

## Перспективный облик высокотемпературной ядерной энергетической установки

© Ф.А. Баучкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложены некоторые технические решения, которые позволяют реализовать бесстолкновительный режим с поверхностной ионизацией в высокотемпературных термоэмиссионных ядерных энергетических установках и оформить перспективный облик таких установок. Проведен анализ и выбор конструкционных материалов, способных обеспечить работоспособность и требуемые выходные параметры при повышенных температурах электродов. В частности, рассмотрена вынесенная схема расположения преобразователя относительно активной зоны реактора для обеспечения изотермичности преобразователя. Предложена перспективная одноканальная многоэлементная схема компоновки электрогенерирующего канала, в которой учтены недостатки как одноэлементной, так и многоэлементной гирляндной схемы. Также предложена схема термоэмиссионной электрогенерирующей сборки с внешним расположением ядерного топлива, которая обеспечивает простоту конструкции и принцип модульного построения активной зоны. Приведены результаты выполненного для дальнейшей проработки предлагаемой конструкции «пристрелочного» стационарного теплового расчета участка канала длиной 10 мм с использованием программного комплекса Star-SSM+.*

**Ключевые слова:** *высокотемпературная термоэмиссионная ядерная энергетическая установка, термоэмиссионный преобразователь, вынесенная схема, тепловая труба, компоновка, стационарный тепловой расчет, перспективный облик.*

**Введение.** В начале XXI в. появились проекты термоэмиссионных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) второго поколения, в которых применяется многоэлементная гирляндная схема компоновки электрогенерирующих каналов (ЭГК) с дуговым режимом работы термоэмиссионного преобразователя (ТЭП). Данный режим был широко исследован коллективами ГНЦ РФ — ФЭИ, НПО «Луч», АО «Красная звезда», НИЦ «Курчатовский институт». При зазоре порядка 0,4 мм, давлении цезия в межэлектродном зазоре (МЭЗ) 1...5 торр и температуре эмиттера до 1900 К в многоэлементных ЭГК, работающих в дуговом режиме, получена удельная электрическая мощность до 2,5 Вт/см<sup>2</sup> и КПД до 10...12 % [1]. Разрабатываются двухрежимные ЯЭУ мощностью 25...500 кВт сроком службы до 10 лет в номинальном режиме, возможна работа в форсированном режиме продолжительностью до 1 года. Удельная масса таких установок варьируется от 15 до 40 кг/кВт в зависимости от мощности. Полагают, что эти ЯЭУ найдут применение в транспортных космических аппаратах

(КА) на основе электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) для межпланетных перелетов, а также послужат источниками электроэнергии для постоянных баз на других планетах.

В ближайшем будущем в космической отрасли с высокой вероятностью возникнет потребность в бортовых энергетических установках повышенной мощности для целей, отличных от перечисленных выше. Можно предполагать, что свою нишу в данном сегменте установок займет определенный класс термоэмиссионных ЯЭУ, обладающих следующими особенностями:

- компактностью;
- повышенными, по сравнению с установками второго поколения, вырабатываемой мощностью и КПД;
- высокой верхней температурой термодинамического цикла (до 2500 К);
- критическими условиями работы конструкционных материалов и, как следствие, малым ресурсом.

**Кнудсеновский режим и вынесенная схема расположения ТЭП.** Бесстолкновительный режим с поверхностной ионизацией, или кнудсеновский режим, является достаточно перспективным, так как имеет характеристики идеального ТЭП. В нем практически полностью отсутствуют потери напряжения, связанные с компенсацией отрицательного объемного заряда. Удельная электрическая мощность в таком ТЭП теоретически может достигать  $20 \text{ Вт/см}^2$ , а плотность тока —  $10 \text{ А/см}^2$  [1]. Таким образом, этот режим является более энергоэффективным, чем дуговой.

Однако на практике плотность тока в нем ограничена условием нейтральной эмиссии. Увеличить ток можно за счет понижения работы выхода эмиттера путем повышения давления пара рабочего тела (РТ) в МЭЗ, но в этом случае требуется выдерживать достаточно малую величину зазора, иначе рассеяние электронов на атомах РТ будет сильно уменьшать проходящий ток. Таким образом, должен выполняться критерий рассеяния [1]:

$$l_{e-a} \geq d, \quad (1)$$

где  $l_{e-a}$  — средняя длина свободного пробега электрона при рассеянии на атомах, которая может быть рассчитана по формуле [2]

$$l_{e-a} = \frac{1}{n_a \sigma_a} = \frac{k_B T_{cp}}{133,3 p_{РТ} \sigma_a}, \quad (2)$$

где  $n_a$  — концентрация атомов РТ в МЭЗ;  $\sigma_a$  — сечение рассеяния электрона на атомах РТ;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T_{cp}$  — средняя температура в МЭЗ;  $p_{РТ}$  — давление РТ, мм рт. ст.

Условие (1) можно переписать в виде:

$$p_{PT}d \leq a, \quad (3)$$

где  $a = k_B T_{cp} / 133,3 \sigma_a$ .

В табл. 1 приведены значения  $a$  для разных температур эмиттера в парах Cs и Ba. Значения сечений рассеяния электрона на атомах РТ взяты из [3] и [4].

Таблица 1

$T_э, K$	$a, \text{мм} \cdot \text{торр}$	
	Cs	Ba
2000	0,031	0,5
2200	0,035	0,58
2400	0,04	0,65
2600	0,0435	0,725

На рис. 1 представлена зависимость величины МЭЗ от температуры эмиттера и давления РТ исходя из критерия рассеяния.

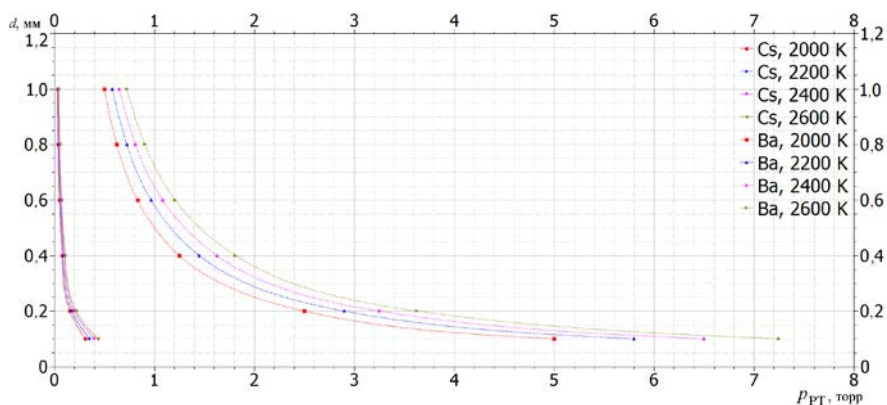


Рис. 1. Зависимость межэлектродного зазора от температуры эмиттера и давления РТ

Плотность тока можно увеличить и другим способом — за счет повышения температуры эмиттера и бинарного наполнения ТЭП (Cs + Ba). При вводе паров бария в МЭЗ получают необходимую работу выхода эмиттера при высокой температуре и практически достижимую величину МЭЗ. Однако это влечет за собой и повышение работы выхода коллектора, следовательно, данный режим вызывает интерес с практической точки зрения лишь при высокой температуре не только эмиттера (2400...3000 К), но и коллектора (1400...1800 К). Отдельного внимания в этом случае заслуживает проблема выбора конструкционных материалов ЭГК, так как при сверхвысоких температурах многие материалы вступают в химическую реакцию с РТ, особенно с химически активным барием.

При переходе от дугового режима к кнудсеновскому становится очевидным, что конструкция многоэлементного гирляндного ЭГК, у которой в центре каждого из последовательно коммутируемых элементов расположено топливо, характеризуется существенными недостатками. Прежде всего, в процессе работы ЭГК происходит распухание, или так называемый свеллинг, топлива в полости эмиттера, что вызывает деформацию оболочки эмиттера и изменение величины МЭЗ. При повышенных температурах возможен значительный массоперенос топлива на торцевые крышки электрогенерирующего элемента (ЭГЭ), что может привести к разрушению сварных швов и импульсному выбросу газообразных продуктов деления (ГПД) в МЭЗ.

В многоэлементном гирляндном ЭГК проблема попадания в межэлектродное пространство ГПД, которые загрязняют межэлектродную среду, осаждаются на поверхностях электродов и изменяют их эмиссионные свойства, имеет место даже в штатных режимах вследствие диффузионных процессов или при применении схемы вентилируемого ЭГЭ. Это недопустимо, поскольку давление в межэлектродной среде у кнудсеновского ТЭП должно быть как минимум на порядок ниже, чем у дугового.

Температура эмиттера в многоэлементных гирляндных ЭГК второго поколения не превышает 1900 К в режиме генерации тока, при этом для них типична неизотермичность по длине, обусловленная перепадами температур и потерями на коммутационных перемычках, дистанционаторах и сравнительно длинных концевых элементах. В то же время в кнудсеновском ЭГК требуется обеспечить температуру эмиттера примерно 2200...2600 К и при отсутствии изотермичности одной из главных опасностей будет повреждение дистанционаторов и короткое замыкание электродов.

**Тугоплавкая высокотемпературная тепловая труба.** В связи с изложенным выше становится целесообразным расположение преобразователей за пределами активной зоны (АЗ) реактора на конденсационных концах тугоплавких высокотемпературных тепловых труб (ТВТТ). Это дает ряд преимуществ, главные из которых — обеспечение изотермичности ТЭП по всей длине благодаря свойствам ТВТТ и локализация ГПД в АЗ, что делает невозможным их попадание в МЭЗ [5]. Данная схема была предложена для термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения [6–11]. Однако описанные в данных источниках схемы разрабатывали с учетом использования в них дуговых ТЭП с рабочими температурами эмиттера 1600...2000 К, в связи с чем некоторые конструкционные и технологические решения, приведенные в этих работах, не подходят для реализации вынесенной схемы применительно к высокотемпературному кнудсеновскому ТЭП. Предложенные авторами ТВТТ с Li в качестве РТ и корпусом из Mo и его сплавов также не подходят, поскольку литиевые ВТТ работают

в интервале температур 1300...2100 К [12]. Рабочими телами, функциональный диапазон которых соответствует требуемой температуре эмиттера кнудсеновского ТЭП, являются In и Ag, которые работают при 1800...2400 и 1900...2700 К соответственно [12–14].

В системах твердый металл — жидкий металл часто наблюдается адсорбционное понижение прочности твердого металла под действием жидкого. Снижение поверхностной энергии твердого металла при одновременном воздействии растягивающих напряжений может привести к преждевременному его разрушению при небольших нагрузках (эффект Ребиндера), что особенно характерно для эвтектических сплавов [14, 15]. Кроме того, пары, образующие интерметаллидные соединения, могут оказаться нежелательными с точки зрения жидкометаллической коррозии. Все это накладывает ограничения на применение различных металлов в качестве конструкционных материалов ТВТТ. В соответствии с вышесказанным можно сформулировать требования к конструкционным материалам ТВТТ для рассматриваемой вынесенной схемы:

- тугоплавкость;
- прочность;
- растворимость в In/Ag не более 1 % при рабочей температуре.

Согласно источникам [12, 14], число подходящих материалов крайне невелико — W и его сплавы. В связи с эффектом Ребиндера применение эвтектических сплавов W исключено. Наибольшей прочностью при растяжении отличаются сплавы W–15% Mo и W–25% Re, причем сплавы, легированные Re, сочетают пластичность в рекристаллизованном состоянии с высокой прочностью, поэтому наиболее подходящим в качестве корпусного материала ТВТТ для сверхвысокотемпературной вынесенной схемы является W–25% Re. Испытания ТВТТ из этого материала с Ag в качестве РТ показали, что ресурс такой трубы составляет не менее 1000 ч при рабочей температуре 2300 К. Однако во время экспериментов наблюдалось значительное испарение с поверхности корпуса, выполненного из Re [13].

В работе [16] приведены результаты испытаний газорегулируемых ТВТТ с корпусом из чистого W, осажденного из паровой фазы, с различными РТ, в том числе с In и Ag. Тепловая труба с Ag отработала в общей сложности 7,25 ч при температуре 2700 К, после чего эксперимент был остановлен ввиду перекоса трубы в кварцевой ампуле; тепловая труба с In расплавилась после 3,4 ч работы при температуре 2560 К.

В [14] приведены обширные данные по оценке различных типов капиллярных структур ТВТТ: наиболее надежной капиллярной структурой с хорошими транспортными свойствами является канавочная. Действительно, при рассматриваемых рабочих температурах вопрос надежности капиллярной структуры стоит весьма остро, так

как в сеточных и спеченных структурах возможны проплавления, хоть они и обладают лучшей технологичностью по сравнению с канавочными. Таким образом, для рассматриваемой ТВТТ больше подходит фитиль в виде продольных канавок. Для уменьшения взаимодействия жидкости с паром (уменьшения вероятности срыва жидкости из фитиля) и увеличения развиваемого капиллярного давления можно применить завальцовку краев канавок.

**Внешнее расположение топлива.** В отличие от [6–10], в работе [11] предложена конструкция ТВТТ, в которой использована тепловая труба с переменным сечением и внутренним расположением ядерного топлива в зоне испарения. Так как это инженерное решение обладает рядом недостатков и в целом является весьма спорным, было проведено расчетное сравнение предложенной в [11] конструкции с конструкцией, в которой топливо расположено снаружи зоны испарения ТВТТ. Подробно этот вопрос рассмотрен в [17], там же приведены результаты расчетов.

Анализ результатов показал, что все элементы электрогенерирующей сборки с внешним расположением топлива находятся в более благоприятном тепловом состоянии. Кроме того, предложенная сборка обеспечивает простоту конструкции и соблюдение принципа модульного построения АЗ термоэмиссионного реактора-преобразователя. Таким образом, целесообразно отказаться от схемы с внутренним расположением топлива в пользу схемы с внешним расположением.

**Тепловой расчет участка ЭГЭ.** Для дальнейшей проработки предлагаемой конструкции выполнен «пристрелочный» стационарный тепловой расчет участка ЭГЭ длиной 10 мм с использованием программного комплекса Star-ССМ+. На рис. 2 приведена температурная эпюра в продольном сечении модели.

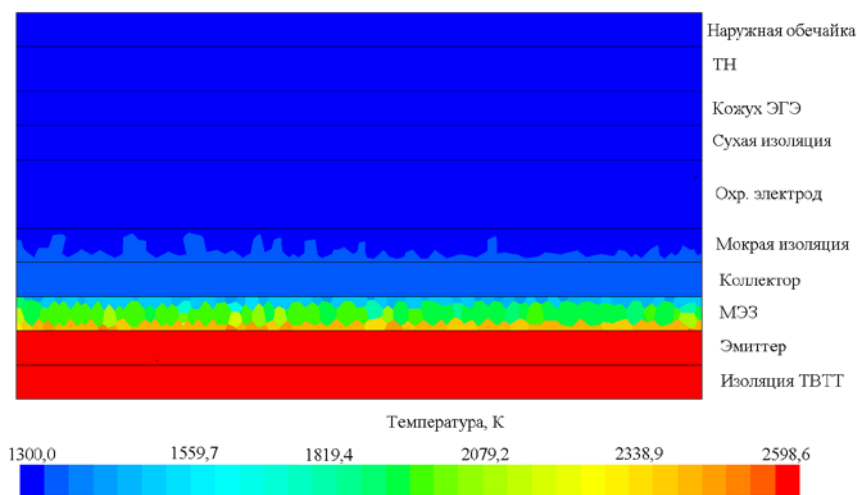


Рис. 2. Распределение температур в продольном сечении участка ЭГЭ

Полученные осредненные значения температур (абсолютная ошибка не превышает  $2 \cdot 10^{-9}$ ) представлены в табл. 2. Зависимость температуры от радиуса показана на рис. 3.

Таблица 2

Расчетная область	Температура, К
<i>Осреднение по поверхности</i>	
Поверхность внешняя эмиттера	2569
Поверхность внутренняя коллектора	1354
<i>Осреднение по объему</i>	
РТ	1952
ТН	1301

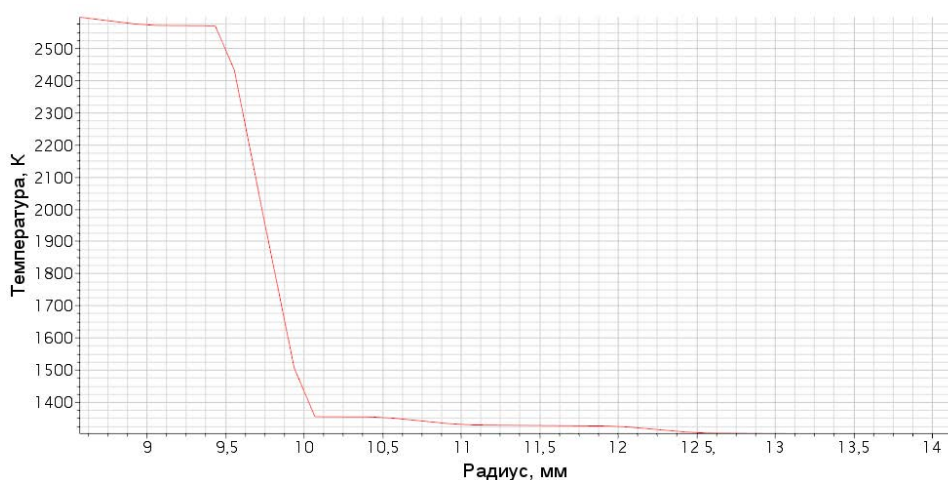


Рис. 3. Радиальное распределение температуры в ЭГЭ

Расчет показал, что радиальный перепад температуры в МЭЗ примерно равен ожидаемому, а средняя температура РТ, принятая при расчете зависимостей, которые представлены на рис. 1 с погрешностью 2,7 %, совпадает с расчетной. Радиальный тепловой поток через электроизоляцию ТВТТ составил  $38,5 \text{ Вт/см}^2$ .

**Заключение.** Технические решения, предложенные в настоящей работе, позволяют реализовать бесстолкновительный режим с поверхностной ионизацией в высокотемпературных термоэмиссионных ЯЭУ как наиболее перспективный и энергоэффективный. В результате проведенного анализа выбраны конструкционные материалы, применение которых обеспечивает работоспособность и требуемые выходные параметры при повышенных температурах электродов.

В случае использования вынесенной схемы расположения ТЭП относительно АЗ реактора обеспечивается изотермичность преобразователя. Отказавшись от многоэлементной гирляндовой схемы ком-

поновки ЭГК, предложена перспективная одноканальная многоэлементная схема компоновки ЭГК, в которой учтены недостатки одноэлементного и многоэлементного гирляндного ЭГК. Принимая во внимание конструктивные особенности ЭГК, вынесенные из АЗ, автором рекомендована схема термоэмиссионной электрогенерирующей сборки с внешним расположением ядерного топлива, при которой обеспечиваются простота конструкции и принцип модульного построения АЗ.

В дальнейшем планируется моделирование теплового состояния детализированной электрогенерирующей сборки вынесенного типа с внешним расположением топлива и многоэлементным одноканальным ЭГК.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Квасников Л.А., Кайбышев В.З., Каландаришвили А.Г. *Рабочие процессы в термоэмиссионных преобразователях ядерных энергетических установок*. Москва, МАИ, 2001, 208 с.
- [2] Ярыгин В.И. *Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Часть I. Введение в специальность*. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2001, 78 с.
- [3] Ключарев А.Н., Мишаков В.Г., Тимофеев Н.А. *Введение в физику низкотемпературной плазмы*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГУ, 2008, 224 с.
- [4] Лендьял В.И., Навроцкий В.Т., Сабад Е.Н. Резонансы в рассеянии электронов на атомах и ионах. *Успехи физических наук*, 1987, № 3, с. 425.
- [5] Мондт Д., Пиккет В. Перспективы термоэмиссионных реакторов с внешним и внутренним размещением горючего для систем с электрореактивными двигателями. *Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы*, 1971, № 10, с. 142.
- [6] Pawlik E.V., Phillips W.M. A Nuclear Electric Propulsion Vehicle for Planetary Exploration. AIAA Paper 76-1041. *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 14, 1977, pp. 518–524.
- [7] Koenig D.R., Renken W.A., Salmi E.M. Heat Pipe Reactor for Space Applications. *AIAA Paper 77-491*.
- [8] Mondt J.E., Stapfer C., Hsieh T.M. Nuclear Power Source for Electric Propulsion. *AIAA Paper 79-2088*.
- [9] Евтихин В.А., Чуманов А.Н. Космическая ядерная энергетическая установка. Пат. 2129740 Российская Федерация. Оpubл. 27.04.1999.
- [10] Ярыгин В.И., Купцов Г.А., Ионкин В.И., Овчаренко М.К., Ружников В.А., Михеев А.С., Ярыгин Д.В. *Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль для активной зоны ядерного реактора с вынесенной термоэмиссионной системой преобразования тепловой энергии в электрическую (варианты)*. Пат. 2187156 Российская Федерация. Оpubл. 10.08.2002. 3 с.
- [11] Баучкин Ф.А. Проектный облик термоэмиссионной электрогенерирующей сборки вынесенного типа с тугоплавкой высокотемпературной тепловой трубой. *Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всерос. науч.-техн. конф. Томский политехнический университет, 4–6 декабря 2013 г. В 2 т.* Томск, Изд-во ООО «Скан», 2013, т. 1, с. 137–141.
- [12] Дан П.Д., Рей Д.А. *Тепловые трубы*. Москва, Энергия, 1979, 272 с.



- [13] Quataert D., Busse C., Geiger F. Long term behaviour of high temperature tungsten-rhenium heat pipes with lithium or silver as working fluid. *Proc. 1st Int. Heat Pipe Conf., Paper 4-4*. Stuttgart, 1973.
- [14] Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В. *Технологические основы тепловых труб*. Москва, Атомиздат, 1980, 160 с.
- [15] Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д. *Эффект Ребиндера*. Москва, Наука, 1966.
- [16] Geiger F., Quataert D. Corrosion studies of tungsten heat pipes at temperatures up to 2650 °C. *Proc. 2nd Intern. Heat Pipe Conf. Bologna, Italy, 1976*, vol. 1, pp. 347.
- [17] Баучкин Ф.А. *Расчетное сравнение электрогенерирующих сборок вынесенного типа с внутренним и внешним расположением топлива*. (Готовится к печати).

Статья поступила в редакцию 01.08.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Баучкин Ф.А. Перспективный облик высокотемпературной ядерной энергетической установки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 9.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-09-1535>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

**Баучкин Федор Алексеевич** — аспирант кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: fedorb2006@ Rambler.ru

# Future look of a high-temperature nuclear power unit

© F.A. Bauchkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper discusses some technical solutions allowing to implement a collisionless mode with surface ionization in high-temperature thermionic nuclear power units and to formalize their future look. On the base of analysis we selected structural materials capable of providing performance and required output parameters at increased temperatures of electrodes. In particular, to provide the isothermal condition for the energy converter we consider a structural configuration with the energy converter placed beyond the reactor core. As a result, we obtain a perspective single-channel multi-element configuration of the electro-generating unit, which considers disadvantages of both single-element configuration and classic multi-element configuration. Besides, structural configuration of thermionic electro-generating assembly with the external nuclear fuel placement, which provides the simplicity of the design and the principle of modularity, is proposed. For further development of the suggested design a tentative estimation using CFD-software Star-CCM+ was carried out. It represents a static thermal numerical computation of channel's part with a length of 10 mm. Computation results are presented in the paper.*

**Keywords:** nuclear power unit, high-temperature thermionic unit, thermionic converter, external placement, heat pipe, configuration, static thermal computation, future look.

## REFERENCES

- [1] Kvasnikov L.A., Kaybyshev V.Z., Kalandarishvili A.G. *Rabochiye protsessy v termoemissionnykh preobrazovatelyakh yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Workflows in thermionic converters of nuclear power plants]. Moscow, MAI Publ., 2001, 208 p.
- [2] Yarygin V.I. *Fizicheskiye osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii. Chast 1. Vvedeniye v spetsialnost* [Physical fundamentals of thermionic energy conversion. Part 1: Introduction to Specialty]. Obninsk, SSC RF-IPPE, 2001, 78 p.
- [3] Klyucharev A.N., Mishakov V.G., Timofeyev N.A. *Vvedeniye v fiziku nizkotemperaturnoy plazmy* [Introduction to the low-temperature plasma physics]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University Publ., 2008, 224 p.
- [4] Lendyel V.I., Navrotsky V.T., Sabad E.N. *Soviet Physics-Uspexhi (Advances in Physical Sciences)*, 1987, no. 3, pp. 425.
- [5] Mondt D. Pikket V. *Perspektivy termoemissionnykh reaktorov s vneshnim i vnutrennim razmeshcheniyem goryuchego dlya sistem s elektrokeaktivnymi dvigatelyami* [Prospects for thermionic reactors with internal and external placement of fuel for the systems with electro-reactive engines]. *Pryamoye preobrazovaniye teplovooy energii v elektricheskuyu i toplivnyye element* [Direct conversion of heat into electricity and fuel cells], 1971, no. 10, pp. 142.
- [6] Pawlik E.V., Phillips W.M. A Nuclear Electric Propulsion Vehicle for Planetary Exploration. *AIAA Paper 76-1041*.
- [7] Koenig D.R., Renken W.A., Salmi E.M. Heat Pipe Reactor for Space Applications. *AIAA Paper 77-491*.
- [8] Mondt J.E., Stapfer C., Hsieh T.M. Nuclear Power Source for Electric Propulsion. *AIAA Paper 79-2088*.
- [9] Evtikhin V.A., Chumanov A.N. *Kosmicheskaya yadernaya energeticheskaya ustanovka* [Space nuclear power plant]. Patent 2129740 Russian Federation. Published April 27, 1999.

- [10] Yarygin V.I., Kuptsov G.A., Ionkin V.I., Ovcharenko M.K., Ruzhnikov V.A., Mikhayev A.S., Yarygin D.V. *Termoemissionnyy elektrogeneriruyushchiy modul' dlya aktivnoy zony yadernogo reaktora s vnesennoy termoemissionnoy sistemoy preobrazovaniya teplovooy energii v elektricheskuyu (varianty)* [Thermionic power generating module for a nuclear reactor core with the taken thermionic system converting thermal energy into electrical (options)]. Patent 2187156 Russian Federation. Published August 10, 2002, 3 p.
- [11] Bauchkin F.A. *Proyektnyy oblik termoemissionnoy elektrogeneriruyushchey sborki vnesennogo tipa s tugoplavkoy vysokotemperaturnoy teplovooy truboy* [Project shape of thermionic power generation assembly of external type with refractory high-temperature heat pipe]. *Energetika: effektivnost, nadezhnost, bezopasnost. Materialy trudov XIX Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Tomskiy politekhnicheskoy universitet, 4–6 dekabrya 2013 g.)* [Energy: efficiency, reliability, safety. Proc. of the XIX All-Russia scientific and technical conf. (Tomsk Polytechnic University, 4–6 December, 2013). Tomsk, Skan Publ., 2013, pp. 137–141.
- [12] Dunn P.D., Reay D.A. *Heat Pipes*. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig, 1976. [In Russ.: Dunn P.D., Reay D.A. *Teplovye truby*. Moscow, Energia Publ., 1979, 272 p.]
- [13] Quataert D., Busse C., Geiger F. Long term behaviour of high temperature tungsten-rhenium heat pipes with lithium or silver as working fluid. *Proc. 1st Int. Heat Pipe Conf.*, Paper 4-4. Stuttgart, 1973.
- [14] Ivanovsky M.N., Sorokin V.P., Chulkov B.A., Yagodkin I.V. *Tekhnologicheskkiye osnovy teplovykh trub* [Technological bases of heat pipes]. Moscow, Atomizdat, 1980, 160 p.
- [15] Goryunov Goryunov Yu.V., Pertsov N.V., Summ B.D. *Effekt Rebindera* [Rebinder effect]. Moscow, Nauka, 1966.
- [16] Geiger F., Quataert D. Corrosion studies of tungsten heat pipes at temperatures up to 2650 °C. *Proc. Second Intern. Heat Pipe Conf. Bologna, Italy. 1976*, vol. 1, pp. 347.
- [17] Bauchkin F.A. *Raschetnoye sravneniye elektrogeneriruyushchikh sborok vnesennogo tipa s vnutrennim i vneshnim raspolozheniyem topliva* [Estimated comparison of electrogenerating assemblies of external type with internal and external arrangement of fuel]. (To be published).

**Bauchkin F.A.**, a postgraduate, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: fedorb2006@rambler.ru