

УДК 629.7.036.74

А. П. Синицин, А. В. Румянцев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КАТОДА

24

Приведены результаты тепловакуумных испытаний катода стационарного плазменного двигателя, смоделированы различные режимы его работы, выполнен тепловой расчет и осуществлена верификация тепловой математической модели катода. По результатам расчетов проведена оценка тепловой модели катода и эксплуатационных параметров, выбраны наиболее эффективные требуемые ресурсные характеристики катода, связанные с выбором мощности и времени работы нагревателя с обеспечением оптимальной температуры эмиттера в авторежиме и герметичности сварных швов. Установлено, что минимальная мощность накала для запуска катода составляет 60 Вт, время подготовки к запуску - 140 с. Рекомендовано для повышения надежности работы катода заменить в его конструкции материал геттерной коробики на молибден М99.95-МП.

This article provides results of the cathode of stationary plasma engine thermal vacuum test with various operating modes simulated, a thermal calculation and the cathode thermal mathematical model verification. Based on the calculations, the cathode thermal model and operating performances were assessed, the most efficient required cathode life time characteristics were selected, which are related to the cathode heater power and operating time with provision of emitter optimal temperature in the automatic mode and welded joints leak-tightness. It was determined that the minimum heater power for cathode start-up is 60 W, the time to prepare for a start-up is 140 sec. To improve the cathode stable operation it is recommended to replace the tail piece and getter cover material for Molybdenum M99.95-МП.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, катод, тепловой расчет.

Key words: stationary plasma thruster, cathode, thermal calculation.

В настоящее время задача применения малых стационарных плазменных двигателей (СПД) является актуальной ввиду их высокой востребованности в проектах по обеспечению низкоорбитальной связи (OneWeb, Гонец, Иридиум и др.). В малых СПД применяется катод-компенсатор на инертном газе, обеспечивающий токи разряда 0,5...1,5 А и обладающий большим ресурсом, позволяющим производить многократное включение двигателя при сравнительно малой потребляемой мощности.

В СПД катод как источник электронов обеспечивает запуск двигателя, поэтому он во многом определяет надежность, устойчивость ра-



боты, стабильность параметров, динамику и ресурс двигательной установки в целом. В этих условиях решение вопросов при разработке электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) в значительной мере определяется успехами в разработке газоразрядного катода. Рассмотрение теплового режима катода является особенно важным, поскольку катоды малых СПД работают в режимах с низким тепловыделением на эмиттере, при этом конструкция катода в целом достаточно теплонапряженная.

С целью получения расчетных данных о тепловом состоянии элементов катода как в режиме стартового разогрева, так и в авторежиме решалась задача по определению диапазона температур и тепловых потоков по элементам катода в стационарных режимах с экстремальными и промежуточными сочетаниями внутренних и внешних тепловых нагрузок с использованием разработанной тепловой модели конструкции катода и окружающих элементов в условиях стендовых испытаний и штатного функционирования.

Измерение температур внутренних элементов катода в штатном исполнении практически невозможно из-за неразборности конструкции и ее малых размеров. Поэтому для определения температур основных элементов катода была разработана его тепловая математическая модель и проведены тепловые расчеты с использованием пакета прикладного программного обеспечения SolidWorksPremium2012 и SolidWorksFlowSimulation2012.

Рассматриваемая конструкция является полым плазменным катодом. Эмиттер разогревается до рабочей температуры (1400...1500°C) и обеспечивает эмиссию первичных электронов, которые ионизируют газ внутри канала катода и создают благоприятные условия для зажигания разряда. За счет разности потенциалов между катодом и анодом создается электрический разряд, участвующий в рабочем процессе СПД.

Схемная конструкция катода представлена на рисунке 1. Основным элементом катода является эмиттер, который помещен внутри обоймы. Вокруг обоймы расположен нагреватель для стартового нагрева эмиттера, закрытый снаружи тепловыми экранами. К обойме приваривается проставка, по которой осуществляется подача рабочего тела – инертного газа. Проставка крепится к геттерной коробке, в которой происходит очищение рабочего тела от газообразных примесей. Поджигной электрод инициирует разряд для запуска катода. К корпусу через хвостовик крепится изолятор.

В тепловой модели были учтены геометрические размеры деталей (без упрощений), свойства конструкционных материалов, заданы контактные термосопротивления между элементами модели. В расчете учитывался только кондуктивный и радиационный теплообмен, так как катод эксплуатируется в глубоком вакууме. Тепловыделяющими элементами тепловой модели являются эмиттер и нагреватель, на которых задавалась соответствующая мощность в зависимости от времени и режима работы. При расчете радиационного компонента теплообмена каждой поверхности задавалась интегральная степень черноты в за-

висимости от материала и обработки поверхности. В свойствах конструкционных материалов учитывалась температурная зависимость коэффициента теплопроводности и теплоемкости.

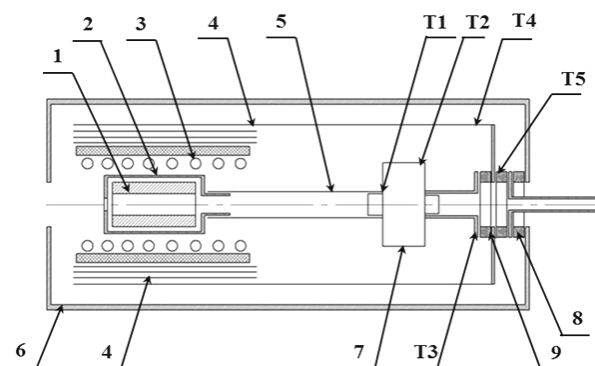


Рис. 1. Схемная конструкция катода и расположение термопар:
1 – эмиттер; 2 – обойма; 3 – нагреватель; 4 – экраны; 5 – проставка;
6 – поджигающий электрод; 7 – геттерная коробочка; 8 – хвостовик; 9 – изолятор

При построении тепловой модели катода применялись автоматическое создание расчетной области, генерация сетки для нее и твердого тела, автоматическая адаптация сетки к геометрии модели и полю решения [1; 2].

Тепловая модель разбивалась на 242 367 объемных элементов.

Целью теплового расчета было:

- определение минимальной мощности стартового разогрева нагревателя и минимального времени разогрева катода, которые обеспечивают условия для самоподдержания температуры эмиттера на уровне, достаточном для поддержания эмиссии электронов без дополнительного подогрева от стартового нагревателя, требования к допустимым уровням температуры критичных элементов катода;

- определение температуры основных элементов катода на основе расчетов при различных граничных условиях, необходимых для выбора инженерных мероприятий по оптимизации тепловой модели и получения исходных данных на проведение тепловакуумных испытаний;

- исследование влияния различных параметров тепловой модели на тепловое состояние катода.

Для достижения цели была проведена расчетная оценка распределения температур по конструкции катода при различных мощностях накала.

Катод представляет собой конструкцию с очень высокими значениями градиента температур как в осевом, так и в азимутальном направлениях: в режиме огневой работы в наихудших горячих условиях от 1400° С на эмиттере до 500° С на боковой поверхности катода и до 350° С в зоне наружного электрического монтажа. В нерабочем режиме в наихудших условиях температура всех элементов катода может опускаться до минус 90° С. Материал эмиттера электронов – гексаборид лантана. При рабочей температуре он позволяет получать плотность тока, соот-



ветствующую эффективному катоду в интервале $(1400 \div 2070)^\circ \text{C}$, длительно (до 1000 ч) работать при температуре 1530°C , не «отравляясь» кислородом [4]. Поэтому основной задачей теплового расчета была оценка тепловой схемы катода и эксплуатационных параметров с целью выбора наиболее эффективных, а также достижения требуемых ресурсных характеристик катода, связанных с выбором мощности и времени работы нагревателя, обеспечением оптимальной температуры эмиттера в авторежиме и обеспечением герметичности сварных швов.

При проведении тепловакуумных испытаний (ТВИ) катода для имитации внешних тепловых воздействий в вакуумной камере были созданы условия, смоделированные и при тепловом расчете:

- давление в камере не менее $2,0 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.;
- степень черноты внутренней поверхности камеры не менее 0,9;
- температура окружающих стенок вакуумной камеры, начальная температура элементов катода и посадочной поверхности под кронштейн катода -20°C .

Расчетная оценка проведена для следующих вариантов работы катода:

- трех циклов запуска (160 с — нагрев/10 мин — остывание) при мощности разогрева 81 Вт;
- 160 с нагрева при мощности накала 81 Вт с последующим выходом на авторежим при токах разряда 1,2 А и 2,23 А;
- 160 с нагрева при мощностях накала (Вт): 60; 70; 90; 100.

При запуске первоначальный разряд происходит между торцом разогретого нагревателем эмиттера и поджигным электродом. Далее нагреватель выключается, и работа катода и тепловыделение в эмиттере происходит за счет разряда.

Для сопоставления расчетных результатов, полученных на тепловой математической модели катода с экспериментальными данными, с целью введения поправок в модель при их рассогласовании, выполнен анализ, суть которого состоит в сравнении температур элементов катода в различных режимах функционирования, предсказанных с помощью тепловой модели, с температурами, полученными на различных этапах тепловакуумных испытаний катода, при имитации внешних воздействий и внутренних тепловыделений, соответствующих режиму его функционирования.

При оценке динамического процесса разогрева тепловой модели конструкции катода, имитация его «запуска» в расчетах осуществлялась за счет фиксированного тепловыделения на различных его участках. Расположение датчиков температуры на катоде приведены на рисунке 1.

Для сравнения использовались показания термопар, полученные при проведении ТВИ в зонах:

- сварки геттерной коробки с проставкой Т1;
- геттерной коробки Т2;
- пайки геттерной коробки с изолятором – Т3;
- тепловых экранов – Т4;
- пайки тепловых экранов с изолятором – Т5.



На рисунке 2 и в таблице сопоставлены расчетные значения температуры и показания термомпар при ТВИ.

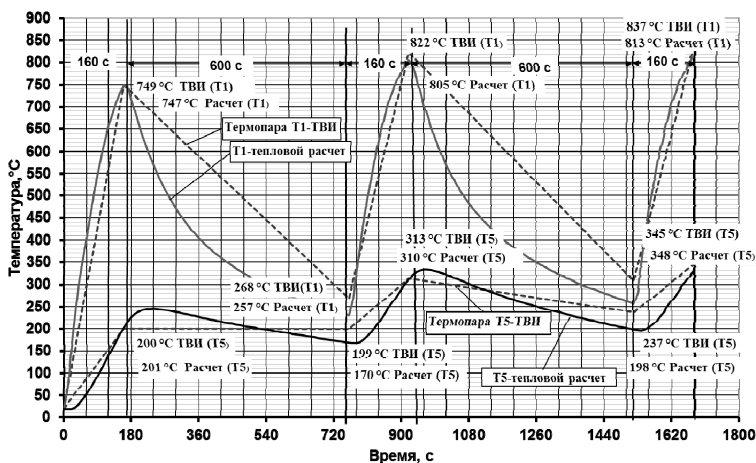


Рис. 2. Температуры в местах установки термомпар Т1 и Т5 при циклическом запуске катода (160 с – 81 Вт, 10 мин – остывание) по результатам ТВИ и по расчетам на тепловой модели

Распределение температуры в местах установки термомпар

Время, с	Т1		Т2		Т3		Т4		Т5	
	ТВИ	Расчет	ТВИ	Расчет	ТВИ	Расчет	ТВИ	Расчет	ТВИ	Расчет
0	–	20	20	20	–	20	–	20	–	20
160	749	747	562	544	260	267	475	485	201	200
760	268	257	249	213	202	175	209	186	199	170
920	822	805	654	629	383	360	–	555	313	310
1520	307	283	288	242	242	205	245	212	237	198
1680	837	813	682	639	417	390	580	566	345	348

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что максимальное расхождение температур составляет 8 %, что объясняется погрешностью, вносимой способом крепления термомпар (контактная сварка) и погрешностью измерений.

Все испытания проводились с катодом, в котором геттерная коробочка была изготовлена из ковара (29НК). В этой конструкции катода геттерная коробочка сваривается с проставкой. Сплавы свариваемых деталей (геттерная коробочка – 29НК и проставка – МР-47) являются материалами с различными коэффициентами линейного расширения. При нагреве катода температура эмиттера плавно повышается. Растет и температура проставки, достигая (в зоне сварки) температуры более 500 С. Согласно справочным данным при температурах до 470 С относительное линейное удлинение ковара меньше, чем у фольги из МР-47, а при



более высоких температурах – существенно больше. Как следствие, экран в зоне сварки подвергается знакопеременной деформации, достигающей 0,15–18 %, что близко к пределу упругости материалов [6].

Усталостное разрушение металлов и сплавов наблюдается при повторном и повторно-переменном действии напряжений, превосходящих определенное критическое значение, зависящее от природы материала и ряда внешних факторов. Структурные неоднородности приводят к неравномерному распределению напряжений, возникновению концентраторов и трещин, их росту и, как следствие – к потере катодом герметичности [3]. Вариантом решения этой проблемы может быть доработка конструкции, в которой геттерная коробка выполнены из молибдена М99.95-МП.

Для сравнения на рисунке 3 приведены прогнозируемые температуры базовой конструкции катода и доработанной, с заменой материала геттерной коробки на молибден М99.95-МП в стационарном режиме работы для условий ТВИ.

Из результатов расчета следует, что замена материала геттерной коробки на молибден М99.95-МП приводит к следующему:

- в зоне сварки геттерной коробки с проставкой (Т1, см. рис. 1) к снижению температуры на 106° С;
- в зоне пайки геттерной коробки с изолятором (Т3) к повышению на 87° С;
- в месте крепления термопары Т2 (в зоне геттерной коробки) к повышению на 30° С.

На эмиттере катода наблюдается незначительное снижение температуры на 23° С (с 1736 до 1713° С в третьем цикле). В последующем тепловые расчеты при разных мощностях велись только с доработанной конструкцией геттерной коробки с заменой материала на молибден М99.95-МП.

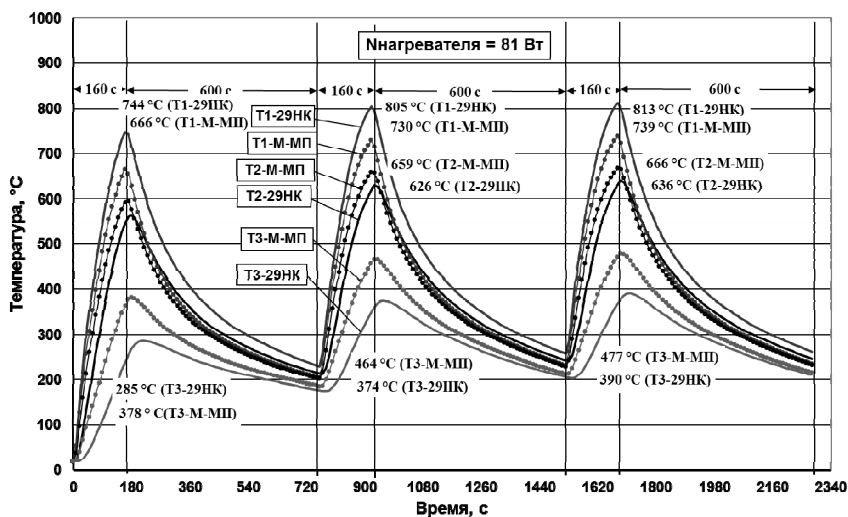


Рис. 3. Изменение температуры элементов катода на геттерной коробке из 29HK и из молибдена М99.95-МП при мощности накала нагревателя 81 Вт



На рисунке 4 дано расчетное распределение температуры на эмиттере для разных мощностей разогрева.

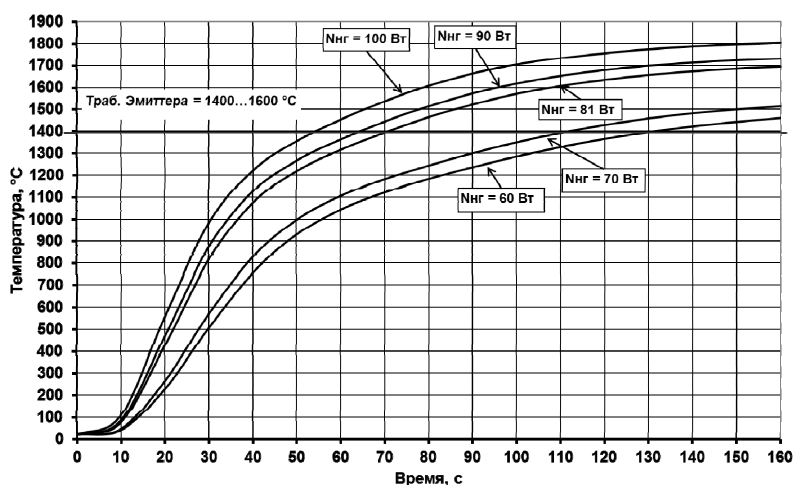


Рис. 4. Изменение температуры эмиттера катода при разогреве в зависимости от мощности нагревателя

Из представленных на рисунке 4 результатов расчета следует, что для достижения рабочей температуры эмиттера 1400°C необходима мощность разогрева 60 Вт, что подтверждается результатами ТВИ катода. При испытаниях было установлено, что минимальный ток накала, при котором катод нормально запускается, составляет 10,5 А (~62 Вт, время подготовки к запуску 145 с). Температура в зоне геттерной коробки составила 500°C , что недостаточно для нормальной работы геттерной коробки (больше 600°C).

На рисунках 5 и 6 приведено распределение температуры по конструкции катода при разогреве катода за 160 с при мощности накала 81 Вт с последующим выходом на авторежим при токе разряда 1,2 А (тепловыделение на эмиттере 12 Вт) и 2,23 А (тепловыделение 27 Вт). Из данных рисунка 5 вытекает, что выход на стационарный режим при токе разряда 1,2 А следует через 700 с, температура эмиттера при этом 1402°C , а температура в зоне геттерной коробки 450°C . При токе разряда 2,23 А выход на стационарный режим происходит через 900 с, при этом температура эмиттера составляет 1812°C .

Таким образом, в работе приведены результаты тепловакуумных испытаний катода, смоделированы различные режимы его работы, проведены тепловые расчеты и верификация тепловой математической модели катода, проведена оценка тепловой схемы катода и эксплуатационных параметров, выбраны наиболее эффективные требуемые ресурсные характеристики катода, связанные с выбором мощности и времени работы нагревателя с обеспечением оптимальной температуры эмиттера в авторежиме и герметичности сварных швов.

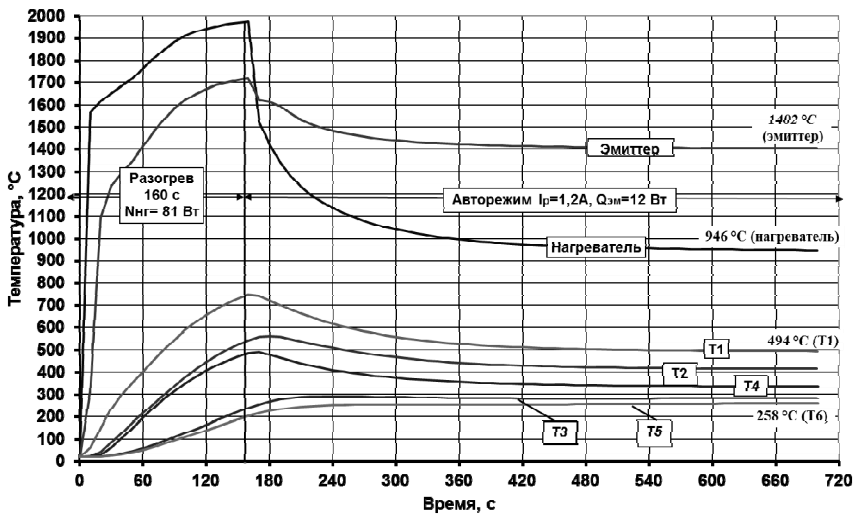


Рис. 5. Изменение температуры элементов катода при мощности нагрева 81 Вт, с выходом на авторежим при токе разряда 1,2 А (тепловыделение на эмиттере 12 Вт)

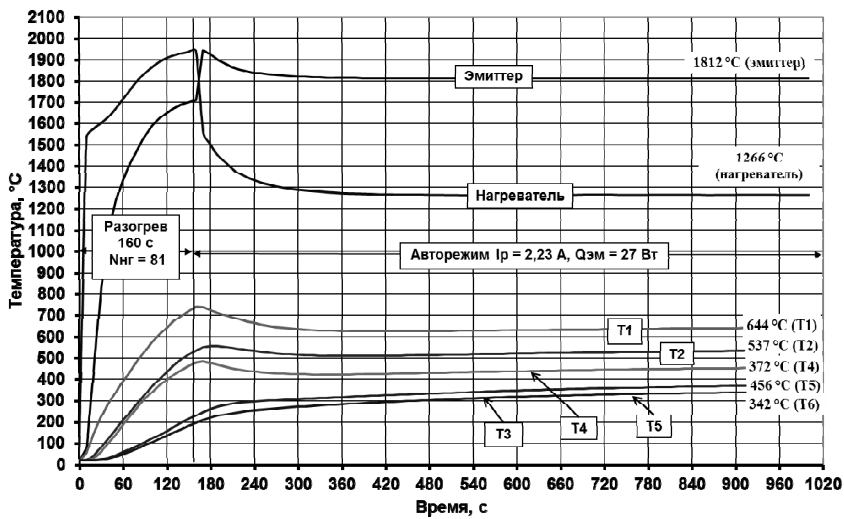


Рис. 6. Изменение температуры элементов катода при мощности разогрева 81 Вт с выходом на авторежим при токе разряде 2,23 А (мощность тепловыделения на эмиттере 27 Вт)

Установлено, что минимальная мощность нагрева для запуска катода составляет 60 Вт, а время подготовки к запуску — 140 с.

Для повышения надежности работы катода, рекомендовано заменить в конструкции катода материал геттерной коробки на молибден М99.95-МП.



Список литературы

1. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. М., 2012.
2. Основные элементы SolidWorks. DassaultSystemes SolidWorks Corporation 175 Wyman Street Waltham, MA 02451 USA, 2011.
3. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов. М., 1959.
4. Кресанов В.С., Малахов Н.П., Морозов В.В. и др. Высокоэффективный эмиттер электронов на основе гексаборида лантана. М., 1987.
5. Агте К., Вацек И. Вольфрам и Молибден. М., 1964.
6. Туманов А.Т., Портной К.И. Тугоплавкие материалы в машиностроении. М., 1967.

32

Об авторах

Алексей Петрович Синицин – инженер-конструктор, ОКБ «Факел», асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: AlekseiSinitcin82@yandex.ru

Альберт Владимирович Румянцев – канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: albert37@list.ru

The authors

Aleksei Sinitcin, design engineer, EDB Fakel, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: AlekseiSinitcin82@yandex.ru

Dr Albert Rumyantsev, Prof., I. Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: albert37@list.ru