

КОНЦЕПЦИЯ ТЕРМОЭМИССИОННОГО РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ИСПАРИТЕЛЬНЫМ ПЕРЕНОСОМ ТЕПЛА

П.А. Алексеев, Г.Э. Лазаренко, В.А. Линник, А.П. Пышко

АО «ГНЦ – РФ ФЭИ»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



В результате проведенного аналитического исследования конструкций термоэмиссионных реакторов-преобразователей выделено четыре группы технических решений, различающихся по способу передачи тепла от топлива к эмиттерам термоэмиссионного преобразователя: с прямой внутризонной передачей (совмещение оболочки твэлов с эмиттером) и три с вынесенными из активной зоны термоэмиссионными преобразователями, в которых вынос тепла осуществляется либо тепловыми трубами (общими или индивидуальными для каждого твэла), или же организован по принципу паровой камеры.

Рассмотрены достоинства и недостатки каждого из перечисленных способов. Показано, что на сегодня наиболее проработанным вариантом исполнения остается вариант с внутризонным преобразованием энергии, а в перспективе – на основе паровой камеры, поскольку в нем исключены попадание газообразных продуктов деления в межэлектродный зазор и влияние распухания топлива на величину межэлектродного зазора. В этом варианте обеспечивается постоянство температуры и плотности теплового потока на поверхности всех эмиттеров термоэмиссионных преобразователей, что позволяет выбрать для них оптимальную рабочую точку.

Разработана модель термоэмиссионного реактора-преобразователя с паровой камерой, содержащей активную зону и зону термоэмиссионных преобразователей, в которой твэл активной зоны и электрогенерирующие каналы термоэмиссионного преобразователя пространственно разделены, покрыты капиллярно-пористой структурой и соединены между собой сотовой капиллярно-пористой проставкой для возврата жидкометаллического теплоносителя и пропуска его пара.

Нейтронно-физический расчет показал возможность осуществления кампании реактора продолжительностью свыше десяти лет с соблюдением правил ядерной безопасности при нанесении покрытия из оксида гадолиния на поверхность твэлов и корпус реактора в районе активной зоны.

Оценка теплоэлектрофизических характеристик показывает, что благодаря постоянству температуры и плотности теплового потока на поверхности всех эмиттеров и оптимизации процесса преобразования энергии для всех термоэмиссионных преобразователей можно рассчитывать на предельную величину КПД в 20%.

Ключевые слова: термоэмиссионный реактор-преобразователь, паровая камера, продолжительность кампании, конструктивные схемы.

ВВЕДЕНИЕ

Основной период интенсивного развития направления прямого преобразования приходится на 1960 – 1980 гг., когда осуществлялись амбициозные проекты ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для энергоснабжения космических аппаратов, выводимых на низкие орбиты для ведения радиолокационной разведки. Всего было выведено два аппарата с ЯЭУ на основе термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП) ТОПАЗ и 32 ЯЭУ с термоэлектрическим электрогенератором БУК.

Последующие работы в этом направлении ввиду отсутствия должного финансирования не были доведены до стадии лётно-космических испытаний, но поиски оптимальных форм ТРП и его систем продолжают по настоящее время. С момента разработки ТРП ТОПАЗ было предложено несколько принципиально отличных конструктивно-компоновочных решений, направленных на увеличение рабочего ресурса ТРП за счет разнесения в пространстве оболочек твэлов и эмиттеров термоэмиссионного преобразователя (ТЭП). Такие технические решения исключают влияние деформации твэлов вследствие распухания топлива на величину межэлектродного зазора ТЭП, ведущего к короткому замыканию и выходу ТРП из строя.

Целью работы является сравнение технических характеристик ТРП при различных вариантах исполнения, отличающихся по способу передачи тепла от топлива к эмиттерам термоэмиссионного преобразователя (кондуктивный, излучением или испарительно-конденсационный). Охлаждение коллекторов ЭГК во всех вариантах осуществляется конвекцией жидкометаллического теплоносителя (ЖМТ).

КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ РЕАКТОРОВ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Конструктивно-компоновочные схемы вариантов исполнения ТРП представлены на рис. 1. Они соответствуют четырём вариантам переноса тепла от твэлов к эмиттерам электрогенерирующих каналов (ЭГК):

- традиционная кондуктивная (оболочка твэла несет функцию эмиттера термоэмиссионного преобразователя) [1, 2];
- теплотрубная с отдельным размещением тепловых труб (ТТ) и твэлов в высокотеплопроводной матрице (испарительная) [3, 4];
- теплотрубная с размещением ТТ в полости твэлов или непосредственно на их стенке (испарительная) [5, 6];
- с размещением твэлов и ЭГК в паровой камере (испарительная) [7, 8].

Рассмотрим особенности приведенных конструктивно-компоновочных схем.

Традиционная схема (рис. 1а) с кондуктивным переносом тепла от топлива к эмиттирующей поверхности через чехол твэла (оболочка твэла несет функцию эмиттера ТЭП). В данном типе ТРП реализована концепция внутризонного размещения ТЭП. Твэл является составной частью ЭГК.

Вследствие совмещения функций конструктивных элементов достигается высокая компактность ТРП при низкой удельной массе. ЭГК размещены между трубными досками в герметичном корпусе, заполненном ЖМТ, подводимым по напорному патрубку и отводимым через сливной (по типу кожухотрубного теплообменника). За трубными досками размещены коммутационные камеры, в которых размещены токоподводы ЭГК и отводы цезиевой системы. Снаружи корпуса активная зона окружена отражателем. Было разработано два варианта ТРП такого типа – с одноэлементным ЭГК (ТРП ЭНИСЕЙ) [2] и многоэлементным ЭГК (ТРП ТОПАЗ) [1]. Одноэлементный ЭГК позволяет организовать отвод газообразных продуктов деления (ГПД)

минуя межэлектродный зазор (МЭЗ), многоэлементный обеспечивает большее выходное напряжение за счет последовательно включенных ТЭП.

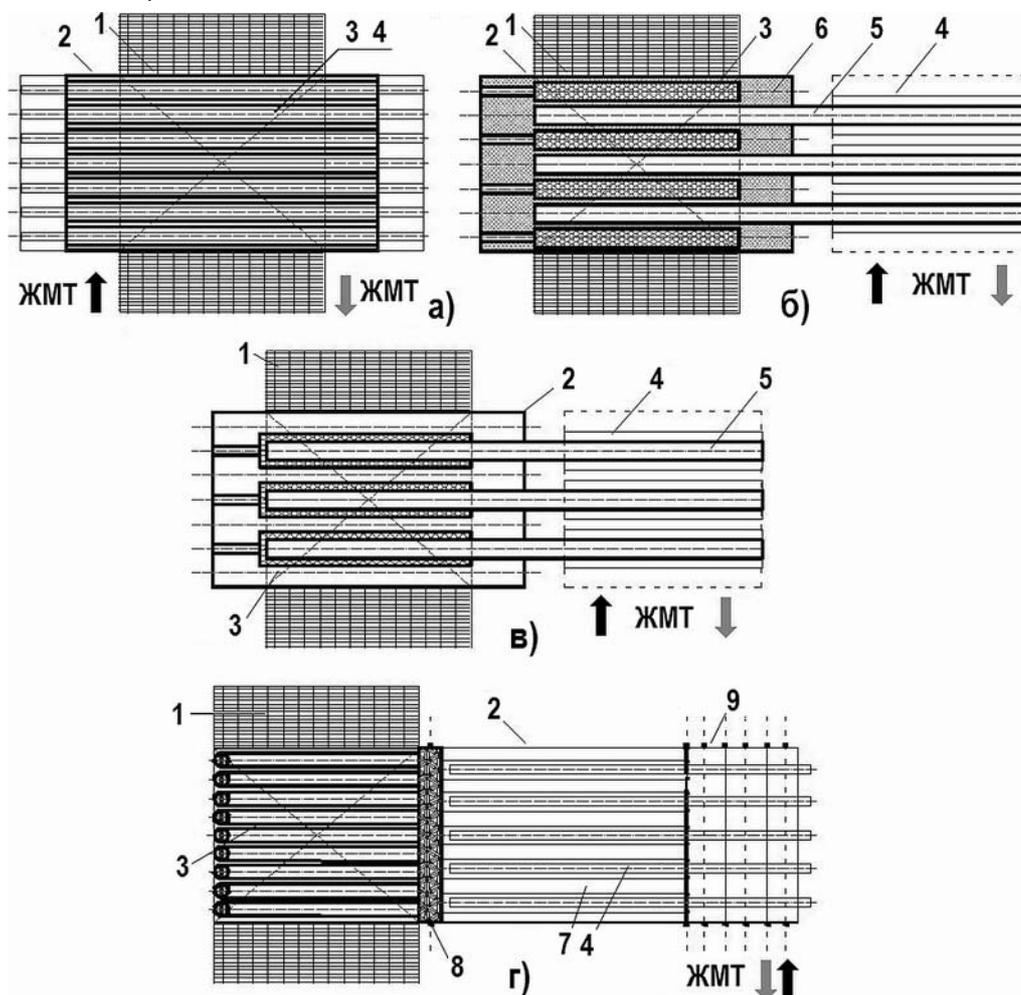


Рис. 1. Конструктивно-компоновочные схемы вариантов исполнения ТРП: а) – типа «ТОПА3»; б) – типа «SAFE-300»; в) – типа «ЭЛЬБРУС»; г) – по принципу паровой камеры. Обозначения: 1 – отражатель, 2 – корпус реактора, 3 – твэлы, 4 – ЭГК, 5 – тепловая труба, 6 – высокотеплопроводная матрица, 7 – паровая камера, 8 – сотовая перегородка из капиллярно-пористого материала, 9 – блок коллекторов и коммутационных камер

Теплотрубная конструкция с раздельным размещением ТТ и твэлов в высокотеплопроводной матрице [3, 4] первоначально была предложена для ТРП на основе двигателя Стирлинга SAFE-300 с последующей заменой на термоэлектрический преобразователь, и только затем ввиду низкого КПД термоэлектрического преобразователя был рассмотрен вариант с ТЭП (рис. 1б). Конструкция реактора обеспечивает устойчивый теплоотвод от каждого твэла при выходе из строя части ТТ за счет перераспределения теплового потока от оболочек твэлов по высокотеплопроводной матрице к действующим ТТ. Тепловой контакт между матрицей, твэлами и ТТ предполагалось обеспечить пайкой, что приемлемо для исходного варианта с двигателем Стирлинга, однако переход к ТЭП, сопровождающийся существенным ростом рабочей температуры, в настоящее время недостаточно технологически проработан, и устойчивость по отношению к термомеханическим нагрузкам требует обоснования.

Теплотрубная конструкция ТР с размещением ТТ в полости твэлов или непос-

редственно на их стенке (испарительная) была предложена в проекте «Эльбрус» [5, 6] (рис. 1в). Активная зона ТРП набрана из кольцевых твэлов, размещенных на внешней поверхности литиевых ТТ, которые отводят тепло к сборке ЭГК, размещенной вне активной зоны реактора. ТЭП размещены на поверхности ТТ, эмиттеры ТЭП отделены от корпусов ТТ слоем высокотемпературной электроизоляции. Конструкция обеспечивает термомеханическую развязку оболочек твэлов и эмиттеров ТЭП. Предполагается, что при распухании топлива в твэлах оно перемещается только наружу, не нагружая стенку ТТ.

Конструкция ТРП с теплопередачей тепла от твэлов к ЭГК по принципу паровой камеры [7, 8] в рамках разрабатываемой концепции в наибольшей степени обеспечивает термомеханическую развязку между твэлами и ЭГК (рис. 1г). Она включает в себя две сборки, размещенные в герметичном корпусе – активную зону, набранную из твэлов с капиллярной структурой на поверхности, образующую зону испарения, и зону конденсации, сформированную из сборки ЭГК, внешняя поверхность которых также покрыта капиллярной структурой. Капиллярные структуры твэлов и ЭГК соединены между собой капиллярной структурой для возврата конденсата ЖМТ. Твэлы крепятся на одном торце корпуса, ЭГК – на другом, что обеспечивает доступ к ним для отвода ГПД (от твэлов), а также подключение к цезиевой системе, соединение с токонесущими шинами и подвод (отвод) ЖМТ для охлаждения коллекторов (в ЭГК).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ ТРП

Каждый из приведенных вариантов исполнения ТРП обладает как достоинствами, так и недостатками. Отметим основные из них по каждому из вариантов.

Для наглядности характеристики вариантов исполнения сведены в табл. 1.

Для традиционного исполнения (рис. 1а).

Достоинства:

- технологическая отработанность конструкции, включая ЛКИ;
- минимальные габариты ТРП;
- максимальная локализация области высокой температуры (ограничена пределами оболочки твэла);
- плотная активная зона (важно при рассмотрении аварий с затоплением ТРП);
- размещение электроизоляции в холодных зонах (вне активной зоны или на коллекторных электродах).

Недостатки:

- вследствие неравномерности тепловыделения по объему реактора невозможно обеспечить оптимальные параметры преобразования для всех ТЭП и, как следствие, КПД ЯЭУ, как правило, в два раза ниже максимального электродного;
- затрудненный отвод ГПД из твэлов, результат – загрязнение цезиевой плазмы в МЭЗ ГПД, снижающее ресурс и эффективность ТЭП;
- ограничение ресурса вследствие распухания топлива и деформация оболочек твэлов, являющихся по совместительству эмиттерами ТЭП, вплоть до перекрытия МЭЗ;
- ЭГК включает в себя твэлы и ТЭП, т.е. содержит делящийся материал, что значительно усложняет его изготовление;
- охлаждение активной зоны производится конвекцией ЖМТ, что ужесточает требования как к чистоте теплоносителя, так и к выбору конструкционных материалов.

Оставшиеся три варианта конструктивного исполнения разрабатывались для устранения отмеченных недостатков, при этом неизбежно появлялись новые, свойственные именно данной конструкции.

Сравнение характеристик ТРП

Тип РП	Традиционный	Теплотрубный (ТВЭЛы и ТТ в матрице)	Теплотрубный (ТВЭЛы внутри ТТ)	Паровая камера
Габариты	Минимальные	Максимальные	Максимальные	Средние
Масса	Средняя	Максимальная	Средняя	Минимальная
Количество конструкционного материала в а.з.	Максимальное	Среднее	Среднее	Минимальное
Плотность а.з. по топливу	Средняя	Средняя	Средняя	Максимальная
Загрузка по U-235 и обогащение	Максимальные	Средние	Средние	Минимальные
Ресурс по топливу	Уменьшенный	Уменьшенный	Средний	Максимальный
Локализация зоны высокой температуры	Максимальная	Средняя	Средняя	Минимальная
Выравнивание температуры и плотности теплового потока в ТЭП	Отсутствует	По высоте	По высоте	По высоте и по радиусу
Отвод ГПД	Затруднён	Доступен	Доступен	Доступен
Технология изготовления	Освоена	Нуждается в доработке	Нуждается в доработке	Нуждается в разработке

Теплотрубная конструкция с отдельным размещением ТТ и ТВЭЛов в высокотемпературной матрице (рис. 1б) обладает теми же достоинствами, что и традиционный вариант. Дополнительное преимущество – продолжение работы при прекращении охлаждения коллекторов одного из ЭГК. Недостаток – корпуса всех ЭГК заземлены на матрицу, что значительно увеличивает требования к устойчивости высокотемпературной изоляции корпуса ЭГК к пробою.

Теплотрубная конструкция ТРП с размещением ТТ в полости ТВЭЛов (рис. 1в) позволяет устранить неравномерность тепловыделения по высоте и полностью выровнять плотность теплового потока на эмиттерах преобразователя изменением длины ТЭП в зависимости от расстояния до центральной оси. Недостаток конструкции – «рыхлая» активная зона и наличие высокотемпературной электрической изоляции между корпусом ТТ и эмиттерами, высокая температура теплоносителя ТТ и, следовательно, повышенные требования к материалам оболочки ТВЭЛов и корпуса ТТ.

Конструкция ТРП с теплопередачей тепла от ТВЭЛов к ЭГК по принципу паровой камеры (рис. 1г), разработанная в рамках предлагаемой концепции, обеспечивает максимальные преимущества по отношению к остальным вариантам исполнения:

- возможность отдельной обработки узлов ТВЭЛов и ЭГК;
- возможность изготовления ЭГК без делящихся материалов;
- упрощенное изготовление ТВЭЛов;
- трансформация плотности теплового потока при передаче тепла от ТВЭЛов к ЭГК

(независимо от распределения плотности теплового потока по поверхностям ТВЭЛов по объему активной зоны обеспечивается постоянная плотность теплового потока на поверхности всех ЭГК; величина плотности теплового потока определяется интегральными характеристиками – тепловой мощностью реактора и суммарной обогреваемой поверхностью ЭГК);

- возможность оптимизации ЭГК по плотности теплового потока при заданной температуре;
- простое решение проблемы отвода ГПД (предполагается использование одноэлементных твэлов с отводом газообразных продуктов деления через элементы крепления твэлов);
- возможность использования в конструкции твэлов и ЭГК тугоплавких сплавов, освоенных промышленностью;
- возможность изготовления по технологии, освоенной промышленностью;
- снижение доли конструкционных материалов в активной зоне;
- увеличение рабочего ресурса;
- увеличение надежности вследствие использования параллельных схем включения твэлов для генерации пара рабочего тела и его конденсации в ЭГК.

Основные недостатки – те же, что и у теплотрубных вариантов плюс низкая локализация высокотемпературной области – зона высокой температуры занимает все внутрикорпусное пространство и сам корпус реактора.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В рамках рассматриваемой концепции была выполнена разработка конструкции ТРП и получены расчетные оценки. Конструкция ТРП показана на рис. 2. ТРП содержит два функциональных блока – собственно реактор и термоэмиссионный преобразователь, разделенные капиллярно-пористой проставкой и размещенные в общем герметичном корпусе.

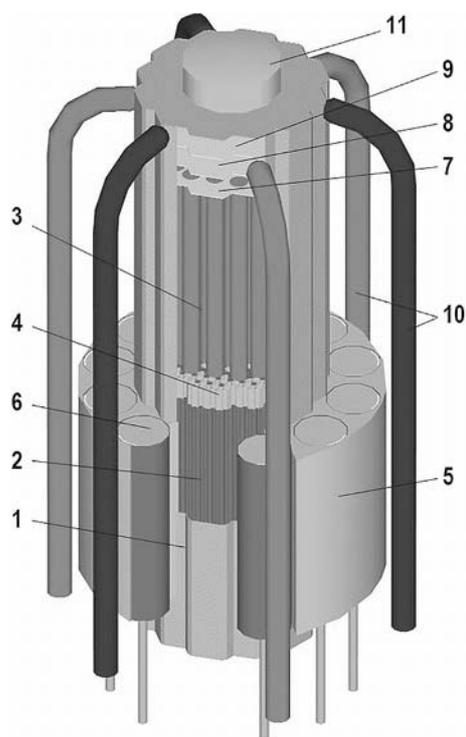


Рис. 2. Общий вид ТРП: 1 – герметичный корпус; 2 – твэлы активной зоны; 3 – термоэмиссионные генераторы; 4 – капиллярно-пористая проставка; 5 – отражатель; 6 – поворотные барабаны СУЗ; 7 – коммутационная камера; 8 – сливной коллектор; 9 – напорный коллектор; 10 – трубопроводы системы охлаждения; 11 – цезиевая система

Активная зона реактора набрана из 186-ти твэлов, расположенных в правильной шестигранной решетке. В центре активной зоны находится стержень безопасности. Твэл включает в себя топливо из высокообогащенного диоксида урана, тор-

цевого отражателя из бериллия и корпуса из молибдена, на внутреннюю поверхность которого нанесен тонкий слой выгорающего поглотителя – окиси гадолиния Gd_2O_3 . Между топливом и торцевым отражателем расположена проставка из молибдена. На внешней поверхности корпуса твэла сформирована капиллярно-пористая структура, заполненная ЖМТ – литием. Свободное пространство активной зоны в рабочем состоянии реактора заполнено парами лития.

Активная зона заключена в корпус из молибдена, на внешней стороне которого нанесен тонкий слой выгорающего поглотителя. Корпус отделен от отражателя пространством толщиной 2 мм, в котором располагается термовакuumная теплоизоляция.

Отражатель из бериллия толщиной 14 см включает в себя 12 поворотных органов регулирования мощности реактора с серповидными вставками из поглощающего материала – карбида бора B_4C .

Блок термоэмиссионных преобразователей набран из 36-ти цилиндрических электрогенерирующих каналов, расположенных в правильной шестигранной решетке. На внешней поверхности электрогенерирующих каналов сформирована капиллярно-пористая структура, заполненная ЖМТ.

Капиллярно-пористая проставка выполнена из металловолоконистого материала (спеченный «войлок» из молибденовых волокон) в виде сотовой структуры с гнездами для плотной посадки хвостовиков твэлов и электрогенерирующих каналов. Вид на капиллярно-пористую проставку со стороны активной зоны представлен на рис. 3, а ее сечение по хвостовикам твэлов – на рис. 4.

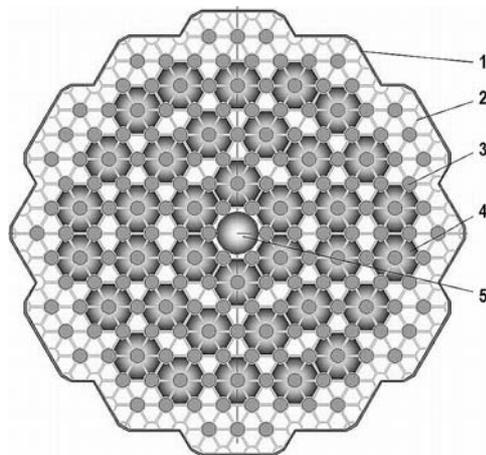


Рис. 3. Вид на капиллярно-пористую проставку со стороны активной зоны: 1 – корпус реактора, 2 – капиллярно-пористая проставка, 3 – твэл, 4 – модуль термоэмиссионного генератора, 5 – стержень АЗ

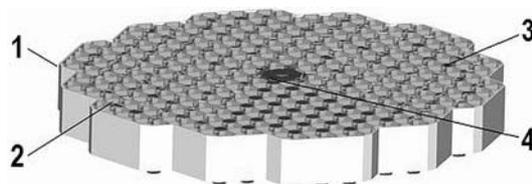


Рис. 4. Сечение капиллярно-пористой проставки по хвостовикам твэлов: 1 – корпус реактора, 2 – капиллярно-пористая проставка, 3 – твэл, 4 – стержень АЗ

Назначение капиллярно-пористой проставки – транспорт ЖМТ в конденсированном виде с поверхности электрогенерирующих каналов на поверхность твэлов под действием капиллярных сил. Для пропуска газообразного ЖМТ через капиллярно-пористую простав-

ку в ее теле выполнены треугольные каналы. Кроме того, с целью улучшения теплогидравлических характеристик электрогенерирующие каналы сгруппированы по центру корпуса, что открывает кольцевое пространство между пакетом электрогенерирующих каналов и корпусом для пропуска пара теплоносителя в районе капиллярно-пористой проставки.

Основные теплогидравлические характеристики ТРП указаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры ТРП

Параметр	Величина
Мощность реактора тепловая, кВт	1000
Мощность реактора электрическая, кВт	150
Температура пара лития максимальная, К	1800
Число твэлов, шт.	186
Число ЭГК, шт.	36
Мощность твэлов, кВт	8,06
Мощность ЭГК тепловая/электрическая, кВт	28/4,2
Число паровых каналов в а.з.	420
Число паровых каналов в блоке ЭГК	168
Энергонапряженность паровых каналов твэлов, кВт/см ²	2,10
Энергонапряженность паровых каналов ЭГК, кВт/см ²	5,25

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Как показано в [9, 10], вследствие присущей атомным реакторам неравномерности тепловыделения по высоте и радиусу активной зоны (коэффициенты неравномерности могут достигать значений 1,3) в традиционных реакторах-преобразователях термоэмиссионные преобразователи работают в режимах, обусловленных положением их в активной зоне, которые не являются оптимальными как по КПД, так и по генерируемой электрической мощности. Кроме того, из-за ограничения по максимальной температуре топлива ограничивается общая мощность реактора, и периферийные термоэмиссионные преобразователи работают в сильно недогруженном режиме, что также сказывается на их эффективности.

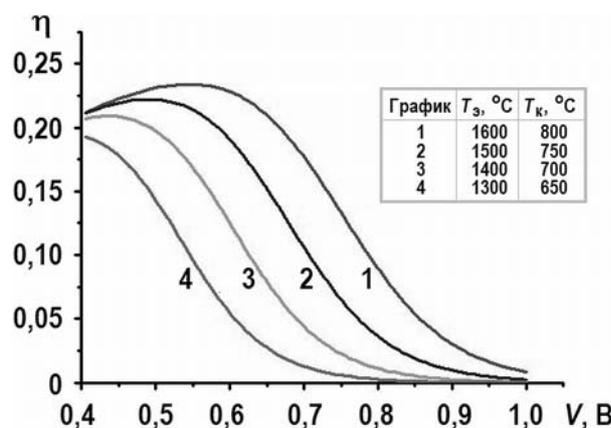


Рис. 5. Предельные величины КПД дугового режима ТЭП в зависимости от температур эмиттера ($T_э$) и коллектора ($T_к$)

Устранение этих недостатков в реакторе-преобразователе, выполненном в соответ-

ствии с рассматриваемой концепцией, обеспечивает оптимальную организацию процесса преобразования энергии для всех термоэмиссионных преобразователей (изотермичность электродов, постоянство плотности теплового потока на их поверхности) и позволяет рассчитывать предельную величину на КПД, которая составляет до 20% [11].

Предельные величины КПД преобразования энергии приведены на рис. 5.

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА

Расчет ядерно-физических характеристик ТРП производился по программе MCNP [12] с использованием базы данных ENDF/B-VII [13]. Задача расчета – определение критических параметров реактора в штатных и аварийных ситуациях и выбор выгорающего поглотителя для предотвращения разгона реактора при аварийных ситуациях.

В результате проведенных вычислений получен запас реактивности для холодного реактора в начале кампании, оценена реактивность заглушенного реактора, определена эффективность поворотных органов СУЗ и оценены аварийные ситуации при затоплении реактора и заполнении его полости мокрым песком. Расчетные результаты представлены в табл. 3. Температурный коэффициент реактивности – отрицательный.

Таблица 3

Ядерно-физические характеристики реактора

Характеристика	Значение
$K_{эфф}$ холодного реактора	$1,04734 \pm 0,00075$
$K_{эфф}$ заглушенного реактора	$0,88404 \pm 0,00076$
Эффективность поворотных ОР, %	10
$K_{эфф}$ реактора (внутри и снаружи реактора вода, отражатель сохранён)	$0,95379 \pm 0,00089$
$K_{эфф}$ реактора (внутри вода, снаружи мокрый песок, отражатель отсутствует)	$0,95359 \pm 0,00090$

На рисунке 6 представлена зависимость изменения запаса реактивности во времени. Видно, что сначала происходит рост запаса реактивности из-за более быстрого выгорания поглотителя, чем топлива в активной зоне, а затем запас реактивности снижается.

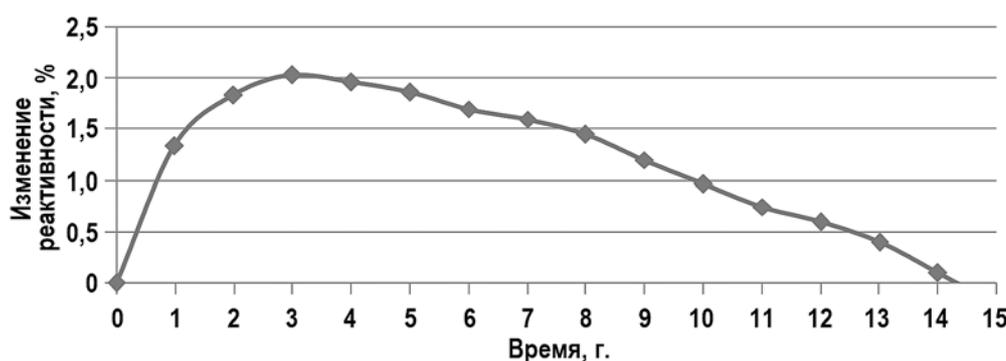


Рис. 6. Изменение запаса реактивности за время работы реактора

Исходя из выполненных расчетов, можно сделать заключение о том, что реактор удовлетворяет требованиям ядерной безопасности при размещении слоя оксида гадолиния на поверхности твэлов и корпуса реактора. Расчетная продолжительность кампании – 14 лет (см. рис. 6), что позволяет использовать рассматриваемый ТРП как источник питания телекоммуникационной станции на геостационарной орбите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее технологически отработанной является традиционная конструкция ТЭП с ЭГК, совмещающими твэлы и ТЭП, т.е. с внутризонным преобразованием энергии. Поэтому в ближайшей перспективе следует связывать развитие ЯЭУ с ТРП именно с этим направлением. В перспективных разработках целесообразно рассмотреть возможность создания ТРП, выполненных по принципу паровой камеры, как обладающих рядом привлекательных особенностей – повышенной эффективностью преобразования тепловой энергии в электричество, увеличенными надежностью и ресурсом работы, высокой степенью изотермичности и связанным с этим отсутствием термомеханических нагрузок на элементы конструкции. К недостаткам следует отнести расширение зоны высокой температуры до объема корпуса ТРП и снижение ядерной плотности топлива в активной зоне.

Литература

1. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. ТОПАЗ-1 – советская космическая ядерно-энергетическая установка. // Природа. – 1991. – № 10. – С. 29-36.
2. Кухаркин Н.Е., Нечаев Ю.А., Самоделов В.Н., Хазанович И.М. Энергоресурсные характеристики одноэлементных ЭГК, прошедшие ядерно-энергетические испытания в составе реакторных блоков установки Топаз-2. / Сб. докладов V Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе». – Подольск, 1999.
3. Забудько А.Н., Ярыгин В.И., Овчаренко М.К. Концептуальная разработка космической ядерной энергетической установки с реактором типа SAFE-300 и термоэлектрическими преобразователями энергии. / Труды Международного конгресса по усовершенствованным ядерным энергетическим установкам (ICAPP'03). – Кордова, Испания, 2003. – С. 314.
4. Зродников А.В., Ярыгин В.И., Лазаренко Г.Э., Забудько А.Н., Овчаренко М.К., Пышко А.П., Миронов В.С., Кузнецов Р.В. Низкотемпературная термоэмиссия в космических ядерных энергетических установках с быстрым реактором типа SAFE. / Труды Международного конгресса по усовершенствованным ядерным энергетическим установкам (ICAPP'07). – Сан-Диего, Калифорния, США. – 89 с.
5. Овчаренко М.К., Забудько А.Н., Ионкин В.И., Лазаренко Г.Э., Михеев А.С., Пышко А.П., Ярыгин В.И. Концепция долгоресурсной ЯЭУ «Эльбрус-400/200» с эффективными низкотемпературными термоэмиссионными преобразователями, вынесенными из активной зоны. / Труды Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе-2005». – Москва-Подольск, 1-3 марта 2005 г. – Т. 1. – С. 144-149.
6. Овчаренко М.К., Альмамбетов А.К., Виноградов Е.Г., Забудько А.Н., Ионкин В.И., Лазаренко Г.Э., Михеев А.С., Пышко А.П., Ярыгин В.И. Концепция космической ЯЭУ с внешним расположением топлива. / Труды Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе-2005». – Москва-Подольск, 1-3 марта 2005 г. – Т. 1. – С. 240-246.
7. *Fiabelmann Peter*. Nuclear Reactor, Патент Великобритании. – No. 1149946, 1966.
8. Алексеев П.А., Лазаренко Г.Э., Линник В.А., Пышко А.П. Реактор-преобразователь. Патент РФ. – № 2724919, 2021.
9. Алексеев П.А., Кротов А.Д., Овчаренко М.К., Линник В.А. Выравнивание радиального энерговыделения в водо-водяном термоэмиссионном реакторе-преобразователе. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2017.4.03>.
10. Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. – М.: Атомиздат, 1974. – 288 с.
11. Жеребцов В.А., Касиков И.И. Предельные характеристики термоэмиссионного преобразователя энергии. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110. – Вып. 1. – С. 12-17.
12. MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport code. LA-12625-M, Vers. 4B, 1997.
13. *Chadwick M.B. et al.* ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. // Nuclear Data Sheets. – 2006. – Vol. 107. – No. 12. – UCRL-JRNL-225066.

Поступила в редакцию 21.10.2021 г.

Авторы

Алексеев Павел Александрович, с. н. с., канд. техн. наук

E-mail: palekseev@ippe.ru

Лазаренко Георгий Эрикович, с.н. с., канд. техн. наук

E-mail: lazarenkoge@ippe.ru

Линник Владимир Алексеевич, в. н. с., канд. техн. наук

E-mail: valin@ippe.ru

Пышко Александр Павлович, начальник отдела, канд. физ.-мат. наук

E-mail: pyshko@ippe.ru

UDC 621.039.578:629.7

**THE CONCEPT OF A THERMIONIC REACTOR-CONVERTER
WITH EVAPORATIVE HEAT TRANSFER**

Alekseev P.A., Lazarenko G.E., Linnik V.A., Pyshko A.P.

SSC RF – IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., Obninsk, Kaluga Reg., 249033, Russia

ABSTRACT

As a result of the analytical study of the designs of thermionic reactor-converters, four groups of technical solutions have been identified that differ in the method of heat transfer from the fuel to the emitters of the thermionic converter: one with direct in-core transfer (combining the fuel element cladding with the emitter) and three with thermionic converters taken away from the core, in which heat is removed either by heat pipes (common or individual for each fuel element) or is arranged according to the principle of a steam chamber.

The article discusses the advantages and disadvantages of each of these methods. It is shown that today the most developed design remains the version with in-core power conversion and, in the future, it will be based on a steam chamber, since it excludes the ingress of gaseous fission products into the interelectrode gap, as well as the effect of fuel swelling on the interelectrode gap size, and ensures the constancy of temperature and heat flux density on the surface of all the emitters of the thermionic converters, which makes it possible to choose the optimal operating point for them.

A model of a thermionic reactor-converter has been developed: it is equipped with a steam chamber containing a core and a zone of thermionic converters, in which the fuel element of the core and the power generating channels of the thermionic converter are spatially separated, covered with a capillary-porous structure and interconnected by a cellular capillary-porous spacer for returning the liquid metal coolant and passing its steam.

Neutronic calculations have shown the possibility of carrying out a reactor campaign lasting more than ten years, subject to nuclear safety rules, if a gadolinium oxide coating is applied to the surface of the fuel elements and the reactor vessel in the area of the core.

The evaluation of thermal and electrophysical characteristics show that, due to the constancy of temperature and heat flux density on the surface of all the emitters and optimization of the power conversion process for all the thermionic converters, it is possible expect a maximum efficiency of 20%.

Key words: thermionic reactor-converter, steam chamber, duration of the campaign, design schemes.

REFERENS

1. Gryaznov G.M., Pupko V.Ya. Soviet Space NPI TOPAZ-1. *Priroda*. 1991, no. 10, pp. 29-36 (in Russian).
2. Kukharkin N.E., Nechaev Yu.A., Samodelov V.N., Khazanovich I.M. Energy and Resource Characteristics of Single-Cell TFE that have passed Nuclear Power Tests as Part of the Topaz-2 Reactor Units. *Proc. of the V-th International Conference «Nuclear Energy in Space»*. Podolsk, 1999 (in Russian).
3. Zabud'ko A.N., Yarygin V.I., Ovcharenko M.K. Conceptual Development of a Space Nuclear Power Plant with a SAFE-300 Reactor and Thermoelectric Energy Converters. *Proc. of the International Congress on Advanced Nuclear Power Plants (ICAPP'03)*. Cordoba, Spain, 2003, p. 314 (in Russian).
4. Zrodnikov A.V., Yarygin V.I., Lazarenko G.E., Zabud'ko A.N., Ovcharenko M.K., Pyshko A.P., Mironov V.S., Kuznetsov R.V. Low-Temperature Thermal Emission in Space Nuclear Power Plants with a Fast Reactor of the SAFE type. *Proc. of the International Congress on Advanced Nuclear Power Plants, (ICAPP '07)*. San Diego, California, USA, p. 89 (in Russian).
5. Ovcharenko M.K., Zabud'ko A.N., Ionkin V.I., Lazarenko G.E., Mikheev A.S., Pyshko A.P., Yarygin V.I. The Concept of a Long-Life Nuclear Power Plant «Elbrus-400/200» with Effective Low-Temperature Thermal Emission Converters removed from the core. *Proc. of the International Conference «Nuclear Energy in Space-2005»*. Moscow-Podolsk, March 1-3, 2005, v. 1, pp. 144-149 (in Russian).
6. Ovcharenko M.K., Almambetov A.K., Vinogradov E.G., Zabud'ko A.N., Ionkin V.I., Lazarenko G.E., Mikheev A.S., Pyshko A.P., Yarygin V.I. The Concept of a Space Nuclear Power Plant with an External Fuel Arrangement. *Proc. of the International Conference «Nuclear Energy in Space-2005»*. Moscow-Podolsk, March 1-3, 2005, v. 1, pp. 240-146 (in Russian).
7. Fiebelmann Peter. *Nuclear Reactor*, Patent GB, No. 1149946, 1966.
8. Alekseev P.A., Lazarenko G.E., Linnik V.A., Pyshko A.P. *The Reactor-Converter*. Patent RF No. 2724919, 2020 (in Russian).
9. Alekseev P.A., Krotov A.D., Ovcharenko M.K., Linnik V.A. Minimize Fission Power Peaking Factor in Radial Direction of Water-Cooled and Water-Moderated Thermionic Conversion Reactor Core. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 4, pp. 27-34; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.4.03>. (in Russian).
10. Ushakov B.A., Nikitin V.D., Emel'yanov I.Ya. *Fundamentals of Thermionic Energy Conversion*. Moscow. Atomizdat Publ., 1974, 288 p. (in Russian).
11. Zherebtsov V.A., Kasikov I.I. Performance Limits of thermionic Energy Converter. *Atomnaya Energiya*. 2011, v. 110, iss. 1, pp.12-17 (in Russian).
12. MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport code. LA-12625-M, Vers. 4B, 1997.
13. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. *Nuclear Data Sheets*. 2006, v. 107, no. 12, UCRL-JRNL-225066.

Authors

Alekseev Pavel Aleksandrovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: palekseev@ippe.ru

Lazarenko Georgiy Erikovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: palekseev@ippe.ru

Linnik Vladimir Alekseevich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: valin@ippe.ru

Pyshko Alexander Pavlovich, Head of Department, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: pyshko@ippe.ru