

УДК 533.9.07

Н.Н. КОШЕЛЕВ, О.П. РЫБАЛОВ, Е.И. ИЩЕНКО*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПОЛОМ КАТОДЕ**

Газовая, энергетическая эффективность и ресурс полого катода могут существенно зависеть от геометрических размеров внешних электродов (диафрагмы, киппера). Рабочая температура этих электродов иногда превышает показатели эмиссионной поверхности катодов, что приводит к снижению их ресурса. В работе приводятся действующий макет полого катода с внешним электродом-калориметром и экспериментальные данные энергетических затрат выделяемых на электродах в дуговом разряде. Показано, что более трети от полной мощности, выделяемой на внешних электродах катода, могут приводить к их перегреву, а изменение электрического потенциала диафрагмы не приводит к положительному тепловому эффекту.

Ключевые слова: *электрореактивный двигатель, полый катод, калориметр, дуговой разряд.*

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами

Полые катоды на сегодняшний день являются наиболее эффективными и единственно применимыми в большинстве электродных электрореактивных двигателей. Однако они остаются критическими элементами, ограничивающими ресурс двигателя.

Конструктивно полый катод состоит из эмиссионной вставки (эмиттера), диафрагмы, пускового электрода (киппера), нагревателя, корпуса и узлов гальванической развязки. Авторы многих публикаций указывают, что применение материалов с низкой работой выхода для эмиссионных вставок приводит к снижению температуры катода и тем самым увеличению его ресурса [1, 2]. Температурный режим эмиссионной вставки в основном поддерживается разностью энергий потока частиц на ее поверхность и совокупностью потоков охлаждения. Эффективность нагрева вставки энергией плазмы, в свою очередь, зависит от давления газа в полости катода. Давление же поддерживается величиной расхода газа и диаметром выходного отверстия катода. Стремление к увеличению газовой эффективности за счет ограничения диаметра и увеличения длины выходного отверстия катода, приводит к значительному перегреву диафрагмы (киппера) [3], и не только ухудшает энергетические показатели катода, но и снижает его ресурс.

Для адекватного моделирования процессов теплообмена в полом термоэмиссионном катоде методом конечных элементов (МКЭ) необходимо более точно экспериментально определить энергетические потоки на элементы конструкции катода [4]. В работе приводятся экспериментальные данные распреде-

ления затрат электрической мощности на электродах дугового разряда с полым катодом.

Цель исследований

Оценить тепловые потоки на элементы конструкции катода. Выявить закономерности (тенденции) изменения тепловых потоков при варьировании:

- тока разряда;
- расхода газа через катод;
- изменения потенциала диафрагмы.

Макет и метод исследований

Суммарные электрические затраты в дуговом разряде с полым катодом, работающим в диодном режиме, определяются величиной произведения тока разряда на разность потенциалов между катодом (эмиттером) и анодом (металлической пластиной). Если не вдаваться в подробности, какие компоненты (частицы) плазмы и с какой энергетикой участвуют в теплообмене с отдельными электродами, а электроды выполнить в виде калориметров, можно выяснить, как распределяется электрическая мощность на них, выделяемая в виде тепла.

В работе использовался действующий макет полого катода (рис. 1) с гальванически и термически развязанной диафрагмой (киппером), представляющей собой кольцевой водяной калориметр. В этом калориметре реализована возможность установки сменного электрода различной длины и диаметра. Анод в макете так же был выполнен в виде калориметра с неизменным отверстием. Трубка-корпус катода и внешний кожух вакуумной камеры изго-

товлены из кварцевого стекла для реализации возможности измерения температуры эмиттера с помощью пирометра. Трубки, подводящие воду к калориметрам, проложены в вакуумной части макета и термически изолированы от опорного фланца. Датчики температуры расположены в непосредственной близости к фланцу.

В эксперименте использовалась дистиллированная вода, которая имеет низкую электропроводность, что позволило последовательно соединить водяные потоки и измерять единый расход воды объемным методом. В эксперименте использовалась система измерений, которая позволяла получать разницу температур на выходе и входе калориметра с точностью $0,1^\circ$. Величина скорости потока выбиралась таким образом, чтобы разность температур воды на входе и выходе калориметров приближалась к 5 градусам. Точность расхода воды, измеряемого объемным методом, не превышала 1%. Следует добавить, что для установки температурного режима калориметров, производилась выдержка по времени, которая была определена экспериментально и составляла 5 минут. Было замечено, что расход воды, установленный дроссельной заслонкой, изменялся от режима к режиму из-за изменения теплового запирания в протоках конвертора.

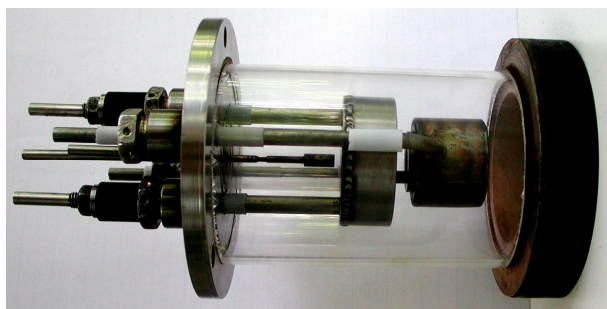


Рис. 1. Макет полого катода с внешним электродом-калориметром

Схема макета показана на рис. 2. На ней видно, что плазмообразующий газ подается непосредственно в полость эмиттера, а давление в объеме, ограниченном диафрагмой внутренней кварцевой трубкой и фланцем, измеряется вакуумметром, соединенным отдельным трубопроводом.

Методика расчета мощности (W), выделяемой на калориметре определяется простым выражением (4).

Количество теплоты (энергия), переданное телу массой m равно

$$Q = cm\Delta T, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость (воды); ΔT – изменение температуры тела (воды); m – масса воды, рассчитываемая, как расход \dot{m} , умноженный на время t .

$$m = \dot{m} t. \quad (2)$$

Мощность, выделенная на калориметре, определяется выражением:

$$W = Q/t, \quad (3)$$

или

$$W = c \dot{m} \Delta T. \quad (4)$$

Таким образом, для определения мощности выделяемой на электроде дугового разряда с полым катодом, необходимо измерить расход воды через калориметр и разность ее температур на входе и выходе калориметра.

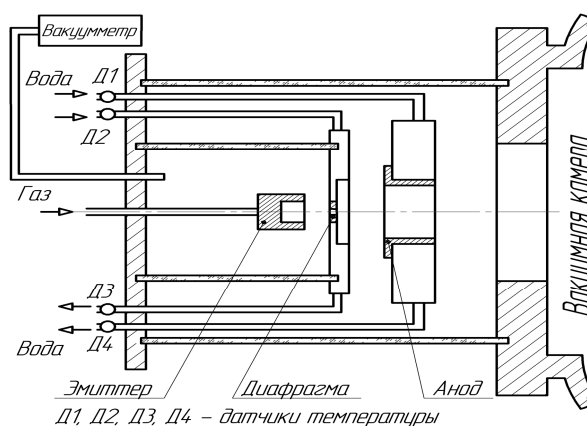


Рис. 2. Схема макета полого катода с внешним электродом-калориметром

Мощность, выделяемая на разогревом до высоких температур эмиттере, рассчитывалась как разность полной электрической мощности и суммы мощностей, выделяемых в виде тепла на калориметрах. При этом не учитывалась часть энергии излучения плазмы и нагретого газа не совершивших работу по нагреву калориметров. Доля такой энергии составляет приблизительно не больше 5%.

Ниже представлены результаты измерений при работе катода на аргоне.

Результаты исследований. Диафрагма - калориметр

Влияние расхода аргона.

В макете полого катода были установлены W-Ва эмиттер, площадь эмиссионной поверхности которого выбрана из условия отбора разрядного тока в среднем около 5А. Вольфрамовая диафрагма, диаметром 0,6мм и толщиной 2мм, была установлена в ближнем к эмиттеру калориметре. Молибденовая анодная вставка и вольфрамовая диафрагма устанавливались в калориметрах методом прессования, что позволило обеспечить надежный термический контакт с водяным конвертором. Расход газа аргона, подаваемый через катод, изменялся в преде-

лах 0,2 -0,6 мг/с. При этом измерялось и фиксировалось давление в полости катода. Широкий диапазон давлений в катоде создавался специально для выявления более выраженных тенденций распределения тепла в калориметрах.

На рис. 3, 4 представлены результаты измерений мощностей в процентах к полной электрической мощности дугового разряда тепловых потоков на диафрагму и анод.

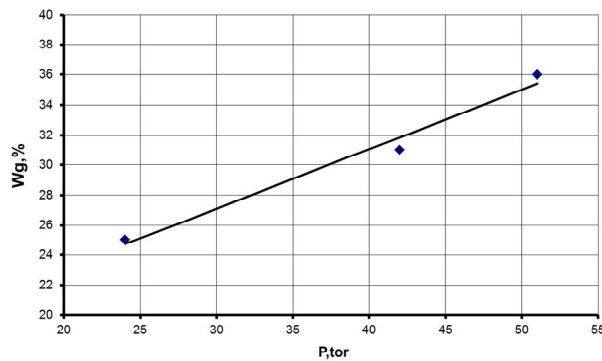


Рис. 3. Доля мощности, выделяемая на диафрагме в зависимости от давления аргона в катоде

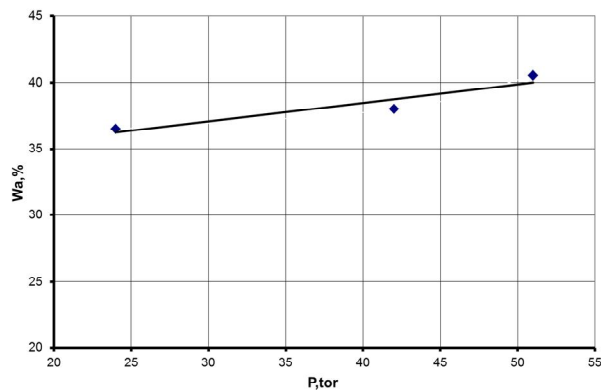


Рис. 4. Доля мощности, выделяемая на аноде в зависимости от давления аргона в катоде

Как видно из графиков доля мощности, выделяемая на диафрагме, является значительной (около 30%), представляя прямые энергетические потери, которые возрастают с увеличением расхода газа. При этом, доля мощности на аноде возрастает незначительно, предположительно за счет увеличения потока горячего газа. Температура эмиттера с увеличением давления газа оставалась неизменной и составила 1250°К. В объяснение этому можно предположить, что ток ионов, являясь основным механизмом поддержания температуры эмиттера, остается неизменным.

Влияние потенциала диафрагмы.

Предыдущий эксперимент показал, что увеличение расхода газа через катод приводит к дополнительному разогреву диафрагмы при неизменном ее сечении. Увеличивающееся давление газа приводит

к росту его температуры, который «остывает» на диафрагме и аноде.

Следующий эксперимент состоял в том, что мы изменяли потенциал диафрагмы и измеряли величину тепловых потоков на калориметры. При этом оставались стабильными ток основного разряда (5,35А) и давление внутри катода (30тор). Для сравнения были выбраны три потенциала диафрагмы: А - плавающий потенциал; В - потенциал эмиттера (диафрагма электрически соединялась с эмиттером через амперметр); С - плюсовой потенциал, величина которому соответствовал ток, 0,5А. На рисунке 5 показана электрическая схема соединений диафрагмы к эмиттеру и вольтамперная характеристика зонда (диафрагмы). Крайние точки соответствуют потокам ионов (В) и электронам (С) на диафрагму, а средняя точка (А) – равенству электронного и ионного тока.

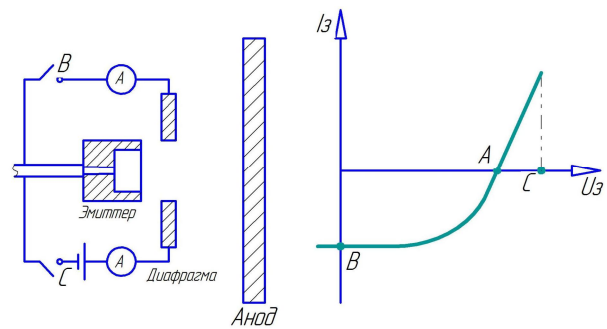


Рис. 5. Схема и график точек измерений

Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Первые два столбца таблицы показывают потенциалы диафрагмы и анода (разрядное напряжение) в режимах работы (А, В, С). Незначительное изменение разрядного напряжения слабо влияет на полную мощность дугового разряда с полым катодом. Отбор ионов поверхностью диафрагмы (режим В) приводит к снижению проводимости дуги и снижению температуры эмиттера (правый крайний столбец таблицы). При этом, ток диафрагмы 0,9А составил около 17% от полного тока разряда.

Повышение температуры эмиттера в режиме (С) объясняется выделением энергии за счет дополнительного электронного тока (0,5А) на диафрагму, а снижение температуры в режиме (В) – оттоком ионов на диафрагму.

Таблица 1

Результаты экспериментов						
	U _д (В)	U _р (В)	W _а (%)	W _д (%)	W _з (%)	T _э (°К)
А	11,2	29,8	40	34,6	25,4	1250
В	0,0	30,2	44,7	37,1	18,2	1240
С	11,85	29,8	45,6	42	12,4	1260

Доля мощности, выделяемой на эмиттере, снижается в режимах с подачей принудительного потенциала на диафрагму (В, С), а потери на ней растут (столбцы таблицы 4,5,6).

Результаты исследований. Киппер - калориметр

Для проведения следующего эксперимента макет катода был немного видоизменен. Эмиттер катода был диафрагмирован вольфрамовой шайбой с отверстием 0,5мм, а электрод, показанный на схеме (рис. 2) как диафрагма, использовался как киппер и имел отверстие 4мм. Измерение мощности, выделяемой в виде тепла, на киппере и аноде производилось прямым калориметрированием, а доля мощности, потраченная на нагрев катод, рассчитывалась вышеописанным методом. Такой макет был испытан в диапазоне токов 1,5А - 4А с интервалом в 0,5А, при этом в каждой точке производилась выдержка 10 минут и измерялся расход воды через калориметры.

На рис. 6 показан существенный рост температуры от 1250К до 1600К капсулы с эмиттером и диафрагмой при увеличении разрядного тока с 1,5А до 4А. Объясняется этот эффект не только увеличением плотности тока с поверхности эмиттера, а и выделением тепла на диафрагме.

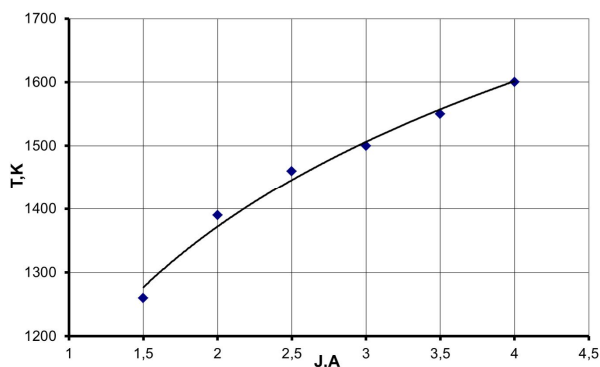


Рис. 6. Температура эмиттера в зависимости от разрядного тока

Два следующих графика отражают доли мощностей выделяемых на аноде, киппере (рис. 7) и эмиттере (рис. 8). Видно, что мощность, выделяемая на киппере с предложенной геометрией, несущественно изменяется с увеличением разрядного тока и составляет не более 20%.

Для поддержания температуры катода в слабotoчном режиме, в данном макете, выделена большая часть мощности относительно киппера и анода (рис. 8). А значит снизились затраты на нагрев плазмы, что отражается низкой температурой катода (рис. 6).

Полученные данные на этом графике могут быть критерием выбора токового режима катода.

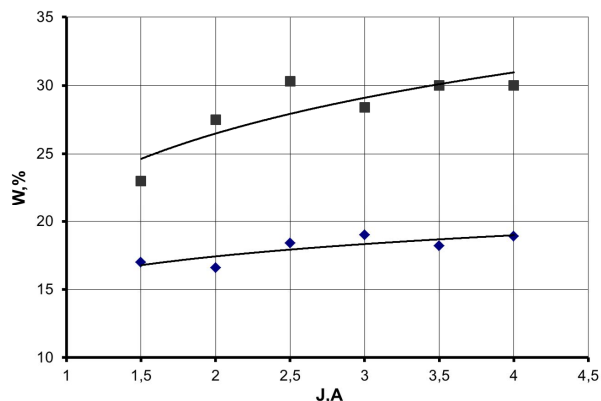


Рис. 7. Доля мощности, выделяемая на аноде (верхняя кривая) и киппере (нижняя кривая) в зависимости от разрядного тока

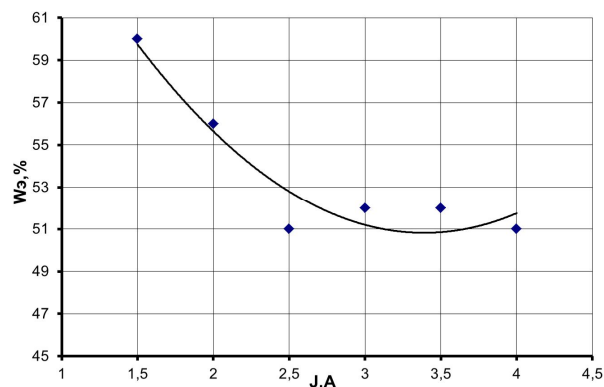


Рис. 8. Доля мощности, выделяемая на эмиттере в зависимости от разрядного тока

Перспективы дальнейших исследований

Представленный макет полого катода с электродами-калориметрами и результаты предварительных исследований показывают значимость полученных результатов.

Дальнейшие исследования, связанные с набором статистических данных при варьировании геометрических и газовых параметров катода приведут к оптимизации внешних электродов полого катода.

Выводы

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Существенная мощность (более 30%) выделяется в виде тепла на диафрагме полого катода, которая приводит к ее перегреву и может существенно снизить ресурс. В катодах, где диафрагма гальванически отвязана от эмиттера, это приводит к дополнительному разогреву корпуса.

2. Повышение расхода газа через катод приводит к увеличению энергетических потерь на диафрагме за счет снижения мощности необходимой для поддержания температуры эмиттера.

3. Изменение потенциала диафрагмы, при котором собираются те или иные заряженные частицы на ней, приводит к существенному перераспределению выделяемой мощности на электродах дугового разряда.

4. Доля мощности, выделяемая на приведенной конструкции киппера, несущественно растет при повышении разрядного тока и не превышает 20%.

5. Слаботочный режим, приведенного макета катода с киппером, показал значительно меньшие энергетические затраты, потраченные на нагрев плазмы.

Полученные результаты испытаний помогут адекватно расставить энергетические потоки при математическом моделировании процессов теплообмена в полном термоэмиссионном катоде при разработке их летных вариантов.

Литература

1. Sarver-Verhey, T.R. *Destructive Evaluation of a Xenon Hollow Cathode After a 28,000 Hour Life Test [Text]* / T.R. Sarver-Verhey // *Papers of 34th AIAA Propulsion conference, Cleveland, USA, 13 – 15 July 1998.* – 98 – 3482.

2. Katz, I. *Plasma Heating of Inert Gas Hollow Cathode Inserts [Text]* / Ira Katz, G. Mikellides, Dan M. Goebel, James E. Polk // *Papers of 30th International Electric Propulsion Conference, Italy, 2007.* – 017.

3. Goebel, D.M. *High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters [Электронный ресурс]* / Dan M. Goebel, Emily Chu // *Papers of 32nd International Electric Propulsion Conference, Germany, 2011.* – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2011index/IEPC-2011-053.pdf. – 20.05.2012 г.

4. Дыбский, П.А. *Конечно-элементная модель теплообмена в безнакальном термоэмиссионном катоде [Текст]* / П.А. Дыбский, А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2003. – № 5/40. – С. 162-164.

Поступила в редакцию 1.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

КАЛОРИМЕТРИЧНІ ВИМІРИ У ПОЛОМУ КАТОДІ

М.М. Кошелев, О.П. Рыбалов, Є.І. Іщенко

Газова, енергетична ефективність та ресурс порожнистого катода можуть значно залежати від геометричних розмірів зовнішніх електродів (діафрагми, кіперу). Робоча температура цих електродів іноді перевищує показники емісійної поверхні катодів, що призводить до зниження їх ресурсу. В роботі наводяться дійсний макет полого катода з зовнішнім електродом-калориметром й експериментальні данні енергетичних затрат, що виділяються на електродах у дуговому розряді. Показано, що більш ніж третина від повної потужності, яка виділяється на зовнішніх електродах, призводить до їх перегріву, а змінення електричного потенціалу діафрагми не призводить до позитивного теплового ефекту.

Ключові слова: електрореактивний двигун, порожнистий катод, калориметр, дуговий розряд.

CALORIMETRIC MEASUREMENTS IN THE HOLLOW CATHODE

N.N. Koshelev, O.P. Rybalov, E.I. Ishchenko

Gas, power efficiency and life time of the hollow cathode can essentially depends on geometrical sizes of external electrodes (diaphragm, keeper). Operating temperature of these electrodes sometimes can exceed factors of cathode emissive surface, which is leaded to lifetime reducing. In work are resulted an operating breadboard model of the hollow cathode with an external electrode-calorimeter and experimental data of power expenses allocated on electrodes in the arc discharge. It is shown, that more than thirds of full power allocated on external electrodes of the cathode can lead to their overheating. Changing of diaphragm electrical potential is not lead to positive thermal effect.

Key words: electro-reactive engine, hollow cathode, calorimeter, arc digit.

Кошелев Николай Николаевич – ст. научный сотрудник каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: nikolajkoshelev@rambler.ru.

Рыбалов Олег Петрович – научный сотрудник каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Ищенко Евгений Иванович – научный сотрудник каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.