
УДК 629.78.064.52:621.314.671

ЭНЕРГОМАССОВЫЕ И ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА, ВЫПОЛНЕННОГО НА ПРИБОРАХ ПЛАЗМЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

© 2023 г. Е. В. Онуфриева¹, *, В. В. Онуфриев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

*e-mail: onufryev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 22.08.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г.

В космических энергодвигательных установках (ЭДУ) на основе низковольтного источника электроэнергии и высоковольтных электроракетных двигателей необходима система преобразования тока (СПТ). В качестве одного из элементов перспективных высокотемпературных СПТ рассматриваются высокотемпературные плазменные термоэмиссионные вентили (ВПТВ) плазменной электроэнергетики – сеточные ключевые элементы (СКЭ) и высоковольтные плазменные термоэмиссионные диоды (ВПТД). В работе проведено моделирование энергомассовых характеристик СПТ, построенной на СКЭ и ВПТД, использующих тепловые трубы (ТТ) для охлаждения, определены температурные режимы, в которых достигается минимальная удельная масса преобразователя тока. Определены значения удельной массы. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых высокотемпературных СПТ космических энергодвигательных установок для электрической мощности от десятков до тысячи киловатт.

Ключевые слова: система преобразования тока, космическая энергодвигательная установка, вентиль, сеточный ключевой элемент, высоковольтный плазменный термоэмиссионный диод, электрическая мощность, температура

DOI: 10.31857/S0002331023060043, EDN: QDSWJR

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений является создание транспортных аппаратов с энергодвигательными установками на основе ядерных энергетических установок и маршевых электроракетных двигательных установок (ЭРДУ), использование которых имеет большой, в том числе научный и коммерческий, потенциал [1–3]. В 80-ые гг. XX века в СССР были проведены лётно-космические испытания космических аппаратов “Плазма–А” с термоэмиссионным реактором преобразователем (ТРП) “Топаз” мощностью 5 кВт [4, 5], во время которых впервые было осуществлено питание электроракетных двигателей (ЭРД) от ядерного реактора. На основе этих ТРП разработаны проекты термоэмиссионных ЯЭУ 2-го поколения электрической мощностью от 25 до 100 кВт [5].

Особенности работы ТРП (высокая рабочая температура – до 2000 К и наличие ионизирующих излучений, тепловых потоков) предполагают высокие требования к

выбору СПТ, ее состава, конфигурации и элементной базы, условия ее функционирования, определяя массогабаритные характеристики всей ЭДУ и космического аппарата. Выходное рабочее напряжение перспективных ТРП электрической мощностью 50–300 кВт составляет 120–150 В, рабочее напряжение маршевой ЭРДУ, использующей ионные двигатели или двигатели с анодным слоем – 2500–3000 В, поэтому СПТ должна строиться по схеме: инвертирование напряжения постоянного тока (выходное ТРП) с помощью управляемых клапанов, повышение амплитуды инвертированного напряжения с помощью трансформатора, выпрямление повышенного напряжения с помощью неуправляемых клапанов. Значительную роль в обеспечении функционирования элементов СПТ играет система охлаждения и терморегулирования, именно ее массоэнергетические показатели существенно влияют на величину удельной массы СПТ [6–12]. Наиболее эффективной будет система преобразования тока с наименьшей удельной массой при рабочей температуре, обеспечивающая согласование электрических параметров ТРП и ЭРДУ [11, 12].

УКРУПНЕННАЯ МАССОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ КЛАПАНОВ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Масса СПТ на основе ВПТВ складывается из следующих составляющих: массы силовой части – клапанов, трансформатора и других коммутационных устройств, системы управления силовой частью (она с достаточной степенью точности может быть выражена в долях от массы силовой части), массы системы теплоотвода потерь электрической мощности на преобразователе [10, 11].

Масса силовой части преобразователя тока – $M_{СПТ}^*$ может быть выражена через удельную массу ее элементов – $\gamma_{iэл}$ (клапанов, силовых коммутаторов, конденсаторов и т.д.) и их электрическую мощность – $N_{iэл}$, удельную массу трансформатора СПТ – $\gamma_{ТР}$ и его электрическую мощность – $N_{эл.СПТ}$:

$$M_{СПТ}^* = \left(\sum_i \gamma_{iэл} N_{iэл} + \gamma_{ТР} N_{эл.СПТ} \right). \quad (1)$$

Поскольку рабочее напряжение клапанов отличается в общем случае от напряжения преобразователя (которое чаще всего больше, чем рабочее напряжение клапана), то количество клапанов должно быть увеличено для обеспечения работоспособности и надежности. Это можно учесть коэффициентом – k_U , который определяется отношением величины выходного напряжения преобразователя – $U_{СПТ}$ к рабочему напряжению – U_p клапана. Аналогично можно ввести коэффициент k_I , характеризующий число клапанов СПТ по току. Если принять:

$$k_U = \frac{U_{СПТ}}{U_p}, \quad k_I = \frac{N_{эл.СПТ}}{U_{СПТ} I_p}, \quad (2)$$

где I_p – рабочий ток клапана, то выражение для составляющей массы преобразователя электрической энергии ЭДУ – силовой части примет вид:

$$M_{СПТ}^* = \left(\gamma_{эл} \frac{N_{эл.СПТ}^2}{U_p I_p} + \gamma_{ТР} N_{эл.СПТ} \right). \quad (3)$$

Массу системы управления $M_{\text{СПТ}}^{\text{СУ}}$ можно представить с учетом сделанных выше замечаний в следующем виде:

$$M_{\text{СПТ}}^{\text{СУ}} = \Phi \left(\gamma_{\text{эл}} \frac{N_{\text{эл.СПТ}}^2}{U_p I_p} + \gamma_{\text{ТР}} N_{\text{эл.СПТ}} \right), \quad (4)$$

здесь Φ — коэффициент, который для традиционных преобразователей тока по многочисленным экспериментальным и проектным данным [6, 8, 10, 11] $\Phi = 0.1 \dots 0.3$ для диапазона мощностей до 100–200 кВт.

Третья составляющая массы преобразователя тока — холодильника-излучателя — $M_{\text{ХИ СПТ}}$ характеризуется рабочей температурой ХИ, так как от этого параметра существенно зависит площадь излучающей поверхности. Выразим массу $M_{\text{ХИ СПТ}}$ системы теплоотвода преобразователя тока ЭДУ через функцию отводимой мощности потерь $N_{\text{пот}}$, которая определяется соотношением:

$$N_{\text{пот}} = (1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл.СПТ}}. \quad (5)$$

Примем температуру ХИ СПТ постоянной — $T_{\text{ХИ СПТ}}$, степень черноты поверхности ХИ СПТ также считается заданной — $\epsilon_{\text{ХИ СПТ}}$. Выражение для площади ХИ СПТ примет вид:

$$F_{\text{ХИ СПТ}} = \frac{N_{\text{пот}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ СПТ}} T_{\text{ХИ СПТ}}^4} = \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл.СПТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ СПТ}} T_{\text{ХИ СПТ}}^4}, \quad (6)$$

где σ — постоянная Стефана–Больцмана. Тогда масса системы теплоотвода — ХИ определяется по формуле:

$$M_{\text{ХИ СПТ}} = \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл.СПТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ СПТ}} T_{\text{ХИ СПТ}}^4} \gamma_{\text{ХИ СПТ}}, \quad (7)$$

здесь $\gamma_{\text{ХИ СПТ}}$ — удельная масса единицы площади ХИ. Отсюда следует, что:

$$\gamma_{\text{СПТ}}^{\text{ХИ}} = \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}})}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ СПТ}} T_{\text{ХИ СПТ}}^4} \gamma_{\text{ХИ СПТ}} \quad (8)$$

является удельной массой ХИ на единицу отводимой мощности. Зависимости массы ХИ СПТ от температуры представлены на рис. 1–2 при $\epsilon_{\text{ХИ СПТ}} = 0.9$.

Из рис. 1–2 видно, что для $N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт в диапазоне температур 500–800 К и $\eta_{\text{СПТ}} = 0.8 \dots 0.95$ значения массы ХИ СПТ: при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 2$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 12.5 \dots 1.9$ кг; при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 3$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 18.8 \dots 2.9$ кг; при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 4$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 25 \dots 3.8$ кг; при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 5$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 31.4 \dots 4.8$ кг. Для $N_{\text{эл.СПТ}} = 200$ кВт в диапазоне температур 500–800 К и $\eta_{\text{СПТ}} = 0.8 \dots 0.95$ значения массы ХИ СПТ: при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 2$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 25 \dots 3.8$ кг; при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 3$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 37.6 \dots 5.7$ кг; при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 4$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 50.2 \dots 7.7$ кг; при $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 5$ кг/м² $M_{\text{ХИ СПТ}} = 62.7 \dots 9.6$ кг.

Результаты расчета показывают целесообразность использования высокотемпературной СПТ с температурой 700–800 К, ХИ которой имеет массу не более 10 кг. Вместе с тем массу преобразователя тока ЭДУ можно представить как функцию ее электрической мощности и температуры теплоотвода — $T_{\text{ХИ}}$ (близкой к рабочей температуре СПТ):

$$M_{\text{СПТ}} = (1 + \Phi) \left(\gamma_{\text{эл}} \frac{N_{\text{эл.СПТ}}^2}{U_p I_p} + \gamma_{\text{ТР}} N_{\text{эл.СПТ}} \right) + \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл.СПТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ СПТ}} T_{\text{ХИ СПТ}}^4} \gamma_{\text{ХИ СПТ}}. \quad (9)$$

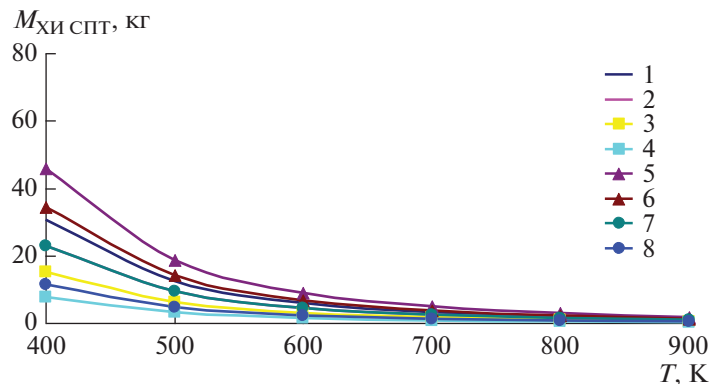


Рис. 1. Зависимость массы ХИ СПТ от температуры, $N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт: 1 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.8$; 2 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.85$; 3 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.9$; 4 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.95$, $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 2$ кг/м²; 5 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.8$; 6 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.85$; 7 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.9$; 8 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.95$; $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 3$ кг/м².

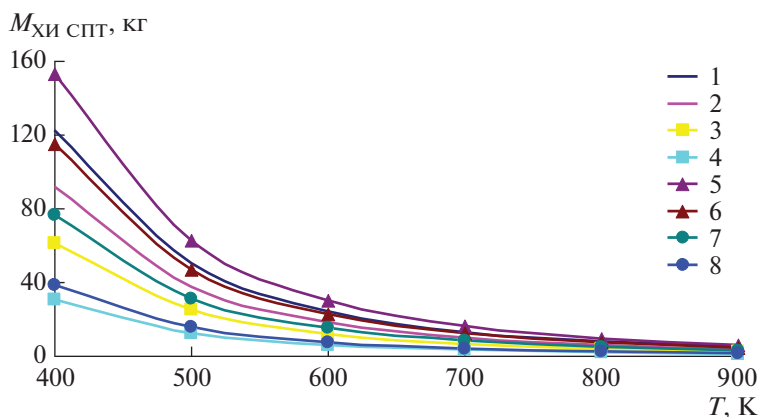


Рис. 2. Зависимость массы ХИ СПТ от температуры, $N_{\text{эл.СПТ}} = 200$ кВт: 1 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.8$; 2 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.85$; 3 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.9$; 4 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.95$, $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 4$ кг/м²; 5 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.8$; 6 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.85$; 7 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.9$; 8 – $\eta_{\text{СПТ}} = 0.95$, $\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = 5$ кг/м².

Аналогично можно выразить удельную массу СПТ как функцию удельных энерго-массовых характеристик ее силовых элементов, КПД и рабочей температуры:

$$\gamma_{\text{СПТ}} = (1 + \varphi)\gamma_{\text{В}} + \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}})}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ СПТ}} T_{\text{ХИ СПТ}}^4} \gamma_{\text{ХИ СПТ}}, \quad (10)$$

где $\gamma_{\text{В}}$ – удельная масса силовой части СПТ (вентилей и трансформатора).

Из выражения (10) для $\gamma_{\text{СПТ}}$ следует, что рабочая температура преобразователя в явном виде присутствует для ХИ СПТ – системы теплоотвода, но нет явной связи с удельными характеристиками силовых элементов преобразователя. Следует отметить, что с ростом температуры потери в преобразователе тока растут, его КПД падает, вме-

сте с тем возрастает удельная масса силовой части преобразователя γ_B за счет снижения рабочего напряжения вентиля и соответственно увеличения их количества.

Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований показали, что для диапазона электрической мощности СПТ 100–200 (250) кВт энергетическая размерность единичного вентиля в зависимости от рабочего напряжения и температуры не превышает 25–75 кВт [15–18]. Таким образом, электрические характеристики перспективных высокотемпературных вентилях будут следующие:

- инвертор (управляемые вентили) – рабочее напряжение 150 В, ток до 500 А;
- выпрямитель (высоковольтные вентили) – рабочее напряжение до 2500–3000 В, ток до 30 А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ВЕНТИЛЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА

Особенностью СПТ на основе ВПТВ (СКЭ и ВПТД) является то, что в инверторе используются “токовые” вентили – сеточные ключевые элементы, разработанные на интегральные токи до 450–500 А [13, 14], а в выпрямителе – высоковольтные плазменные термоэмиссионные диоды, являющиеся вентилями “напряжения”, разработанные на напряжение 1500–2500 В [15–18]. Таким образом в инверторной части при электрической мощности СПТ на основе ВПТВ 100–200 кВт сеточные ключевые элементы коммутируются параллельно по току, а в выпрямительной части – высоковольтные плазменные термоэмиссионные диоды коммутируются последовательно по напряжению. С учетом этих особенностей построения СПТ на основе ВПТВ проведем ее энергомассовое и теплоэлектрическое исследование.

Отвод тепла от вентилях осуществляется радиаторами охлаждения, выполненными в виде тепловых труб (ТТ) [19, 20], совмещенных с электродами. Положим, что ТТ выполнена цилиндрической конструкции, имеет длину $L_{ТТ}$, внешний диаметр $D_{ТТ}$, толщину стенки $\delta_{ТТ}$ и сбрасывает излучение со всей боковой поверхности. Площадь теплосброса потерь электрической энергии одного СКЭ в инверторе определяется как:

$$I_{СКЭ} \delta U_{СКЭ} = \sigma \epsilon_{ТТ} T_{ТТ}^4 \pi D_{ТТ} L_{ТТ}, \quad (11)$$

где $I_{СКЭ}$ – рабочий ток СКЭ; $\delta U_{СКЭ}$ – падение напряжения на СКЭ; $\epsilon_{ТТ}$ – степень черноты поверхности ТТ.

Умножим обе части (11) на $(\rho_{ТТ})$ – плотность материала ТТ и толщину стенки ТТ ($\delta_{ТТ}$):

$$I_{СКЭ} \delta U_{СКЭ} \rho_{ТТ} \delta_{ТТ} = \sigma \epsilon_{ТТ} T_{ТТ}^4 M_{ТТ.СКЭ}, \quad (11^*)$$

где $M_{ТТ.СКЭ}$ – масса тепловой трубы для охлаждения одного СКЭ. Тогда масса всех ТТ для инвертора (охлаждения всех СКЭ) определится как:

$$M_{ТТ}^{СКЭ} = \frac{I_{СКЭ} \delta U_{СКЭ} \rho_{ТТ} \delta_{ТТ}}{\sigma \epsilon_{ТТ} T_{ТТ}^4} k_I. \quad (11^{**})$$

Удельная масса тепловых труб инвертора СПТ определится как:

$$\gamma_{ТТ}^{СКЭ} = \frac{M_{ТТ}^{СКЭ}}{N_{СПТ.СКЭ}^{пот}} = \frac{M_{ТТ}^{СКЭ}}{(1 - \eta_{инв.}) N_{эл.СПТ}} = \frac{I_{СКЭ} \delta U_{СКЭ} \rho_{ТТ} \delta_{ТТ}}{(1 - \eta_{инв.}) N_{эл.СПТ} \sigma \epsilon_{ТТ} T_{ТТ}^4} k_I, \quad (12)$$

где $\eta_{инв.}$ – КПД инвертора с учетом количества СКЭ.

Количество параллельно соединенных по току СКЭ в инверторе СПТ – k_I в этом случае может определено по формуле:

$$k_I = \frac{N_{\text{эл.СПТ}}}{U_{\text{СКЭ}}^{\text{СПТ}} I_{\text{СКЭ}}} \quad (13)$$

с учетом тока единичного сеточного ключевого элемента в инверторе и напряжения СПТ в инверторе – $U_{\text{СКЭ}}^{\text{СПТ}}$. В результате суммарная удельная масса ТТ всех сеточных ключевых элементов инвертора СПТ с учетом КПД инвертора – $\eta_{\text{инверт.}}$, (13) и (12) определится как:

$$\gamma_{\text{ТТ}}^{\text{СКЭ}} = \frac{\delta U_{\text{СКЭ}} \rho_{\text{ТТ}} \delta_{\text{ТТ}}}{U_{\text{СКЭ}}^{\text{СПТ}} (1 - \eta_{\text{инверт.}}) \sigma \epsilon_{\text{ТТ}} T_{\text{ТТ}}^4}. \quad (14)$$

Количество последовательно соединенных по напряжению ВПТД в выпрямителе СПТ определим по формуле – отношение выходного напряжения СПТ $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}}$ к рабочему напряжению $U_{\text{ВПТД}}(T_{\text{ТТ}})$ единичного ВПТД с учетом температуры анода, охлаждаемого тепловой трубой (принимая $T_{\text{ВПТД}} = T_{\text{ТТ}}$ – вентили имеют нижнюю температуру, равную температуре теплоотвода, то есть, самой тепловой трубы):

$$k_U = \frac{U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}}}{U_{\text{ВПТД}}(T_{\text{ТТ}})}, \quad (15)$$

где масса одной тепловой трубы для охлаждения ВПТД может быть найдена аналогично (11)–(11**):

$$M_{\text{ТТ.ВПТД}} = \frac{I_{\text{ВПТД}} \delta U_{\text{ВПТД}} \rho_{\text{ТТ}} \delta_{\text{ТТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ТТ}} T_{\text{ТТ}}^4}, \quad (16)$$

$\delta U_{\text{ВПТД}}$ – падение напряжения на ВПТД; $I_{\text{ВПТД}}$ – рабочий ток ВПТД.

Масса всех тепловых труб выпрямителя СПТ (по числу ВПТД) определится как:

$$M_{\text{ТТ}}^{\text{ВПТД}} = \frac{I_{\text{ВПТД}} \delta U_{\text{ВПТД}} \rho_{\text{ТТ}} \delta_{\text{ТТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ТТ}} T_{\text{ТТ}}^4} k_U. \quad (16^*)$$

Или:

$$M_{\text{ТТ}}^{\text{ВПТД}} = \frac{I_{\text{ВПТД}} \delta U_{\text{ВПТД}} \rho_{\text{ТТ}} \delta_{\text{ТТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ТТ}} T_{\text{ТТ}}^4} \frac{U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}}}{U_{\text{ВПТД}}(T_{\text{ТТ}})}. \quad (17)$$

Учтем, что

$$N_{\text{эл.СПТ}} \cong \frac{1}{\eta_{\text{инверт.}} \eta_{\text{ТР}}} N_{\text{эл.СПТ}}^{\text{Выпр.}} = \frac{1}{\eta_{\text{инверт.}} \eta_{\text{ТР}}} I_{\text{ВПТД}} U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}},$$

потери в инверторе и трансформаторе учтены через их КПД: $\eta_{\text{Выпр.}}$, $\eta_{\text{ТР}}$.

Удельную массу тепловых труб выпрямителя СПТ можно записать аналогично (16) с учетом $\eta_{\text{Выпр.}}$ (КПД выпрямителя СПТ), потери мощности в инверторе и трансформаторе СПТ и (17):

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{ТТ}}^{\text{ВПТД}} &= \frac{M_{\text{ТТ}}^{\text{ВПТД}}}{(1 - \eta_{\text{Выпр.}}) \eta_{\text{инверт.}} \eta_{\text{ТР}} N_{\text{эл.СПТ}}} = \\ &= \frac{I_{\text{ВПТД}} \delta U_{\text{ВПТД}} \rho_{\text{ТТ}} \delta_{\text{ТТ}}}{(1 - \eta_{\text{Выпр.}}) \eta_{\text{инверт.}} \eta_{\text{ТР}} N_{\text{эл.СПТ}} \sigma \epsilon_{\text{ТТ}} T_{\text{ТТ}}^4} \frac{U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}}}{U_{\text{ВПТД}}(T_{\text{ТТ}})}. \end{aligned} \quad (18)$$

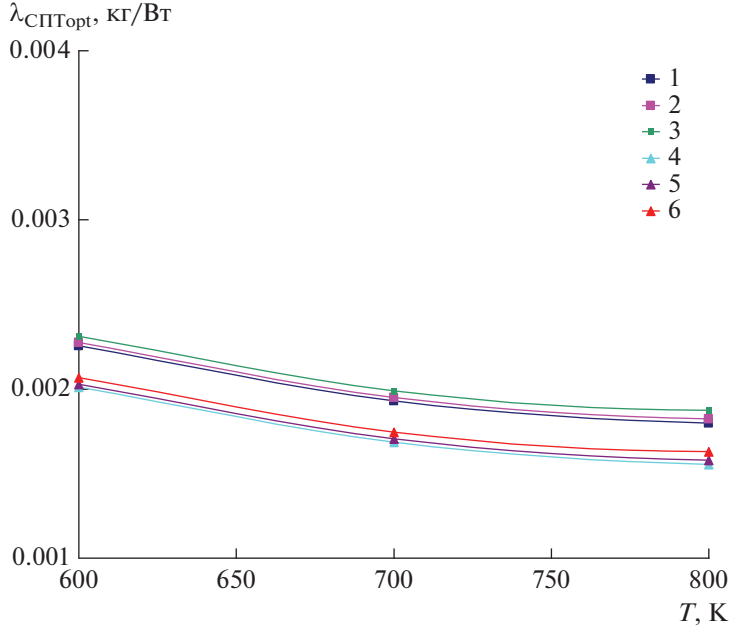


Рис. 3. Зависимость удельной массы СПТ от температуры ($N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт, $p_{\text{СЗ}} = 0.06$ Торр): $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А, 1 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В, 2 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В, 3 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В; $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А, 4 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В, 5 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В, 6 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В.

В результате удельную массу СПТ на основе СКЭ и ВПТД можно определить как функцию удельных энергомассовых характеристик его силовых элементов, КПД и рабочей температуры:

$$\gamma_{\text{СПТ}} = (1 + \varphi) \gamma_{\text{СКЭ}} \frac{N_{\text{эл.СПТ}}}{U_{\text{СКЭ}} I_{\text{СКЭ}}} + \gamma_{\text{ТР}} + \gamma_{\text{ВПТД}} \frac{U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}}}{U_{\text{ВПТД}} (T_{\text{ТТ}})} + \frac{\rho_{\text{ТТ}} \delta_{\text{ТТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ТТ}} T_{\text{ТТ}}^4} \times \left(\frac{\delta U_{\text{СКЭ}}}{U_{\text{СКЭ}}^{\text{СПТ}} (1 - \eta_{\text{инверт.}})} + \frac{\delta U_{\text{ВПТД}}}{U_{\text{ВПТД}} (T_{\text{ТТ}}) (1 - \eta_{\text{выпр.}})} \right), \quad (18^*)$$

где $\gamma_{\text{СКЭ}}$, $\gamma_{\text{ВПТД}}$, $\gamma_{\text{ТР}}$ – удельные массы СКЭ, ВПТД, трансформатора соответственно.

Последние слагаемые в (18*) представляют собой удельную массу эквивалентной тепловой трубы СПТ. Следует отметить, что для расчета характеристик СПТ необходимо задать рабочее напряжение инвертора (для ТРП 2-го поколения $U_{\text{ТРП}} = U_{\text{СКЭ}}^{\text{СПТ}} = U_{\text{СКЭ}} = 150$ В) и напряжение ВПТД от температуры (для цезиевого и бариевого наполнения) [15–18]. Результаты исследования удельной массы СПТ на основе ВПТВ от его электрической мощности от температуры и электрической мощности (18*) представлены на рис. 3–6. Зависимости удельной массы СПТ (давление пара цезия в МЭЗ ВПТД 0.06 Торр) получены при $\epsilon_{\text{ТТ}} = 0.9$, $\varphi = 0.1$; $\gamma_{\text{ТР}} = 1$ кг/кВт, $\gamma_{\text{СКЭ}} = 0.17$ кг/кВт, $\gamma_{\text{ВПТД}} = 0.03$ кг/кВт, $\eta_{\text{инверт.}} = 0.95$, $\eta_{\text{выпр.}} = 0.99$, $\delta U_{\text{СКЭ}} = 2.5$ В, $\delta U_{\text{ВПТД}} = 2.5$ В, материал тепловой трубы молибден – $\rho_{\text{ТТ}} = 10200$ кг/м³, толщина стенки – $\delta_{\text{ТТ}} = 1$ мм.

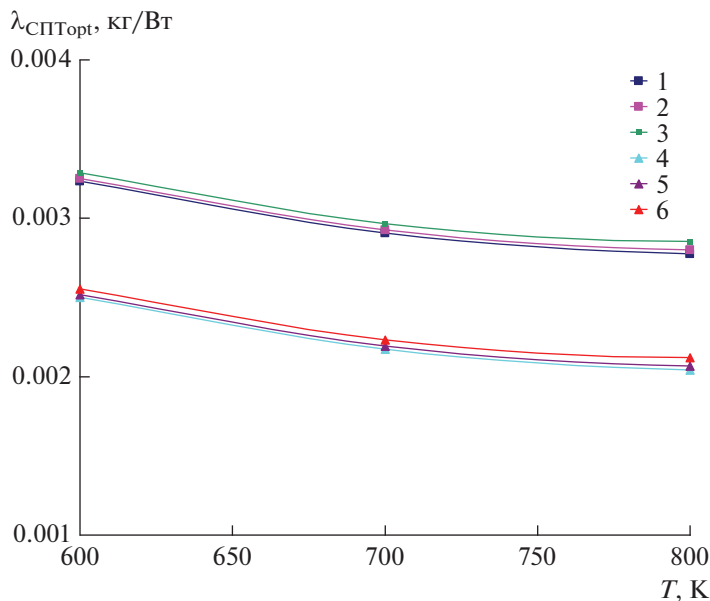


Рис. 4. Зависимость удельной массы СПТ от температуры ($N_{\text{эл.СПТ}} = 300$ кВт, $p_{\text{Cs}} = 0.06$ Торр): $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А, 1 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В, 2 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В, 3 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В; $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А, 4 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В, 5 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В, 6 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В.

Расчеты показывают, что для $N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт и $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А в диапазоне температур 600–800 К минимальная удельная масса СПТ на основе ВПТВ при $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В составляет $\gamma_{\text{СПТопт}} = 2.3 \dots 1.6$ кг/кВт, а при $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В – $\gamma_{\text{СПТопт}} = 2.3 \dots 2.1$ кг/Вт, при $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В – $\gamma_{\text{СПТопт}} = 2.3 \dots 2.2$ кг/Вт. При $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А в этом же диапазоне температур при равных параметрах минимальная удельная масса СПТ составляет соответственно: $\gamma_{\text{СПТопт}} = 2 \dots 1.7$ кг/кВт, $\gamma_{\text{СПТопт}} = 2 \dots 1.8$ кг/кВт и $\gamma_{\text{СПТопт}} = 2.1 \dots 2$ кг/кВт. Для $N_{\text{эл.СПТ}} = 300$ кВт и $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А в указанном диапазоне температур минимальная удельная масса СПТ на основе ВПТВ увеличивается в 1.4–1.5 раз при прочих равных параметрах вентилей. При $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А в указанном диапазоне температур минимальная удельная масса СПТ на основе ВПТВ увеличивается в 1.25–1.3 раз при прочих равных параметрах вентилей.

С увеличением давления пара цезия в МЭЗ ВПТД (до 0.08 Торр) минимальная удельная масса СПТ при $I_{\text{СКЭ}} = 250 \dots 500$ А снижается до 1.7–2.1 кг/кВт – $N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт и до 2.3–3 кг/кВт – $N_{\text{эл.СПТ}} = 300$ кВт, рис. 5, 6.

При переходе на бариевое наполнение СКЭ и ВПТД обеспечивается снижение удельной массы СПТ на ВПТВ на 40–50% по сравнению с цезиевым при одновременном увеличении рабочей температуры СПТ до 900–950 К, рис. 7, 8. Отметим, что при этих параметрах теплофизического состояния вентилей (ВПТД) их рабочее напряжение составляет 2000–2500 В [16–18].

Зависимости удельной массы СПТ (при $p_{\text{Ba}} = 0.008$ Торр) получены для диапазона электрической мощности $N_{\text{эл.СПТ}} = 100 \dots 300$ кВт при $\epsilon_{\text{ТТ}} = 0.9$, $\varphi = 0.1$; $\gamma_{\text{ТР}} = 1$ кг/кВт, $\gamma_{\text{СКЭ}} = 0.17$ кг/кВт, $\gamma_{\text{ВПТД}} = 0.03$ кг/кВт, $\eta_{\text{инверт.}} = 0.95$, $\eta_{\text{выпр.}} = 0.99$, $\delta U_{\text{СКЭ}} = 2.5$ В,

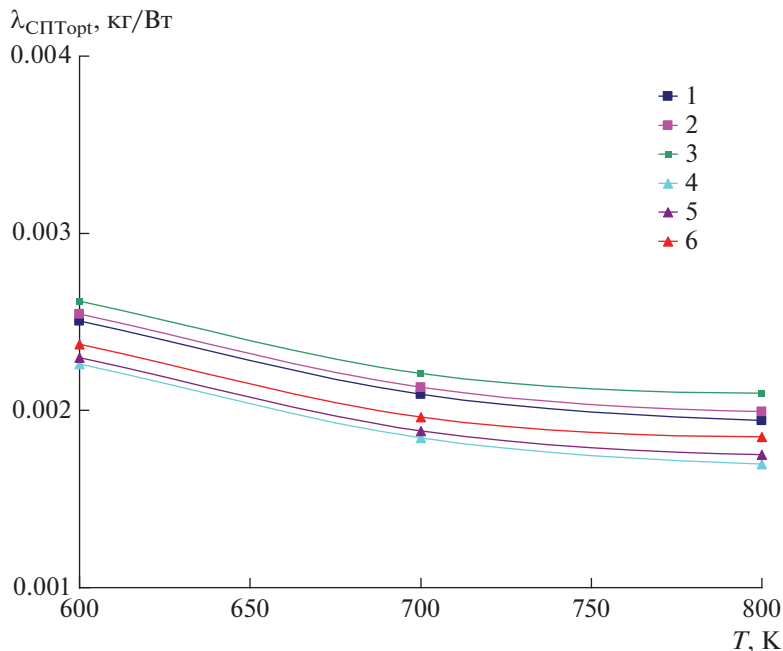


Рис. 5. Зависимость удельной массы СПТ от температуры ($N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт, $p_{\text{Cs}} = 0.08$ Торр): $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А, 1 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В, 2 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В, 3 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В; $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А, 4 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000$ В, 5 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 3000$ В, 6 – $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 5000$ В.

$\delta U_{\text{ВПТД}} = 2.5$ В, материал тепловой трубы молибден – $\rho_{\text{ТТ}} = 10200$ кг/м³, толщина стенки – $\delta_{\text{ТТ}} = 1$ мм.

Расчеты показывают, что для $N_{\text{эл.СПТ}} = 100$ кВт и $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А в диапазоне температур 800–900 К минимальная удельная масса СПТ на основе ВПТВ при $U_{\text{ВПТД}}^{\text{СПТ}} = 2000 \dots 5000$ В составляет $\gamma_{\text{СПТопт}} = 1.5 \dots 1.6$ кг/кВт. При $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А в этом же диапазоне температур при равных параметрах минимальная удельная масса СПТ составляет соответственно: $\gamma_{\text{СПТопт}} = 1.75 \dots 1.8$ кг/кВт. Для $N_{\text{эл.СПТ}} = 300$ кВт и $I_{\text{СКЭ}} = 250$ А в указанном диапазоне температур минимальная удельная масса СПТ на основе ВПТВ увеличивается в 1.3–1.35 раз при прочих равных параметрах вентилей и достигает 2.0 кг/кВт. При $I_{\text{СКЭ}} = 500$ А в указанном диапазоне температур минимальная удельная масса СПТ на основе ВПТВ увеличивается в 1.25–1.3 раз при прочих равных параметрах вентилей и составляет 2.7–2.8 кг/кВт.

Таким образом, по сравнению с классическими полупроводниковыми СПТ и построенными на полупроводниках Si-C с рабочей температурой 400–500 К удельная масса снижается в 2–3 раза [11, 12].

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЛАЗМЕННЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Проведенные исследования показали, что оптимальное значение температуры СПТ на основе ВПТВ для КА с ТРП лежит в диапазоне 500–900 К, при этом рабочее напряе-

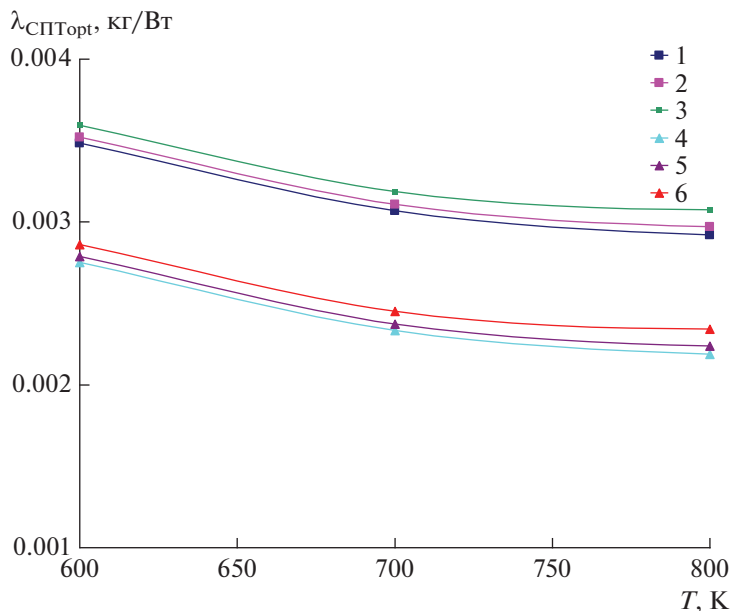


Рис. 6. Зависимость удельной массы СПТ от температуры ($N_{эл.СПТ} = 300$ кВт, $p_{Cs} = 0.08$ Торр): $I_{СКЭ} = 250$ А, 1 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 2000$ В, 2 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 3000$ В, 3 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 5000$ В; $I_{СКЭ} = 500$ А, 4 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 2000$ В, 5 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 3000$ В, 6 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 5000$ В.

ние перспективной системы преобразования тока должно быть не ниже 2500 В. Чтобы обеспечить приемлемые значения $\gamma_{СПТ}$, необходимо использовать СКЭ и ВПТД с рабочим напряжением более 150 В и 1500 В соответственно.

Использование классических низкотемпературных полупроводниковых вентиляей для системы преобразования тока КА с энергоустановкой на основе ТРП (в современной и ближайшей перспективе) обуславливает значительное увеличение удельной массы СПТ до 10–15 кг/кВт. Применение высокотемпературных полупроводниковых вентиляей с рабочей температурой 520–420 К позволит снизить удельную массу СПТ в 2–3 раза, но, как и в первом случае, такой СПТ требуется принудительное охлаждение, гермоконтейнер и радиационная защита.

Использование для КА с ТРП системы преобразования тока на основе ВПТВ и высокотемпературным трансформатором с удельной массой $\gamma_{ВПТД} = 0.02...0.05$ кг/кВт способствует снижению общей массы инвертора и выпрямителя СПТ до 0.4–0.9 кг/кВт. Уменьшение удельной массы СКЭ и ВПТД до 0.01 кг/кВт при одновременном увеличении их рабочего напряжения до 5 кВ позволяет реализовать плазменную часть с удельной массой:

- $\gamma = 0.2$ кг/кВт (при рабочем напряжении СПТ 1–2 кВ);
- $\gamma = 0.6$ кг/кВт (при рабочем напряжении СПТ 5 кВ);
- $\gamma = 1...2$ кг/кВт (при рабочем напряжении СПТ 10 кВ).

В этой связи становится перспективным применение в мощных системах преобразования тока высокотемпературных плазменных термоэмиссионных вентиляей.

Как свидетельствуют зависимости удельной массы системы преобразования тока на основе высокотемпературных плазменных термоэмиссионных вентиляей (термо-

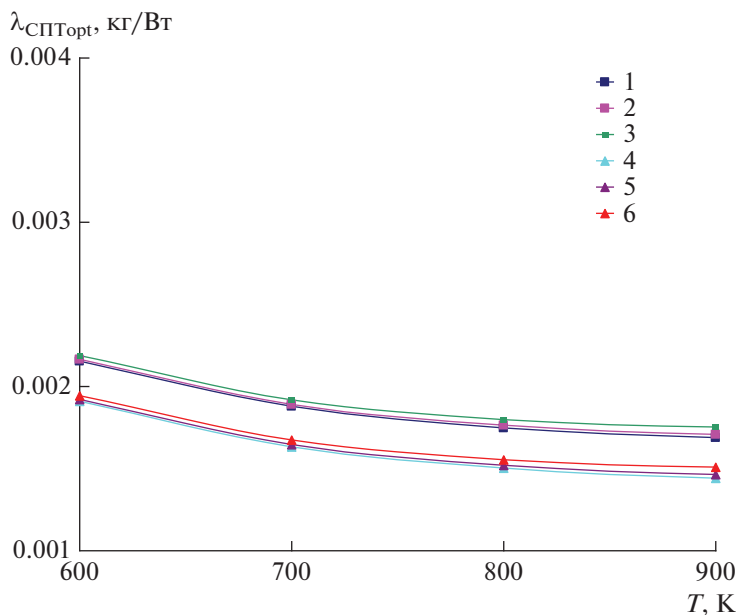


Рис. 7. Зависимость удельной массы СПТ от температуры ($N_{эл.СПТ} = 100$ кВт, $p_{Ba} = 0.008$ Торр): $I_{СКЭ} = 250$ А, 1 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 2000$ В, 2 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 3000$ В, 3 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 5000$ В; $I_{СКЭ} = 500$ А, 4 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 2000$ В, 5 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 3000$ В, 6 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 5000$ В.

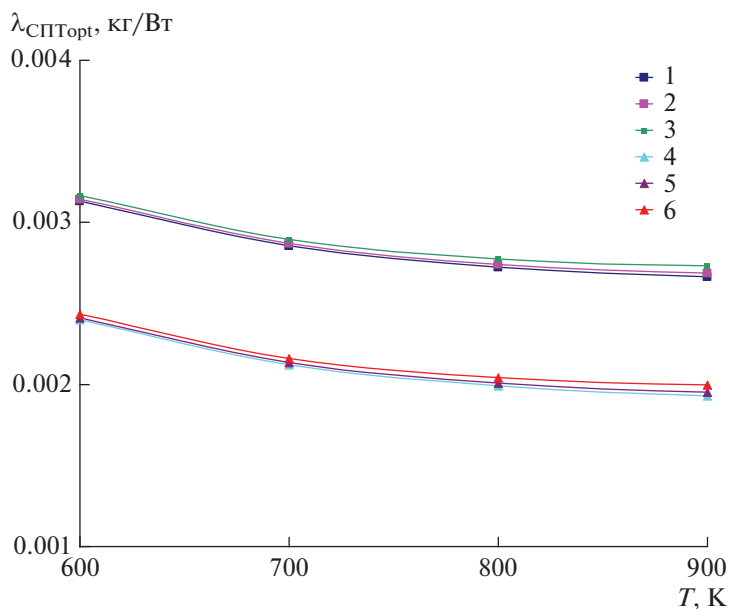


Рис. 8. Зависимость удельной массы СПТ от температуры ($N_{эл.СПТ} = 300$ кВт, $p_{Ba} = 0.008$ Торр): $I_{СКЭ} = 250$ А, 1 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 2000$ В, 2 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 3000$ В, 3 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 5000$ В; $I_{СКЭ} = 500$ А, 4 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 2000$ В, 5 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 3000$ В, 6 – $U_{ВПТД}^{СПТ} = 5000$ В.

эмиссионные вентили с цезиевым или бариевым наполнением) от рабочей температуры, мощности и напряжения, они могут быть рекомендованы в качестве высокотемпературных силовых элементов перспективных преобразователей тока космических аппаратов с энергоустановкой на основе термоэмиссионного реактора-преобразователя.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние температурного режима системы преобразования тока космической ЭДУ на ее энергомассовые характеристики и эффективность. Исследовано влияние температурного режима высоковольтных плазменных термоэмиссионных диодов СПТ на ее энергомассовые характеристики и эффективность с точки зрения потерь электрической мощности.

2. Показано, что диапазон рабочих температур высоковольтных плазменных термоэмиссионных диодов перспективных систем преобразования тока составляет 600–900 К, что существенно превышает температурный диапазон полупроводниковых вентилях и практически затрудняет или исключает их использование в составе мощных энергодвигательных установок вследствие значительной удельной массы. Перспективные системы преобразования тока космических энергодвигательных установок могут быть выполнены на СКЭ и ВПТД с цезиевым или бариевым наполнением.

3. Получены аналитические зависимости для определения количественного состава вентилях в системе преобразования тока космической энергодвигательной установки в зависимости от их теплового режима, рабочего напряжения и электрической мощности преобразователя тока, позволяющие рассчитать энергетическую размерность единичного вентиля, а также для расчета удельной массы СПТ на плазменных вентилях — СКЭ и ВПТД. Определены диапазоны удельных масс перспективных систем преобразования тока на основе вентилях плазменной термоэмиссионной электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев П.В., Жаботинский Е.Е., Никонов А.М. Перспективы использования термоэмиссионных ЯЭУ для межорбитальных перелетов космических аппаратов в околоземном пространстве // Атомная энергия. 1992. Т. 73. № 5. С. 346–350.
2. Использование электроядерных установок в перспективной ядерной энергетике / Г.В. Киселев, И.В. Чувило, О.В. Шведов и др. // Атомная энергия. 1994. Т. 77. № 3. С. 167–174.
3. Грязнов Г.М. Космическая атомная энергетика и новые технологии (записки директора). М.: ФГУП «ЦНИИатоминформ», 2007.
4. Пупко В.Я. История работ по летательным аппаратам на ядерной энергии для космических и авиационных установок в ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск: ФЭИ, 2002.
5. Проблемы космической энергетики и роль ЯЭУ в их решении / Васильковский В.С., Андреев П.В., Зарицкий Г.А., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Ядерная энергетика в космосе. В сб. докладов в 3-х т. Т. 1. М.: Изд. НИКИЭТ, 2005. С. 20–25.
6. Thornton R.D. Power Management and Distribution Equipment Developed for Space Applications // 26-th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Boston MS, 1991. V. II. P. 162–167.
7. Requirements and Design of a 30 kW DC-DC Converter for Space — Based Radar Applications / P.M. Anderson, S.E. Lofton, R.W. Ericson, A.F. Hernandez, G.L. Fronista // 26-th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Boston MS, 1991. V. II. P. 184–189.
8. Rose M.F. High Energy Density Capacitors for Space Power Conditions // 24-th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Washington DC, August 6–11 1989. V. III. P. 1059–1066.
9. Mac'Lean D. The MSPICE Simulation of Saturating Transformer // 24-th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Washington DC, August 6–11 1989. V. I. P. 105–110.
10. Глибицкий М.М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1981. 136 с.
11. Онуфриева Е.В., Синяевский В.В., Онуфриев В.В. Высокотемпературные системы преобразования тока перспективных космических энергодвигательных установок // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 4. С. 137–144.

12. Онуфриева Е.В., Алиев И.Н., Онуфриев В.В. О выборе оптимального температурного режима преобразователя тока космической энергодвигательной установки // Известия вузов. Машиностроение. 2014. № 7. С. 10–18.
13. Импульсное управление током сильноточного низковольтного разряда на смеси паров цезия и бария / В.Б. Каплан, А.М. Марциновский, А.С. Мустафаев и др. // Журнал технической физики. 1977. Т. 47. Вып. 10. С. 2060–2068.
14. Бакуит Ф.Г., Костин А.А. Теория сеточных ключевых элементов // Журнал технической физики. 1991. Т. 61. В. 12. С. 29–35.
15. Onufriev V.V., Grishin S.D. Experimental Investigation of Electric Strength to Inverse Arc Breakdown of a Thermionic Diode with Cesium Filling // High Temperature. 1996. Т. 34. № 3. С. 477–480.
16. Onufriyev V.V. The Results of Investigations of High Temperature High Voltage Thermion Diode // International Energy Conversion Engineering Conference. (IECEC 2000): Proceeding. – Las Vegas (NV), 2000. – P. 290–296.
17. Onufriyev V.V. Experimental Investigation of High Temperature High Voltage Thermionic Diode for the Space Power Nuclear Reactor // Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2001): Proceeding. Albuquerque (NM), 2001. P. 1136–1141.
18. Онуфриев В.В., Лошкарев А.И., Синаевский В.В. Электроэнергетические характеристики термоэмиссионного высоковольтного диода для космических энергодвигательных установок // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 1. С. 87–97.
19. Физические основы тепловых труб / М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, И.В. Ягодкин. Москва: Атомиздат. 1978. – 256 с.
20. Богомолов И.В., Кузин Г.А., Юрченко А.А. Экспериментальное исследование высокотемпературных вентилей на большие плотности тока // Всес. конф. по термоэмиссионному методу преобразования тепловой энергии в электрическую: Тезисы доклада. Обнинск, 1979. С. 96.

Energy-Mass and Thermoelectric Characteristics of the Current Convertor, Made on the Devices of Plasma Electric Power Industry

E. V. Onufrieva^a, * and V. V. Onufriev^a

^a*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

**e-mail: onufriyev@bmstu.ru*

In space power propulsion systems (SPPS) based on a low-voltage power source and high-voltage electric rocket thrusters, a current conversion system (CCS) is required. As one of the elements of promising high-temperature CCS, high-temperature plasma thermal emission valves (HPTV) of plasma electric power industry are considered – grid key elements (GKE) and high-voltage plasma thermal emission diodes (HVPTD). In the work, the modeling of the energy-mass characteristics of the CCS built on the GKE and HVPTD using heat pipes (HP) for cooling is carried out, the temperature conditions in which the minimum specific mass of the current converter is achieved are determined. The specific gravity values are determined. The results of the work can be used in the development of new high-temperature CCS space power propulsion systems for electrical power from tens to thousands of kilowatts.

Keywords: current conversion system, space power propulsion system, valve, grid key element, high-voltage plasma thermionic diode, electric power, temperature