

## Высокотемпературный термоэмиссионный преобразователь с пониженным давлением паров цезия и сверхвысокотемпературным составным коллектором

© М.С. Яшин<sup>1</sup>, В.В. Онуфриев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», МО, г. Подольск, 142103, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Проведен аналитический расчет вольт-амперных характеристик высокотемпературного термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) с однородным и макроскопически неоднородным (составным) коллектором при пониженном давлении паров цезия. Рассмотрен случай, когда поверхность коллектора ТЭП представляет собой совокупность периодически расположенных макроскопических элементов с различной работой выхода. На основе сравнительного анализа распределений параметров низкотемпературной цезиевой плазмы по длине межэлектродного зазора для различных точек вольт-амперных характеристик для двух вариантов коллекторов сделаны качественные выводы об отличии процессов, протекающих в преобразователе с составным коллектором, и влиянии этих процессов на ход вольт-амперной характеристики. Полученные результаты свидетельствуют о преимуществе ТЭП с составным коллектором относительно преобразователя с однородным коллектором в наиболее интересной, с точки зрения генерации электрической энергии (наибольшая выходная мощность), области вольт-амперной характеристики. Для получения количественных зависимостей влияния макроскопической неоднородности коллектора по работе выхода электронов на выходные характеристики высокотемпературного ТЭП необходимо проведение оптимизационных численных экспериментов и эмпирических исследований.*

**Ключевые слова:** ТЭП, составной коллектор, поле пятен, прямое преобразование, плазма

**Введение.** Разработка перспективных космических энергетических установок (ЭУ), использующих метод прямого преобразования энергии, с повышенными удельной мощностью, КПД, выходным напряжением, — актуальная задача по созданию новых энергодвигательных комплексов для практической космонавтики. Одним из основных параметров ЭУ прямого преобразования энергии является их эффективность, обуславливающая выходные электрические характеристики, — ток и напряжение. Существующие ЭУ с термоэмиссионными преобразователями (ТЭП) энергии имеют существенные потери напряжения, обусловленные высоким значением барьерного индекса  $V_B$  (сумма работы выхода коллектора и потерь напряжения на дуговом разряде). Использование в современных ЭУ ТЭП с однородными коллекторами не позволяет управлять генерацией частиц в силу постоянства работы выхода. При поиске способов повышения эффективности ТЭП становится очевидной необходимость усовер-

шенствования рабочего процесса таких преобразователей. Одним из ключевых моментов является снижение внутренних потерь напряжения в ТЭП.

Цель настоящей статьи — снижение барьерного индекса в ТЭП за счет управления работой выхода коллектора, что позволит повысить его эффективность, особенно это важно для высокотемпературных ЭУ (с температурой коллектора ~1500 К).

Следует отметить, что такой способ повышения эффективности может быть использован и в приборах плазменной электроэнергетики, которые рассматриваются в качестве перспективных высокотемпературных систем преобразования тока в космических энергодвигательных установках [1–3], а также для увеличения их эффективности.

В качестве основной задачи исследования рассмотрены параметры рабочего процесса в межэлектродном зазоре (МЭЗ) ТЭП с повышенной температурой коллектора и неоднородной работой выхода его поверхности.

Степень совершенства термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) характеризуют величиной барьерного индекса  $V_B$ , учитывающего отличие потерь в МЭЗ реального ТЭП от потерь в идеальном преобразователе [4]. Фактически  $V_B$  равен разнице напряжений между вольт-амперной характеристикой (ВАХ) ТЭП и больцмановской кривой:

$$eJ = A_0 T_E^2 \exp(-eU / kT_E),$$

где  $A_0 = 120,4 \text{ А/(см}\cdot\text{К)}^2$ ;  $J$  — плотность тока,  $\text{А/см}^2$ ;  $T_E$  — температура эмиттера, К;  $e$  — заряд электрона, Кл;  $U$  — напряжение ТЭП, В;  $k$  — постоянная Больцмана, Дж/К. Следовательно, при равных внешних условиях, таких как температура и работа выхода электродов, величина МЭЗ, — меньшим барьерным индексом, следовательно, и преимуществом, обладает ТЭП, ВАХ которого больше смещена в преобразовательную область по оси напряжений.

Одним из способов снижения барьерного индекса  $V_B$  является уменьшение потерь в разряде. В условиях дугового режима ТЭП обычно можно наблюдать перекомпенсацию отрицательного объемного заряда, что приводит к образованию скачков потенциала, препятствующих уходу электронов на электроды. Более благоприятные условия для протекания тока возникают, если у поверхности коллектора существует поле, ускоряющее электроны из плазмы. Это возможно при реализации составного коллектора, когда его поверхность разделена на участки с различающейся работой выхода.

Повышенная температура коллектора может быть целесообразна в условиях радиационного теплоотвода энергии от конструкции преобразователя. Однако высокая температура коллектора приводит

к росту обратного электронного тока, что негативно влияет на выходные характеристики ТЭП. Поэтому необходимо ограничивать электронный ток с коллектора, например, увеличивая работу выхода электронов уменьшением степени покрытия поверхности коллектора цезием за счет снижения давления его паров в МЭЗ. Пониженное давление паров цезия положительно уменьшает потери энергии в МЭЗ преобразователя, что ведет к увеличению полезной выходной мощности и эффективности ТЭП в рассматриваемом режиме.

По результатам [5] сделан вывод о меньших потерях напряжения в разряде ТЭП с составным коллектором, по сравнению с ТЭП с гладким однородным коллектором. Тем не менее необходимо учитывать, что исследование проводилось как в [5], так и в настоящей статье в узком диапазоне изменения тока на ВАХ.

**Описание расчетной модели ТЭП.** На основе математической модели ТЭП [6] с кинетическими коэффициентами из [7], в настоящей работе проведены расчеты ВАХ ТЭП с однородным и составным коллекторами. Особенность такого расчета с составным коллектором заключается в том, что значения работы выхода электронов для различных поверхностей коллектора выбирают на основании результатов расчета для ТЭП с однородным коллектором так, чтобы их разность была заведомо больше, чем величина приколлекторного скачка потенциала  $\phi_k$  (в рассматриваемых случаях  $\phi_k$  не превышал 0,25 В). При этом в отличие от [5] расчет (численный эксперимент) проведен при меньшем давлении паров цезия в МЭЗ — 13,3 Па. Дальнейшее снижение давления пара цезия связано с необходимостью уменьшения потерь в разряде. В рассматриваемых условиях рассеяние электронов происходит в основном на атомах за счет кулоновских взаимодействий, при этом длина свободного пробега электронов в предельных случаях только рассеяния на атомах и только за счет кулоновского взаимодействия определяется как:

$$l_{ea} = \frac{1}{\sigma_{ea} N_a};$$
$$l_{\Delta} \approx R_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n e^2}}.$$

Здесь  $l_{ea}$  — длина свободного пробега электронов, максимальное значение  $l_{ea} = 0,6$  мм;  $\sigma_{ea}$  — сечение электрон-атомного взаимодействия;  $N_a$  — концентрация атомов;  $l_{\Delta}$  — кулоновская длина пробега электронов, максимальное значение  $l_{\Delta} = 2 \cdot 10^{-3}$ ;  $R_D$  — дебаевский радиус, мм;  $T_e$  — температура электронов, К;  $n$  — концентрация электронов,  $10^{13}$  1/см<sup>3</sup>.

Как видно, длина свободного пробега электрона в атомах сравнима (в наихудшем варианте немного превышает) с размерами МЭЗ. Однако кулоновская длина пробега оказывается значительно меньше зазора, это приводит к увеличению эффективного пути электронов. В таких условиях, согласно [7], гидродинамическое рассмотрение качественно верно описывает состояние плазмы МЭЗ. Авторами настоящей статьи предполагается, что в данном режиме работы ТЭП должны наблюдаться: характерная для дугового режима стабильность и в то же время сниженные на 0,1...0,2 В потери напряжения в плазме МЭЗ. При большем снижении давления паров цезия или величины МЭЗ необходим переход к рассмотрению бесстолкновительной плазмы. В [8] была разработана методика расчета для малых межэлектродных зазоров кнудсеновского диода в условиях перекомпенсации. Особенности, связанные с неустойчивостями бесстолкновительных режимов, подробно рассмотрены в [9].

Для учета влияния составного коллектора на распределение параметров плазмы в ТЭП требуется видоизменить классические граничные условия (рассмотрено в [5]). Для обеспечения применимости выражений, рассмотренных в данной работе, необходимо выполнение следующего условия: размеры участков с разной работой выхода должны существенно превышать величину дебаевского радиуса экранирования, так как только в этом случае возможно рассмотрение контакта каждого участка с плазмой МЭЗ независимо друг от друга. При этом размеры этих участков должны быть малы по сравнению с расстоянием, на котором существенно изменяются параметры плазмы, фактически по порядку значений эта величина равна длине ионизации [7]:

$$L_i = \sqrt{D_0 / \alpha},$$

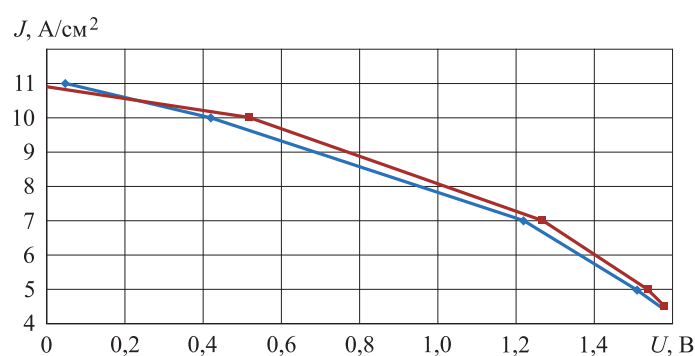
где  $D_0$  — коэффициент амбиполярной диффузии;  $\alpha$  — коэффициент, определяющий скорость ионизации. В рассматриваемом случае  $L_i$  принимает значения 0,2...0,3 мм. Таким образом, геометрические размеры различающихся по работе выхода электронов областей коллектора должны быть заключены в пределах от 10 до 100 мкм.

**Обсуждение результатов.** В рамках исследования проведено моделирование рабочего процесса в ТЭП с однородным и составным коллекторами, при следующих параметрах:

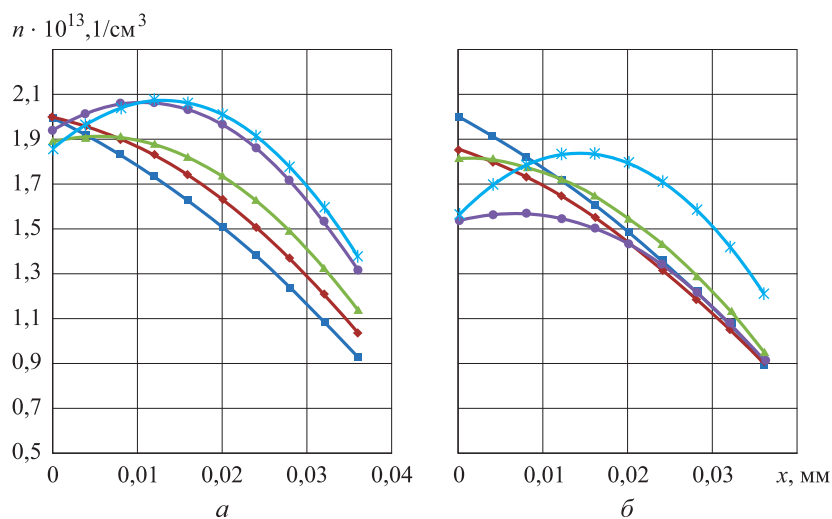
- температура эмиттера — 2600 К;
- работа выхода эмиттера — 4,1 эВ;
- температура коллектора — 1330 К;
- работа выхода коллектора  
однородного — 2,52 эВ;  
составного — 2,22 и 2,82 эВ;

- давление паров цезия — 13,3 Па;
- длина МЭЗ — 0,35 мм.

Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 1–6. Полученные ВАХ свидетельствуют о некотором преимуществе ТЭП с составным коллектором перед ТЭП с однородным коллектором в области максимальной выходной мощности. Однако данный эффект имеет экстремум в области токов 9...10 А/см<sup>2</sup>. Максимальный выигрыш в напряжении составляет ~0,1 В, что соответствует увеличению мощности ТЭП на 15 %. Следует отметить, что рассмотренные режимы ТЭП не являются оптимизированными по давлению паров цезия.



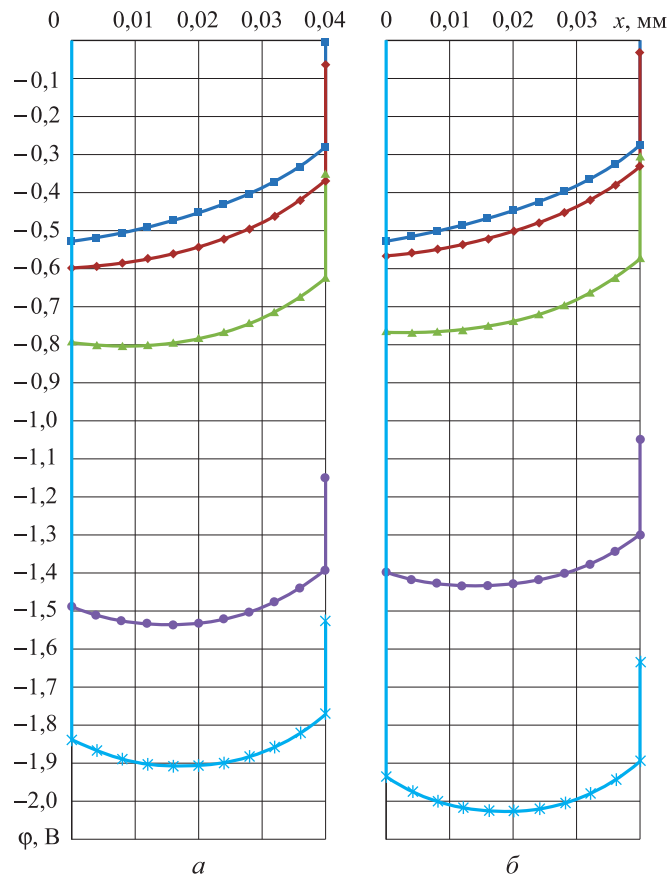
**Рис. 1.** Вольт-амперная характеристика термоэмиссионного преобразователя



**Рис. 2.** Распределения концентрации частиц по длине МЭЗ в зависимости от плотности тока преобразователя:

*a* — однородный коллектор; *б* — составной коллектор; —■—  $J = 4,5 \text{ А/см}^2$ ; —●—  $J = 5 \text{ А/см}^2$ ; —▲—  $J = 7 \text{ А/см}^2$ ; —◆—  $J = 10 \text{ А/см}^2$ ; —\*—  $J = 11 \text{ А/см}^2$

В области плотности тока, превышающей  $10 \text{ A/cm}^2$ , ход кривой ВАХ характеризуется более ранним появлением участка насыщения тока, вероятно связанного с переходом плазмы в сильно ионизованное состояние, концентрация заряженных частиц у эмиттера при этом перестает увеличиваться, вследствие чего напряженность поля у эмиттера возрастает очень слабо и эффект Шоттки практически не проявляется.

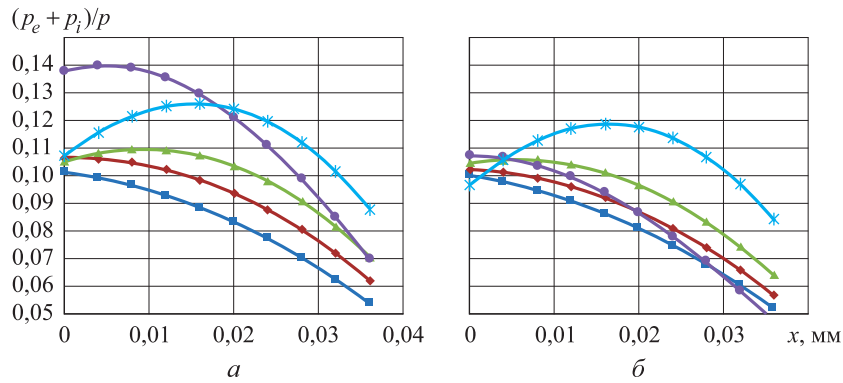


**Рис. 3.** Потенциальные диаграммы по длине МЭЗ в зависимости от плотности тока преобразователя:

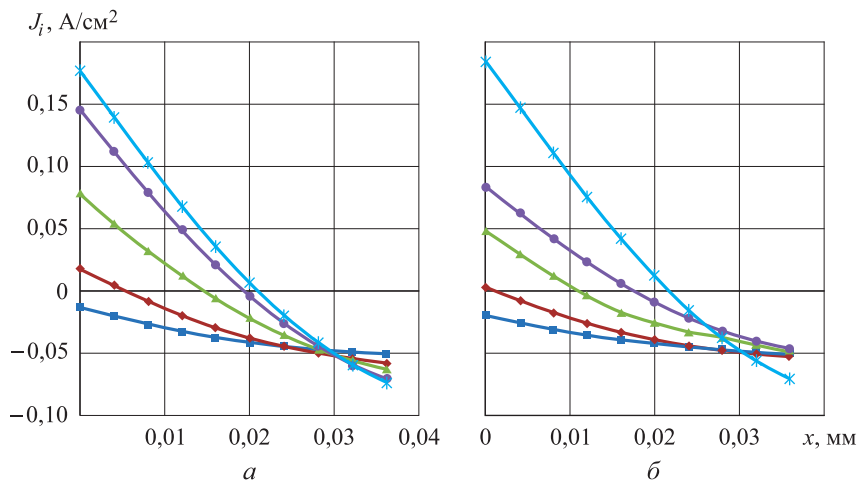
*a* — однородный коллектор; *b* — составной коллектор; —■—  $J = 4,5 \text{ A/cm}^2$ ;  
—◆—  $J = 5 \text{ A/cm}^2$ ; —▲—  $J = 7 \text{ A/cm}^2$ ; —●—  $J = 10 \text{ A/cm}^2$ ; —\*—  $J = 11 \text{ A/cm}^2$

Точка изгиба ВАХ ТЭП с составным коллектором лежит в области больших токов. Это объясняется тем, что эффекта «поля пятен» становится недостаточно для прохождения тока на коллектор. Необходимый ток обеспечивается повышенной (порядка 100 К) температурой электронов в объеме МЭЗ, обеспечивающейся приращением эмиттерного скачка потенциала на 0,1 В.

С повышением температуры электронов растет и их энергия, вследствие чего увеличиваются сечения рассеяния электронов и появляется «провал» концентрации частиц в области эмиттера (см. рис. 2).



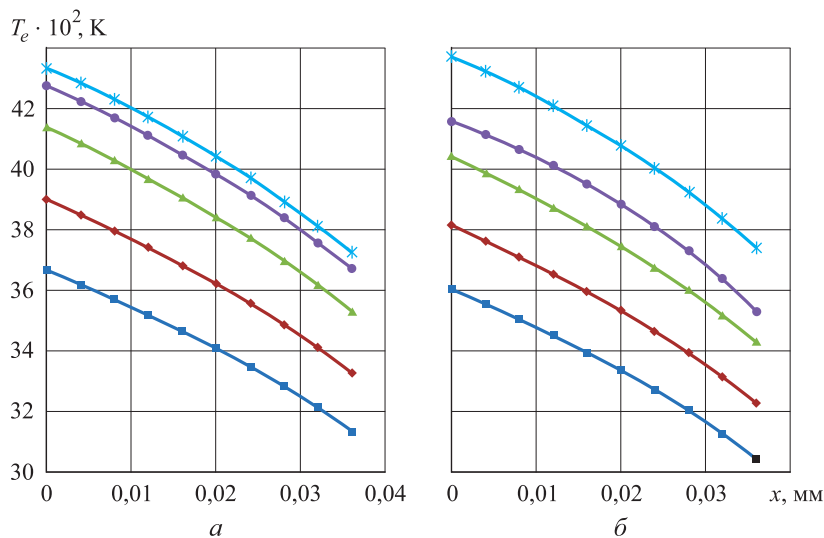
**Рис. 4.** Отношения суммы парциальных давлений электронов и ионов к полному давлению частиц  $(p_e + p_i)/p$  в МЭЗ в зависимости от плотности тока преобразователя:  
 а — однородный коллектор; б — составной коллектор; —■—  $J = 4,5 \text{ A/cm}^2$ ;  
 —♦—  $J = 5 \text{ A/cm}^2$ ; —▲—  $J = 7 \text{ A/cm}^2$ ; —●—  $J = 10 \text{ A/cm}^2$ ; —\*—  $J = 11 \text{ A/cm}^2$



**Рис. 5.** Распределения плотности тока ионов по длине МЭЗ в зависимости от плотности тока преобразователя:  
 а — однородный коллектор; б — составной коллектор; —■—  $J_i = 4,5 \text{ A/cm}^2$ ;  
 —♦—  $J_i = 5 \text{ A/cm}^2$ ; —▲—  $J_i = 7 \text{ A/cm}^2$ ; —●—  $J_i = 10 \text{ A/cm}^2$ ; —\*—  $J_i = 11 \text{ A/cm}^2$

Полученный вид ВАХ может быть объяснен повышенным коэффициентом отражения электронов плазмы от приколлекторного скачка потенциала, форма которого существенно зависит от конфигурации «поля пятен» на поверхности коллектора [10]. При этом уменьшение прозрачности электрода при большом электронном токе с коллектора приводит к уменьшению выходной мощности преобразователя [11].

При плотности тока менее  $5 \text{ A/cm}^2$  важную роль в ТЭП с составным коллектором играет обратный ток эмиссии. Для обеспечения протекания тока необходима повышенная концентрация частиц, практически совпадающих с концентрацией при однородном коллекторе, что вызывает небольшое ( $\sim 0,02 \text{ В}$ ) увеличение приэмиттерного скачка потенциала (см. рис. 3) и, как следствие, потери выходного напряжения ( $\sim 0,02 \text{ В}$ ).



**Рис. 6.** Распределение температуры электронов по длине МЭЗ в зависимости от плотности тока преобразователя:

$a$  — однородный коллектор;  $b$  — составной коллектор;  $\blacksquare$  —  $J = 4,5 \text{ A/cm}^2$ ;  
 $\blacklozenge$  —  $J = 5 \text{ A/cm}^2$ ;  $\blacktriangledown$  —  $J = 7 \text{ A/cm}^2$ ;  $\blacklozenge$  —  $J = 10 \text{ A/cm}^2$ ;  $\blackstar$  —  $J = 11 \text{ A/cm}^2$

Понижение давления паров цезия до  $13,3 \text{ Па}$  приводит к увеличению степени ионизации плазмы: уже в рабочей области ТЭП почти вся плазма переходит в сильно ионизованное состояние (см. рис. 2, 4). В сильно ионизованной плазме электрическое поле становится тянущим для электронов, и электронный ток становится в основном полевым, а не диффузионным.

Для сильно ионизованной плазмы ТЭП характерно небольшое (всего в 2 раза) изменение концентрации по зазору [5], в то время как в классическом дуговом режиме концентрация плазмы по зазору изменяется на порядок. При возрастании тока повышение концентрации заряженных частиц в максимуме задерживается ввиду того, что электроны и ионы начинают вносить существенный вклад в полное давление в объеме МЭЗ. Увеличение парциальных давлений электронов и ионов до  $10 \dots 15 \%$  от полного давления смеси в МЭЗ приводит к тому, что атомы вытесняются из приэмиттерной области, где плазма переходит в полностью ионизованное состояние. На рис. 2



виден провал концентрации в наиболее горячей приэмиттерной части плазмы.

Пониженному давлению паров цезия соответствует меньшая концентрация ионов в зазоре, порядка  $(1...2) \cdot 10^{13}$   $1/\text{см}^3$ , и значения плотности ионного тока до  $0,15$   $\text{А}/\text{см}^2$ , в то время как для дугового режима характерны значения концентрации ионов  $\sim 10^{14}$   $1/\text{см}^3$  и величина ионного тока до 10 % от полного тока разряда, соответственно. С одной стороны, ионный ток быстро возрастает с повышением температуры электронов, но с другой стороны, — падает вследствие снижения концентрации плазмы. При этом по сравнению с классическим дуговым режимом уменьшаются потери энергии на ионизацию.

Кроме того состояние плазмы изменяется и в неравновесных приэлектродных областях (см. рис. 5), но в отличие от слабоионизованной плазмы в приколлекторной области можно увидеть ионизацию ввиду высокой температуры электронов, а не рекомбинацию ( $(dj_i)/(dx) < 0$  на всей длине МЭЗ) [5].

В отличие от классического дугового режима ТЭП, для которого характерны значения температуры электронов на уровне 2000...3000 К, в рассматриваемом в настоящей статье случае возрастает температура электронов (см. рис. 6). Следовательно, происходит увеличение приэлектродных потенциальных барьеров (при больших токах приэмиттерный потенциальный скачок начинает превышать первый потенциал возбуждения атома цезия, равный 1,4 эВ), ограничивающих потоки электронов из плазмы на электроды. Поэтому потенциальная яма для электронов при низком давлении получается более глубокой (см. рис. 3).

**Заключение.** В преобразователе с составным коллектором наблюдаются пониженные значения концентрации частиц и температуры электронов. Распределения параметров плазмы свидетельствуют о протекании тока через преобразователь даже при менее плотной и горячей плазме и меньших потерях по сравнению с ТЭП с однородным коллектором. Это находит отражение в виде несколько (на  $\sim 0,1$  В) повышенного выходного напряжения преобразователя в определенной области ВАХ.

По сравнению с классическим дуговым характерны следующие особенности рассмотренных режимов:

- более плавные изменения потенциала плазмы и концентрации заряженных частиц;
- бóльший градиент температуры электронов по длине МЭЗ.

Данный эффект связан с меньшим влиянием рассеяния частиц в объеме МЭЗ вследствие пониженного значения давления паров цезия. Хотя приращение напряжения по сравнению с однородным коллектором и имеет экстремум, согласно полученным результатам,

преимущество ТЭП с составным коллектором можно наблюдать в наиболее интересной с практической точки зрения области ВАХ — максимальной выходной мощности. Несмотря на то, что максимальный прирост напряжения 0,1 В не соответствует максимальной выходной мощности для полученной ВАХ, при проведении оптимизации режимов работы ТЭП возможно смещение данной точки по кривой ВАХ.

Помимо проведения оптимизации по давлению паров цезия и температурам электродов, требуется тщательно теоретически и экспериментально рассмотреть конфигурацию поверхности самого коллектора с точки зрения параметров образующегося на его поверхности «поля пятен». В частности, необходимо исследовать влияние геометрических размеров, отличающихся по работе выхода областей, на состояние плазмы в МЭЗ и выходные характеристики ТЭП.

Поставленная цель и задача исследования показывают перспективность применения составных коллекторов в высокотемпературном ТЭП для снижения барьерного индекса и увеличения его КПД.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Синявский В.В. Высокотемпературные системы преобразования тока перспективных космических энергодвигательных установок. *Известия Российской академии наук. Сер. Энергетика*, 2009, № 4, с. 137–144.
- [2] Онуфриева Е.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Синявский В.В., Ивашкин А.Б., Онуфриев В.В. О расчете характеристик разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде в режиме обратного тока. *Известия Российской академии наук, Сер. Энергетика*, 2017, № 6, с. 87–96.
- [3] Онуфриева Е.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Синявский В.В., Ивашкин А.Б., Онуфриев В.В. О расчете напряжения зажигания обратного дугового разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде. *Известия Российской академии наук, Сер. Энергетика*, 2018, № 4, с. 108–115.
- [4] Щербинин П.П. *Генераторы прямого преобразования тепловой и химической энергии в электрическую. Т. 6: Термоэмиссионные преобразователи*. Москва, ВИНТИ, 1981, 242 с.
- [5] Яшин М.С., Онуфриев В.В. Об особенностях работы составного высокотемпературного коллектора в термоэмиссионном преобразователе при пониженном давлении паров цезия. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-7-1514>
- [6] Мойжес Б.Я., Пикус Г.Е. ред. *Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма*. Москва, Наука, 1973, 480 с.
- [7] Стаханов И.П., Черковец В.Е. *Физика термоэмиссионного преобразователя*. Москва, Энергоатомиздат, 1985, 208 с.
- [8] Бабанин В.И., Ситнов В.И., Соловьев А.В., Эндер А.Я. Исследование области обратных токов в кнудсеновском диоде с поверхностной ионизацией в перекомпенсированном режиме при наличии эмиссии электронов с коллектора П. Малый межэлектродный промежуток. *Журнал технической физики*, 2002, т. 72, вып. 12, с. 32–38.

- [9] Кузнецов В.И., Эндера А.Я. Теория устойчивости кнудсеновских плазменных диодов. *Физика плазмы*, 2015, т. 41, вып. 3, с. 262–276.
- [10] Шуандер Ю.А., Юдицкий В.Д. Влияние отражения электронов у коллектора на ВАХ ТЭП. *Сб. докл. Конференции по термоэмиссионному методу преобразования тепловой энергии в электрическую*. Обнинск, Физ.-энерг. ин-т, 1979, с. 76–77.
- [11] Kaibyshev V.Z., Lysikov A.V. Influence of the collector emission properties on the efficiency of thermionic energy converter in the arc regime. *Atomic energy*, 2000, vol. 3, pp. 709–715.

Статья поступила в редакцию 02.03.2020

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Яшин М.С., Онуфриев В.В. Высокотемпературный термоэмиссионный преобразователь с пониженным давлением паров цезия и сверхвысокотемпературным составным коллектором. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1972>

**Яшин Максим Сергеевич** — начальник отдела ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ».  
e-mail: [yashinms@sialuch.ru](mailto:yashinms@sialuch.ru)

**Онуфриев Валерий Валентинович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: [onufriev@bmstu.ru](mailto:onufriev@bmstu.ru)

## The high-temperature TEC at reduced cesium vapor pressures and with the ultrahigh-temperature collector

© M.S. Yashin<sup>1</sup>, V.V. Onufriev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LUCH FSUE, Moscow, Podolsk, 142103, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The current-voltage characteristics of a high-temperature thermionic energy converter (TEC) with a homogeneous and macroscopically inhomogeneous (component) collector at a reduced cesium vapor pressure were calculated numerically. The case when the surface of the TEC collector is a set of periodically located macroscopic elements with different work function is considered. Based on a comparative analysis of the distributions of the parameters of low-temperature cesium plasma along the length of the interelectrode gap for various points of the current-voltage characteristics for two collector options, qualitative conclusions are made about the difference between the processes that occur in the converter with a component collector and the effect of these processes on the course of the current-voltage characteristic. The results indicate the advantage of the TEC with a component collector relative to a converter with a homogeneous collector, in the most interesting, from the point of view of generating electric energy (maximum output power), current-voltage characteristics. To obtain quantitative dependences of the influence of macroscopic inhomogeneity of the collector on the electron work function on the output characteristics of a high-temperature TEC, it is necessary to conduct optimization numerical experiments and experimental studies.*

**Keywords:** TEC, component collector, spot field, direct energy conversion, plasma

### REFERENCES

- [1] Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Sinyavsky V.V. Vysokotemperaturnye sistemy preobrazovaniya toka perspektivnykh kosmicheskikh energodvigatelnkh ustanovok [High-Temperature current conversion systems for advanced space power propulsion systems]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2009, no. 4, pp. 137–144.
- [2] Onufrieva E.V., Grishin Yu.M., Sidnyaev N.I., Sinyavsky V.V., Ivashkin A.B., Onufriev V.V. O raschete harakteritik razryada v vysokovoltnom plazmennom termoemissionnom diode v regime obratnogo toka [On calculating discharge characteristics in a high-voltage plasma thermionic diode in reverse current mode]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2017, no. 6, pp. 87–96.
- [3] Onufrieva E.V., Grishin Yu.M., Sidnyaev N.I., Sinyavsky V.V., Ivashkin A.B., Onufriev V.V. O raschete napryazheniya zanjiganiya obratnogo dugovogo razryada v vysokovoltnom termoemissionnom diode [On calculating the ignition voltage of a reverse arc discharge in a high-voltage plasma thermionic diode]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2018, no. 4, pp. 108–115.
- [4] Sherbinin P.P. *Generatory pryamogo preobrazovaniya teplovoi i khimicheskoi energii v elektricheskuyu. T. 6: Termoemissionnye preobrazovately* [Direct conversion of thermal and chemical energy to electrical energy. Vol.6: Thermionic converters]. Moscow, VINITI RAS, 1981, 242 p.
- [5] Yashin M.S., Onufriev V.V. Ob osobennostyakh raboty sostavnogo vysokotemperaturnogo kollektora v termoemissionnom preobrazovatele pri ponizhenom

- davlenii parvo tsesiya [On the features of the composite high-temperature collector performance in the thermionic converter at reduced cesium pressures]. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-7-1514>
- [6] Moyzhesa B.Ya., Pikusa G.E., ed. *Termoemissionnye preobrazovateli i nizkotemperaturnaya plazma* [Thermionic converters and low-temperature plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 480 p.
- [7] Stakhanov I.P., ed. *Fizicheskie osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii* [Physical fundamentals of thermionic energy conversion]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973, 376 p.
- [8] Babanin V.I., Sitnov V.I., Ender A.Y., Soloviev A.V. Study of the reverse current range in a Knudsen diode with surface ionization under over neutralized conditions in the presence of electron emission from the collector: part II. Small electrode spacing. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 12, pp. 1518–1523.
- [9] Kuznetsov V.I., Ender A.Y. Stability theory of Knudsen plasma diodes. *Plasma Physics Reports*, 2015, vol. 11, pp. 905–917.
- [10] Shuander Yu.A., Yuditskiy V.D. *Vliyaniye otrazheniya elektronov ot kollektora na VAKH TEP* [The influence of electron reflection near collector to I-V curve of TEC]. In: *Reports on Conference on the thermionic energy conversion*. Obninsk, Phis-En. Institute, 1979, pp. 76–77.
- [11] Kaibyshev V.Z., Lysikov A.V. Influence of the collector emission properties on the efficiency of thermionic energy converter in the arc regime. *Atomic energy*, 2000, vol. 3, pp. 709–715.

**Yashin M.S.**, Head of Department, LUCH FSUE. Research interests: Thermionic energy conversion and onboard power plants. e-mail: [yashinms@sialuch.ru](mailto:yashinms@sialuch.ru)

**Onufriev V.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Plasma energy plants, Bauman Moscow State Technical University. Space nuclear power plants, current conversion systems and high-power propulsion spacecraft systems. e-mail: [onufriev@bmstu.ru](mailto:onufriev@bmstu.ru)