

Принципиальным новым моментом, связанным с возможностью построения термоэмиссионной преобразовательной системы на газорегулируемых высокотемпературных тепловых трубах, является резервирование термоэмиссионной электрической мощности, которое будет содействовать увеличению надежности и ресурса работы космических ЯЭУ в целом.

Ближайшей задачей участников работы является переход к экспериментальной стадии разработки и испытаниям ключевых систем в части термоэмиссионных эффективных электродных материалов, газорегулируемых высокотемпературных тепловых труб, металлокерамических многослойных пакетов, кольцевого твэла и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярыгин Д.В., Миронов В.С., Соловьев Н.П. и др. Термоэмиссионный преобразователь с высокими выходными электрическими характеристиками с $\text{Me}-\text{O}$ -системой на коллекторе. Тезисы докл. 2-го Межд. семинара «Космическая ядерная энергетика XXI века» (19—21 апреля 2000 г.), 2000, с. 71—72.
2. Ружников В.А., Дмитриева В.М. Численный метод совместного решения тепловой и электрической задач для термоэмиссионного ЭГК: Препринт ФЭИ № 774, 1977. 19 с.
3. Полевой В.Б., Леонтьев В.В., Овчинников А.В. и др. Базовый пакет программ комплекса ММКФК-2 для решения методом Монте-Карло задач переноса нейтронов в физике реакторов (ММКФК-2-BASE). Отраслевой фонд алгоритмов и программ ядерных реакторов, № 00371. М., 1996.
4. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В. Технологические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1980. 160 с.
5. Михайлов В.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. М.: Энергоатомиздат, 1999. 528 с.
6. Streckert H., Begg L., Nikolaev Yu.B. et al. Development and testing of conductively coupled multi-cell TFE components. — In: Proc. Space Technology and Applications International Forum-2000, p. 1307—1312. Albuquerque, the USA, 2000.
7. Афанасьев Н.М., Вертков А.В., Евтихин В.А. и др. Термоэмиссионный энергетический модуль. Полезная модель № 9084, приоритет от 28.07.98. — Полезные модели и пром. образцы, 1999, № 1, с. 68.
8. Евтихин В.А., Чуманов А.Н. Космическая ядерная энергетическая установка. Патент РФ № 2129740, приоритет от 28.07.98. — Изобретения, 1999, № 12, с. 515.

УДК 629.19:621.039.578

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЯДА КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ С ВЫНЕСЕННОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ НА ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

*Грязнов Г.М., Евтихин В.А., Чуманов А.Н., Богуш И.П., Люблинский И.Е.,
Вертков А.В., Афанасьев Н.М. (ГП «Красная Звезда»), Ионкин В.И.,
Меркурисов И.Х., Ярыгин В.И. (ГНЦ РФ—ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Современное развитие космической энергетики характеризуется потребностью в высокой электрической мощности (до 500 кВт в обозримом будущем) и ресурсе энергоустановок 10 лет и более. Космические ЯЭУ с термоэмиссионным преобразованием тепловой энергии в электрическую являются перспективными в силу приемлемых массогабаритных характеристик и потенциально высокой ресурсоспособности и надежности, свойственных статической системе преобразования. Известные проекты выполняются по схеме со встроенными в активную зону реактора термоэмиссионными ЭГК цилиндрической формы. Такая схема позволяет создать компактный реактор-преобразователь, однако ему присущи некоторые недостатки:

полностью не реализуются возможности термоэмиссионного способа преобразования энергии вследствие неравномерности тепловыделения по высоте и радиусу активной зоны реактора, что приводит к неизотермичности эмиттеров термоэмиссионных диодов, каждый из которых работает в условиях неоптимального давления паров цезия;

невозможно проверить характеристики космической ЯЭУ и ЭГК гирляндного типа с электронагревателем, следствием чего является всегда комплексная отработка установки с неизвестными параметрами ЭГК;

отсутствует мокрая изоляция, обладающая высокой надежностью, и др.

Космическая ЯЭУ с вынесенными из активной зоны реактора термоэмиссионными преобразователями устраняет эти недостатки, хотя масса таких установок будет больше. Поэтому разработка мощного ряда установок, основанного на унифицированных элементах и типовых инженерных решениях, является актуальной задачей.

Концепция мощного ряда космических ЯЭУ. Она заключается в создании надежных, высокоресурсных энергоустановок с высоким к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую путем использования модульной конструкции термоэмиссионного генератора с отводом тепла из активной зоны реактора с помощью высокотемпературных тепловых труб, преобразования тепла в термоэмиссионном генераторе и сброса непреобразованного тепла в пространство холодильником-излучателем на основе среднетемпературных тепловых труб [1, 2].

Конструкция ядерного реактора для анализируемого мощного ряда разрабатывается с учетом экологической и ядерной безопасности на основе соответствующих международных норм. Так, конструкция активной зоны обеспечивает ее компактное размещение в случае несанкционированного спуска объекта на стадии вывода и с орбиты искусственного спутника земли при разрушении ЯЭУ и реактора. Подкритичность реактора в любых условиях достигается конструкцией и материальным составом активной зоны с учетом влияния стержней безопасности. При ударе о твердую поверхность активная зона распадается на подкритичные элементы. При спуске с орбиты и торможении в плотных слоях атмосферы сохраняется компактность топлива без его расплавления посредством применения теплозащитного корпуса из композитных углеграфитовых материалов и пирографита. В случае аварии на старте самопроизвольный пуск реактора исключается его конструктивным исполнением.

Ресурс и надежность космических ЯЭУ обеспечивается:

применением совместимых между собой и рабочим телом при рабочей температуре конструкционных материалов, имеющих достаточный запас прочности, отсутствием материалов и сред, склонных к термохимическим реакциям, в том числе углерода с тугоплавкими металлами;

высоким уровнем технологии изготовления высоко- и среднетемпературных тепловых труб и термоэмиссионных преобразователей с учетом опыта, в том числе технологии термической очистки и сварки материалов в вакууме;

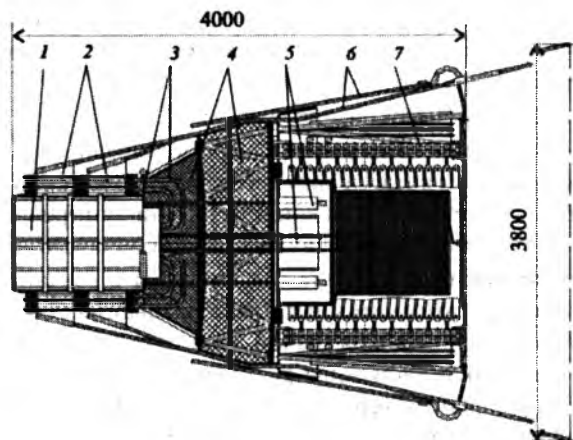
выбором щадящих температурных режимов и режимов нагружения тепловых труб и преобразователей, исключающих существенный массоперенос, термохимические реакции и рекристаллизацию материалов, обеспечивающих стабильность состава и текстуры эмиссионных поверхностей;

отсутствием в конструкции преобразователей керамической межэлектродной и корпусной мокрой изоляции, заменой межэлектродной изоляции металлическим шунтом, например, сильфонным (линзовым) компенсатором;

наличием матричной коммутации преобразователей и управляемых диодов, обеспечивающих шунтирование вышедших из строя.

Изотермичность электродов, оптимальные межэлектродные зазоры, оптимальные электродные материалы и давление паров цезия позволят улучшить характеристики преобразователей и будут способствовать увеличению ресурса и надежности космической ЯЭУ в целом.

Конструктивные принципы и анализ параметров мощного ряда космических ЯЭУ. В качестве базового варианта для анализа выбрана схема компоновки, представленная на рис. 1, где соосно в пределах объема усеченного конуса расположены ее основные составные элементы. Предполагается размещение системы автоматичес-

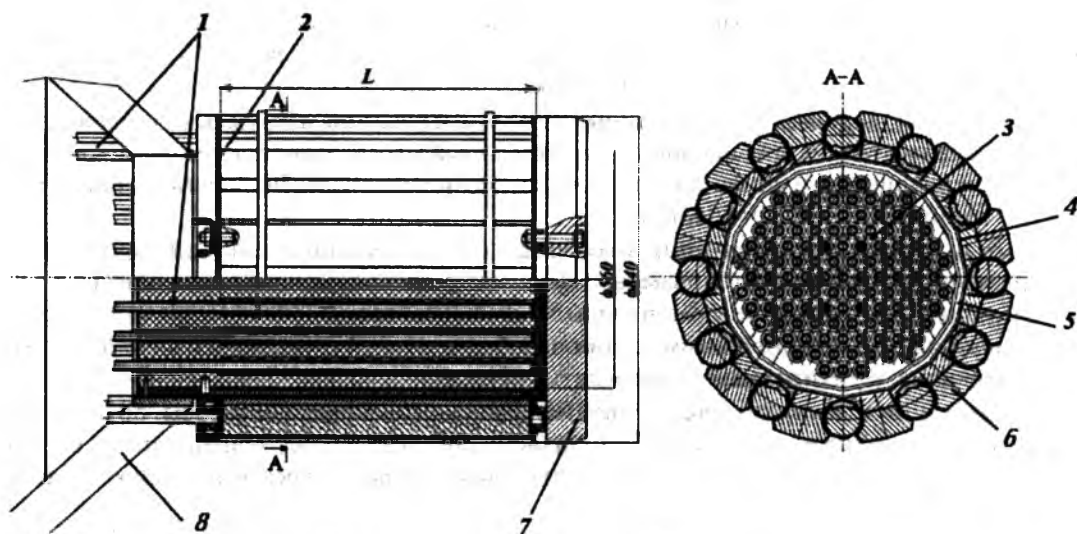


Р и с. 1. Компоновка космической ЯЭУ: 1 — реактор; 2 — термоэмиссионный генератор; 3 — высокотемпературная тепловая труба; 4 — радиационная защита; 5 — блок приводов системы автоматического управления; 6 — холодильник-излучатель; 7 — пантограф-токопровод

лозащитном корпусе толщиной 20—25 мм и закреплена штифтами. Он в свою очередь размещается в металлическом корпусе с зазором и закрепляется через тепловые развязки или упоры. В зазоре устанавливается пакет экранов. В нижнем торцевом отражателе и днище корпуса предусмотрено необходимое число отверстий под установку тепловых труб и стержней регулирования и безопасности. Снаружи корпуса установлены блоки торцевого и бокового отражателей из очехлованного бериллия. В боковом отражателе установлены регулирующие барабаны, которые вращаются с помощью приводов с электродвигателями, установленными за радиационной защитой. Там же установлены приводы регулирующих стержней и стержней безопасности. На корпусе реактора предусмотрена ферма крепления реактора с термоэлектрическим генератором к блоку радиационной защиты, электроизолированные узлы крепления труб и генератора. Теплоотвод из реактора осуществляется высокотемпературными тепловыми

кого управления и блока электрооборудования на объекте, т.е. термоэлектрические генераторы и блок электрооборудования соединены силовыми шинами.

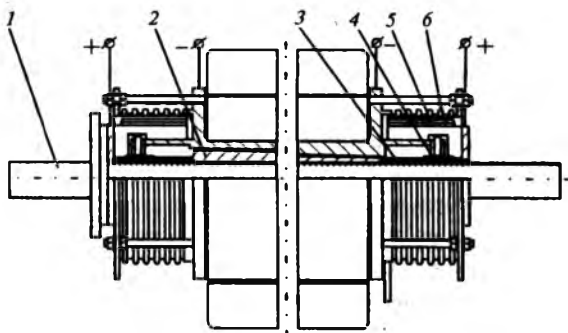
Схема реактора с тепловыми трубами генераторов приведена на рис. 2. Активная зона реактора — цилиндрическая с отверстиями вдоль оси под установку труб, стержней регулирования и безопасности и состоит из пакета цилиндрических или призматических твэлов с диоксидом урана необходимого обогащения, покрытых снаружи пироуглеродом. Число труб определяется диаметром активной зоны, длина и диаметр активной зоны — тепловой мощностью. Активная зона вместе с нижним графитовым торцевым отражателем размещается в теп-



Р и с. 2. Реактор: 1 — высокотемпературные тепловые трубы; 2 — нижний графитовый торцевой отражатель; 3 — активная зона; 4 — металлический корпус; 5 — пакет экранов; 6, 7 — блоки торцевого и бокового отражателя соответственно; 8 — ферма крепления реактора с термоэмиссионным генератором к блоку радиационной защиты

трубами (конструкционный материал — молибден, теплоноситель — литий). Труба имеет систему транспортировки рабочего тела, состоящую из закрытых сетчатым экраном каналов. Тепловоспринимающая часть имеет чернящее покрытие, покрытие из графитообразующего материала, стабильное при рабочей температуре, криволинейная адиабатная часть закрыта экранами и теплоизолятором (например, нитридом бора), теплоотводящая часть совмещена с эмиттерной втулкой модуля генератора.

Конструктивная схема термоэмиссионного диода ампульного типа — модуля генератора приведена на рис. 3. Модуль представляет собой цельнометаллическую сварную герметичную конструкцию. Он состоит из греющей трубы, имеющей в зоне конденсации теплоносителя утолщение с наружной конусностью, являющейся эмиттером. К эмиттеру приварены трубчатые токовыводы. Наружная поверхность токовыводов в зоне, удаленной от эмиттера, покрыта электроизоляционным покрытием. К эмиттерному токовыводу приварены цельнометаллические шунты в виде коаксиально расположенных цилиндрических стаканов и сильфонных компенсаторов. Конструктивные и технологические особенности генератора приведены в работе [3].



Р и с. 3. Конструктивная схема термоэмиссионного диода: 1 — высокотемпературная тепловая труба; 2 — эмиттер; 3 — токовыводы; 4 — электроизоляционное покрытие; 5 — цельнометаллические шунты; 6 — сильфонные компенсаторы

Радиационная защита — двухкомпонентная, профилированная, снижает флюенс нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) ниже 10^{12} см⁻² и дозу γ -излучения ниже 10^5 рад при удалении реактора от объекта на расстояние более 25 м. Теневой угол определяется этим расстоянием и диаметром объекта, принятым равным 4 м.

Базовая конструкция холодильника-излучателя принята в виде пакета оребренных среднетемпературных тепловых труб, причем каждая труба отводит тепло от одного диода генератора.

Недостаток рассматриваемой конструктивной схемы заключается в том, что тепловые трубы в рабочем состоянии оказываются под электрическим потенциалом. Вследствие этого возможны электрические утечки и при определенных условиях возникновение дуг. Этот недостаток устраняется введением тонкого электроизоляционного покрытия между корпусом термоэмиссионного генератора и подводщими и отводящими тепловыми трубами. Технология нанесения таких покрытий отработана, их характеристики в достаточной степени изучены. Толщина слоя сухой изоляции, работающей вне активной зоны и при низком напряжении, может быть выбрана таковой, что заметным образом не повлияет на параметры установки.

В качестве исходных данных для оценки характеристик мощностного ряда космических ЯЭУ принято:

Максимальная температура, К:	
топлива (UC_2) . . .	2270
высокотемпературных тепловых труб . . .	1770
эмиттера . . .	1670
коллектора . . .	870—920
Шаг высокотемпературных тепловых труб, мм . . .	55
Межэлектродный зазор, мм . . .	0,2
Материал эмиттера . . .	W<110>, МРФ, Р1
Материал коллектора . . .	Mo, Ni
Внутренний диаметр тепловых труб, мм . . .	20

Расчетные параметры мощностного ряда космических ЯЭУ и их составных частей таковы:

Активная зона ядерного реактора:

диаметр, мм . . .	252	252	352	352	452	524	552	552
высота, мм . . .	300	500	400	600	400	600	500	800
число каналов . . .	12	12	24	24	48	48	72	72
температура поверхности твэлов, К . . .	2270							
удельная мощность, кВт/л . . .	14,7	13,2	13,8	12,9	15,9	15	16,1	15,1

Ядерный реактор:

диаметр, мм . . .	552	552	652	652	752	752	852	852
высота, мм . . .	660	860	760	960	760	960	860	1160
температура корпуса, К . . .	845	870	910	1040	990	1045	950	1050
масса с системой автоматического управления, кг . . .	630	780	1030	1280	1350	1700	1910	2350
тепловая мощность, кВт . . .	220	330	540	750	1020	1440	1920	2880
тепловой к.п.д. . . .	0,72	0,8	0,78	0,85	0,83	0,88	0,83	0,88

Термоэмиссионный генератор:

средний диаметр, мм . . .	770	830	896	956	995	1060	850	1150
длина, мм . . .	680	850	750	920	750	920	850	1150
число электрогенерирующих элементов в ЭГК . . .	2	2	3	4	3	4	3	5
электрическая мощность, кВт . . .	16,6	28,8	44,6	65,3	89,2	130,9	173	268
ток в цепи, кА . . .	2,53	4,12	3,2	5,05	3,2	5,05	4,12	6,63

Космическая ЯЭУ (выходное напряжение 120 В):

электрическая мощность, кВт . . .	11,7	20,1	35	48,8	68,7	100	134	207
максимальный диаметр холодильника-излучателя, мм . . .	1170	1325	1195	2000	2270	2530	2470	3730
длина, мм . . .	3010	4095	5040	6520	7300	8680	7800	13 810
масса, т . . .	1,61	2,05	2,82	3,7	4,4	5,5	6,81	8,2
удельная масса, кг/кВт . . .	157,6	102,4	80,5	75,8	64,5	55	50,7	39,6

Заключение. Таким образом, анализ показывает перспективность дальнейшей углубленной проектно-конструкторской проработки одной из установок мощностного ряда космических ЯЭУ с вынесенным из активной зоны реактора термоэмиссионным генератором на тепловых трубах в диапазоне мощности 20—200 кВт с удельной массой до 35—40 кг/кВт (при электрической мощности 200 кВт) и к.п.д. не менее 7%. Главные особенности предлагаемой схемы (простота конструкции электрогенерирующих модулей, вынесенных за пределы активной зоны; применение освоенной технологии и материалов; возможность селективной сборки; простота в изготовлении цельнометаллического шунтового термоэмиссионного преобразователя; умеренная рабочая температура электрогенерирующих элементов; независимая поэлементная отработка основных узлов) обеспечивают сохранность и компактность активной зоны в аварийных ситуациях и позволяют прогнозировать надежную работу установки в течение 10 лет и более при общем цикле создания 5,5—6 лет и относительно низкой стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. М.: Энергоатомиздат, 1999. 528 с.

2. Евтихин В.А., Чуманов А.Н. Космическая ядерная энергетическая установка. Патент РФ № 2129740 с приоритетом от 28.07.98 г., зарегистрирован 27.04.99 г. 528 с.
3. Чуманов А.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Конструктивные и технологические особенности энергетического модуля КЯЭУ на молибден-литиевых тепловых трубах. Тезисы докл. 2-го Межд. семинара по космической ядерной энергетике XXI века. Обнинск, 19—21 апреля 2000 г., с. 54.

УДК 621.362:537.58

ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ВЫСОКИМИ ВЫХОДНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛ-КИСЛОРОДНОЙ СИСТЕМЫ НА КОЛЛЕКТОРЕ

*Ярыгин Д.В., Миронов В.С., Соловьев Н.П., Тулин С.М., Ярыгин В.И.**(ГНЦ РФ—ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Разработка космических ЯЭУ нового поколения с термоэмиссионными преобразователями тепловой энергии в электрическую, отличительной чертой которых является повышение ресурса работы до 10 лет и более, вызвала необходимость значительного снижения температуры эмиттера (T_3) при сохранении и даже увеличении к.п.д. по сравнению со средне- и высокотемпературными преобразователями ($T_3 = 1750—2000$ К). Достигнутый к настоящему времени уровень выходных электрических характеристик и к.п.д. средне- и высокотемпературных преобразователей может быть представлен с помощью барьерного индекса ($V_6 = 2—2,25$ эВ) — обобщенного показателя эффективности термоэмиссионного преобразователя, включающего основные виды потерь напряжения на коллекторе и при прохождении тока через среду межэлектродного зазора [1—3]. Необходимость снижения температуры эмиттера до ≤ 1600 К связана с понижением барьерного индекса меньше 2 эВ. Чем он ниже, тем более низкой может быть выбрана температура эмиттера и соответственно могут быть использованы новые схемы подвода тепла к эмиттерам преобразователей, такие, как тепловые трубы, жидкометаллический контур охлаждения реактора, для наземных термоэмиссионных энергоустановок — продукты сгорания органического топлива и солнечный нагрев. Таким образом, появляется возможность использования низкотемпературных высокоэффективных термоэмиссионных преобразователей с $V_6 < 2$ эВ в составе электрогенерирующих каналов с вынесенными из активной зоны реактора преобразователями [4]. В них принципиально разделены межэлектродное пространство преобразователя и оболочка твэла, содержащая ядерное топливо с газообразными продуктами деления, и соответственно более убедительно, чем для ЭГК, встроенных в активную зону, может быть обоснована стабильность или допустимое изменение эмиссионно-адсорбционных характеристик электродов и выходных электрических характеристик ЭГК/ЯЭУ в течение назначенного срока службы 10 лет и более. Для отработки конструкции и технологии изготовления таких низкотемпературных ЭГК для космических ЯЭУ или электрогенерирующих систем наземного применения в полной мере может быть использован опыт традиционной электровакуумной технологии классической эмиссионной электроники, обеспечившей в свое время создание радио, генераторных и выпрямительных ламп и систем с ресурсом работы 10 лет и более [5, 6].

Одним из реальных и одновременно перспективных путей увеличения выходных электрических характеристик и к.п.д. (т.е. уменьшения V_6) низкотемпературных термоэмиссионных преобразователей в разрядных режимах работы является использование металл-кислородных систем на коллекторе [7—11].

Анализ результатов исследования металл-кислородных систем на коллекторах термоэмиссионных преобразователей в виде объемных оксидов показывает, что такие системы, несмотря на значительное улучшение эмиссионно-адсорбционных характеристик