

04; 11; 12

© 1990 г.

ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С МИКРОПОЛОСТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В ДУГОВОМ РЕЖИМЕ С ЦЕЗИЕВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

В. Д. Атамасов, Н. А. Иванова

Теоретически и экспериментально исследованы вольт-амперные характеристики ТЭП с электродами, имеющими микрополостную структуру поверхности. Представлена математическая модель, позволившая рассмотреть некоторые типы микрополостного развития поверхности электродов и проанализировать распределения параметров плазмы в таких преобразователях. Показано, что микрополостной катод обладает более высокими эмиссионными свойствами по сравнению с гладким катодом из монокристаллического вольфрама с вакуумной работой выхода 5.0 эВ. Согласно расчетным данным, использование микрополостного катода может увеличить мощность, генерируемую ТЭП, примерно на 10—60 % в зависимости от типа развития поверхности. Анализ расчетных зависимостей мощности преобразователя с микрополостным анодом от характерных геометрических размеров и типа микрополостной структуры анода, от параметров режима преобразователя, а также эмиссионных свойств анодного материала позволил оценить возможный выигрыш по мощности 10—30 % и определить условия, при которых целесообразно использование микрополостных анодов. Экспериментальные исследования подтвердили основные теоретические результаты.

Введение

Одним из способов повышения энергетических характеристик термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) является использование электродов с многополостной структурой поверхности [1, 2]. В зависимости от соотношения между геометрическими размерами полостей (шириной b и глубиной l) и длиной свободного пробега электронов в плазме l_e условились различать макро- и микрополостную структуры.

Целью настоящей работы является изучение характеристик ТЭП с микрополостным электродом, для которого выполняется неравенство

$$L_D \ll b, \quad l \ll l_e, \quad (1)$$

где L_D — дебаевский радиус экранирования.

Решение данной задачи требует привлечения как теоретических, так и экспериментальных методов исследования.

Математическая модель ТЭП с микрополостным электродом

В [3] проведено теоретическое рассмотрение потоков заряженных частиц и энергии на границе плазмы с электродом, имеющим на поверхности треугольные полости, характерные размеры которых удовлетворяют неравенству (1). В [4] сделана оценка влияния такой структуры электродов на параметры плазмы и характеристики преобразователя, работающего в дуговом цезиевом режиме. Показано, что в этом случае следует ожидать повышения генерируемой мощности ТЭП. Однако в настоящее время в литературе отсутствуют данные, позволяющие проанализировать зависимость характеристик преобразователя с микрополостными электродами от таких факторов, как давление цезия, ширина межэлектродного зазора, эмиссионные свойства электродов, температуры электродов

и др. Это объясняется в первую очередь сложностью и трудоемкостью расчета характеристик ТЭП в дуговом режиме на основе численного решения полной системы уравнений переноса.

В настоящей работе для описания процессов в плазме термоэмиссионного преобразователя с изотермическими эквипотенциальными электродами используется система нестационарных уравнений переноса заряда, импульса электронов и ионов и энергии электронов [5]

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(nV_e) = \Gamma, \quad (2)$$

$$mn \frac{\partial V_e}{\partial t} + mnV_e \frac{\partial V_e}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(nkT_e) = -q \frac{\partial \varphi}{\partial x} n + R_e, \quad (3)$$

$$Mn \frac{\partial V_i}{\partial t} + MnV_i \frac{\partial V_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(nkT) = q \frac{\partial \varphi}{\partial x} n + R_i, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} nkT_e \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{3}{2} nkT_e V_e \right) + nkT_e \frac{\partial V_e}{\partial x} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = Q_e, \quad (5)$$

где n — концентрация плазмы; T_e — температура электронов; φ — потенциал плазмы (за нуль отсчета потенциала принята поверхность анода); V_e и V_i — дрейфовые скорости электронов и ионов соответственно; Γ — скорость ионизации-рекомбинации [6]; R_e , R_i — силы трения, действующие на электроны и ионы со стороны других компонент плазмы; q_e и Q_e — поток тепла и выделение тепла в электронной компоненте вследствие столкновений; m и M — массы электрона и иона соответственно; q — заряд электрона; k — постоянная Больцмана.

Для определения величин R_e , R_i , Q_e и q_e использовались выражения, полученные в [7] с помощью модификации метода Энского—Чепмена.

Граничные условия для гладкого электрода записываются в виде алгебраических соотношений, связывающих потоки частиц и энергии с граничными значениями параметров плазмы в приэлектродной области [6]. Остановимся подробнее на балансных уравнениях для потоков частиц и энергии на границе плазмы с микрополостным электродом. Выполнение неравенства (1) позволяет рассматривать движение частиц в микрополости без учета столкновений, а отражение их от приэлектродного барьера — как упругое отражение от твердой поверхности. В [8] получены выражения для тока частиц из плазмы на микрополостной электрод $j_{\text{пк}}$, тока эмиссии j_e с такого электрода и для соответствующих потоков энергии $S_{\text{пк}}$ и S_e , если функция распределения электронов является максвелловской,

$$j_{\text{пк}} = j_{\text{пк}}^{(0)} f\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT_e}\right), \quad j_e = j_e^{(0)} f\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT}\right), \quad (6)$$

$$S_{\text{пк}} = S_{\text{пк}}^{(0)} f\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT_e}\right) \left[1 - \frac{q\Delta\varphi}{2kT_e} \frac{f_1\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT_e}\right)}{f\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT_e}\right)} \right], \quad (7)$$

$$S_e = S_e^{(0)} f\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT}\right) \left[1 - \frac{q\Delta\varphi}{2kT} \frac{f_1\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT}\right)}{f\left(\frac{q\Delta\varphi}{kT}\right)} \right], \quad (8)$$

где $j_{\text{пк}}^{(0)}$ и $S_{\text{пк}}^{(0)}$ — плотность тока и потока энергии электронов из плазмы на гладкий электрод; $j_e^{(0)}$ и $S_e^{(0)}$ — плотность тока и потока энергии электронов, эмиттированных гладким электродом; T — температура электрода; T_e — температура электронов вблизи электрода; $\Delta\varphi$ — приэлектродный потенциалный барьер;

$$f_1(z) = e^z \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{z}}{\theta}\right) \right], \quad f(z) = f_1(z) + \frac{1}{\sin\theta} \operatorname{erf}(\sqrt{z} \operatorname{tg}\theta),$$

2θ — угол между боковыми гранями полости.

При малых углах θ , когда развитие поверхности является предельным, выражения для функций f и f_1 упрощаются. Для одномерного развития

$$f_1(z) = e^z [1 - \operatorname{erf}(\sqrt{z})], \quad f = f_1 + 2\sqrt{\frac{z}{\pi}},$$

для двумерного развития

$$f_1(z) = 1, \quad f(z) = 1 + z.$$

Для учета влияния микрополостной структуры поверхности на параметры плазмы в приэлектродной области необходимо в граничных уравнениях изменить потоки частиц и энергии в соответствии с (6)—(8).

В условиях реальной конструкции степень пористости Π рабочей поверхности микрополостного электрода, как правило, отличается от единицы. В этом случае ток частиц из плазмы на микрополостной электрод $\bar{j}_{\text{пл}}$ и ток эмиссии с такого электрода \bar{j}_s рассчитываются по формулам

$$\bar{j}_{\text{пл}} = (1 - \Pi) j_{\text{пл}}^{(0)} + \Pi j_{\text{пл}}, \quad \bar{j}_s = (1 - \Pi) j_s^{(0)} + \Pi j_s,$$

где $j_{\text{пл}}$ и j_s определяются выражениями (6).

Аналогичным образом с учетом (7) и (8) вычисляются соответствующие потоки энергии $\bar{S}_{\text{пл}}$ и \bar{S}_s . Поскольку уравнения (2)—(8) являются существенно нелинейными, то решение задачи выполнялось на ЭВМ с помощью разработанного в [8] алгоритма, в основе которого лежит метод последовательной верхней релаксации.

Результаты расчетов параметров плазмы и характеристик ТЭП с микрополостным катодом

Для выявления и анализа особенностей физических процессов, протекающих в ТЭП с микрополостным катодом, целесообразно рассмотреть случай, когда степень пористости рабочей поверхности $\Pi_x = 1$. При расчете полагалось, что катод изготовлен из монокристаллического вольфрама, анод — из ниобий-никелевого сплава СБ-3, а ширина межэлектродного зазора $d = 0.25$ мм.

Т а б л и ц а 1

Тип катода	Гладкий катод	Одномерное развитие		Двумерное развитие ($\theta_x \rightarrow 0$)
		$\theta_x = \frac{\pi}{4}$	$\theta_x \rightarrow 0$	
φ_0 , В	0.94	0.85	0.72	0.67
φ_k , В	1.14	0.93	0.62	0.23

Сравнение вольт-амперных характеристик (ВАХ) преобразователей с различными катодами (рис. 1, а) показывает, что наличие микрополостной структуры на поверхности катода приводит к увеличению наклона ВАХ, повышению генерируемой мощности и сдвигу максимума мощности в сторону меньших напряжений. Такое изменение ВАХ свидетельствует об улучшении эмиссионных свойств микрополостного катода по сравнению с гладким. При этом с уменьшением угла между боковыми гранями использование микроразвития поверхности катода становится более эффективным. Из рассмотренных типов преобразователей наилучшими характеристиками обладает прибор с катодом, имеющим двумерную микрополостную структуру поверхности с малыми углами между боковыми гранями полости.

На рис. 1, б представлены распределения параметров плазмы (концентрации, температуры электронов и потенциала) в межэлектродном зазоре преобразователей с различными катодами при одинаковом проходящем токе ($j = 40$ А/см²). Из рисунка следует, что нанесение на поверхность катода микрополостной структуры приводит к уменьшению концентрации и температуры электронов, а также к повышению потенциала плазмы практически во всем

объеме зазора, особенно в его прикатодной области. При этом снижаются потери напряжения φ_0 в плазме (табл. 1), а прианодный скачок потенциала остается неизменным ($\varphi_a \approx 0.12$ В).

Вблизи анода параметры плазмы почти не различаются, в то время как у катода расхождение по величине температуры электронов достигает 800° , а по значениям концентрации — примерно в 2 раза.

Такое изменение параметров плазмы в ТЭП с микрокатодом обусловлено следующим. Для обеспечения тока через преобразователь, превышающего ток термоэлектронной эмиссии, необходимо тратить энергию на создание у катода пристеночного скачка потенциала, увеличивающего эмиссию за счет эффекта Шоттки. Прикатодный потенциальный скачок приводит к повышению темпера-

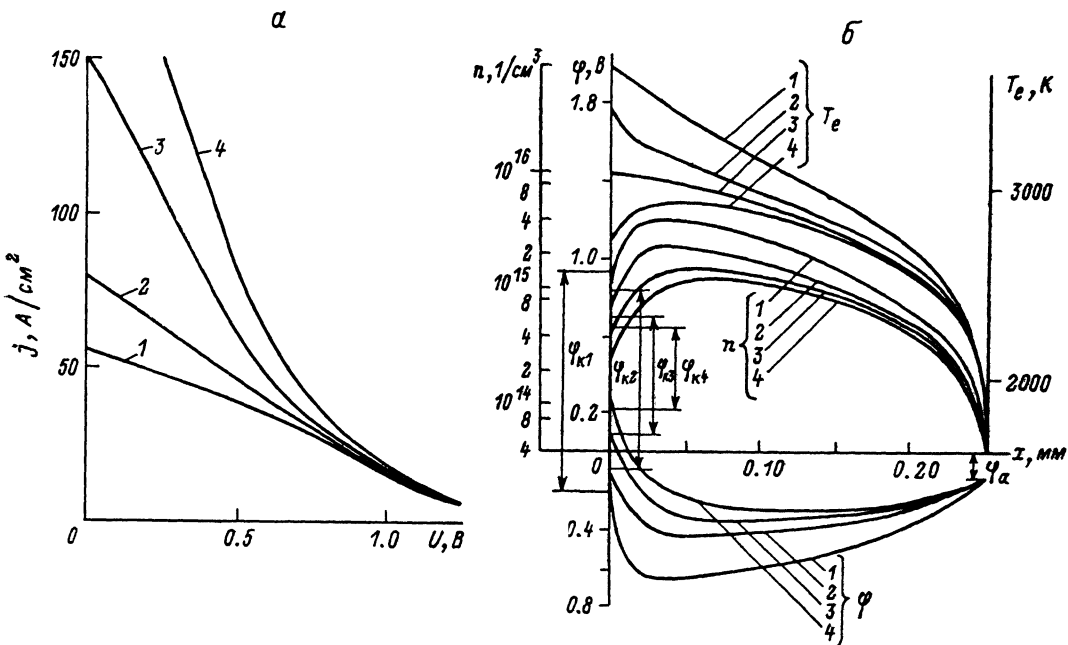


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики (а) и распределения параметров плазмы (б) в ТЭП с гладким и микрополостным катодами.

$T_k = 2153$ К, $T_a = 1011$ К, $p_{CS} = 6$ Тор; 1 — гладкий катод; 2 — одномерное развитие, $\theta_k = \pi/4$; 3 — одномерное развитие, $\theta_k \rightarrow 0$; 4 — двумерное развитие, $\theta_k \rightarrow 0$.

туры электронов, ускоряющихся на нем, что в свою очередь вызывает усиление процесса объемной ионизации в прикатодной области. Повышение эмиссионной способности катода за счет нанесения на его поверхность микрополостной структуры позволяет уменьшить прикатодный скачок потенциала (табл. 1), в результате чего снижается температура электронов вблизи катода по сравнению с ТЭП, имеющим гладкий катод. При этом падает интенсивность процесса объемной ионизации и, следовательно, уменьшаются потери напряжения на разогрев электронов и на ионизацию. Кроме того, снижение концентрации и температуры электронов приводит к уменьшению потерь энергии электронов, вызванных их рассеянием на других частицах.

Исследование вопроса о влиянии степени пористости поверхности микрополостного катода на характеристики ТЭП показало, что с уменьшением параметра P_k преимущества преобразователя с микрополостным катодом снижаются.

Таким образом, согласно полученным расчетным данным, наиболее целесообразным является использование катода с двумерной микрополостной структурой, для которой параметры P_k и θ_k приближаются к своим предельным значениям ($P_k \rightarrow 1$, $\theta_k \rightarrow 0$). Безусловно, случай предельного развития поверхности на практике реализован быть не может. Однако рассмотрение данного типа микрополостной структуры для иллюстрации результатов теоретического ис-

следования позволяет, во-первых, рассчитать оптимальные энергетические характеристики ТЭП с микрокатодом и, во-вторых, исследовать их зависимость от параметров режима преобразователя, эмиссионных свойств электродов и т. д. С этой целью были проведены расчеты для различных температур катода и давлений цезия. Из анализа результатов, приведенных в табл. 2, следует, что при каждом значении температуры T_k оптимальное давление цезия для ТЭП с микрокатодом существенно меньше, чем для преобразователя с гладким катодом. Необходимо отметить, что при всех исследованных температурах катода

Т а б л и ц а 2

Тип катода	T_k, K	$(p_{Cs})_{opt}, \text{Тор}$	$N_{max}, \text{Вт/см}^2$
Гладкий	1788	2.5	9
	2018	7	17.2
	2303	16	38
Одномерное развитие	1788	2	11.3
	2018	5	22.4
	2303	12	49
Двумерное развитие	1788	1.5	14
	2018	4	29
	2303	8	64

преимущества ТЭП с микрополостным развитием катодной поверхности заметнее в области давлений цезия, меньших оптимального, когда работа выхода гладкого катода еще достаточно высока, а эмиссионный ток Ричардсона мал. Во всем рассмотренном диапазоне изменения температуры катода коэффициент увеличения мощности ТЭП за счет использования микрокатода с одномерным развитием составляет 1.2—1.3 (при оптимальных значениях давления цезия и напряжения на нагрузке), а в случае двумерного развития поверхности 1.6—1.7.

Исследование вопроса о влиянии вакуумной работы выхода катодного материала $W_k^{(0)}$ на характеристики ТЭП с микрополостной структурой поверхности катода показало, что с уменьшением $W_k^{(0)}$ эффективность применения таких катодов возрастает (например, для поликристаллического вольфрама с $W_k^{(0)}=4.6$ эВ коэффициент увеличения мощности во всем диапазоне температур катода достигает ~ 1.3 —1.4 при одномерном развитии поверхности и 1.7—1.8 в случае двумерного развития катода).

В табл. 3 представлены значения коэффициента увеличения мощности за счет использования микрополостных катодов для

Т а б л и ц а 3

Ширина МЭЗ, мм	Коэффициент увеличения мощности	
	одномерное развитие	двумерное развитие
0.25	1.25	1.67
0.4	1.35	1.83
0.6	1.45	1.95

различных типов развития поверхности при изменении ширины межэлектродного зазора. Расчет проводился при $T_k=2153 K$, $p_{Cs}-opt$ и $U-opt$.

С увеличением ширины МЭЗ преимущества ТЭП с микрополостными катодами возрастают. Причиной этого является уменьшение оптимального давления цезия с ростом ширины зазора при неизменных температурах электродов. Так, для ТЭП с гладким катодом при $d=0.25$ мм $(p_{Cs})_{opt} \approx 12$ Тор, а при $d=0.6$ мм $(p_{Cs})_{opt} = 6$ Тор. Как отмечалось ранее, при низких давлениях энергетическая эффективность микрополостных катодов увеличивается.

Создание микрополостной структуры на поверхности электрода, характеризующейся определенным типом развития (одномерным или двумерным) и конкретными значениями параметров Π_k ($0 < \Pi_k < 1$) и θ_k ($0 < \theta_k < \pi/2$), определяется в первую очередь технологическими возможностями. Использование рассмотренной выше методики расчета ВАХ ТЭП с микрополостным электродом позволяет оценить мощность преобразователя для любого типа развития

поверхности катода. Так, при $\Pi_k=0.5$ и $\theta_k \rightarrow 0$ увеличение мощности за счет применения микрополостного катода с одномерным развитием поверхности составляет 12—14 %, а с двумерной структурой поверхности 25—30 %. Согласно расчетным данным, аналогичные результаты получаются и в случае применения микрополостного катода с $\Pi_k=1$ и $\theta_k=\pi/8$.

Таким образом, выполненные теоретические исследования показывают, что использование микрополостных катодов может привести к повышению удельной мощности термоэмиссионного преобразователя в дуговом цезиевом режиме по сравнению с ТЭП, имеющим гладкие электроды. Анализ полученных данных позволяет определить оптимальную геометрию микрополостей и область параметров режима ТЭП, где применение таких электродов наиболее целесообразно.

Экспериментальные исследования характеристик ТЭП с гладкими и микрополостными катодами

Для получения вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя с микрополостным катодом в более широком диапазоне режимных параметров, а также для подтверждения физических концепций процессов, протекающих в данных преобразователях, и проверки адекватности математиче-

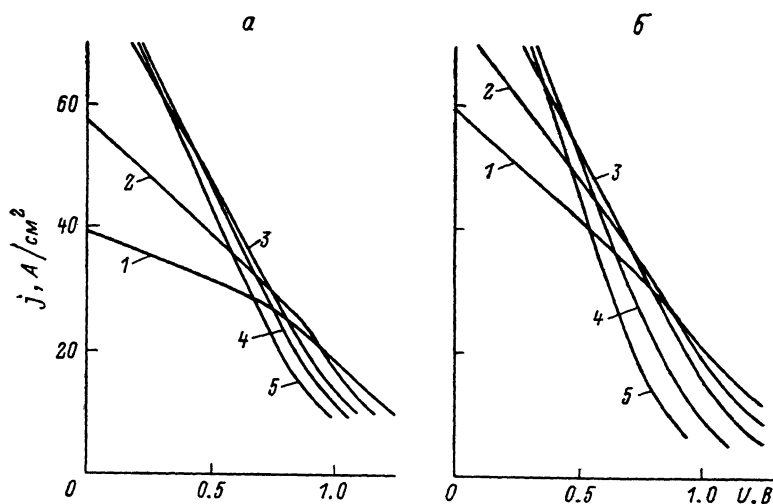


Рис. 2. Экспериментальные вольт-амперные характеристики ТЭП с гладким (а) и микрополостным (б) катодами.

$T_k=2153$ К, $T_a=1011$ К; p_{Cs} , Тор: 1 — 4.1, 2 — 5.9, 3 — 10.5, 4 — 16.5, 5 — 23.

ской модели, используемой для их описания, были проведены экспериментальные исследования лабораторного прибора с двумя электродными парами плоскопараллельной геометрии [2]. Такая конструкция позволяет одновременно регистрировать ВАХ преобразователей с гладким и микрополостным катодами в одинаковых физических условиях.

Для сравнительного анализа экспериментальных ВАХ преобразователей с катодами, имеющими различную структуру поверхности, исследовались следующие электродные пары: микрополостной катод—гладкий анод и гладкий катод—гладкий анод. Аноды были изготовлены из ниобий-никелевого сплава с содержанием никеля ~ 0.2 %, а гладкий катод — из монокристаллического вольфрама с гранью (110) на рабочей поверхности. Структура микрополостного катода была образована с помощью вольфрамовой и молибденовой фольги толщиной 20 мкм, наложенных друг на друга и свернутых в рулон. После обрезки и зачеканки рулона в керн катода молибденовая фольга растворялась с помощью химических реактивов. В результате была получена поверхность с одномерным микрополостным развитием и степенью пористости $\Pi_k=0.5$. Ширина межэлектродного зазора во всех экспериментах составляла 0.25 мм.

Т а б л и ц а 4

Т _к , К	Тип катода	Максимальная удельная мощность, Вт/см ²	Напряжение, соответствующее максимальной удельной мощности, В	Коэффициент увеличения мощности	Оптимальное давление цезия, Тор
1643	Гладкий	6.7	0.35	1.13	1.7
		7.6	0.33		1.2
1793	Гладкий	11.5	0.5	1.15	3.2
		13.2	0.47		2
1993	Гладкий	17.5	0.55	1.14	8
		20.0	0.52	1.14	6.3
2153	Гладкий	24.9	0.64	1.13	11
		28.1	0.6		8
2363	Гладкий	36	0.8	1.14	17
		41.2	0.75		14
2573	Гладкий	51.4	1.0	1.12	28
		57.5	0.97		25

Как показали результаты предварительных теоретических исследований, преобразователь с рассматриваемым типом микрополостной структуры катодной поверхности (одномерное развитие, $\Pi_k = 0.5$, угол между гранями полостей $\theta_k \rightarrow 0$) имеет относительно невысокий уровень превышения ($\sim 12-15\%$) генерируемой мощности над мощностью ТЭП с гладкими электродами. В связи с этим для получения достоверных данных особое внимание было уделено оценке случайных и устранению систематических погрешностей эксперимента.

Сравнение характеристик преобразователей с различной структурой поверхности катода было проведено при $T_k = 1643-2573$ К. На рис. 2 представлены ВАХ ТЭП с гладким (а) и микрополостным (б) катодами при температуре катодов $T_k = 2153$ К и различных давлениях цезия. Нетрудно видеть, что вольт-амперные характеристики преобразователя с микрополостным катодом смещаются в сторону больших напряжений, а их наклон увеличивается. Это является следствием улучшения эмиссионных свойств катода и снижения потерь в плазме при нанесении на его поверхность микрополостей. Наиболее заметно эти преимущества проявляются в области токов, превышающих ток эмиссии Ричардсона, когда часть контактной разности потенциала затрачивается на создание у поверхности катода электрического поля и увеличение эмиссионного тока за счет эффекта Шоттки. При этом в преобразователе, имеющем катод с лучшими эмиссионными свойствами, потери напряжения в прикатодной области плазмы меньше. При низких давлениях цезия, когда работа выхода гладкого катода неоптимально высока, смещение ВАХ ТЭП с микрокатодом в сторону больших напряжений (при фиксированном токе) составляет 0.15—0.25 В в области максимума мощности и резко увеличивается по мере приближения к току короткого замыкания. С ростом давления цезия ток эмиссии гладкого катода возрастает и различие в характеристиках преобразователей уменьшается. Анализ зависимостей максимальной мощности ТЭП от давления цезия (табл. 4) позволяет сделать вывод о том, что во всем диапазоне исследованных температур использование микрополостного катода увеличивает удельную мощность преобразователя примерно на 12—15% (при оптимальных значениях давления цезия и напряжения на нагрузке). Поскольку при высоких температурах катода ($T_k > 2400$ К) влияние эмиссионных свойств катодного материала на ВАХ преобразователя уменьшается, то с ростом T_k преимущества микрополостного катода несколько ослабевают. Следует также отметить, что для преобразователя с микрокатодом оптимальное давление цезия на 1—3 Тор ниже. Это объясняется тем, что максимуму мощности ТЭП с микрополостным катодом при любом p_{Cs} соответствуют большие токи и, следовательно, более высокая концентрация

плазмы и более интенсивные процессы диссипации энергии в межэлектродном зазоре (например, при $T_e = 2153$ К и $p_{Cs} = 5.9$ Тор $j|_{N=N_{max}} = 30$ А/см² для гладкого катода и $j|_{N=N_{max}} = 40$ А/см² для микрополостного). Поэтому с увеличением давления цезия ограничение роста удельной мощности преобразователя наступает быстрее и величина оптимального давления уменьшается. При p_{Cs} , меньших оптимального, эффективность микрополостного катода выше и коэффициент увеличения мощности составляет 1.20—1.25. С ростом давления характеристики преобразователей с различными катодами сближаются.

Результаты теоретического исследования процессов в ТЭП с микрополостным анодом

Сравнительный анализ характеристик ТЭП с гладким и микрополостным анодами был выполнен в интервале температур катода $T_k = 1700—2300$ К и давлений цезия $p_{Cs} = 1—30$ Тор.

Как и в случае микрокатода, результаты расчета показали, что эффективность микрополостного анода возрастает с уменьшением угла между боковыми

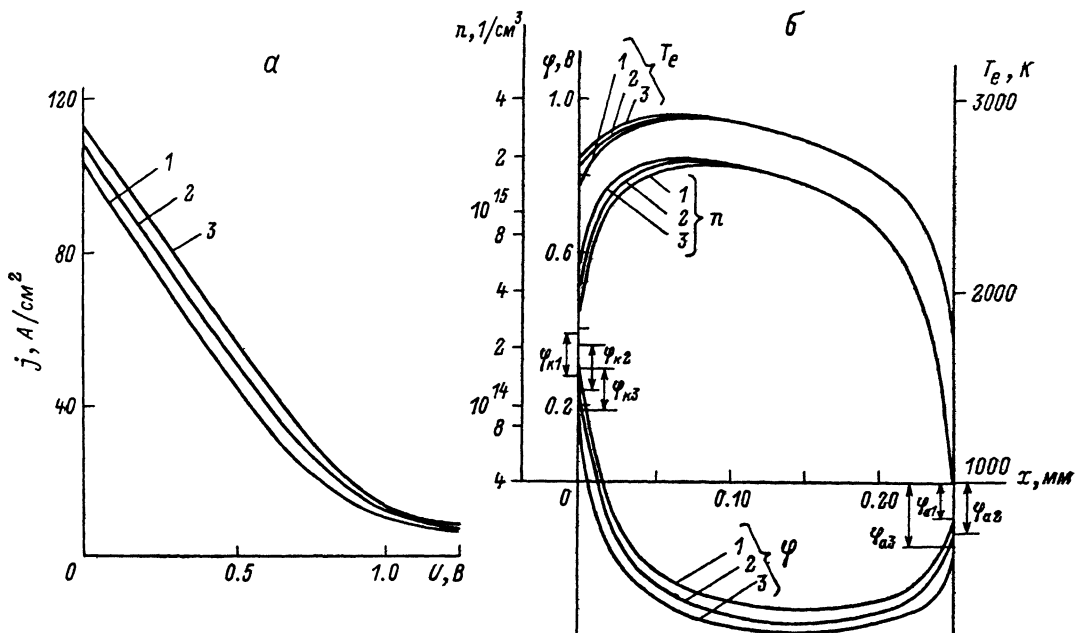


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики (а) и распределения параметров плазмы в МЭЗ (б) для ТЭП с гладким и микрополостным анодами.

$T_k = 2123$ К, $T_a = 1000$ К, $p_{Cs} = 10$ Тор; 1 — гладкий анод, 2 — одномерное развитие, 3 — двумерное развитие.

гранями полости. Поэтому целесообразно рассмотреть микрополостные структуры (одномерную и двумерную) с малыми углами $\theta_a \rightarrow 0$. На рис. 3, а приведены ВАХ для ТЭП с гладким и микрополостным анодами с идеализированным (степень пористости $\Pi_a = 1$, $\theta_a \rightarrow 0$) одномерным и двумерным развитием поверхности. Нетрудно видеть, что при использовании таких анодов происходит смещение вольт-амперных характеристик преобразователя в сторону больших напряжений примерно на 0.05—0.1 В. Этому соответствует увеличение генерируемой мощности на $\sim 10\%$ в случае микроанода с одномерным развитием и на $\sim 20\%$ при двумерном развитии анодной поверхности.

На рис. 3, б представлены распределения температуры электронов T_e , концентрации n и потенциала плазмы φ при тех же параметрах режима и фиксированном значении проходящего тока ($j = 40$ А/см²). Как показано в [3, 4], микроструктура поверхности электрода, в том числе анода, изменяет условие преодоления электронами приэлектродного барьера за счет переотражений от

боковых граней полости. Поэтому развитие поверхности анода приводит к возрастанию потока частиц из плазмы или при фиксированном токе через преобразователь к увеличению прианодного барьера. Как видно из рис. 3, 6, при выбранных параметрах режима это изменение составляет $\varphi_{a2} - \varphi_{a1} \simeq 0.04$ В и $\varphi_{a3} - \varphi_{a1} \simeq 0.07$ В. Примерно на ту же величину смещается потенциал плазмы в зазоре преобразователя. В то же время температура электронов и концентрация плазмы практически не изменяются. Коэффициент увеличения мощности ТЭП с одномерным развитием поверхности анода составляет $K \simeq 1.09$, а с двумерным $K \simeq 1.2$. При этом максимум мощности смещается в сторону больших напряжений на 0.04 и 0.07 В ($\Delta U \simeq \Delta \varphi_a$).

Таблица 5

W_a , эВ	K	
	одномерное развитие	двумерное развитие
1.6	1.1	1.23
1.7	1.12	1.27
1.8	1.14	1.3
1.9	1.16	1.32
2.0	1.17	1.34

Таблица 6

d , мм	K	
	одномерное развитие	двумерное развитие
0.15	1.2	1.4
0.25	1.1	1.23
0.4	1.05	1.1

Анализ расчетных зависимостей максимальной мощности от давления цезия для ТЭП с гладким и микрополостным анодами при различных температурах катода позволил сделать следующие выводы: в диапазоне исследованных температур T_x увеличение мощности преобразователя за счет микрополостей на аноде не превышает 12 % при одномерном развитии поверхности и 22—23 % в случае двумерного развития; оптимальное давление для ТЭП с микроанодом несколько выше (на 1—2 Тор), при этом с возрастанием p_{Cs} спад мощности происходит медленнее, чем в преобразователе с гладкими электродами.

Исследование вопроса о влиянии температуры анода T_a на характеристики преобразователей с различной структурой анодной поверхности показало следующее. В ТЭП с гладким анодом изменение T_a при фиксированном давлении цезия сдвигает ВАХ преобразователя по напряжению на величину $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2$, где ΔU_1 — изменение контактной разности потенциала, соответствующее смещению по рейзоровской кривой для материала анода ($W_s = W_a (T_a/T_{Cs})$); ΔU_2 — потери напряжения, обусловленные эмиссией с анода [5]. Как уже отмечалось, наличие микрополостной структуры на поверхности электрода увеличивает его ток эмиссии. Поэтому с ростом T_a влияние обратного тока с такого анода начинает сказываться при меньших температурах, чем в случае гладкого анода, и отношение мощности ТЭП с микроанодом к мощности ТЭП с гладким анодом уменьшается. Начиная с $T_a \simeq 1300$ К преобразователь с микрополостным развитием анодной поверхности не имеет практически никаких преимуществ перед ТЭП с гладким анодом.

Согласно расчетным данным, с ростом работы выхода анодного материала W_a при фиксированном давлении цезия использование микрополостных анодов становится более эффективным (табл. 5), а с увеличением ширины зазора преимущества преобразователя с микрополостным анодом уменьшаются (табл. 6). Последнее обусловлено снижением оптимального давления цезия (по мере роста ширины МЭЗ) и меньшей эффективностью использования микроанода при низких давлениях.

Результаты экспериментальных исследований ТЭП с гладкими и микрополостными анодами

Для экспериментального исследования характеристик преобразователей с гладким и микрополостным анодами использовался лабораторный прибор с двумя электродными парами плоскопараллельной геометрии [2]. Катод дан-

ного прибора был выполнен гладким из монокристаллического вольфрама с гранью (110) на рабочей поверхности. Анодный узел прибора состоял из двух измерительных анодов, один из которых имел гладкую поверхность, а другой — микрополостную. Оба анода были изготовлены из ниобий-никелевого сплава СБ-3 с содержанием никеля $\sim 0.2\%$. Микрополостная структура на рабочей поверхности анода выполнялась с помощью ионной бомбардировки с экспонированием под ионным потоком в течение 10 ч. При этом на поверхности образовывались микрократеры глубиной и диаметром около 6 мкм. Такая структура поверхности по своей геометрии близка к двумерной микрополостной структуре со степенью пористости $\Pi_a = 0.5$ и малой величиной угла $\theta_a \rightarrow 0$ между гранями полости.

Сравнение вольт-амперных характеристик ТЭП с гладким и микрополостным анодами было проведено в диапазоне температур катода $T_k = 1770-2550$ К. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что наличие на

Т а б л и ц а 7

T_k , К	Тип анода	Максимальная удельная мощность, Вт/см ²	Напряжение, соответствующее максимальной удельной мощности, В	Коэффициент увеличения мощности	Оптимальное давление цезия, Тор
1773	Гладкий	10.7	0.5	1.1	2.8
		11.8	0.55		3.5
2003	Гладкий	18.2	0.55	1.1	8
		20.0	0.6		9
2123	Гладкий	24.0	0.62	1.09	10
		26.2	0.67		11.5
2373	Гладкий	36.0	0.77	1.09	16
		39.2	0.83		18
2553	Гладкий	49.0	1.0	1.1	23.5
		53.8	1.05		25.5

поверхности анода микрополостей сдвигает характеристики преобразователя примерно на 0.05 В в сторону больших напряжений без изменения их наклона. На эту же величину смещается напряжение, соответствующее максимуму удельной мощности (табл. 7), при этом максимальная мощность возрастает на 9—10 % (во всем диапазоне исследованных температур). Такое изменение характеристик преобразователя с микроанодом свидетельствует об уменьшении потерь напряжения в плазме. Это в свою очередь связано с тем, что наличие микрополостной структуры на поверхности анода приводит к возрастанию потоков электронов и их энергии из плазмы на анод. Оптимальное давление цезия для ТЭП с микрополостным анодом увеличивается (на 1—2 Тор) по сравнению с преобразователем, имеющим гладкий анод, а уменьшение мощности при $p_{Cs} > > (p_{Cs})_{opt}$ происходит медленнее. Поэтому в области давлений цезия, превышающих оптимальное, преимущества ТЭП с микрополостным анодом возрастают.

Сравнение представленных в работе расчетных и экспериментальных характеристик ТЭП с гладкими и микрополостными электродами позволяет сделать вывод об их качественном и количественном соответствии друг другу, а также результатам, полученным ранее [3—4]. Кроме того, это свидетельствует о достаточной степени адекватности используемой математической модели физическим процессам, происходящим в ТЭП с микрополостным электродом.

Заключение

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты показали, что использование электродов с микрополостной структурой поверхности приводит к увеличению удельной мощности термоэмиссионного преобразова-

теля в широком диапазоне параметров режима (температуры катода и давления цезия).

Авторы считают своим долгом выразить благодарность В. Н. Сидельникову за содействие в отладке на ЭВМ численного алгоритма, а также А. Н. Евдокимову, В. А. Жиркову, С. А. Скребкову за помощь в проведении экспериментальных работ и обсуждении результатов.

Список литературы

- [1] Атамасов В. Д., Скребков С. А., Тацилин Л. Н. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 1. С. 73—76.
- [2] Атамасов В. Д., Евдокимов А. Н., Жирков В. А. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 1. С. 77—81.
- [3] Гунько В. М., Кучеров Р. Я. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 11. С. 2264—2268.
- [4] Абрамова Л. П., Гунько В. М., Кучеров Р. Я. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 14. С. 668—673.
- [5] Сидельников В. Н. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 2. С. 385—387.
- [6] Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б. Я. Мойжеса и Г. Е. Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.
- [7] Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / Под ред. И. П. Стаханова. М.: Атомиздат, 1973. 374 с.
- [8] Сидельников В. Н., Шутько А. В. // Численные методы динамики вязкой жидкости. Новосибирск, 1979. С. 182—186.

Поступило в Редакцию

12 декабря 1988 г.

В окончательной редакции

13 февраля 1989 г.