

П. Н. Чубов, А. В. Румянцев, В. Г. Харюков

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АНОДА СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлен тепловой расчет анода-газораспределителя в составе разрядной системы стационарного плазменного двигателя в пакете прикладных программ SolidWorks, который дает возможность с достаточной точностью определять чувствительность модели к вариации различных параметров. Расчет позволяет определить минимальное количество пайки между деталями анода для получения необходимой тепловой картины по конструкции изделия.

The paper includes the thermal calculation of the anode gas distributor in Stationary Plasma Thruster (SPT) discharge system made with SolidWorks Software, that allows to determine with sufficient accuracy the model's sensibility vs. variation of the different parameters. The calculation can define the minimum area of fusion penetration between anode's components during braising in order to obtain the thermal picture of the item design.



Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, тепловой расчет, анод-газораспределитель, стационарный режим, динамический режим.

Key words: Stationary Plasma Thruster, thermal calculation, anode gas distributor, stationary mode, dynamic mode.

Работоспособность и надежность функционирования изделия существенно зависят от условий внутреннего и внешнего теплообмена его элементов, которые определяют тепловой режим и налагают требования к системам терморегулирования. Выбор и оценка различных схем обеспечения теплового режима требует разработки методов решения задачи теплообмена элементов изделия. Сложность решения таких задач обусловлена нелинейным характером теплообмена излучением, большими перепадами температур между различными поверхностями изделия, сложной пространственной конфигурацией элементов и существенной неоднородностью структуры, а также различными законами изменения внешней тепловой нагрузки в зависимости от режимов функционирования изделия.

Оптимальным образом решить проблему терморегулирования можно сопоставлением расчетно-теоретических методов анализа с экспериментальными данными. В проектной практике используются весьма приближенные оценки стационарных характеристик изделия, что сдерживает реализацию новых конструктивных решений, удлинняет сроки разработки, увеличивает объем экспериментальной тепловой отработки. Поэтому исследование тепловых режимов изделий и разработка на этой основе методики оценки их характеристик и выбора параметров тепловых схем на этапе проектирования является актуальной задачей.

Разработка математической модели, тепловые расчеты и исследование чувствительности модели к различным сочетаниям параметров были проведены с использованием модуля flow simulation ппш solidworks [1]. Объект расчета — анод-газораспределитель в составе разрядной системы электроракетного двигателя типа спд мощностью 4,5 квт. Для подтверждения точности данной математической модели и процедуры проведения расчета предварительно была выполнена верификация расчетных и экспериментальных результатов, представленных в работе [2], для двигателя спд с разрядной мощностью 1,5 квт.

Способ подачи рабочего тела в разрядную камеру СПД предопределяет азимутальную неравномерность концентрации частиц в камере, что приводит к азимутальной неравномерности распределения тепла по ее поверхности и к изменению направления вектора тяги двигателя.

Для выравнивания поля температуры по азимуту на поверхности анода-газораспределителя в его конструкции предусмотрен теплопровод (а) (рис. 1). Качество контакта теплопровода определяет качество распределения тепла по азимуту. Контакт между теплопроводом (а) и основанием анода-газораспределителя не всегда идеален.

С целью обоснования допустимой суммарной площади, на которой отсутствует контакт между теплопроводом (а) и основанием распределителя анода разрядной системы двигателя типа СПД, допустимого



распределения площади, на которой отсутствует контакт по азимуту, уточнения температуры теплопровода (материал — медь) решалась задача определения температурного поля элементов анода в момент запуска (динамика) и в режиме стационарной работы двигателя.

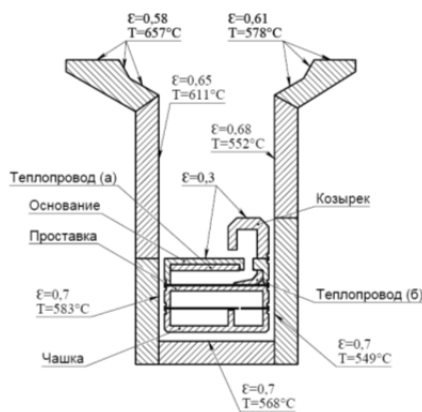


Рис. 1. Сечение разрядной камеры и анода-газораспределителя двигателя типа СПД; граничные условия при стационарном режиме работы СПД (температура и степень черноты граничных поверхностей)

Конструкционные материалы и данные для построения геометрической модели взяты из конструкторской документации. Для оптимизации количества элементов математической модели и времени счета были приняты следующие упрощения в модели, что позволяет рассматривать задачу как осесимметричную: отсутствуют элементы анодного токоподвода; отсутствуют элементы механического крепления анода к керамике разрядной камеры.

Оптические характеристики (степени черноты) и уровни температуры поверхностей, имитирующих воздействие на анод окружающих элементов керамики, показаны на рисунке 1 согласно результатам теплового расчета двигателя типа СПД по программе СПРУТ при стационарном режиме работы: разрядный ток – 5 А, разрядное напряжение – 300 В. Тепловые потери плазмы на поверхностях анода, обращенных в сторону разрядного промежутка (100 Вт, основание и козырек), заданы по результатам теплового расчета двигателя типа СПД для стационарного режима работы двигателя с параметрами 15 А, 300 В.

В стационарном режиме тепловые потери распределены равномерно на поверхностях распределителя. Для нестационарных тепловых режимов тепловые потери концентрировались на пятне диаметром 3 мм. Его диаметр был задан по результатам дефектации анода одного из двигателей, который проходил испытания в составе двигательной установки. После испытаний один из элементов анода был деформирован — произошло оплавление, диаметр которого равнялся примерно 3 мм. Пятно располагалось на поверхности основания анода-газораспределителя. Таким образом, имитировалось гипотетическое аномаль-



ное развитие процесса запуска СПД (отсутствие магнитного поля, неравномерность магнитного поля и т.п.). Общее время процесса задавалось равным 10 с, при этом в первую секунду дискретность вывода результатов равна 0,1 с, далее — 1 с. Температура окружающей среды в процессе запуска двигателя не изменялась и была принята равной 20 °С (температура в вакуумной камере стенда).

Для количественной оценки качества контакта между теплопроводом (а) и основанием распределителя анода разрядной системы двигателя типа СПД задавалась площадь, на которой контакт отсутствует (% от общей площади контакта) равномерно на каждой восьмой части или локально в какой-то одной части площади анода в зоне контакта.

Было выполнено шесть вариантов расчета с различными граничными условиями. В вариантах № 1 и 2 рассмотрены стационарные режимы работы двигателя. Мощность тепловых потерь плазмы (100 и 130 Вт, что соответствует разрядному току 15 и 16,67 А) задавалась равномерно на поверхностях распределителя и козырька анода. Контакт между основанием распределителя и теплопроводом присутствует на всей площади (100 %). Результаты расчетов представлены в таблице 1. Результат расчета варианта № 1 показан на рисунке 2.

47

Таблица 1

Температура элементов анода в стационарном режиме

№	W, Вт	I, А	Контакт, %	T _{max} °С Основание	T _{max} °С Теплопровод (а)
1	100	15	100	616	616
2	130	16,7	100	637	636,7
3	100	15	100	620	610

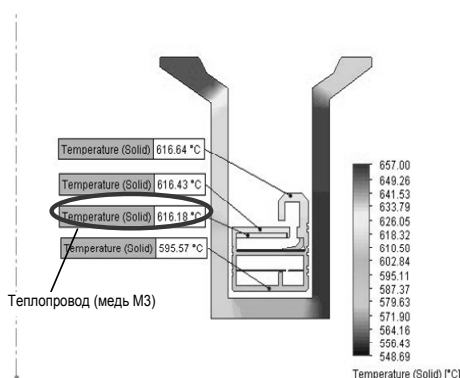


Рис. 2. Стационарное распределение температуры по конструкции анода

Как видно из таблицы 1, влияние качества контакта на температуру основания и теплопровода анода незначительное, но это только в стационарном режиме и в том случае, когда выделяемая мощность равномерно распределяется по поверхности козырька и основания анода-газораспределителя.



В варианте № 3 также исследован стационарный режим работы двигателя. Мощность тепловых потерь плазмы (100 Вт) задавалась равномерно на поверхностях распределителя и козырька анода. Контакт между основанием распределителя и теплопроводом отсутствует (0 %), передача тепла между ними осуществляется только за счет радиационного теплообмена. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Для динамических расчетов – варианты № 4, 5, 6 – была выбрана мощность 100 Вт, что соответствует току 15 А. Степени черноты поверхностей остаются теми же, что и для стационарного режима.

В варианте № 4 мощность задавалась непрерывно в течение 10 с на пятно диаметром 3 мм на распределителе анода. Контакт между основанием распределителя и теплопроводом распределен по всей поверхности (100 %).

В варианте № 5 величина отсутствия контакта – 5 %, равномерно в каждой восьмой части площади контакта между основанием распределителя и теплопроводом анода. Рассматривался наихудший случай, при котором мощность задавалась непрерывно в течение 10 с на пятно диаметром 3 мм на распределителе анода над тем местом, где отсутствует контакт между основанием распределителя и теплопроводом. Результаты расчетов вариантов № 4, 5 и 6 даны в таблице 2.

В варианте № 6 отсутствие контакта между основанием распределителя и теплопроводом оценивается величиной 12,5 %, то есть 1/8 часть площади между основанием распределителя и теплопроводом в зоне контакта в математической модели моделируется зазором с радиационным теплообменом. Рассматривался наихудший случай, при котором мощность задавалась непрерывно в течение 10 с на пятно диаметром 3 мм на распределителе анода над тем местом, где отсутствует контакт между основанием распределителя и теплопроводом. Результаты расчета показаны в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2

Температура элементов анода в динамическом режиме

№	Контакт, %	T_{\max} , °C Основание	T_{\max} , °C Теплопровод (а)
4	100	782	240
5	5	1196	217
6	12,5	1800	29

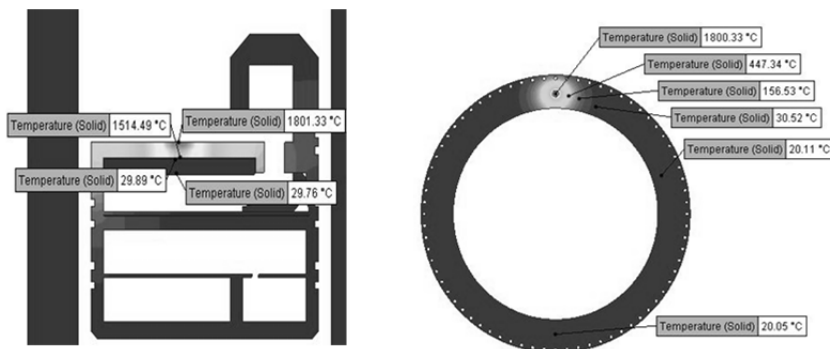


Рис. 3. Распределение температуры по конструкции через 10 с после запуска для варианта № 6



Как видно из таблицы 2, качество контакта оказывает значительное влияние на температуру основания и теплопровода анода при выделении мощности на пятно вследствие воздействия разряда на поверхность основания анода. Текущие данные по температуре в центре пятна воздействия электрического разряда на анод в моменты времени от 0 до 1 с и от 1 до 10 с для вариантов № 4 – 6 представлены на рисунке 4.

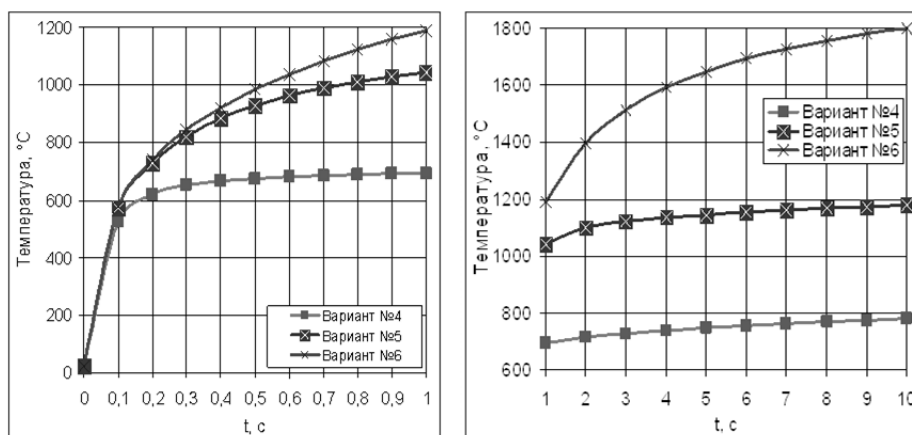


Рис. 4. Текущие данные по температуре в центре пятна воздействия электрического разряда на анод в моменты времени от 0 до 1 и от 1 с до 10 с для вариантов № 4 – 6

В режиме непрерывной стационарной работы при равномерном распределении тепловой нагрузки на поверхности анода влияние качества контакта между основанием и теплопроводом (а) незначительно: даже при полном отсутствии контакта рост максимального значения температуры анода составляет около 4 °С, перепад температуры между основанием распределителя и теплопроводом увеличивается с 1 до 10 °С (см. табл. 1, варианты № 1 и 3). Максимальная температура теплопровода в режиме непрерывной работы (разрядный ток – 16,67 А, мощность – 5 кВт, эквивалентная величина тепловых потерь на фронтальной поверхности анода около 130 Вт) не превышает 640 °С (температура плавления меди 1083 °С). Таким образом, температура соединения сталь – никелированная медь находится в пределах рабочего диапазона, однако дальнейшее увеличение разрядного тока для данной конструкции анода СПД недопустимо. При имитации аномального развития процесса запуска СПД (отсутствие магнитного поля, неравномерность магнитного поля и т.п.) в случае «привязки» электрического разряда с эквивалентной мощностью 100 Вт непрерывно в течение 10 с на пятно диаметром 3 мм на распределителе анода, расчетная температура в центре пятна в зависимости от качества контакта равна: 782 °С (контакт 100 %,



вариант № 4), 1196 °С (отсутствие контакта 5 %, равномерно в каждой восьмой части площади контакта, вариант № 5) и 1806 °С (отсутствие контакта 12,5 %, локально на 1/8 части площади анода в зоне контакта, вариант № 6). В последнем случае температура распределителя анода в центре пятна достигает температуры плавления 1400 °С через 2 с от начала воздействия разрядной мощности. Приведенные результаты расчетов позволяют сделать вывод, что отсутствие контакта между основанием распределителя анода и теплопроводом не должно превышать 5 % (от 1/8 площади контакта) и оно должно распределяться равномерно в каждой восьмой части площади контакта.

Список литературы

1. *Алямовский А.* Руководство по эксплуатации SolidWorks/ Flow Simulation. СПб., 2012.
2. *Bundesmann C., Tartz M., Neumann H. et al.* In-situ temperature, erosion, beam and plasma characterisation of a SPT-100D EM1 with an advanced electric propulsion diagnostic system // IEPS-2009-141, 31st International Electric Propulsion Conference. Michigan, 2009.

Об авторах

Павел Николаевич Чубов – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, инженер ОКБ «Факел», Калининград.
E-mail: chubovp@gmail.com

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

Владимир Геннадьевич Харюков – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: albert37@list.ru

About the authors

Pavel Chubov – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, engineer, EDB «Fakel», Kaliningrad.
E-mail: chubovp@gmail.com

Albert Rumyantsev – PhD, Prof., I. Kant Baltic Federal University Kaliningrad.
E-mail: albert37@list.ru

Vladimir Kharjukov – PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: albert37@list.ru