

ДВУХРЕЖИМНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ТЕРМОЭМИССИОННОГО РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ТЕРМОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

© 2017 г. Грибков А.С., Попов А.Н., Синявский В.В.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Применительно к созданию транспортно-энергетического модуля для электроракетной доставки и последующего длительного энергоснабжения энергоёмкой функциональной аппаратуры космического аппарата приведены результаты концептуально-проектных исследований возможности использования комбинированной двухрежимной ядерно-энергетической установки с термоэмиссионным реактором-преобразователем и термоэлектрохимическим генератором. Возможность использования термоэлектрохимического преобразователя (ТЭХП) для выработки электроэнергии определяется тем, что температура горячей зоны ТЭХП попадает в область температур литиевой системы охлаждения высокотемпературной ядерно-энергетической установки по литий-ниобиевой технологии для межорбитального буксира «Геркулес». Показана целесообразность использования части теплоизлучающей поверхности системы охлаждения установки для размещения на ней элементов ТЭХП. В термоэмиссионном реакторе выделяется зона бустерных тепловыделяющих элементов, охлаждаемых литиевым теплоносителем. На тепловых трубах системы теплосброса устанавливаются элементы ТЭХП с верхней температурой термодинамического цикла порядка 1200 К и нижней — 500–550 К. В качестве рабочего тела ТЭХП используется натрий, основной конструкционный материал — ниобиевый сплав НбЦУ, твердый электролит — $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$. Перечисленные материалы обладают комплексом свойств, позволяющих создать высокоэффективный ТЭХП, работающий в заданном температурном диапазоне. Приведены характеристики элемента и всего генератора электрической мощностью 30 кВт.

Ключевые слова: транспортно-энергетический модуль, двухрежимная ядерно-энергетическая установка, термоэмиссионный реактор-преобразователь, литий-ниобиевая технология, ниобиевый сплав НбЦУ, натрий, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$.

DUAL-MODE SPACE NUCLEAR POWER SYSTEM BASED ON A THERMIONIC CONVERSION REACTOR AND THERMOELECTROCHEMICAL GENERATOR

Gribkov A.S., Popov A.N., Sinyavskiy V.V.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

Within the context of development of a transportation and power module for electrically-propelled delivery and subsequent long-term power supply of power-hungry functional equipment of a spacecraft, the paper provides the results of conceptual design studies into the feasibility of using a combined dual-mode nuclear power system with a thermionic conversion reactor and thermoelectrochemical generator. The feasibility of using a ThermoElectroChemical Converter (TECC) to generate electric power hinges upon the fact that TECC hot zone temperature lies within the range of temperatures of the lithium cooling system for the high-temperature lithium-niobium nuclear power system designed for the Hercules orbital transfer vehicle. The paper demonstrates the practicability of using a part of the heat radiating surface of the cooling

system for the power system to place on it TECC elements. Within the thermionic reactor there is a zone of booster heat-producing elements that are cooled by a lithium coolant. Installed on the heat pipes of the heat-rejection system are TECC elements with the upper temperature of the thermodynamic cycle of about 1200 K and the lower temperature of about 500–550 K. Used as TECC working medium is sodium, the main structural material is niobium alloy NbZrC, the solid electrolyte is $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$. The above materials have a mix of properties that makes it possible to construct a highly efficient TECC operating within the specified range of temperatures. The paper provides performance data for the element and the entire generator with 30 kW electrical output.

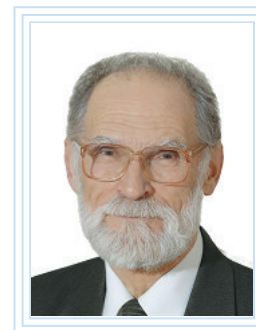
Key words: transportation and power module, dual-mode nuclear power system, thermionic conversion reactor, lithium-niobium technology, niobium alloy NbZrC, sodium, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$.



ГРИБКОВ А.С.



ПОПОВ А.Н.



СИНЯВСКИЙ В.В.

ГРИБКОВ Александр Сергеевич — ведущий инженер-программист РКК «Энергия»,
e-mail: alexander.gribov@rsce.ru
GRIBKOV Alexander Sergeevich — Lead software engineer at RSC Energia,
e-mail: alexander.gribov@rsce.ru

ПОПОВ Александр Николаевич — начальник сектора РКК «Энергия»,
e-mail: alexander.popov1@rsce.ru
POPOV Alexander Nikolaevich — Head of Subdepartment at RSC Energia,
e-mail: alexander.popov1@rsce.ru

СИНЯВСКИЙ Виктор Васильевич — доктор технических наук, профессор, научный консультант РКК «Энергия», e-mail: viktor.sinyavsky@rsce.ru
SINYAVSKIY Viktor Vasilyevich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific consultant at RSC Energia, e-mail: viktor.sinyavsky@rsce.ru

Одной из наиболее вероятных областей применения мощных космических энергоустановок, в т. ч. ядерно-энергетических (ЯЭУ), является их использование для решения двух взаимосвязанных задач: транспортной и энергетической, например, электроракетной доставки тяжелых информационных космических аппаратов (КА) на орбиту функционирования, преимущественно геостационарную (ГСО), и последующее длительное (в течение 10–15 лет) энергообеспечение функциональной аппаратуры КА [1–3]. Этот ядерный электроракетный аппарат принято называть транспортно-энергетическим модулем (ТЭМ).

Возможность использования для решения подобных задач различных типов ЯЭУ,

прежде всего на основе термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП), рассматривалась специалистами из различных организаций [1, 3–5].

Выполненный анализ перспективных космических задач показал, что в среднесрочной перспективе многие актуальные задачи могут быть эффективно решены при использовании ТЭМ с ЯЭУ электрической мощностью порядка 150 кВт в транспортном режиме и в несколько раз меньшей мощностью в номинальном режиме, но с ресурсом не менее 10 лет [1, 3].

В РКК «Энергия» за основу проектно-концептуальных исследований двухрежимных ЯЭУ для ТЭМ была принята ЯЭУ по литий-ниобиевой технологии с ТРП на быстрых

нейтронах электрической мощностью 550 кВт и ресурсом два года для межорбитального буксира «Геркулес» [6]. ЯЭУ допускала работу на пониженной мощности 150 кВт с ресурсом до пяти лет. По такой ЯЭУ был создан большой материаловедческий и научно-технический задел [7].

Обоснованность характеристик ЯЭУ с ТРП электрической мощностью 150 кВт с ресурсом 1...1,5 года для питания ЭРДУ при выведении КА на орбиту функционирования не вызывает сомнений [7]. Однако возможность последующей длительной (не менее 10 лет) эксплуатации той же ЯЭУ даже на пониженной в несколько раз мощности (до 40 кВт) нельзя считать обоснованной, учитывая необходимость экспериментального обоснования длительной работы термоэмиссионных сборок в условиях реактора [8]. В то же время ресурс 10...15 лет и более существенен для обеспечения конкурентоспособности ЯЭУ по отношению к используемым в настоящее время космическим энергоустановкам на основе солнечных фотоэлектрических преобразователей.

Были проанализированы с точки зрения обеспечения длительного (не менее 10 лет) ресурса различные схемно-технические решения двухрежимных ЯЭУ.

Одной из наиболее привлекательных оказалась предложенная в работе [9] новая схема двухрежимной ЯЭУ в виде единой теплотехнической схемы и двух видов преобразователей тепловой энергии в электрическую: термоэмиссионного, расположенного в активной зоне ТРП, электрической мощностью порядка 150 кВт с ресурсом 1...1,5 года, и размещенного вне реактора дополнительного генератора электроэнергии меньшей мощности, но с длительным ресурсом функционирования (не менее 10 лет). В качестве дополнительного генератора могут быть использованы различные преобразователи. Прежде всего, был рассмотрен термоэлектрический преобразователь, который показал длительную работоспособность в условиях космоса (в составе радиоизотопных генераторов). Комбинирование двух типов преобразовательной системы достигается за счет специальной теплогидравлической схемы ЯЭУ [2]. Система охлаждения ТРП (первый контур) разветвляется на две петли, в составе каждой имеется электромагнитный насос. В *термоэмиссионном режиме* литиевый теплоноситель первого контура направляется в тракт холодильника-излучателя, в *термоэлектрическом* — к горячим

электродам термоэлектрического генератора. Для охлаждения холодных спаев генератора служит дополнительный (второй) контур охлаждения, доставляющий необработанную теплоту термодинамического цикла в холодильник-излучатель. Насос этого контура включается при переключении системы в термоэлектрический режим. Так как режим энергопитания на пониженной мощности обеспечивается вынесенными из активной зоны преобразователями, термоэмиссионные сборки реактора после выполнения транспортной задачи как источники электроэнергии «выключаются», т.е. переводятся в режим обычных твэл (источников тепла), например, заполнением межэлектродных зазоровборок теплопроводящим газом [10].

Однако термоэлектрический преобразователь имеет очень малый КПД (менее 1% на 100 градусов перепада температур). В результате его электрическая мощность ограничена из-за невозможности обеспечения существенного перепада температур, так как сброс тепла в космосе осуществляется лишь излучением.

В настоящей работе приведены результаты выполненных концептуально-проектных исследований двухрежимной ЯЭУ на базе ТРП, но при использовании в качестве дополнительного генератора высокотемпературного термоэлектрохимического преобразователя (ТЭХП) с существенно более высоким КПД, чем у термоэлектрического генератора.

Принцип работы термоэлектрохимического преобразователя

ТЭХП осуществляет прямое преобразование химического потенциала рабочего тела в электричество при использовании в качестве рабочего тела жидкого металла (щелочного или одновалентного), а в качестве твердого электролита — материала с ионной электропроводностью.

В ТЭХП в электрическую энергию преобразуется та часть химпотенциала газобразного рабочего тела, которая зависит от его давления. В качестве преобразователя тепловой энергии в электрическую используется электрохимическая ячейка, в которой разность химических потенциалов на электродах определяется температурой насыщенных паров рабочего тела. Для такой ячейки электродвижущая сила (ЭДС), генерируемая на электродах, определяется следующим уравнением:

$$V = \frac{RT_r}{F} \ln\left(\frac{P_r}{P_x}\right),$$

где V — ЭДС электрохимической ячейки; R — универсальная газовая постоянная; F — постоянная Фарадея; T_r — температура «горячего» электрода; P_r — давление насыщенного пара на «горячем» электроде; P_x — давление насыщенного пара на «холодном» электроде.

На выбор конкретных материалов твердого электролита и рабочего тела оказывает существенное влияние диапазон рабочих температур, достижимые параметры ТЭХП, совместимость применяемых материалов.

Рабочее тело, применяемое для выбранного диапазона температур, должно иметь:

- температуру плавления ниже температуры «холодного» электрода;
- температуру кипения при рабочем давлении выше температуры «горячего» электрода;
- высокую электропроводность в жидкой фазе;
- максимальное отношение давлений насыщенного пара рабочего тела при температурах «горячего» и «холодного» электродов.

Применительно к параметрам рассматриваемой двухрежимной ЯЭУ наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяет натрий.

Разделение рабочего тела на зоны с различным химическим потенциалом осуществляется твердым электролитом с ионной проводимостью. Твердый электролит должен обладать максимальной ионной и минимальной электронной электропроводностью и совместимостью с основным конструкционным материалом и рабочим телом.

Среди твердых электролитов наибольшей электропроводностью обладают электролиты со структурной разупорядоченностью, например на основе $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (бета-алюминаты), катионная электропроводность которых осуществляется ионами Na. Бета-алюминаты представляют собой химические соединения переменного состава с общей формулой $\text{Me}_2\text{O}n\text{Al}_2\text{O}_3$, где Me — это Li, Na, K, Cs, Rb, Ag, Cu; $n = 5\text{...}10$. По физическим свойствам они приближаются к чистому Al_2O_3 — высокопрочному веществу с высокой температурой плавления. При рабочих температурах эти соединения хорошо совместимы с рабочим телом и основным конструкционным материалом.

Основные требования к конструкционному материалу ТЭХП — совместимость с рабочим телом и твердым электролитом при рабочих температурах, длительная

прочность. Всем этим требованиям хорошо удовлетворяют ниобиевые сплавы, в т. ч. разработанный РКК «Энергия» ниобиевый сплав NbЦУ (ниобий, цирконий, углерод) [11], технология изготовления изделий из которого была освоена при разработке ЯЭУ по литий-ниобиевой технологии для межорбитального буксира «Геркулес» [7, 12].

Принципиальная схема процесса термоэлектрохимического преобразования приведена на рис. 1. Процесс генерирования электроэнергии происходит следующим образом. Рабочее тело (в данном случае Na) в жидкой фазе находится на «горячем» электроде 1. Давление насыщенного пара определяется температурой на стороне «горячего» электрода. Атомы Na, находящиеся на поверхности твердого электролита, диффундируют в твердый электролит 2 в виде ионов. Таким образом, переход атома через поверхность твердого электролита происходит с разделением зарядов. Ион Na встраивается внутрь кристаллической решетки электролита, а электрон из жидкой фазы рабочего тела, контактирующей с «горячим» электродом, удаляется во внешнюю цепь и движется через электрическую нагрузку 6 к «холодному» электроду 3. Ион Na, прошедший через слой твердого электролита, получает электрон из внешней цепи через пористый «холодный» электрод и нейтрализуется. Таким образом, осуществляется замыкание электронного тока от «горячего» электрода через внешнюю нагрузку к «холодному». Замыкание ионного тока осуществляется через твердый электролит.

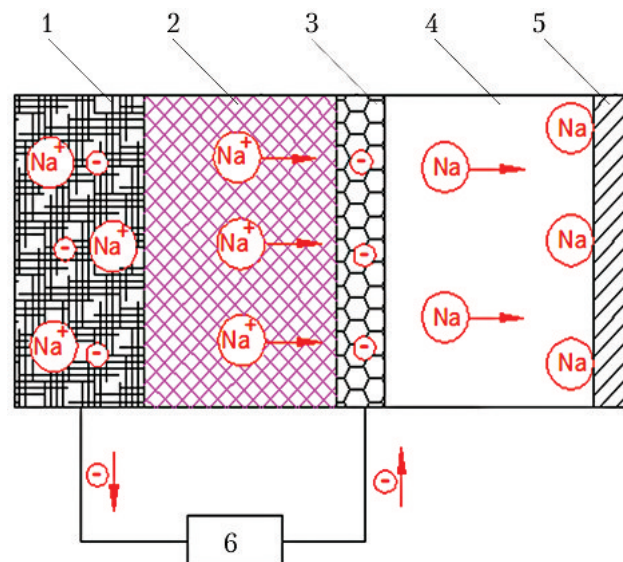


Рис. 1. Принципиальная схема процесса термоэлектрохимического преобразования тепла в электричество: 1 — «горячий» электрод; 2 — твердый электролит; 3 — «холодный» электрод; 4 — зазор; 5 — холодная стенка; 6 — электрическая нагрузка

Атом Na, образовавшийся на поверхности контакта твердого электролита и «холодного» электрода, диффундирует преимущественно вдоль поверхности раздела до попадания в пору «холодного» электрода. Поток атомов Na, прошедший через твердый электролит, попадает через пористый «холодный» электрод в пространство 4 между пористым электродом и холодной стенкой 5. Так как давление насыщенного пара вещества в замкнутом пространстве определяется низшей температурой на границе, давление пара Na на поверхности «холодного» электрода определяется температурой холодной стенки. Поток атомов рабочего тела движется через паровое пространство от «холодного» электрода к холодной стенке, на которой происходит процесс конденсации. Далее жидкая фаза рабочего тела подается от холодной стенки к «горячему» электроду. Таким образом, осуществляется замкнутое движение рабочего тела.

Приведенный процесс является некоторой идеализацией и происходит при бесконечно малом расходе рабочего тела. Генерация достаточно сильных токов сопровождается отклонениями от равновесного процесса. Достаточно заметные потоки рабочего тела приводят к уменьшению располагаемого перепада давлений, определяющего ЭДС ТЭХП, и увеличению паразитных тепловых потоков.

Из рассмотрения процесса преобразования видно, что параметры ТЭХП определяются как рабочим телом, так и свойствами твердого электролита, в качестве которого целесообразно использовать вещество из класса твердых электролитов со структурной разупорядоченностью. Общая отличительная черта таких электролитов — наличие в катионной подрешетке кристалла большого числа избыточных позиций, в которых могут находиться катионы. Поэтому катионы в таком кристалле статистически распределены по всем возможным позициям, что обеспечивает относительную свободу их передвижения и, следовательно, высокую проводимость кристалла по катионной компоненте.

Использование твердого электролита со структурной разупорядоченностью, обеспечивающего высокую катионную электропроводность, совместно с жидкими щелочными металлами в качестве рабочего тела позволяет создать высокоэффективный ТЭХП тепловой энергии в электрическую. КПД такого преобразователя определяется температурами «горячего» и «холодного»

электродов и совершенством конструкции. При плотности тока $\sim 1 \text{ А/см}^2$, что соответствует плотности мощности $1...1,5 \text{ Вт/см}^2$, расчетные значения КПД могут составить 25...35%.

Таким образом, наиболее подходящей комбинацией материалов представляется следующая: основной конструкционный материал — ниобиевый сплав Nb₂Zr, рабочее тело — натрий, твердый электролит — $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$. Перечисленные выше материалы обладают комплексом свойств, позволяющих создать высокоэффективный ТЭХП, работающий в заданном температурном диапазоне.

Схема построения двухрежимной ЯЭУ

Возможность использования ТЭХП для выработки электроэнергии определяется тем, что температура горячей зоны ТЭХП попадает в область температур литиевой системы охлаждения высокотемпературной ЯЭУ с ТРП [6, 7]. Поэтому целесообразно использовать часть теплоизлучающей поверхности системы охлаждения для размещения на ней элементов ТЭХП.

Рассматривается следующая схема технической реализации принципа построения двухрежимной ЯЭУ. ТРП проектируется как относительно мощный источник электроэнергии (например, 150 кВт) для ограниченного времени транспортного режима (1...1,5 года) и одновременно как длительный (на полный срок функционирования КА) источник тепловой энергии. Активная зона ТРП набрана из термоэмиссионных электрогенерирующих сборок (ЭГС) и так называемых бустерных твэл, которые не генерируют электроэнергию, но позволяют обеспечить требуемые критические параметры ТРП. В термоэмиссионных ЭГС температура теплоносителя ограничена оптимальным значением коллектора термоэмиссионного преобразователя и для рассматриваемого ТРП на быстрых нейтронах с литиевым теплоносителем составляет $1\ 050...1\ 100 \text{ К}$ [13]. Применительно к бустерным твэл такого ограничения нет, и температура литиевого теплоносителя может быть выбрана более высокой, ограничиваемой лишь длительной работоспособностью литий-ниобиевой системы охлаждения. С учетом разных температур охлаждения термоэмиссионных ЭГС и бустерных твэл их системы охлаждения автономны. ТЭХП в виде автономных модулей размещается вне активной зоны ТРП в системе охлаждения бустерных твэл, имеющей более высокую температуру, чем основная система охлаждения ТРП.

Преобразователи функционируют последовательно во времени: термоэмиссионный обеспечивает питание ЭРДУ в процессе транспортировки КА, например на ГСО, дополнительный ТЭХП обеспечивает длительное питание аппаратуры КА на уровне мощности до 30 кВт во время функционирования на ГСО.

Набор большого ресурса (до 15 лет) обеспечивается за счет работы ТРП как источника тепловой энергии и возможного «холодного» резервирования модулей ТЭХП.

Основные характеристики ЯЭУ (электроэнергетическая система, температура теплоносителя, поверхность холодильника-излучателя, диаметры трубопроводов и т. п.) проектируются под требования обеспечения большой мощности для реализации транспортного режима, а параметры вынесенного преобразователя (температуры термодинамического цикла и др.) адаптируются к спроектированной конструкции ТРП и ЯЭУ (в т. ч. к выбранной поверхности холодильника-излучателя системы охлаждения бустерных твэл).

Система охлаждения ТРП представляет собой секционированный холодильник-излучатель на основе тепловых труб. Каждая секция содержит восемь тепловых труб длиной 5,5 м и диаметром 60 мм. Теплоизлучающая поверхность тепловых труб покрыта чернотным покрытием для обеспечения необходимых теплоизлучающих характеристик. Близкие по характеристикам тепловые трубы были разработаны и прошли цикл испытаний в составе высокотемпературных литий-ниобиевых контуров [7, 12].

Система охлаждения бустерной зоны состоит из секций в виде восьми тепловых труб длиной 8 м, работающих в двух режимах: в *первом* осуществляется только охлаждение бустерной зоны, во *втором* кроме охлаждения бустерной зоны осуществляется подвод тепла к ТЭХП. Зона конденсации тепловой трубы состоит из двух участков разного диаметра. Начальный участок так же, как и в основном холодильнике-излучателе, имеет диаметр 60 мм, а концевой участок, на котором расположены электрогенерирующие элементы ТЭХП, имеет диаметр 80 мм.

Наружная поверхность тепловых труб покрыта чернотным покрытием для обеспечения необходимых теплоизлучающих характеристик. Концевой участок труб, на котором расположены электрогенерирующие элементы, покрыт слоем электроизоляции из Al_2O_3 .

Таким образом, в состав двухрежимной ЯЭУ с ТЭХП входят:

- ядерный реактор (ТРП) с бустерной зоной;
- система охлаждения ТРП, включающая автономную систему охлаждения бустерной зоны;
- система электроснабжения на основе ТРП и ТЭХП.

Работает двухрежимная ЯЭУ с ТРП и ТЭХП следующим образом: после выполнения программы транспортного режима ЯЭУ переводится в режим пониженной тепловой мощности (энергетический режим) с производимой электрической мощностью 20...40 кВт, вырабатываемой с помощью ТЭХП.

Конструкция термоэлектрохимического генератора

Термоэлектрохимический генератор состоит из отдельных электрогенерирующих элементов (ЭГЭ), собранных в секции. Внутри каждой секции элементы соединены электрически последовательно для обеспечения заданного напряжения. Между собой секции соединены параллельно для обеспечения заданного выходного тока. Электрическое напряжение, вырабатываемое отдельным ЭГЭ, определяется температурами «горячей» и «холодной» зон ТЭХП, а ток, отдаваемый в нагрузку, пропорционален площади элемента.

Геометрические размеры элементов выбраны таким образом, чтобы обеспечить необходимую электрическую мощность, снимаемую с одного элемента, и возможность отвести необработанное тепло термодинамического цикла ТЭХП.

Поскольку ТЭХП должен работать от того же источника тепла, что и встроенный в реактор термоэмиссионный преобразователь, было естественным задать рабочую температуру «горячего» электрода равной температуре теплоносителя на выходе из бустерной зоны ТРП (на входе в холодильник-излучатель бустерной зоны). Температура «холодного» электрода оптимизируется из условия компромисса между увеличением КПД ТЭХП с ростом перепада температур и увеличением площади и, следовательно, массы холодильника-излучателя системы охлаждения с понижением температуры «холодного» электрода. С учетом этих требований для выбранной температуры «горячего» электрода 1 200 К для «холодного» электрода она составит 540...580 К.

Источник электроэнергии на основе ТЭХП представляет собой набор одинаковых ЭГЭ,

расположенных на концевой части тепловой трубы холодильника-излучателя системы охлаждения бустерной зоны ТРП. Отдельные ЭГЭ собраны в группы и соединены внутри них последовательно для получения необходимого напряжения на нагрузке. Группы ЭГЭ соединены параллельно для получения необходимой силы тока. Количество элементов в группе составляет 30 штук, количество групп – 76.

Конструкционная схема ЭГЭ представлена на рис. 2.

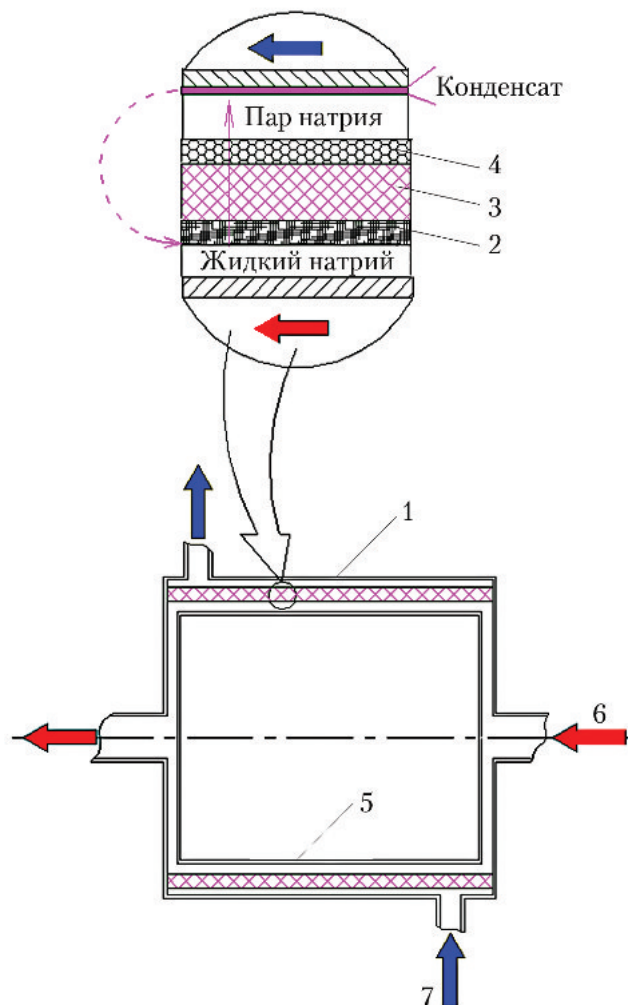


Рис. 2. Конструкционная схема электрогенерирующего элемента: 1 – корпус; 2 – «горячий» электрод; 3 – твердый электролит; 4 – «холодный» электрод; 5 – внутренний объем; 6 – горячий теплоноситель; 7 – холодный теплоноситель

Корпус ЭГЭ 1 представляет собой герметичную тороидальную оболочку прямоугольного сечения. Внутри расположены «горячий» электрод 2, твердый электролит 3 цилиндрической формы, пористый «холодный» электрод 4. Подвод теплового потока к «горячему» электроду осуществляется по внутренней цилиндрической части корпуса, отвод непретворенного тепла – излучением со стороны «холодного» электрода

на внешней цилиндрической части корпуса. Для обеспечения условий теплоотвода излучением внешняя цилиндрическая часть корпуса покрыта чернотным покрытием, обеспечивающим степень черноты ~0,85. Механические нагрузки передаются, в основном, на цилиндрические части корпуса, которые имеют относительно большую толщину, в то время как плоские торцевые участки корпуса выполнены из относительно тонкого материала для уменьшения паразитных тепловых потоков по корпусу.

«Горячий» электрод выполнен из металловолокна, обеспечивающего точное позиционирование относительно корпуса и эластичное закрепление твердого электролита. Пористый «холодный» электрод представляет собой нанесенную непосредственно на твердый электролит тонкую металлическую пленку, перфорированную для получения заданной поверхностной пористости, на которую нанесен слой металловолокна, к нему присоединен токовывод. Каждый ЭГЭ закрепляется на тепловой трубе пайкой.

Проектные значения параметров ЭГЭ следующие:

внутренний диаметр корпуса	80 мм;
наружный диаметр корпуса	120 мм;
высота корпуса	40 мм;
масса ЭГЭ	0,26 кг;
температура «горячего» электрода	1190...1210 К;
температура «холодного» электрода	500...550 К;
напряжение на нагрузке	1,1...1,2 В;
ток в нагрузке	20...25 А.

Проектные параметры всей системы ТЭХП следующие:

электрическая мощность	30 кВт;
суммарное количество ЭГЭ	1344;
количество ЭГЭ в панели	448;
суммарная масса ЭГЭ	350 кг;
удельная мощность	11,6 кг/кВт.

Длительный ресурс работы элементов ТЭХП обеспечивается применением соответствующих конструкционных материалов. Совместимость ниобиевого сплава NbЦУ с натрием подтверждена длительным сроком работы экспериментальных ниобий-натриевых тепловых труб, безотказная наработка которых составляет более 30 000 ч [12]. Длительная совместимость Al_2O_3 с ниобиевым сплавом и натрием также подтверждена экспериментально. Существует технология соединения ниобиевых сплавов с Al_2O_3 , обеспечивающая длительный срок работы без разрушений [14, 15].

Режимы работы транспортно-энергетического модуля

Режимы работы ТЭМ на основе ЯЭУ с ТЭХП практически ничем не отличаются от таковых для ТЭМ с двухрежимной ЯЭУ с термоэлектрическим генератором [16]. КА с ТЭМ с помощью ракеты-носителя и разгонного блока выводится на так называемую радиационно-безопасную орбиту, которая по современным требованиям должна быть не ниже 800 км. На этой орбите запускается ТРП на уровень электрической мощности транспортного режима (в рассматриваемом проекте 150 кВт), включается электроракетная двигательная установка (ЭРДУ) и КА транспортируется в течение не более полутора лет на орбиту функционирования, например, в рабочую точку на ГСО. ЭРДУ выключается, ТРП переводится на пониженный уровень тепловой мощности, организуется циркуляция лития в контуре с ТЭХП, который начинает генерировать электроэнергию для питания функциональной аппаратуры КА в течение длительного времени. После завершения работы КА с помощью части двигателей ЭРДУ на мощности пониженного режима переводится на орбиту захоронения, например, выше ГСО.

Обеспечение ядерной безопасности также ничем не отличается от традиционных систем космических ЯЭУ. В ТРП предусмотрены стержни безопасности, обеспечивающие защиту от несанкционированного запуска на всех этапах жизненного цикла до планового пуска, который производится на радиационно-безопасной орбите. Обоснование обеспечения ядерной безопасности рассматриваемого ТРП выполнено при проектировании ЯЭУ для межорбитального буксира «Геркулес» [6], в т. ч. при экспериментальном исследовании полномасштабного нейтронно-физического макета ТРП модульной конструкции [17, 18].

Заключение

Выполнены проектно-концептуальные исследования комбинированной двухрежимной ЯЭУ на основе термоэмиссионного реактора и размещенного вне активной зоны термоэлектрохимического преобразователя с максимальным уровнем электрической мощности в транспортном режиме до 150 кВт и длительного (в течение 10–15 лет) питания аппаратуры КА на пониженной до 20–40 кВт мощности. При разработке использованы большие материаловедческие и научно-технические

заделы РКК «Энергия» и смежных организаций по термоэмиссионной ЯЭУ, созданной по литий-ниобиевой технологии для межорбитального буксира «Геркулес».

В настоящее время существуют отработанные технологии и материалы, необходимые для создания высокотемпературных ТЭХП космического применения с длительным ресурсом работы.

Список литературы

1. *Легостаев В.П., Лопота В.А., Снявский В.В.* Эффективность применения космических ядерных энергетических и ядерных электроракетных двигательных установок // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 4–15.
2. *Снявский В.В., Юдицкий В.Д.* О рациональных уровнях электрической мощности ядерно-энергетической установки в режиме электроракетной доставки спутника на орбиту и в режиме питания его аппаратуры // Известия РАН. Энергетика. 2003. № 3. С. 70–75.
3. *Ковтун В.С., Королёв Б.В., Снявский В.В., Смирнов И.В.* Космические системы связи разработки Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва // Космическая техника и технологии. 2015. № 2(9). С. 3–24.
4. *Кузин А.И., Павлов К.А., Зацерковский С.П., Шевцов Г.А.* Этапы развития космических аппаратов, реализующих принцип самодоставки на высокоэнергетические орбиты в рамках существующей и разрабатываемой инфраструктур средств выведения / Сб. докл. V Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе» // Под ред. проф. Федика И.И. Подольск: НИИ НПО «Луч», 1999. Ч. 1. С. 18–25.
5. *Андреев П.В., Еремин А.Г., Жаботинский Е.Е., Зарицкий Г.А., Коробков Л.С., Матвеев А.В., Никонов А.М., Труханов Ю.Л., Павлов К.А., Николаев Ю.В., Лапочкин Н.В.* Основные положения концепции термоэмиссионных космических ЯЭУ второго поколения в составе транспортно-энергетического модуля с учетом возможностей современных средств выведения / Сб. докл. V Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе» // Под ред. проф. Федика И.И. Подольск: НИИ НПО «Луч», 1999. Ч. 1. С. 26–37.
6. *Островский В.Г., Снявский В.В., Сухов Ю.И.* Межорбитальный электроракетный буксир «Геркулес» на основе термоэмиссионной ядерно-энергетической

установки // *Космонавтика и ракетостроение*. 2016. № 2(87). С. 68–74.

7. Синявский В.В. Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» // *Космическая техника и технологии*. 2013. № 3. С. 25–45.

8. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных сборок. М.: Энергоатомиздат, 2000. 375 с.

9. Патент RU 2140675 С1. Российская Федерация. Космическая двухрежимная ядерно-энергетическая установка. Синявский В.В., Юдицкий В.Д.; заявитель и патентообладатель – ООО «Прикладные научные разработки»; заявка 98117956/12; приоритет от 30.09.1998 // *Изобретения*. 1999. № 30.

10. Патент RU 2282905 С2. Российская Федерация. Способ эксплуатации космической двухрежимной ядерно-энергетической установки с термоэмиссионным реактором-преобразователем и дополнительным преобразователем тепловой энергии в электрическую. Синявский В.В., Юдицкий В.Д.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; заявка 2004115155/06; приоритет от 19.05.2004 // *Изобретения*. 2006. № 24.

11. Араkelов А.Г., Геков А.Ф., Минеева Л.В., Лукьянов А.Н. Ниобий как базовый конструкционный материал высокотемпературных космических ЯЭУ. Освоение ниобий-литиевой технологии // Тезисы доклада на конференции «Ядерная энергетика в космосе. Материалы. Топливо». Подольск: НИИ НПО «Луч», 1993. С. 199.

12. Араkelов А.Г., Быстров П.И., Глазунов М.Г., Кирусик Е.М., Левин М.Н., Осадчий В.А., Семкин С.П., Соболев В.Я., Соловьев Л.В., Попов А.Н., Юдицкий В.Д. Разработка и испытания агрегатов высокотемпературной литий-ниобиевой системы охлаждения термоэмиссионной ЯЭУ космического назначения / В сб. *Ракетно-космическая техника. Ракетные двигатели и энергетические установки*. Вып. 3(141). Системы и средства

бортовой энергетики. М.: НИИТП, 1993. С. 87–105.

13. Синявский В.В., Бержатый В.И., Мавевский В.А., Петровский В.Г. Проектирование и испытания термоэмиссионных твэлов. М.: Атомиздат, 1981. 96 с.

14. Савлов Н.А., Рыжков А.Н., Куцлов Г.А. и др. Разработка и экспериментальное обоснование конструкции и технологии ЭГК повышенных эффективности и ресурса // *Избранные труды ФЭИ*. 1996. Обнинск: Изд. ФЭИ, 1997. С. 193–199.

15. Рыжков А.Н., Савлов Н.А., Альмамбетов А.К., Великанович Р.И., Иевлева Ж.И., Куцова Г.А., Прилежаева И.Н., Трещалин М.А., Ларионов Ю.П., Синявский В.В. Разработка и исследование коллекторного пакета энергонапряженных высоковольтных термоэмиссионных сборок // *Ракетно-космическая техника*. Труды. Сер. XII. Королёв: РКК «Энергия». 2003. Вып. 1–2. С. 197–210.

16. Синявский В.В., Юдицкий В.Д., Гафуров А.А. Структура геостационарного информационного космического аппарата с системой электропитания на базе двухрежимной ядерно-энергетической установки // *Ядерная энергетика в космосе*. Сборник докладов в 3-х т. М.: Изд. НИКИЭТ, 2005. Т. 1. С. 121–130.

17. Овчаренко М.К., Синявский В.В., Шестеркин А.Г., Юдицкий В.Д. Обеспечение ядерной и радиационной безопасности при использовании ядерно-энергетической установки с термоэмиссионным реактором-преобразователем в составе космического аппарата // *Известия РАН. Энергетика*. 2003. № 4. С. 3–18.

18. Шестеркин А.Г., Овчаренко М.К., Синявский В.В., Тарасов В.А. Экспериментальное обоснование ядерной безопасности модульной сборки космической ядерно-энергетической установки // *Известия РАН. Энергетика*. 2007. № 4. С. 48–60.

Статья поступила в редакцию 22.06.2017 г.

Reference

1. Legostaev V.P., Lopota V.A., Sinyavskiy V.V. *Effektivnost' primeneniya kosmicheskikh yadernykh energeticheskikh i yadernykh elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok* [Prospects for and efficiency in application of space nuclear power plants and nuclear electrorocket propulsion systems]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2013, no. 1, pp. 4–15.

2. Sinyavskiy V.V., Yuditckiy V.D. *O ratsional'nykh urovnyakh elektricheskoi moshchnosti yaderno-energeticheskoi ustanovki v rezhime elektroraketnoi dostavki sputnika na orbitu i v rezhime pitaniya ego apparatury* [About practicable levels of electric power output of a nuclear power system

in the mode of electrically-propelled delivery of a satellite into orbit and in the mode of supplying power to its equipment]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2003, no. 3, pp. 70–75.

3. Kovtun V.S., Korolev B.V., Sinyavskiy V.V., Smirnov I.V. *Kosmicheskie sistemy svyazi razrabotki Raketno-kosmicheskoi korporatsii «Energiya» imeni S.P. Koroleva* [Space communication systems developed by S.P. Korolev rocket and space corporation Energia]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 2(9), pp. 3–24.

4. Kuzin A.I., Pavlov K.A., Zatserkovnyi S.P., Shevtsov G.A. *Etapy razvitiya kosmicheskikh apparatov, realizuyushchikh printsip samodostavki na vysokoenergeticheskie orbity v ramkakh sushchestvuyushchei i razrabatyvaemoi infrastruktur sredstv vyvedeniya. Sb. dokl. V Mezhdunarodnoi konferentsii «Yadernaya energetika v kosmose»* [Stages in the development of spacecraft implementing the concept of self-delivery to high-energy orbits within the framework of both the existing launch infrastructure and the one that is currently under development. Collection of papers of the 5th International Conference Nuclear Power in Space]. *Ed. prof. Fedik I.I. Podol'sk: NII NPO «Luch» publ.*, 1999. Ch. 1, pp. 18–25.

5. Andreev P.V., Eremin A.G., Zhabotinskiy E.E., Zaritskiy G.A., Korobkov L.S., Matveev A.V., Nikonov A.M., Trukhanov Yu.L., Pavlov K.A., Nikolaev Yu.V., Lapochkin N.V. *Osnovnye polozheniya kontseptsii termoemissionnykh kosmicheskikh YaEU vtorogo pokoleniya v sostave transportno-energeticheskogo modulya s uchetom vozmozhnostei sovremennykh sredstv vyvedeniya. Sb. dokl. V Mezhdunarodnoi konferentsii «Yadernaya energetika v kosmose»* [Basic concepts of the second-generation thermionic space nuclear power systems within a transportation and power module considering the performance of the present-day launch vehicles. Collection of papers of the 5th International Conference Nuclear Power in Space]. *Ed. prof. Fedik I.I. Podol'sk: NII NPO «Luch» publ.*, 1999. Ch. 1, pp. 26–37.

6. Ostrovskiy V.G., Sinyavskiy V.V., Sukhov Yu.I. *Mezhorbital'nyi elektroraketnyi buksir «Gerkules» na osnove termoemissionnoi yaderno-energeticheskoi ustanovki* [Electrically-propelled orbital transfer vehicle Hercules based on a thermionic nuclear power system]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2016, no. 2(87), pp. 68–74.

7. Sinyavskiy V.V. *Nauchno-tekhnicheskii zadel po yadernomu elektroraketnomu mezhorbital'nomu buksiru «Gerkules»* [Advanced technology for nuclear electric propulsion orbital transfer vehicle Hercules]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 25–45.

8. Sinyavskiy V.V. *Metody i sredstva eksperimental'nykh issledovaniy i reaktornykh ispytaniy termoemissionnykh sborok* [Methods and means of experimental studies and reactor tests of thermionic assemblies]. *Moscow, Energoatomizdat publ.*, 2000. 375 p.

9. Patent RU 2140675 C1. Rossiiskaya Federatsiya. *Kosmicheskaya dvukhrezhimnaya yaderno-energeticheskaya ustanovka* [Space dual-mode nuclear power system]. Sinyavskiy V.V., Yuditskiy V.D.; the applicant and the patent owner – OOO «Prikladnye nauchnye razrabotki»; application 98117956/12; priority of 30.09.1998. *Izobreteniya*, 1999, no. 30.

10. Patent RU 2282905 S2. Rossiiskaya Federatsiya. *Sposob ekspluatatsii kosmicheskoi dvukhrezhimnoi yaderno-energeticheskoi ustanovki s termoemissionnym reaktorom-preobrazovatelem i dopolnitel'nyim preobrazovatelem teplovoi energii v elektricheskuyu* [A method of operating a space dual-mode nuclear power system with a thermionic converter reactor and an additional converter of thermal energy into electrical energy]. Sinyavskiy V.V., Yuditskiy V.D.; the applicant and the patent owner – OAO RKK «Energiya»; application 2004115155/06; priority of 19.05.2004. *Izobreteniya*, 2006, no. 24.

11. Arakelov A.G., Gekov A.F., Mineeva L.V., Luk'yanov A.N. *Niobii kak bazovyi konstruktsionnyi material vysokotemperaturnykh kosmicheskikh YaEU. Osvoenie niobii-litievoi tekhnologii. Tezisy doklada na konferentsii «Yadernaya energetika v kosmose. Materialy. Toplivo»* [Niobium as the base structural material of high-temperature space NPS. Mastering niobium-lithium technology. Abstract of a paper at the conference «Nuclear Power in Space. Materials. Propellant»]. *Podol'sk: NII NPO «Luch» publ.*, 1993. P. 199.

12. Arakelov A.G., Bystrov P.I., Glazunov M.G., Kirisik E.M., Levin M.N., Osadchiy V.A., Semkin S.P., Sobolev V.Ya., Solov'ev L.V., Popov A.N., Yuditskiy V.D. *Razrabotka i ispytaniya agregatov vysokotemperaturnoi litii-niobievoi sistemy okhlazhdeniya termoemissionnoi YaEU kosmicheskogo naznacheniya. V sb. Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Raketnye dvigateli i energeticheskie ustanovki* [Development and testing of assemblies of lithium-niobium cooling subsystem for thermionic nuclear power system for space applications. In the collection of papers Rocket and Space Technology. Rocket engines and power systems]. *Issue 3(141). Sistemy i sredstva bortovoi energetiki. Moscow, NIITP publ.*, 1993. P. 87–105.

13. Sinyavskiy V.V., Berzhatyi V.I., Maevskiy V.A., Petrovskiy V.G. *Proektirovanie i ispytaniya termoemissionnykh tvelov* [Design and testing of thermionic fuel elements]. Moscow, Atomizdat publ., 1981. 96 p.

14. Savlov N.A., Ryzhkov A.N., Kuptsov G.A. i dr. *Razrabotka i eksperimental'noe obosnovanie konstruksii i tekhnologii EGK povyshennykh effektivnosti i resursa* [Development and experimental validation of the design and technology of PGC with improved efficiency and life]. *Izbrannye trudy FEI*. 1996. Obninsk: FEI publ., 1997. P. 193–199.

15. Ryzhkov A.N., Savlov N.A., Al'mambetov A.K., Velikanovich R.I., Ievleva Zh.I., Kuptsova G.A., Prilezhaeva I.N., Treshchalin M.A., Larionov Yu.P., Sinyavskiy V.V. *Razrabotka i issledovanie kollektornogo paketa energonapryazhennykh vysokovol'tnykh termoemissionnykh sborok* [Development and study of the collector package of high-power-density high-voltage thermionic assemblies]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Trudy. Ser. XII. Korolev, RKK «Energiya» publ.*, 2003, issue 1–2, pp. 197–210.

16. Sinyavskiy V.V., Yuditskiy V.D., Gafarov A.A. *Struktura geostatsionarnogo informatsionnogo kosmicheskogo apparata s sistemoi elektropitaniya na baze dvukhrezhimnoi yaderno-energeticheskoi ustanovki* *Yadernaya energetika v kosmose. Sbornik dokladov in 3 vol.* [The structure of a geostationary information spacecraft with a power supply system based on dual-mode nuclear power system. Nuclear power in space. Collection of papers in 3 vol.]. Moscow, NIKIET publ., 2005. Vol. 1, pp. 121–130.

17. Ovcharenko M.K., Sinyavskiy V.V., Shesterkin A.G., Yuditskiy V.D. *Obespechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti pri ispol'zovanii yaderno-energeticheskoi ustanovki s termoemissionnym reaktorom-preobrazovatelem v sostave kosmicheskogo apparata* [Providing nuclear and radiation safety when using a nuclear power system with thermionic converter reactor as a part of a spacecraft]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2003, no. 4, pp. 3–18.

18. Shesterkin A.G., Ovcharenko M.K., Sinyavskiy V.V., Tarasov V.A. *Eksperimental'noe obosnovanie yadernoi bezopasnosti modul'noi sborki kosmicheskoi yaderno-energeticheskoi ustanovki* [Experimental validation of nuclear safety of the modular assembly of a space nuclear power system]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2007, no. 4, pp. 48–60.