

Тепловые процессы на электродах при испытании безрасходного катода в диодной схеме

© Г.К. Клименко, А.И. Коновалова, А.А. Ляпин

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

Представлены результаты экспериментального и аналитического исследования энергетических процессов, протекающих при испытаниях безрасходного катода, работающего в режиме термоэмиссии электронов с нагретой поверхности эмиттера. Рассмотрены, в частности, тепловые процессы на электродах, протекающие при испытании безрасходного катода в диодной схеме. Для случая стационарного теплообмена проведен анализ слагаемых в балансе мощностей на электродах. Исследован взаимный радиационный обмен катода и анода. Экспериментально и теоретически показано, что присутствие анода оказывает существенное влияние на тепловой баланс катода. Использование безрасходных катодов-компенсаторов в составе электроракетной двигательной установки позволит повысить газовую экономичность и улучшить массогабаритные характеристики. К тому же при разработке электроракетных двигателей, в которых используются новые рабочие вещества, в конструкцию безрасходного катода не потребуется вносить изменения.

Ключевые слова: безрасходный катод, катод-компенсатор, тепловой баланс, диодная схема

Введение. Для работы в космосе большинство используемых в настоящее время электроракетных двигателей должны быть оснащены катодом-компенсатором (КК), обеспечивающим нейтрализацию заряда потока ионов, истекающего из двигателя [1].

В последнее время возрастает интерес к малорасходным и безрасходным КК [2–5], которые позволяют уменьшить долю плазмообразующего вещества, подаваемого в КК и практически не участвующего в создании тяги. Интерес обусловлен тем, что использование таких катодов в составе электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) позволит сократить суммарный расход рабочего вещества, тем самым повысить экономичность и улучшить массогабаритные характеристики.

Существуют отработанные методики исследования традиционных плазменных КК [6–9]. Для широкого внедрения в состав ЭРДУ безрасходных КК еще предстоит разработать методики экспериментального исследования КК, а также создать адекватные расчетные и теоретические модели, применение которых позволит упростить процессы конструирования и испытаний.

Настоящая работа посвящена исследованию безрасходного КК, который работает в режиме термоэмиссии электронов с нагретой по-

верхности эмиттера. Цель работы — экспериментальное и теоретическое исследование тепловых процессов, протекающих при испытании безрасходного катода в диодной схеме.

Эксперимент и расчет. Исследование проводилось с использованием термоэмиссионного катода, эмитирующая поверхность которого выполнена из материала, имеющего низкое значение работы выхода. Нагрев эмитирующей поверхности производился с помощью спирального нагревателя. В конструкции предусмотрена система тепловых экранов, которая служит для уменьшения тепловых потерь.

Катод был установлен в вакуумной камере, откачанной до давления около 10^{-3} Па. Для измерения термоэмиссионного тока напротив эмиттера с зазором примерно 1 мм устанавливался анод. Нагреватель был подключен к регулируемому источнику выпрямленного напряжения, при этом ток и напряжение контролировались цифровыми мультиметрами. Температура поверхностей эмиттера и анода измерялась с помощью ИК-пирометра. Между катодом и анодом прикладывалась разность потенциалов, вытягивающая термоэмиссионные электроны из межэлектродного промежутка.

Экспериментально было установлено, что при увеличении тока, приходящего на анод, для поддержания постоянной температуры поверхности эмиттера необходимо уменьшать мощность нагревателя (рис. 1).

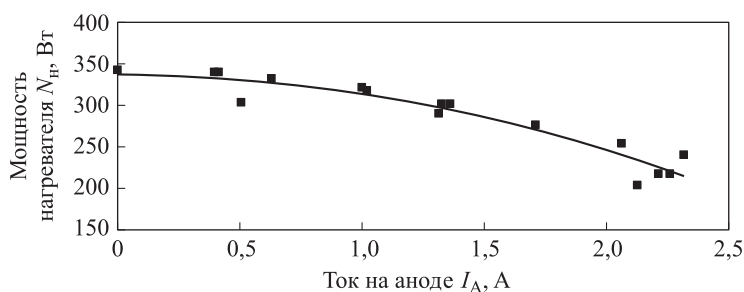


Рис. 1. Зависимость электрической мощности, подводимой к нагревателю для поддержания температуры поверхности катода постоянной (1225 °С), от значения электронного тока

Качественно этот результат можно объяснить следующим образом. Нагретая поверхность эмиттера вследствие радиационного теплообмена нагревает анод до некоторого равновесного значения температуры. При отсутствии электронного тока анод работает как дополнительный тепловой экран, возвращая часть излучения обратно на катод. При наличии некоторой разности потенциалов термоэмиссионные электроны ускоряются в ней и приносят на анод дополнительную энергию, вследствие чего равновесная температура анода увеличивается. Вместе с ней возрастает и поток излучения на катод.

Для более строгого объяснения был выполнен теоретический анализ тепловых процессов в системе катод — анод. Ниже приведены наиболее важные его результаты.

Схема основных тепловых потоков представлена на рис. 2. От источника питания в нагреватель поступает электрическая мощность $N_{эл}$. Проанализируем эффективность передачи энергии от нагревателя к эмиттеру.

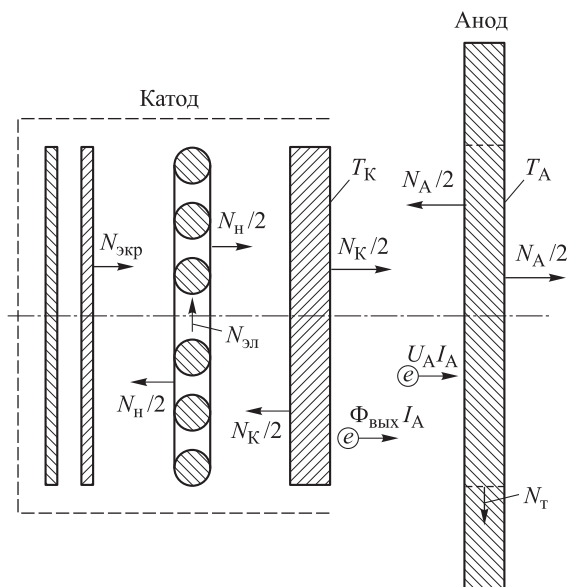


Рис. 2. Схема основных тепловых потоков в рассматриваемой системе

Слева от нагревателя расположена система тепловых экранов, отражающих часть падающего на них излучения и возвращающих нагревателю мощность $N_{экр}$.

Выражение, связывающее электрическую мощность, подведенную к нагревателю ($N_{эл}$), с мощностью, приходящей на эмиттер ($N_H/2$), имеет вид

$$\frac{N_H}{2} = \alpha N_{эл} + \beta N_K, \quad (1)$$

где N_H — полная мощность теплового излучения нагревателя, Вт; α и β — безразмерные коэффициенты, которые позволяют учесть эффективность системы тепловых экранов, потери теплового излучения с боковой поверхности нагревателя, а также потери вследствие теплопроводности (точные значения α и β могут быть определены экспериментально); N_K — полная мощность теплового излучения эмиттера, Вт.

Для того чтобы оценить значения коэффициентов α и β для рассматриваемой конструкции, запишем тепловой баланс на нагревателе:

$$N_{\text{н}} - N_{\text{эл}} - N_{\text{экр}} - \frac{N_{\text{к}}}{2} = 0. \quad (2)$$

Система, состоящая из n экранов, отражает долю излучения, равную $n / (n + 1)$. Для двух экранов отраженная доля составляет 0,66 от падающего излучения.

Полагая, что на экраны падает мощность $N_{\text{н}} / 2$, получаем:

$$N_{\text{экр}} = 0,33N_{\text{н}}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2) и преобразуем, тогда для рассматриваемой конструкции выражение (1) примет вид

$$\frac{N_{\text{н}}}{2} = 0,75N_{\text{эл}} + 0,37N_{\text{к}}.$$

Тепловой баланс на катоде выглядит следующим образом:

$$\frac{N_{\text{н}}}{2} - N_{\text{к}} + \frac{N_{\text{А}}}{2} - \varphi_{\text{в}} I_{\text{А}} = 0, \quad (4)$$

где $N_{\text{А}}$ — полная мощность теплового излучения анода, Вт; $\varphi_{\text{в}}$ — потенциал выхода электрона для материала эмиттера, В; $I_{\text{А}}$ — ток на аноде, А.

Мощность излучения анода зависит от температуры анода и определяется как

$$N_{\text{А}} = \varepsilon_{\text{А}} \sigma T_{\text{А}}^4 S_{\text{А}}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{А}}$ — степень черноты материала анода; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м² · К⁴); $S_{\text{А}}$ — площадь поверхности анода, м².

Как было отмечено ранее, температура анода зависит не только от мощности излучения катода, но и от мощности электронного нагрева. В некотором приближении из баланса мощностей на аноде может быть получена аналитическая зависимость температуры анода от значения электронного тока:

$$\varepsilon_{\text{А}} \sigma T_{\text{А}}^4 S_{\text{А}} - N_{\text{т}} = I_{\text{А}} \cdot U_{\text{А}}(I_{\text{А}}),$$

где $N_{\text{т}}$ — мощность потерь на аноде вследствие теплопроводности, Вт.

Для количественного расчета необходимо знать вольт-амперную характеристику межэлектродного промежутка $U_{\text{А}}(I_{\text{А}})$, а также учитывать значение мощности потерь $N_{\text{т}}$, отводимой от анода вследствие теплопроводности. Гораздо надежнее можно определить зависимость экспериментально. Такая зависимость была получена для температуры катода $T_{\text{к}} = 1225$ °С и имеет линейный вид (рис. 3).

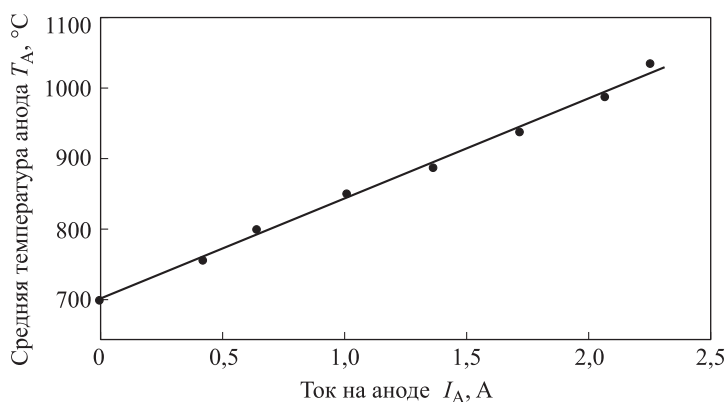


Рис. 3. Зависимость температуры анода от значения электронного тока при постоянной температуре катода $T_K = 1225$ °C

В общем виде выражение для температуры анода может быть записано как

$$T_A(I_A) = T_{A0} + kI_A,$$

где T_{A0} — равновесная температура анода при отсутствии электронного тока, К; k — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально, К/А.

Таким образом, подставив (4) и (5) в (1), получим выражение для мощности, которую необходимо подвести к нагревателю для поддержания температуры эмиттера постоянной, как функции от тока:

$$N_{\text{эл}}(I_A) = 0,75N_K + 1,34\varphi_{\text{в}}I_A - 0,67\varepsilon_A\sigma S_A(T_{A0} + kI_A)^4. \quad (6)$$

Получить точные количественные результаты, пользуясь зависимостью (6), довольно трудно, так как в ней не учитываются потери вследствие теплопроводности и уход излучения с боковых сторон элементов конструкции. Параметры $\varphi_{\text{в}}$ и ε_A также довольно трудно поддаются определению. В связи с этим выражение (6) можно использовать лишь для оценки. На рис. 4 представлено сравнение нормированных зависимостей мощности нагревателя при постоянной температуре катода от значения анодного тока, полученных экспериментально и теоретически. Теоретическая зависимость верно отражает качественную картину.

Очевидно, что при экспериментальном исследовании термоэмиссионных свойств КК влияние анода является нежелательным, так как вызывает трудности в дальнейшей интерпретации полученных результатов. Проблему можно решить с помощью «прозрачного» анода

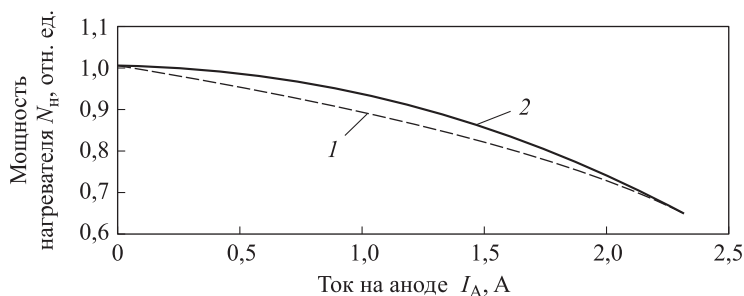


Рис. 4. Зависимость мощности нагревателя при постоянной температуре катода от значения электронного тока:
1 — теория; 2 — эксперимент

или принудительного охлаждения анода. При наличии охлаждения у анода $T_A \rightarrow 0$ и выражение (6) принимает вид

$$N_{эл}(I_A) = 0,75N_K + 1,34\phi_v I_A, \quad (7)$$

при этом мощность вследствие относительно малой работы выхода становится настолько слабой функцией электронного тока, что ее можно считать постоянной для широкого диапазона получаемых токов.

Заключение. В результате исследования основных тепловых процессов, протекающих при испытании термоэмиссионного катода в диодной схеме, представлены аналитические зависимости для оценки эффективности преобразования электрической мощности нагревателя в тепловую мощность катода, показана целесообразность применения охлаждения анода при проведении испытаний. Данная статья может оказаться полезной при разработке методики расчета безрасходных КК, а также методики их экспериментального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Г.К., Ляпин А.А. Пути совершенствования катодов-компенсаторов электроракетных двигателей. *Космонавтика и ракетостроение*, 2008, № 3 (52), с. 97–103.
- [2] Ким В.П., Семенкин А.В., Хартов С.А. *Конструктивные и физические особенности двигателей с замкнутым дрейфом электронов*. Москва, Изд-во МАИ, 2016, 160 с.
- [3] Островский В.Г., Смоленцев А.А., Соколов Б.А., Черашев Д.А. Электроракетная двигательная установка на основе двигателей с замкнутым дрейфом электронов на иоде. *Космическая техника и технологии*, 2013, № 2, с. 42–52.
- [4] Клименко Г.К., Ляпин А.А. Разработка и исследование катодных узлов сильноточных плазменных устройств на кафедре «Плазменные энергетические установки». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1024.html> (дата обращения 28.08.2017).

- [5] Минаков П.В., Поройков А.Ю., Рахимов А.Т., Сень В.В. Нанокристаллический графит — перспективный автоэмиссионный материал. *Интеграл*, 2012, № 3, с. 9–11.
- [6] Царёв Б.М. *Расчет и конструирование электронных ламп*. 3-е изд. Москва, Энергия, 1967, 672 с.
- [7] Киселёв А.Б. *Металлоксидные катоды электронных приборов*. Москва, Изд-во МФТИ, 2002, 239 с.
- [8] Клименко Г.К., Ляпин А.А. Предпосылки к созданию методики ускоренных испытаний катода-компенсатора электроракетных двигателей. *Справочник. Инженерный журнал*, 2007, № 2, с. 52–56.
- [9] Ефремов А.А., Румянцев А.В. Тепловой баланс полого катода-компенсатора, работающего в авторежиме. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки*, 2006, № 4, с. 81–83.

Статья поступила в редакцию 20.06.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1694>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Клименко Георгий Константинович родился в 1935 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. 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

Коновалова Анна Игоревна родилась в 1994 г., студентка 6-го курса кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: konovalovaai.bmstu@gmail.com

Ляпин Александр Александрович родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. 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: laal@bmstu.ru

Thermal processes on electrodes during testing a lossless cathode in a diode circuit

© G.K. Klimenko, A.I. Konovalova, A.A. Lyapin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers the experimental and analytical study results of the energy processes occurring during the tests on a lossless cathode, operating at the electrons thermal emission from a heated emitter surface. In particular, we consider thermal processes at the electrodes occurring during testing of a lossless cathode in a diode circuit. We analyzed the terms in the power balance at the electrodes for the steady-state heat transfer case. We investigated the mutual radiation exchange between the cathode and the anode. We show experimentally and theoretically that the anode presence has a significant effect on the cathode thermal balance. The cathode-compensators used in the electric propulsion system will increase gas economy and improve mass-dimension characteristics. In addition, when developing the electric propulsion system, which uses new working substances, the cathode-compensator design will not need to be changed.

Keywords: lossless cathode, cathode-compensator, heat balance, diode circuit

REFERENCES

- [1] Klimenko G.K., Lyapin A.A. *Kosmonavtika i raketostroenie — Scientific and technical journal “Cosmonautics and Rocket Engineering”*, 2008, no. 3 (52), pp. 97–103.
- [2] Kim V.P., Semenkin A.V., Khartov S.A. *Konstruktivnye i fizicheskie osobennosti dvigateley s zamknutym dreyfom elektronov* [Constructive and physical features of engines with closed electron drift]. Moscow, MAI Publ., 2016, 160 p.
- [3] Ostrovsky V.G., Smolentsev A.A., Sokolov B.A., Cherashev D.A. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technologies*, 2013, no. 2, pp. 42–52.
- [4] Klimenko G.K., Lyapin A.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 10. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1024.html> (accessed 28.08.2017).
- [5] Minakov P.V., Poroykov A.Yu., Rakhimov A.T., Sen V.V. *Integral — Integral*, 2012, no. 3, pp. 9–11.
- [6] Tsaryev B.M. *Raschet i konstruirovaniye elektronnykh lamp* [Calculation and design of electron tubes]. 3rd ed. Moscow, Energiya Publ., 1967, 672 p.
- [7] Kiselyov A.B. *Metalloksidnye katody elektronnykh priborov* [Metal oxide cathodes of electronic devices]. Moscow, MIPT Publ., 2002, 239 p.
- [8] Klimenko G.K., Lyapin A.A. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal — Handbook. An Engineering Journal*, 2007, no. 2, pp. 52–56.
- [9] Efremov A.A., Rummyantsev A.V. *Vestnik Baltijskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki — Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Physics and mathematics and engineering sciences*, 2006, no. 4, pp. 81–83.

Klimenko G.K. (b.1935) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department “Plasma 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

Konovalova A.I. (b.1994) a student of the 6th year of the Department “Plasma Power Plants”, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: konovalovaai.bmstu@gmail.com

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