

Мощность в рассматриваемых ЯЭУ может быть повышена за счет увеличения числа модулей с едиными отработанными техническими решениями. Это позволит в относительно короткие сроки при готовности новых средств выведения перейти на более высокий уровень электрической мощности. Нарращивание мощности возможно и увеличением числа одновременно работающих АЭС одинаковой размерности. В этом случае легко решается резервирование мощности, покрытие пиковых нагрузок.

В предлагаемой концепции АЭС предусматривается использовать задел и многие технические решения по разрабатываемым космическим ЯЭУ на основе теплового реактора. При этом открывается возможность применения независимо от конкретных условий универсальной конструкции собственно энергетической установки. Это в свою очередь позволяет в наибольшей степени унифицировать разработку планетной АЭС с созданием бортовых ЯЭУ и наиболее экономично построить программу единой унифицированной ядерной энергоустановки космического назначения, что в дальнейшем обеспечит высокий уровень серийности изготовления таких ЯЭУ.

Такая АЭС может быть использована для энергопитания автоматических планетных исследовательских комплексов, баз и производственных комплексов.

УДК 629.19:621.039.578

КОСМИЧЕСКИЕ ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ЯЭУ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ВЫНЕСЕННЫМИ ИЗ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

*Ярыгин В.И., Ионкин В.И., Купцов Г.А., Овчаренко М.К., Ружников В.А.,
Пышко А.П., Михеев А.С., Ярыгин Д.В. (ГНЦ РФ—ФЭИ им. А.И. Лейпунского),
Евстихин В.А., Богущ И.П., Люблинский И.Е., Чуманов А.Н. (ГП «Красная Звезда»)*

В соответствии с Концепцией развития космической ядерной энергетики, которая принята Постановлением правительства № 144 от 2 февраля 1998 г., современные требования ориентируют разработчиков на создание ЯЭУ для транспортных энергетических модулей, обеспечивающих выведение космических аппаратов с помощью электроракетных двигательных установок на высокие геостационарные и геосинхронные орбиты и последующее длительное энергообеспечение бортовых систем космических аппаратов на уменьшенной примерно в 2 раза электрической мощности, и основаны на нескольких базовых положениях: электрическая мощность — 120—150 кВт в транспортном и 50—60 кВт в номинальном (дежурном) режиме, ресурс работы — 7 лет и более (до 10—15), массогабаритные характеристики не должны заметно превышать ~4000 кг при ограничении продольного размера 4—4,5 м. Кроме того, требуется значительно сократить время разработки термоэмиссионных ЯЭУ при одновременном уменьшении финансирования, а также числа реакторных установок, в которых в настоящее время проводятся испытания традиционных ЭГК с совмещенными полостями твэлов и межэлектродного пространства термоэмиссионных преобразователей. Отсюда вытекает практическая невозможность экспериментального подтверждения у таких ЭГК стабильности выходных электрических характеристик в течение требуемого ресурса, а также характеристик собственно термоэмиссионных ЯЭУ.

Для удовлетворения перечисленным требованиям на современном этапе НИОКР, по нашему мнению, следует отказаться от традиционной концепции термоэмиссионных ЯЭУ со встроенными в активную зону ЭГК и приступить к разработке ЯЭУ нового поколения с вынесенными из активной зоны реактора термоэмиссионными электрогенерирующими системами. Такой подход позволит разработчикам разделить задачи создания и испытания собственно реактора и ЭГК, экспериментальное подтверждение ресурсной стабильности выходных электрических характеристик которых возможно в процессе их испытаний на стендах с электронагревом. В принципиальном плане для

выноса тепла из активной зоны реактора в зависимости от характеристик и типа ЯЭУ могут быть использованы либо жидкометаллический контур, либо высокотемпературные тепловые трубы. Однако возможность достижения и сохранения в течение назначенного ресурса термоэмиссионной ЯЭУ требуемых электрических характеристик и к.п.д. будет в значительной мере зависеть от снижения рабочей температуры твэлов и эмиттерной оболочки до ≤ 1700 К при сохранении к.п.д. не ниже 10% (обобщенного показателя эффективности, так называемого барьерного индекса меньше 1,95 эВ), разработки длительно и стабильно работающих высокотемпературных тепловых труб, «мокрой» и «сухой» керамической изоляции при эмиттерной и коллекторной температуре, ядерной и радиационной безопасности установки, успехов в создании холодильников-излучателей нового поколения, складывающихся в режиме транспортировки и раскрывающихся в дежурном режиме.

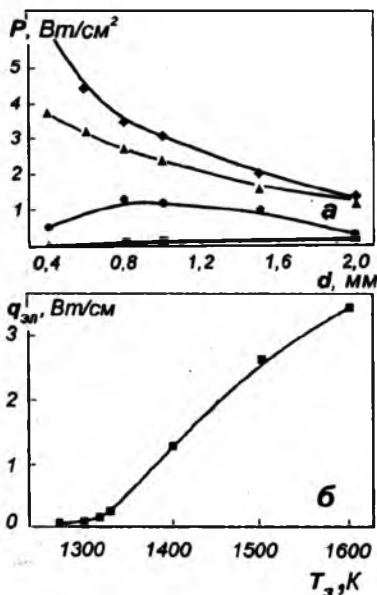
В работе обсуждаются две схемы термоэмиссионных электрогенерирующих систем на молибден-литиевых высокотемпературных тепловых трубах и соответствующая концепция предлагаемой ЯЭУ: на базе низкотемпературного многоэлементного ЭГК с эмиттерной мокрой керамической изоляцией и однодиодного цельнометаллического высокоэффективного электрогенерирующего элемента с шунтовой коммутацией электродов и сухой керамической изоляцией некоторых элементов ЭГК.

Выходные электрические характеристики низкотемпературных термоэмиссионных преобразователей с эффективными электродными материалами. Исследования последних лет различных эмиттерных и коллекторных материалов и рабочего процесса в термоэмиссионном преобразователе с электронагревом, проводимые в ГНЦ РФ—ФЭИ, позволили выбрать эффективные электродные материалы, обеспечивающие получение в низкотемпературных дуговых режимах работы при температуре эмиттера $T_э = 1300$ — 1600 К минимального барьерного индекса $\approx 1,9$ эВ, который соответствует электродному к.п.д. 13% (при $T_э = 1600$ К). Эти электродные материалы получили условное наименование «серия К17». Эмиттеры таких преобразователей формируются на основе вольфрама или молибдена, коллекторы — на основе металл-кислородной системы [1].

Электродная пара К17 содержит модифицированные платиной и ванадием эмиттерные и коллекторные материалы. Ее использование в низкотемпературном термоэмиссионном преобразователе обеспечивает получение выходных электрических характеристик в изотермических и эквипотенциальных дуговых режимах, представленных на рис. 1.

Эффективные электродные материалы и оптимальным образом организованный рабочий процесс в термоэмиссионном преобразователе, поддерживающий неизменный состав межэлектродной рабочей среды, дают новое качество низкотемпературному термоэмиссионному преобразованию тепла в электроэнергию, позволяющее при межэлектродном зазоре 0,6—0,8 мм получать высокий уровень выходных электрических характеристик в традиционных низкотемпературных дуговых режимах. Он является привлекательным для оптимизации характеристик многоэлементного ЭГК, вынесенного из активной зоны реактора, эмиттеры которого нагреваются тепловыми трубами.

Р и с. 1. Зависимость максимальной плотности электрической мощности от межэлектродного зазора при температуре эмиттера 1300 (■), 1400 (●), 1500 (▲), 1600 К (◆), температуре коллектора 830—850 К, оптимальном давлении паров цезия (а) и плотности выходной электрической мощности от температуры эмиттера при температуре коллектора 830—850 К, межэлектродном зазоре 0,8 мм и оптимальном давлении паров цезия (б)



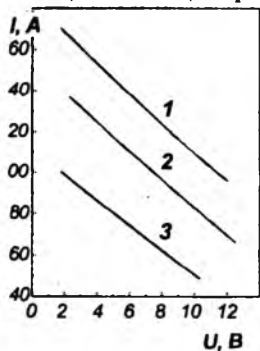
Полученные вольт-амперные характеристики термоэмиссионного преобразователя с электродной парой K17 в диапазоне $T_{\text{э}} = 1250\text{—}1650\text{ К}$, $T_{\text{к}} = 730\text{—}900\text{ К}$, межэлектродного зазора $0,1\text{—}2,5\text{ мм}$, давления цезия $6,5\text{—}6,5 \cdot 10^2\text{ Па}$ позволили провести самосогласованные электрические и тепловые расчеты характеристик ЭГК различных типоразмеров и согласовать их с требованиями, вытекающими из расчета нейтронно-физических характеристик реактора-преобразователя с вынесенными из него термоэмиссионными преобразователями на тепловых трубах. Расчетная оптимизация характеристик ЭГК была ориентирована на генерацию электрической мощности реактора-преобразователя $\sim 120\text{ кВт}$ при выходном напряжении $\sim 125\text{ В}$ в форсированном и $\sim 60\text{ кВт}$ в номинальном длительном режиме работы.

Энергетические характеристики ЭГК и реактора-преобразователя. Рассматривали возможность генерации термоэмиссионным реактором-преобразователем в форсированном режиме выходной электрической мощности около 120 кВт при напряжении 125 В и максимальной температуре эмиттеров не выше 1600 К , а также снижения выходной электрической мощности до 60 кВт при переходе в режим длительного функционирования в варианте с многоэлементными ЭГК, в варианте термоэмиссионного реактора-преобразователя на основе одиодных цельнометаллических сильноточных электрогенерирующих элементов с шунтовой коммутацией электродов — 150 и 50 кВт соответственно при выходном напряжении около 60 В и $T_{\text{э}} \equiv 1673\text{ К}$.

Анализ схем коммутации многоэлементных ЭГК в термоэмиссионном реакторе-преобразователе показал, что этим требованиям могла бы удовлетворять схема, которая состоит из 120 ЭГК, объединенных в восемь параллельных ветвей по 15 последовательно соединенных ЭГК в каждой. С учетом того, что выходное напряжение таких реакторов-преобразователей должно быть 125 В , каждый ЭГК должен работать при среднем напряжении $U_{\text{ЭГК}} = 8,33\text{ В}$. Для обеспечения выходной электрической мощности реактора-преобразователя в форсированном режиме 120 кВт каждый ЭГК в среднем должен генерировать при этом напряжении $\sim 1\text{ кВт}$. Для определения условий, при которых это возможно, были проведены расчетная оптимизация основных геометрических параметров ЭГК и расчет его выходных характеристик и температуры электродов. Основные геометрические параметры ЭГК, которые были выбраны в ходе расчетной оптимизации, таковы:

Длина электрогенерирующей части канала, мм . . .	650
Число электрогенерирующих элементов в ЭГК . . .	20
Длина электрогенерирующего элемента (все элементы равной длины), мм . . .	31
Длина коммутационных промежутков, мм . . .	2
Наружный диаметр эмиттеров, мм . . .	23
Толщина эмиттера, мм . . .	1
Межэлектродный зазор, мм . . .	0,6
Толщина коллектора, мм . . .	1
Суммарная эмиссионная площадь, см^2 . . .	450

Число электрогенерирующих элементов (20) было выбрано таким исходя из необходимости одновременно обеспечить максимальную температуру эмиттеров не выше 1600 К и выходное напряжение ЭГК в рабочей точке $8,33\text{ В}$. Изомощностные вольт-амперные характеристики ЭГК с электродной парой K17 рассчитывали по программе TFEDM [2] при средней температуре коллекторов 850 К , близкой к оптимальной (рис. 2). Давление паров цезия для тепловой мощности $6,2\text{—}9,4\text{ кВт}$ было выбрано постоянным (144 Па) и равным оптимальному $9,4\text{ кВт}$.



Р и с. 2. Изомощностные вольт-амперные характеристики 20-элементного ЭГК с электродной парой K17 при тепловой мощности $9,4$ (1), 8 (2), $6,2\text{ кВт}$ (3), температуре коллектора $\sim 850\text{ К}$ и давлении паров цезия 144 Па

Как следует из рис. 3, требуемая выходная электрическая мощность ЭГК $N_{эл} = 1$ кВт достигается при тепловой мощности около 9,4 кВт и максимальной температуре эмиттеров ~ 1595 К. При этом к.п.д. ЭГК составляет 10,64%.

Рассмотрим другое возможное исполнение термоэмиссионного электрогенерирующего модуля в варианте с резервированием термоэмиссионной электрической мощности. Оно получено при разбиении зоны термоэмиссионного преобразования на две равные части. При этом каждая часть состоит из 120 10-элементных ЭГК половинной длины. Отметим, что размеры электрогенерирующих элементов остаются теми же, что и в базовом 20-элементном варианте исполнения. Конструкция реактора с таким исполнением термоэмиссионного электрогенерирующего модуля предусматривает, что за счет изменения режима работы тепловых труб, подводящих тепло к эмиттерам ЭГК из активной зоны, путем подачи в них неконденсирующегося газа (аргона), т.е. путем перевода в режим газорегулируемых тепловых труб возможна как одновременная работа термоэмиссионных преобразовательных зон ЭГК, так и поочередная каждой из них. В случае одновременной работы обеих термоэмиссионных зон реактор генерирует выходную электрическую мощность ~ 120 кВт при напряжении 125 В, в случае работы одной термоэмиссионной зоны ~ 60 кВт при том же напряжении. Вторая термоэмиссионная преобразовательная зона находится в это время в «теплом резерве» и электрическую мощность не генерирует.

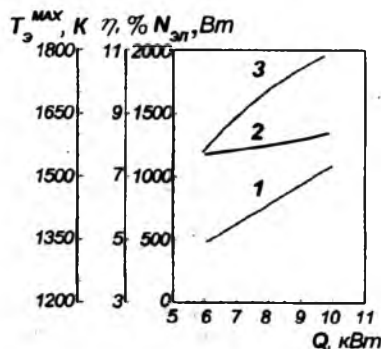
На рис. 4 приведены концептуальные схемы базового варианта 20-элементного ЭГК (рис. 4, а) и две схемы 10-элементного ЭГК с резервированием термоэмиссионной электрической мощности: в варианте двух параллельно соединенных 10-элементных ЭГК внутри одного корпуса (рис. 4, б) и в возможном варианте компоновки с размещением термоэмиссионных 10-элементных ЭГК в преобразовательных блоках по разные стороны активной зоны реактора-преобразователя, но на одних и тех же высокотемпературных тепловых трубах (рис. 4, в)

Расчетные выходные электрические, тепловые характеристики термоэмиссионного электрогенерирующего модуля и соответственно термоэмиссионного реактора-преобразователя являются, по нашему мнению, наиболее привлекательными: при температуре эмиттера ~ 1600 К (низкотемпературный режим) к.п.д. равен 10,6%. Они значительно превосходят характеристики традиционного ЭГК, встроенного в активную зону, благодаря следующим отличительным особенностям:

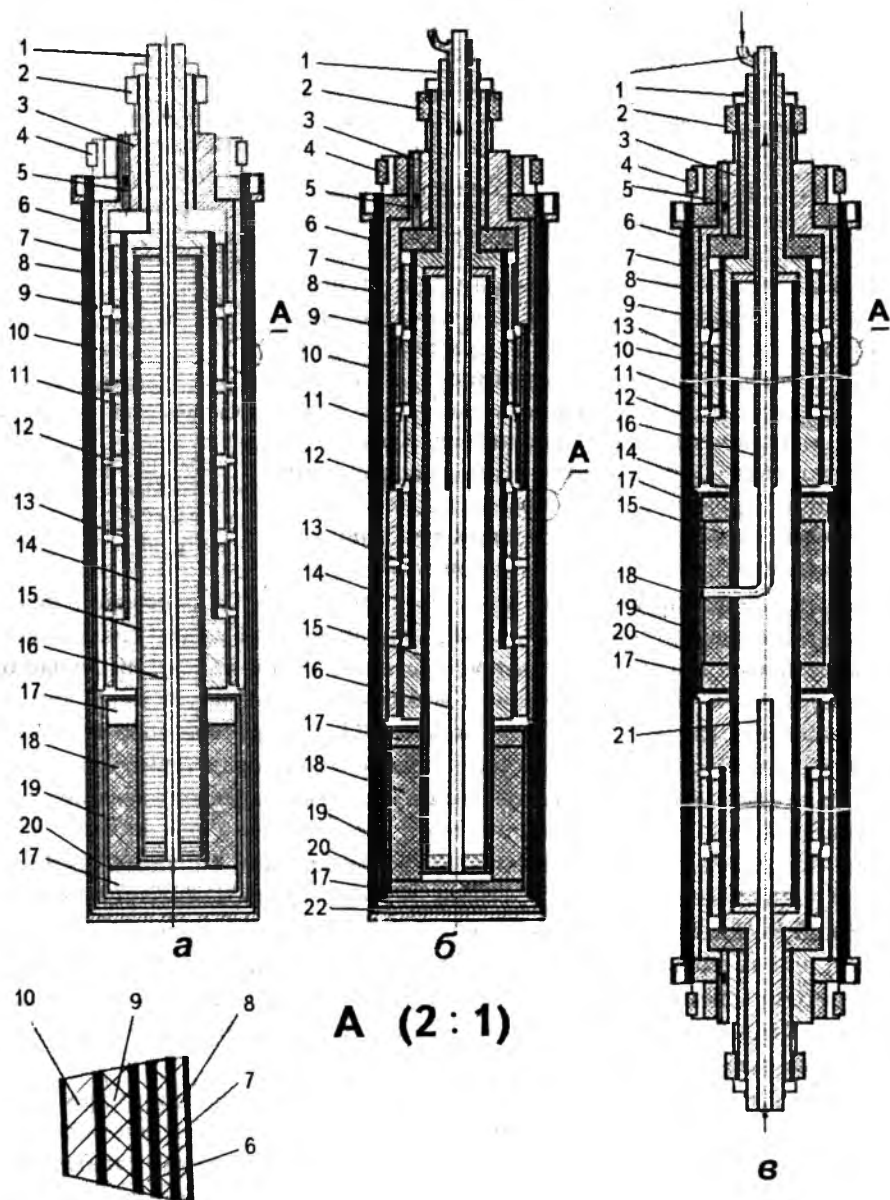
использованию эффективных электродных материалов, обеспечивающих низкотемпературный дуговой режим работы с барьерным индексом 1,9 эВ, в свою очередь соответствующим электродному к.п.д. 13% (без тепловых и электрических потерь в электродах и коммутации);

высокой изотермичности электродов с оптимизированными коммутационными тепловыми и электрическими потерями (оптимизированный выбор длины, толщины электрогенерирующих элементов, коммутационной межэлектродной перемычки и др.);

компенсации собственного магнитного поля в результате использования катодного обратного токовывода, обеспечивающего равномерное распределение давления цезия вдоль относительно длинной рабочей части ЭГК и соответственно равномерное распределение плотности тока по всей рабочей поверхности ЭГК.



Р и с. 3. Зависимость выходной электрической мощности 20-элементного ЭГК (1), максимальной температуры эмиттеров (2) и к.п.д. (3) от тепловой мощности при напряжении $U_{\text{ЭГК}} = 8,33$ В ($T_{\text{к}} = 850$ К, $P_{\text{Сз}} = 144$ Па)



Р и с. 4. Концептуальная схема различных вариантов исполнения термоэмиссионного электрогенерирующего модуля: 1, 3 — катодный и анодный токовывод соответственно; 2 — металлочермический узел («горячий» гермоввод); 4 — «холодный» гермоввод; 5 — подача паров цезия; 6 — охранный электрод; 7 — сухая коллекторная керамическая изоляция; 8 — электрически нейтральный корпус; 9, 13 — мокрая коллекторная и эмиттерная керамическая изоляция соответственно; 10 — коллектор; 11 — эмиттер; 12 — межэлектродная коммутация электрогенерирующего элемента; 14 — высокотемпературная молибден-литиевая тепловая труба; 15 — фитиль высокотемпературной тепловой трубы (капиллярно-пористая структура); 16 — тракт вывода газообразных осколков деления; 17 — отражатель; 18 — кольцевой твэл; 19 — оболочка твэла; 20 — экранно-вакуумная изоляция твэла; 21 — тракт подачи неконденсирующегося газа (аргона) в газорегулируемую высокотемпературную тепловую трубу; 22 — торцевая керамическая изоляция

Здесь наиболее привлекательным, с нашей точки зрения, является исполнение термоэмиссионного электрогенерирующего модуля и соответственно реактора-преобразователя с резервированием термоэмиссионной электрической мощности. Для этого варианта исполнения расчетным путем установлено, что:

схема коммутации ЭГК в составе реактора-преобразователя должна включать четыре параллельные ветви по 30 последовательно соединенных ЭГК (всего 120 ЭГК);

параметры рабочей точки среднего ЭГК ($T_3^{\max} = 1595\text{—}1600\text{ К}$, $T_k = 850\text{ К}$, $P_{Cs} = 144\text{ Па}$, межэлектродный зазор 0,6 мм) таковы: напряжение 4,17 В, ток 120 А, электрическая мощность 500 Вт при тепловой мощности 4,7 кВт и к.п.д. 10,64%;

тепловая мощность всех ЭГК в форсированном режиме 1128 кВт, в режиме длительного функционирования — 564 кВт.

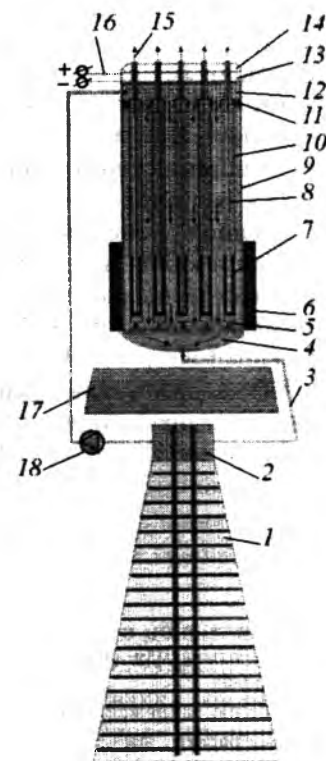
Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль с многоэлементными ЭГК и реактор-преобразователь. Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль (см. рис. 4) представляет собой функционально завершенную часть активной зоны реактора с системой преобразования тепловой энергии в электрическую, размещенной на молибден-литиевой высокотемпературной тепловой трубе и вынесенной за пределы активной зоны.

Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль входит в состав реактора-преобразователя, являющегося одним из основных функциональных элементов космической ЯЭУ (рис. 5).

Тепло преобразуется в электричество внутри общего силового корпуса реактора, через который прокачивается натрий-калиевый теплоноситель из жидкометаллического контура охлаждения с помощью МГД-насоса, в котором непреобразованное тепло с помощью теплообменника отводится холодильником-излучателем панельного типа на тепловых трубах с калиевым рабочим телом. Теневая радиационная защита ослабляет излучение реактора до безопасного уровня, обеспечивающего длительное существование систем космического аппарата.

Рассматриваемый вариант предполагает использование быстрого реактора. Как показали нейтронно-физические расчеты, он допускает широкую вариацию геометрических параметров активной зоны в зависимости от числа термоэмиссионных электрогенерирующих модулей: 61, 91, 127, 169, 217. Управляющими параметрами нейтронно-физических характеристик реактора являются диаметр высокотемпературной тепловой трубы и радиальные размеры кольцевого твэла при заданной высоте активной зоны.

В качестве примера, подтверждающего основные предлагаемые технические решения, рассмотрим реактор, содержащий 120 термоэмиссионных электрогенерирующих модулей. Кольцевой твэл в составе термоэмиссионного электрогенерирующего модуля содержит делящуюся топливную композицию из нитрида урана высокого обогащения (90% ^{235}U) с элементами торцевых отражателей из оксида бериллия. Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль содержит электроизоляцию и экранно-вакуумную изоляцию, а также высокотемпературную тепловую трубу диаметром 18 мм (внутренний диаметр 16 мм), испарительная зона которой погружена в активную зону реактора на полную высоту.



Р и с. 5. Принципиальная теплогидравлическая схема космической ЯЭУ с реактором на основе термоэмиссионных электрогенерирующих модулей с многоэлементными ЭГК: 1 — холодильник-излучатель; 2 — теплообменник; 3 — контур охлаждения с жидкометаллическим теплоносителем; 4, 12 — входной и выходной коллектор жидкометаллического контура соответственно; 5 — подпятник; 6 — боковой отражатель; 7 — кольцевой твэл; 8 — высокотемпературная тепловая труба; 9 — силовой корпус реактора; 10 — ЭГК в зоне конденсации высокотемпературной тепловой трубы; 11 — трубная доска; 13 — коммутационная камера; 14 — цезиевая камера; 15 — тракт вывода газообразных продуктов деления; 16 — выходные клеммы термоэмиссионного реактора-преобразователя; 17 — радиационная защита; 18 — МГД-насос

Наружный размер корпуса термоэмиссионного электрогенерирующего модуля, достаточный по условию необходимого исходного запаса реактивности, определен из серии нейтронно-физических расчетов реактора с варьированием диаметра модуля при постоянной высоте активной зоны 50 см и числе модулей 120. Оценка критических параметров реактора проведена методом Монте-Карло [3] в гетерогенной расчетной модели с детальным представлением конструктивных элементов модуля и реактора в целом.

Конструктивная схема собственно реактора традиционна для быстрых реакторов с замедляющим отражателем и включает рабочие органы системы управления защиты поворотного типа, активные средства безопасности (стержни безопасности) для компенсации положительного гипотетического водородного эффекта реактивности, связанного с заполнением реактора водой.

Активная зона содержит 120 термоэмиссионных электрогенерирующих модулей диаметром 32 мм (шаг треугольной решетки 33 мм). Толщина корпуса активной зоны 3 мм, бокового отражателя из бериллия 11 см с 12 рабочими органами СУЗ поворотного типа. Основные характеристики реактора, обеспечивающего генерацию 120 кВт электрической мощности, следующие:

Активная зона:	
загрузка ^{235}U , кг . . .	173,4
эффективный диаметр, см . . .	39
высота, см . . .	50
объем, л . . .	60
диаметр корпуса, см . . .	43,6
Наружный диаметр бокового отражателя, см . . .	66
Высота торцевых отражателей, см . . .	10
Реактор:	
эффективный коэффициент размножения нейтронов . . .	1,06
масса, включая термоэмиссионные модули, кг . . .	900—1000

Литиевые высокотемпературные тепловые трубы подводят тепло от оболочки кольцевого твэла к эмиттерам ЭГК. В данной конструкции использованы классические цилиндрические тепловые трубы с расположением фитиля вдоль их стенок. Конструкционным материалом тепловых труб может служить молибден или его сплавы. Технология заполнения тепловых труб литием использует опыт ГНЦ РФ—ФЭИ и ГП «Красная Звезда» [4, 5].

Система отвода тепла от корпуса термоэмиссионного электрогенерирующего модуля к радиатору (холодильнику-излучателю) реализована по одноконтурной циркуляционной схеме (см. рис. 5). В качестве теплоносителя выбран эвтектический сплав натрия и калия вследствие его низкой температуры плавления и наибольшей технологической проработанности. Кроме того, в ГНЦ РФ—ФЭИ имеется опыт эксплуатации космических ЯЭУ «Бук» и «Топаз» с этим теплоносителем. В качестве холодильника-излучателя использован теплотрубный радиатор-излучатель панельного типа.

Основные технические характеристики отдельных систем энергоустановки и ЯЭУ в целом следующие:

	Вариант 1		Вариант 2	
	(базовый)		(с резервированием)	
	Режим			
	форсированный	номинальный	форсированный	номинальный
Параметры режима				
Мощность, кВт:				
вырабатываемая электрическая . . .	120	60	120	60
тепловая . . .	1200	750	1200	600
Выходное напряжение, В . . .	125	125	125	125
Время работы, лет . . .	До 1	Не менее 6	До 1	Не менее 6
				каждого блока

Максимальная температура эмиттера, К . . .	1595	1400	1600	1600
Электродная пара материалов . . .		K17		
Межэлектродный зазор, мм . . .		0,6		
Поглощенная доза:				
по нейтронам ($E > 0,1$ МэВ), см ⁻² . . .		$1 \cdot 10^{12}$		
по γ -квантам, рад . . .		$1 \cdot 10^6$		
Расстояние между реактором и защищаемым объектом, м . . .		Не более 24		
Температура излучающей поверхности панелей холодильника-излучателя, К . . .		Не менее 800		
		Массогабаритные характеристики		
Площадь излучающей поверхности (при одностороннем сбросе тепла), м ² . . .		Не более 70		
Габариты, м, не более:				
в транспортном положении				
максимальный диаметр . . .		2		
максимальная длина . . .		4,5		
Габариты, м, не более:				
в рабочем положении				
максимальный диаметр . . .		3		
максимальная длина . . .		13		
Масса, кг, не более:				
реакторный блок (с ЭГК и топливом) . . .		1000		
радиационная защита . . .		635		
система отодвижения + электри- ческие кабели . . .		735		
теплоноситель циркуляционного контура . . .		150		
МГД-насос циркуляционного контура . . .		100		
трубопроводы циркуляционного контура . . .		100		
холодильник-излучатель (с теплооб- менником, панелями, рабочим телом и трубами) . . .		830		
крепежные элементы (рама, кронш- тейны и др.) . . .		200		
Всего		3750		

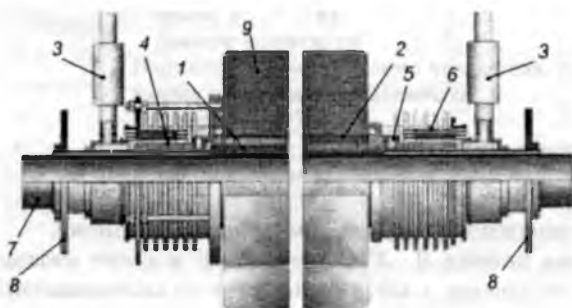
Технология изготовления многослойных элементов Ме—керамика—Ме на эмиттерах и Ме—керамика—Ме—керамика—Ме на коллекторах термоэмиссионных электрогенерирующих модулей основана на согласованном по коэффициенту линейного расширения сцеплении слоев, полученном при газостатическом обжиге, вакуумной пайкой разнородных слоев или комбинацией этих методов. Она во многом аналогична известной технологии [6]. В ней найдены технические решения изготовления многослойных систем с мокрой и сухой керамической электроизоляцией на основе Al_2O_3 при более высокой, чем в нашем случае, температуре 1770 К.

Термоэмиссионный энергетический модуль на базе однодиодного цельнометаллического электрогенерирующего элемента с шунтовой коммутацией электродов и реактор-преобразователь. Несмотря на привлекательность использования многоэлементного ЭГК в составе термоэмиссионного электрогенерирующего модуля и реактора-преобразователя, в настоящее время нет в полном объеме технологии изготовления

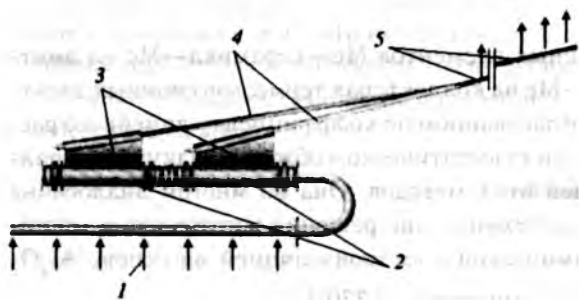
трехслойного пакета Ме—керамика—Ме для эмиттеров и пятислойного пакета Ме—керамика—Ме—керамика—Ме для коллекторов [6]. Очевидно, что эта сложная технологическая задача может и будет несомненно решена в ближайшее время, особенно для низкотемпературных ЭГК с $T_g \leq 1600$ К.

Однако уже сейчас концепция реактора-преобразователя с вынесенными из активной зоны термоэмиссионными преобразователями на молибден-литиевых тепловых трубах близка к возможности ее практической реализации и соответственно к отработке нового поколения космических ЯЭУ в целом при использовании упрощенного за счет отказа от керамической изоляции на электродах термоэмиссионного энергетического модуля на основе одноэлементных электрогенерирующих элементов с металлической шунтовой коммутацией электродов [7].

На рис. 6 приведена конструктивная схема такого модуля, в состав которого входят два параллельно соединенных электрогенерирующих элемента, размещенных на одной (общей) высокотемпературной тепловой трубе. Особенностью таких одноэлементных электрогенерирующих элементов является использование в качестве межэлектродной электрической изоляции между коаксиальными эмиттером и коллектором металлического шунта (сильфона), электрическое сопротивление которого в 10—15 раз превышает сопротивление межэлектродной среды (цезиевой низкотемпературной плазмы) при зажигании между электродами низковольтного дугового разряда.



Р и с. 6. Конструктивная схема коаксиального шунтового термоэмиссионного преобразователя с коническими электродами: 1 — эмиттер; 2 — коллектор; 3 — цезиевый термостат; 4 — втулка; 5 — керамический штифт; 6 — металлический шунт; 7 — молибден-литиевая высокотемпературная тепловая труба; 8 — катодный токовывод; 9 — токовывод и анодный излучатель



Р и с. 7. Конструктивная схема модуля преобразователя: 1 — испарительная зона молибден-литиевой тепловой трубы, расположенная в активной зоне реактора; 2 — термоэмиссионный преобразователь; 3, 4 — тепловые трубы коллекторов и холодильника-излучателя соответственно; 5 — секция холодильника-излучателя

На рис. 7 показана схема преобразовательного модуля в целом. Он предназначен для использования в космических ЯЭУ, все системы теплоподвода и теплоотвода которой построены на тепловых трубах и в которой удалось отказаться от жидкометаллического контура охлаждения реактора и теплообменника между контуром и тепловыми трубами холодильника-излучателя [8]. Базовым элементом таких модулей и реактора-преобразователя является собственно электрогенерирующий элемент, разработка которого значительно продвинута по сравнению с многоэлементными ЭГК. К настоящему времени удалось изготовить несколько опытных образцов электрогенерирующих элементов (1/2 модуля, макет которого показан на рис. 6). В качестве электродной пары в нем использована платина на эмиттере и никель на коллекторе. Согласно исследованиям [1], экспериментальные вольт-амперные характеристики с платино-никелевыми электродами обеспечивают получение барьерного индекса 2 эВ, соответствующего электродному к.п.д. (без тепловых и омических потерь в электродах) на уров-

не 11% при $T_g \cong 1600$ К и 15% при $T_g \cong 1800$ К. Предварительные экспериментальные результаты испытаний такого электрогенерирующего элемента, проведенные специалистами ГП «Красная Звезда», подтвердили правильность конструкторско-технологических решений. Поскольку экспериментальные исследования продолжаются, приведем ожидаемые результаты, которые рассчитаны на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторном термоэмиссионном преобразователе с платиноникелевой электродной парой [1] для рабочих условий экспериментального модуля с электрогенерирующим элементом (1/2 модуля, макет которого показан на рис. 6) по методике [2]. Здесь в качестве исходных данных для расчета были приняты следующие геометрические размеры:

Длина электродов, мм . . .	200
Диаметр эмиттера, мм . . .	33 (средний диаметр, так как форма электродов коническая)
Межэлектродный зазор, мм . . .	0,2
Толщина эмиттера, мм . . .	3
Толщина коллектора, мм . . .	4,5 (из них 1,5 мм молибден, 3 мм сетка из нержавеющей стали, пропитанная калием)
Эмиссионная площадь эмиттера, см^2 . . .	207,2

Расчетные ожидаемые выходные энергетические характеристики одноэлементного электрогенерирующего элемента таковы:

Плотность тока, А/см^2 . . .	3	5	5	7
Напряжение термоэмиссионного преобразователя, В . . .	0,65	0,61	0,6	0,56
Выходное напряжение, В . . .	0,47	0,32	0,28	0,15
Ток утечки через шунты, А . . .	94,7	63,2	55,4	30
Электрический ток, А . . .	527,3	973	1085	1420
Выходная электрическая мощность, кВт . . .	0,25	0,31	0,3	0,21
Подводимая тепловая мощность, кВт . . .	3,3	4,4	4,5	5,4
К.п.д., % . . .	7,58	7,03	6,67	3,92

Для расчета были использованы экспериментальные вольт-амперные характеристики лабораторного термоэмиссионного преобразователя для межэлектродного зазора 0,3 мм и $T_g = 1673$ К. Давление цезия выбиралось оптимальным для экспериментальных данных [1]. Температура коллектора также выбиралась оптимальной и равной 923 К. Сопротивление коммутационного переходника между электродами при соединении их между собой и выходными клеммами термоэмиссионного энергетического модуля в первом приближении равно $0,5 \cdot 10^{-3}$ Ом, далее оптимизируем его расчетным путем. Межэлектродное эмиттер—коллектор шунтовое сопротивление, в нашем случае сопротивление сильфона, является постоянным и равным 10^{-2} Ом.

Оптимизационные расчеты электрических и тепловых характеристик термоэмиссионного энергетического модуля для термоэмиссионного реактора-преобразователя выходной электрической мощностью 150—200 кВт показали, что число таких модулей и соответственно твэлов в активной зоне реактора должно составлять 112 электрически последовательно соединенных электрогенерирующих элементов. На рис. 8 показана одна из возможных конструктивных схем таких космических ЯЭУ.

Здесь очевидна необходимость выбора оптимальной по тепловым и электрическим потерям металлической коммутации между электрогенерирующими элементами и выходными клеммами модуля R_k , а также электрической схемы коммутации электрогенерирующих элементов внутри модуля и модулей между собой в реакторе-преоб-

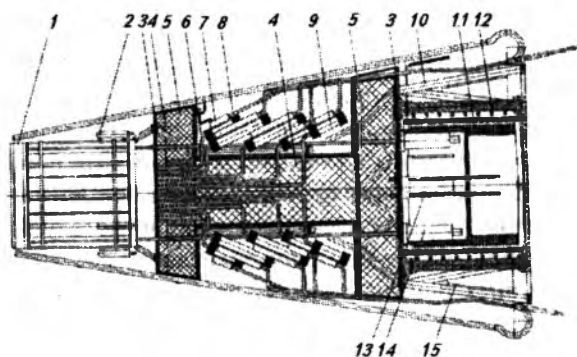


Рис. 8. Пример конструктивной схемы космической ЯЭУ:

1 — реактор; 2 — пусковая ионизационная камера; 3 — кожух теплосброса; 4 — защита; 5 — радиационная защита (LiH); 6—8 — тепловая труба горячая, средняя, холодная соответственно; 9 — электрогенерирующий элемент; 10 — рама; 11 — токопровод пусковой ионизационной камеры; 12 — пантограф; 13, 14 — привод стержней безопасности и отражателей соответственно; 15 — балластник

характеристики такого реактора, содержащего 112 последовательно соединенных модулей, внутри которых последовательно соединены по три электрогенерирующих элемента, следующие:

Плотность тока, А/см ² . . .	7	7
Сопротивление коммутационной перемычки между электрогенерирующими элементами R_k , Ом . . .	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
Выходное напряжение, В . . .	147,5	135
Выходная электрическая мощность, кВт . . .	210	185
Тепловая мощность, кВт . . .	2016	1934
К.п.д., % . . .	9,97	9,58

Видно, что уже при использовании трехэлементного последовательного соединения электрогенерирующих элементов в модуль на одной тепловой трубе электрическая мощность и выходное напряжение реактора соответственно ~ 185 кВт и ~ 135 В близки к желаемым, при этом ожидаемый к.п.д. достигает 9,6%. Очевидно, что дальнейшее расчетное увеличение к.п.д. и энергетических характеристик будет связано с выбором более эффективной, чем платино-никелевая, электродной пары, оптимизацией размеров электрогенерирующих элементов и коммутационных, тепловых и электрических потерь, оптимизацией электрической схемы коммутации электрогенерирующих элементов в модулях, а модулей в реакторе-преобразователе в условиях повышенного в 7—10 раз по сравнению с многоэлементными ЭГК тока (до уровня ~ 1400 А), а также выбором способов электрической изоляции элементов и модулей, находящихся под электрическим потенциалом электрогенерирующих элементов, массы космического аппарата. Однако на текущем этапе «наземной» отработки реактора-преобразователя такая плата является оправданной в связи со значительным упрощением собственно электрогенерирующих элементов и термоэмиссионного энергетического модуля. Основные характеристики космической ЯЭУ с таким реактором-преобразователем следующие:

Число твэлов . . .	112
Число рабочих органов системы управления и защиты . . .	12
Число стержней безопасности . . .	4
Эффективный диаметр активной зоны, см . . .	51
Высота активной зоны, см . . .	60
Загрузка ^{235}U , кг . . .	28,5
Диаметр корпуса активной зоны, см . . .	61,8

разователе. Расчетные оценки показали, что размещение одного или двух параллельно соединенных электрогенерирующих элементов на одной высокотемпературной тепловой трубе для выходной электрической мощности реактора ~ 150 кВт не позволило получить выходное напряжение выше 60 В. Для удовлетворения современным требованиям термоэмиссионного реактора-преобразователя с выходным напряжением ~ 125 В потребовалось разместить электрогенерирующие элементы внутри модуля на тепловой трубе через сухую керамическую электроизоляцию и соединить их между собой последовательно. Расчетные выходные энергетические ха-

Масса реактора, кг . . .	1120
Эффективный коэффициент размножения нейтронов . . .	1,06
Мощность, кВт:	
вырабатываемая электрическая . . .	185
тепловая . . .	1934
Выходное напряжение, В . . .	135
Ресурс, лет . . .	Не менее 10
Максимальная температура эмиттера, К . . .	1673
Электродная пара материалов . . .	Pt—Ni
Межэлектродный зазор, мм . . .	0,3
Поглощенная доза:	
по нейтронам ($E > 0,1$ МэВ), см ⁻² . . .	$1 \cdot 10^{12}$
по γ -квантам, рад . . .	$1 \cdot 10^6$
Расстояние между реактором и защищаемым объектом, м . . .	Не более 25
Температура излучающей поверхности холодильника- излучателя, К . . .	920
Площадь излучающей поверхности (при двухстороннем сбросе тепла), м ² . . .	40
Габариты, м, не более:	
в транспортном положении:	
максимальный диаметр . . .	2,4
максимальная длина . . .	4
в рабочем положении:	
максимальный диаметр . . .	3,5
максимальная длина . . .	7,8
Масса, кг:	
реакторный блок (с топливом) . . .	1120
радиационная защита . . .	1600
экран-излучатель . . .	150
термоэмиссионный генератор . . .	1069
молибден-литиевые высокотемпературные тепловые трубы . . .	280
холодильник-излучатель . . .	318
система отодвижения . . .	372
рама . . .	70
соединительная шина . . .	22
теплоизоляция . . .	120
приводы . . .	35
система автоматического управления . . .	100
Всего . . .	5256

Анализ данных показывает высокую степень готовности в части как экспериментальной и технологической отработки и изготовления электрогенерирующих элементов, высокотемпературных молибден-литиевых тепловых труб, среднетемпературных ванадий-калиевых тепловых труб, элементов активной зоны и др., так и системной оптимизации при проведении проектных исследований и разработки космической ЯЭУ для практической верификации концепции реактора-преобразователя с вынесенной из активной зоны реактора термоэмиссионной системой преобразования энергии.

Выводы. Анализ возможности разработки космической ЯЭУ нового поколения с термоэмиссионным реактором-преобразователем на основе термоэмиссионных модулей с молибден-литиевыми высокотемпературными тепловыми трубами с рабочей температурой в диапазоне 1600—1673 К в вариантах исполнения с одно- и многоэлементными термоэмиссионными электрогенерирующими элементами/электрогенерирующими каналами, вынесенными из активной зоны, показали, что современное состояние термоэмиссионной элементной базы, технологии изготовления тепловых труб и металллокерамических узлов для электродных систем, а также уровень текущих разработок быстрых реакторов с жидкометаллическим контуром охлаждения и компактной радиационной защитой, ядерной безопасности отвечает ожиданиям разработчиков космических ЯЭУ нового поколения на создание новой техники со значительно улучшенными показателями по ресурсу до 10—15 лет и массогабаритным характеристикам для транспортных энергетических модулей.

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;