После повышения напряжения между анодом-коллектором и эмиттером и его дальнейшего возвращения к исходному значению (см. точки 1–6 на рис. 6, точки 1–9 на рис. 7, точки 1–6 на рис. 8) ток эмиссии сильно возрастает. Так, для температуры эмиттера 1012 °С ток возрос в 2 раза, для 1060 °С — в 2,3 раза, для 1250 °С — в 2 раза. Таким образом, дополнительная активация эмиттера напряжением может существенно повысить эффективность эмиттера.

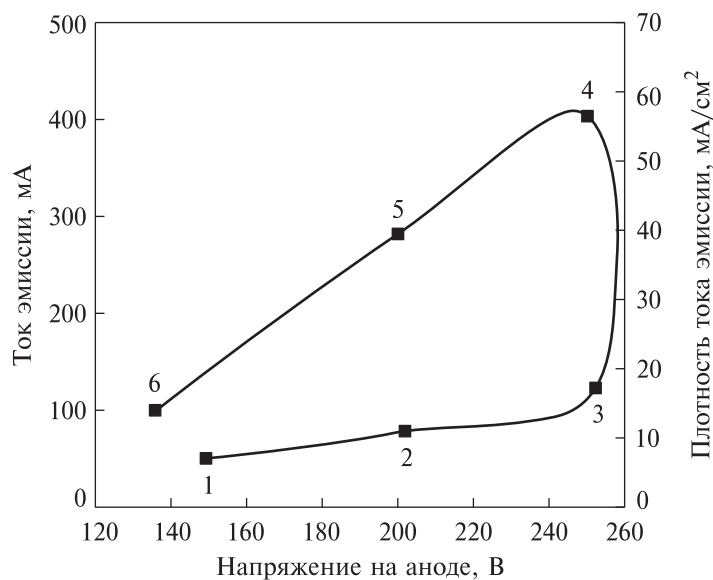


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика лабораторной модели БКК при температуре эмиттера 1012 °С, токе накала 13,2 А, вкладываемой в нагрев мощности 51,1 Вт

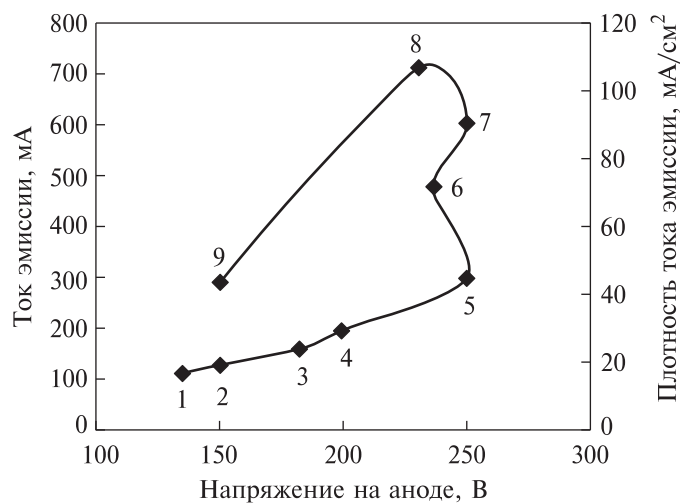


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика лабораторной модели БКК при температуре эмиттера 1060 °С, токе накала 14,1 А, вкладываемой в нагрев мощности 66,3 Вт

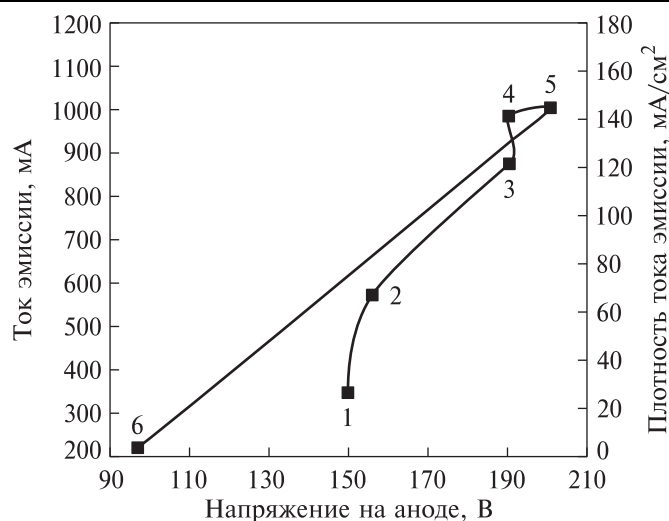


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика лабораторной модели БКК при температуре эмиттера 1250 °С, токе накала 18,1 А, вкладываемой в нагрев мощности 130,3 Вт

Полученные результаты экспериментального исследования позволяют сделать некоторые выводы.

1. Разработанная, изготовленная и испытанная лабораторная модель БКК с развитой поверхностью показала свою работоспособность в заданных условиях и возможность получения требуемых токов эмиссии.

2. Исследования работы оксидного катода в заданных условиях подтвердили необходимость процесса активации эмиттера нагревом в вакууме при длительной выдержке (несколько часов). При этом была обнаружена возможность интенсификации процесса активации эмиттера напряжением, т. е. кратковременным повышением напряжения между эмиттером и коллектором-анодом.

3. Проведенная работа позволяет рекомендовать при проектировании БКК введение дополнительного электрода — анода-коллектора для процесса активации эмиттера напряжением.

Заключение. В настоящее время существует ряд перспективных космических задач, для решения которых потребуется небольшой компактный КК, способный работать в паре с ЭРД как на йоде, так и на ксеноне. Решением этого вопроса является применение БКК.

В данной работе был подготовлен стенд для испытаний БКК в диодной схеме. Разработанная лабораторная модель БКК была испытана на данном стенде, и результаты ее испытаний дают основания сделать выводы о работоспособности оксидного эмиттера в качестве КК ЭРД. Важно также отметить, что обнаруженный эффект активации эмиттера напряжением позволяет существенно улучшить эмиссионные характеристики оксидного катода, являющегося перспективным эмиттером для БКК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Goebel D., Katz I. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008, 493 p.
- [2] Holste K., Gärtner W., Köhler P., Dietz P., Konrad J., Schippers S., Peter J., Klar P., Müller A., Schreiner P. In Search of Alternative Propellants for Ion Thruster. *34th International Electric Propulsion Conference, At Kobe, Japan, 2015*. URL: https://www.researchgate.net/publication/280157449_In_Search_of_Alternative_Propellants_for_Ion_Thrusters (дата обращения 04.11.2018).
- [3] Dankanich J., Szabo J., Pot B., Oleson S., Kamhawi H. Mission and System Advantages of Iodine Hall Thrusters. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Propulsion and Energy Forum, 2014*. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2014-3905>. DOI: 10.2514/6.2014-3905 (дата обращения 04.11.2018).
- [4] Dankanich J. SmallSats, Iodine Propulsion Technology, Applications to Low-Cost Lunar Missions, and the Iodine Satellite (iSAT) Project. *Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group (LEAG); 22-24 Oct. 2014*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140016889> (дата обращения 04.11.2018).
- [5] Polzin K. Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference Cleveland, OH, 2014*. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2014-3915>. DOI: 10.2514/6.2014-3915 (дата обращения 04.11.2018).
- [6] Островский В.Г., Смоленцев А.А., Щербина П.А. Йод как альтернативное рабочее тело электроракетных двигателей. *Вест. Самарского гос. аэрокосмического ун-та*, 2014, № 5 (47), с. 131–136.
- [7] Ляпин А.А., Щербина П.А., Клименко Г.К., Коновалова А.И., Островский В.Г., Сишко И.Б. Исследование возможности создания безрасходного катода-компенсатора электроракетного двигателя. *Изв. Рос. акад. наук. Энергетика*, 2018, № 2, с. 93–97.
- [8] Клименко Г.К., Коновалова А.И., Ляпин А.А. Тепловые процессы на электродах при испытании безрасходного катода в диодной схеме. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1694
- [9] Дюбуа Б.Ч., Королев А.Н. Современные эффективные катоды. *Электронная Техника. Сер. 1: СВЧ-техника. Научно-технический сборник*, АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2011, вып. 1 (508), с. 5–24.
- [10] Евстигнеев С.И., Ткаченко А.А. *Катоды и подогреватели электровакуумных приборов*. 2-е издание, испр. и доп. Москва, Высшая школа, 1975. 196 с.

Статья поступила в редакцию 29.03.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бенклян А.С., Ляпин А.А., Клименко Г.К. Исследование оксидного катода в качестве безрасходного катода-компенсатора ЭРД. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1888>

Бенклян Артем Сергеевич — аспирант 1-го курса кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: плазменные энергетические установки, электроракетные двигатели.
e-mail: benklyanartem@yahoo.com

Ляпин Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей и устройств. e-mail: laa1@bmstu.ru

Клименко Георгий Константинович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 200 научных трудов и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей, устройств и систем. e-mail: gkk@land.ru

Research of an oxide cathode as a cathode-neutralizer for EPSPS

© A.S. Benklyan, A.A. Lyapin, G.K. Klimenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In this research, a laboratory model of a thermionic oxide cathode was tested as part of a diode circuit. The ultimate goal of this work was to obtain the thermionic characteristics of the emitter of the laboratory model and to study the processes of emitter activation. The relevance of the study is due to the increased interest in the possibility of using thermionic cathodes as cathode-neutralizers for electrically-powered spacecraft propulsion system (EPSPS). During the experiment, the following parameters were recorded: the pressure in the vacuum chamber and the emission current to the anode-collector. The current of the emitter and the voltage applied between the anode-collector and the emitter were regulated. The gap between the emitter and the anode-collector was set before the beginning of the experiment and was 2 mm. The emission current was measured in the emitter temperature range from 600 °C to 1260 °C. The temperature of the emitter was controlled by infrared and optical pyrometers. In the course of the work, three emitter activation processes were identified: temperature, time and voltage. The processes of activation by temperature and time are widely known, in contrast to the activation process by voltage, for which there is currently no unambiguous theoretical explanation.

Keywords: a thermionic oxide cathode, cathode-neutralizer, oxide cathode, emitter, emitter activation, electrically-powered spacecraft propulsion system, ion thruster

REFERENCES

- [1] Goebel D., Katz I. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008, 493 p.
- [2] Holste K., Gärtner W., Köhler P., Dietz P., Konrad J., Schippers S., Peter J., Klar P., Müller A., Schreiner P. In Search of Alternative Propellants for Ion Thruster. *34th International Electric Propulsion Conference, At Kobe, Japan, 2015*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/280157449_In_Search_of_Alternative_Propellants_for_Ion_Thrusters (accessed November 4, 2018).
- [3] Dankanich J., Szabo J., Pot B., Oleson S., Kamhawi H. Mission and System Advantages of Iodine Hall Thrusters. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Propulsion and Energy Forum, 2014*. Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2014-3905> DOI: 10.2514/6.2014-3905 (accessed November 4, 2018).
- [4] Dankanich J. SmallSats, Iodine Propulsion Technology, Applications to Low-Cost Lunar Missions, and the Iodine Satellite (iSAT) Project. *Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group (LEAG); 22–24 Oct. 2014*. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140016889> (accessed November 4, 2018).
- [5] Polzin K., Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference Cleveland, OH, 2014*. Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2014-3915> DOI:10.2514/6.2014-3915 (accessed November 4, 2018).
- [6] Ostrovskiy V.G., Smolentsev A.A., Shcherbina P.A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2014, no. 5 (47), pp. 131–136.

- [7] Lyapin A.A., Shcherbina P.A., Klimenko G.K., Konovalova A.I., Ostrovskiy V.G., Sishko I.B. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Proceedings of RAS. Power Engineering*, 2018, no. 2, pp. 93–97.
- [8] Klimenko G.K., Konovalova A.I., Lyapin A.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1694
- [9] Dyubua B.Yu., Korolev A.N. *Elektronnaya tekhnika, ser. 1. SVCH-tekhnika. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik — Electronic Engineering, ser. 1. Microwave Engineering*, 2011, no. 1 (508), pp. 5–24.
- [10] Evstigneev S.I., Tkachenko A.A. *Katody i podogrevateli elektrovakuumnykh priborov* [Electro-vacuum devices cathodes and heaters]. 2nd ed., rev. and corr. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975, 196 p.

Benklyan A.S. (b. 1994), 1st year post-graduate student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: benklyanartem@yahoo.com

Lyapin A.A. (b. 1950) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 scientific publications and inventions in the field of plasma technologies, plasma engines and devices.
e-mail: laa1@bmstu

Klimenko G.K. (b. 1935) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. Author of 200 scientific publications and inventions in the field of plasma technologies, plasma engines, devices and systems.
e-mail: gkk@land.ru