

01; 04; 11

© 1990 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДУГОВЫХ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С МНОГОПОЛОСТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В. Д. Атамасов, Н. А. Иванова

Предложены математическая модель и алгоритм численного расчета, позволяющие при умеренных затратах машинного времени рассчитать распределения параметров плазмы и вольт-амперные характеристики термоэмиссионного преобразователя с макрополостными электродами. Впервые получены зависимости мощности, генерируемой таким преобразователем, от геометрических размеров полостей, параметров режима, эмиссионных свойств электродного материала, ширины межэлектродного зазора. Сравнение с характеристиками ТЭП, имеющего гладкий катод из монокристаллического вольфрама с вакуумной работой выхода 5.0 эВ, показало, что в достаточно широком диапазоне температур (1700—2300 К) мощность, генерируемая преобразователем с макрополостным катодом, выше примерно на 10—25 % в зависимости от степени пористости катодной поверхности. При ухудшении эмиссионных свойств катодного материала использование макрополостного развития поверхности катода приводит к более существенному увеличению мощности термоэмиссионного преобразователя. Результаты подтвердили полученные ранее теоретические и экспериментальные данные, согласно которым мощность ТЭП с макрополостным анодом, имеющим степень пористости поверхности $\bar{P}_x=0.5$, превышает на 35—45 % мощность преобразователя с гладким анодом.

Введение

Использование в термоэмиссионных преобразователях (ТЭП) электродов с многополостной структурой поверхности является одним из методов снижения потерь в плазме межэлектродного зазора (МЭЗ) преобразователя, обладающим таким важным достоинством, как универсальность для широкого диапазона температур электродов [1, 2].

Результаты как теоретических [3, 4], так и экспериментальных [1, 2, 5] работ показали, что создание на поверхности любого из электродов (катода или анода) так называемой макрополостной структуры приводит к заметному увеличению мощности, генерируемой преобразователем. Под макрополостной понимают такую структуру, у которой геометрические размеры полостей (ширина b и глубина l) существенно превышают длину свободного пробега электронов в плазме.

Настоящая работа посвящена анализу некоторых новых результатов теоретического исследования характеристик ТЭП с макрополостными электродами.

Математическая модель ТЭП с макрополостными электродами

Особенностью теоретического исследования термоэмиссионных преобразователей с макрополостным электродом является необходимость рассмотрения переноса частиц и энергии в полостях электрода и учет их влияния на параметры плазмы в МЭЗ преобразователя. В [6] показано, что если ширина полости и расстояние между полостями велики по сравнению с толщиной пространственного заряда у электрода, то каждую полость можно рассматривать независимо. В случае низковольтной дуги это условие выполняется, что позволяет сформу-

лирование математическую модель ТЭП с макрополостным электродом на основе анализа процессов, происходящих в единичной полости.

Разработанные ранее [3, 4] математические модели и алгоритмы расчета вольт-амперных характеристик преобразователя с макрополостным электродом позволили проанализировать особенности протекающих в них физических процессов и показали, что такие преобразователи имеют более высокие выходные характеристики по сравнению с ТЭП с гладкими электродами. Однако необходимость самосогласованного решения двух систем уравнения переноса (для МЭЭ и полости), неустойчивость их численного интегрирования, обусловленная выбором начальных значений параметров на аноде, а также сложность минимизации четырех (или двух в случае ЛТР приближения) невязок требуют очень больших затрат машинного времени. Все это затрудняет теоретическое исследование ТЭП с макрополостными электродами в широком диапазоне изменения параметров режима и оптимизацию геометрических размеров полостей. Поэтому вопрос о влиянии геометрических размеров полостей на выходные характеристики преобразователя решался в основном экспериментальным путем.

Перечисленные выше недостатки математической модели ТЭП с макрополостным электродом можно устранить, если рассматривать такой преобразователь как совокупность параллельно соединенных независимых преобразователей, одни из которых соответствуют торцам макрополостного электрода, а другие включают в себя полости. Сделанное допущение позволяет для каждого элементарного ТЭП рассчитать состояние дуговой плазмы с помощью численного решения одной системы нестационарных уравнений переноса

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(nV_e) = \Gamma + \xi_k \frac{2}{b_k} \left(\frac{j_{\text{стр}}^k}{q} \right) - \xi_a \frac{2}{b_a} \left(\frac{j_{\text{стр}}^a}{q} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(nV_i) = \Gamma + \xi_k \frac{2}{b_k} \left(\frac{j_{\text{стр}}^k}{q} \right) - \xi_a \frac{2}{b_a} \left(\frac{j_{\text{стр}}^a}{q} \right), \quad (2)$$

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} nkT_e \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{3}{2} nkT_e V_e \right) + nkT_e \frac{\partial V_e}{\partial x} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = \\ = Q_e + \xi_k \frac{2}{b_k} S_{\text{стр}}^k - \xi_a \frac{2}{b_a} S_{\text{стр}}^a, \end{aligned} \quad (5)$$

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; T — температура ионов и нейтральных атомов; Γ — скорость процессов объемной ионизации и рекомбинации [7]; 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 — масса электрона и иона соответственно; q — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; b_k и b_a — ширина катодной и анодной полостей соответственно;

$$\xi_k = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq l_k, \\ 0, & l_k < x \leq d + l_k, \end{cases}$$

$$\xi_a = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq d, \\ 1, & d < x \leq d + l_a, \end{cases}$$

l_k и l_a — глубины катодной и анодной полостей соответственно. Для определения величин R_e , R_i , Q_e и q_e использовались выражения, полученные в [8] с помощью модификации Энского—Чепмена.

Отличием уравнений (1)–(5) от рассмотренных в [9] и описывающих процессы в ТЭП с гладкими электродами является учет потоков частиц ($j_{\text{стр}}^k$ и $j_{\text{стр}}^a$)

и энергии электронов $S_{\text{от}}$ с боковых стенок полости (индекс k соответствует катодной полости, индекс a — анодной). Если предположить, что изменение потенциала по ширине полости происходит в узких приэлектродных слоях, то потоки заряженных частиц и энергии электронов с боковых стенок полости могут быть рассчитаны с помощью соответствующих балансных соотношений на границе плазма—электрод [7]. Аналогичные алгебраические уравнения, связывающие потоки частиц и энергии на каждом из электродов со значениями параметров плазмы в приэлектродных областях, используются в качестве граничных условий для системы (1)—(5). В основе алгоритма численного расчета ВАХ преобразователя с макрополостным электродом лежит метод последовательной верхней релаксации [10].

Результаты расчетов параметров плазмы и вольт-амперных характеристик ТЭП с макрополостным катодом

Расчеты, выполненные с помощью представленной математической модели, позволили проанализировать распределения параметров плазмы в МЭЗ и вольт-амперные характеристики преобразователя, а также провести оптимизацию геометрических размеров полостей электродов.

Рассмотрим некоторые результаты расчетов характеристик ТЭП с катодом, имеющим макрополостную структуру поверхности. При расчете степень пористости катодной поверхности Π_k принималась близкой к единице, ширина МЭЗ полагалась равной 0.025 см, а в качестве анодного материала был выбран ниобий-никелевый сплав СБ-3. Необходимо отметить, что случай предельного развития поверхности ($\Pi_k=1$) на практике реализован быть не может. Однако теоретическое исследование данного идеализированного типа многополостной структуры позволяет рассмотреть особенности физических процессов, происходящих

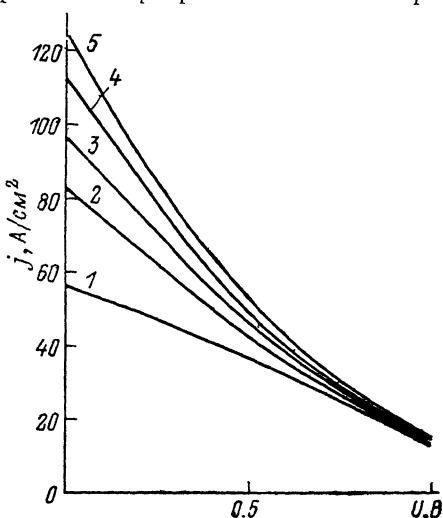


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ТЭП с гладким и макрополостным катодами.

$T_k = 2153 \text{ К}$, $T_a = 1011 \text{ К}$, $p_{\text{Cs}} = 6 \text{ Тор}$, $b_k = 75 \text{ мкм}$; l_k , мкм:
1 — 0, 2 — 15, 3 — 30, 4 — 45, 5 — 65.

в ТЭП с многополостным электродом, оценить максимальные энергетические характеристики такого преобразователя и определить их зависимость от параметров режима, эмиссионных свойств электродов и т. д.

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики ТЭП с гладким катодом из монокристаллического вольфрама с гранью (110) на рабочей поверхности и макрополостным катодом при ширине полостей $b_k = 75 \text{ мкм}$ и нескольких значениях глубины полостей l_k . Увеличение крутизны ВАХ преобразователя при использовании макрополостного катода свидетельствует о более высоких эмиссионных свойствах такого катода по сравнению с гладким. По мере роста глубины полостей удельная мощность ТЭП увеличивается. Однако начиная с некоторой глубины $l_k = l_{\text{opt}}$, значение которой зависит от давления цезия, мощность преобразователя практически не изменяется. Это позволяет предположить, что при достижении глубины l_{opt} в плазме полостей реализуется состояние, близкое к термодинамическому равновесию, когда интегральные потоки частиц и энергии незначительны. Увеличение давления цезия приводит к уменьшению оптимальной глубины токоотбора при интенсификации обменных процессов между плазмой и боковыми стенками полости. При значениях давления цезия, близких к оптимальному ($\sim 10 \text{ Тор}$), величина l_{opt} лежит в интервале 40—

30 мкм, а превышение максимума мощности ТЭП с макрополостным катодом составляет ~20 %.

На рис. 2, 3 представлены распределения параметров плазмы в МЭЗ и полостях катода при фиксированном токе $j=40 \text{ А/см}^2$. Как показали расчеты, повышение эмиссионной способности катода за счет создания на его поверхности макрополостной структуры обеспечивает прохождение через зазор тока заданной величины при меньших значениях температуры электронов, концентрации плазмы и скорости процесса объемной ионизации (табл. 1), чем в случае гладкого катода. Это в свою очередь приводит к снижению электрических потерь в плазме φ_0 , обусловленных процессами нагрева электронов и объемной ионизации вблизи катода (табл. 1).

Следствием уменьшения концентрации плазмы вблизи катода являются расширение области, где процесс ионизации преобладает над рекомбинацией, а также смещение минимума потенциала и максимума концентрации в сторону анода.

Анализ распределений температуры электронов, концентрации и потенциала плазмы в катодной полости (рис. 3, а), а также электронного и ионного токов со стенок полости (рис. 3, б) подтверждает предположение о том, что по мере увеличения глубины полости параметры плазмы приближаются к значениям, соответствующим термодинамическому равновесию при выбранном режиме преобразователя ($T_e=2153 \text{ К}$, $p_{Cs}=6 \text{ Тор}$). Расчеты показывают, что состояние термодинамического равновесия в этих условиях реализуется на глубине ~80 мкм, которая и является оптимальной глубиной токоотбора из полости. Необходимо отметить, что электрическое поле в полости увеличивает скорость дрейфа электронов в направлении к межэлектродному зазору. Кроме того, смещение минимума потенциала в сторону анода (по сравнению с ТЭП с гладким катодом) расширяет область ускоряющего поля в зазоре. В области же тормо-

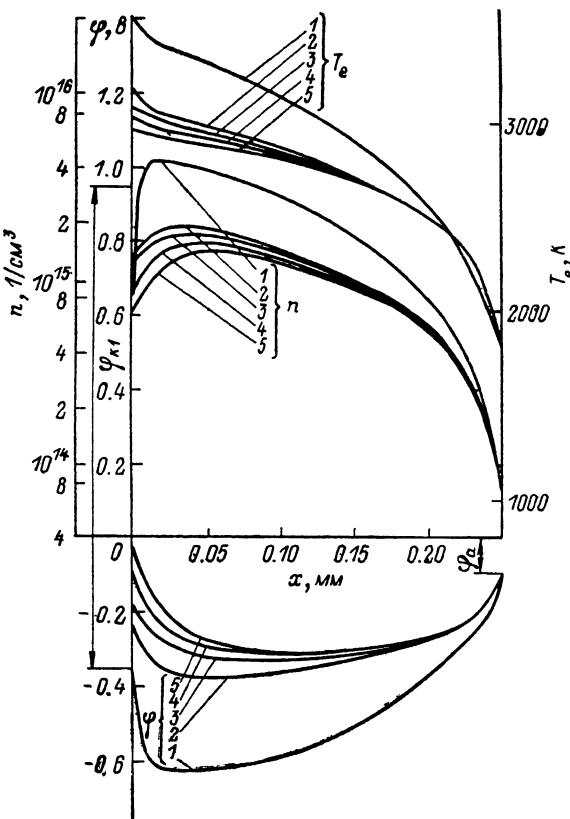


Рис. 2. Распределение параметров плазмы в МЭЗ.

Значения параметров те же, что и на рис. 1; $j=40 \text{ А/см}^2$.

мы в катодной полости (рис. 3, а), а также электронного и ионного токов со стенок полости (рис. 3, б) подтверждает предположение о том, что по мере увеличения глубины полости параметры плазмы приближаются к значениям, соответствующим термодинамическому равновесию при выбранном режиме преобразователя ($T_e=2153 \text{ К}$, $p_{Cs}=6 \text{ Тор}$). Расчеты показывают, что состояние термодинамического равновесия в этих условиях реализуется на глубине ~80 мкм, которая и является оптимальной глубиной токоотбора из полости. Необходимо отметить, что электрическое поле в полости увеличивает скорость дрейфа электронов в направлении к межэлектродному зазору. Кроме того, смещение минимума потенциала в сторону анода (по сравнению с ТЭП с гладким катодом) расширяет область ускоряющего поля в зазоре. В области же тормо-

Таблица 1

l_k	$q\Gamma, \frac{\text{К}}{\text{с} \cdot \text{см}^3}$ (при $\alpha=0$)	$\varphi_0, \text{ В}$
0	$2 \cdot 10^4$	0.95
15	$3 \cdot 10^3$	0.83
30	$2 \cdot 10^3$	0.8
45	$1.2 \cdot 10^3$	0.78
65	$9 \cdot 10^2$	0.75

Таблица 2

$T_k, \text{ К}$	$(p_{Cs})_{opt}, \text{ Тор}$		$N_{max}, \text{ Вт/см}^2$	
	гладкий	макрополостной	гладкий	макрополостной
1788	3	2	7.3	8.2
2018	6.5	5	16.1	18.2
2153	12	10	25.6	28.5
2303	16	13	34.1	37.5

заящего электрического поля вблизи анода градиент потенциала существенно меньше, чем в случае гладкого катода. Подобное изменение потенциала в полости и зазоре обеспечивает прохождение через ТЭП с макрополостным катодом такого же тока, как и в преобразователе с гладким катодом, несмотря на меньшую величину концентрации и температуры электронов.

Аналогичные расчеты были выполнены для других значений ширины полостей $b_x = 40-100$ мкм в диапазоне температур катода $T_k = 1800-2300$ К и давлений цезия 1-25 Тор. Анализ полученных результатов показал, что при одинаковых параметрах режима преобразователя и фиксированной глубине полостей мощность ТЭП с макрополостным катодом возрастает по мере уменьшения ширины полостей. Физически это можно объяснить увеличением отношения площади эмиттирующей поверхности в полости к ее объему. Необходимо отметить, что если ширина полости превышает некоторую величину b_{max} , которая

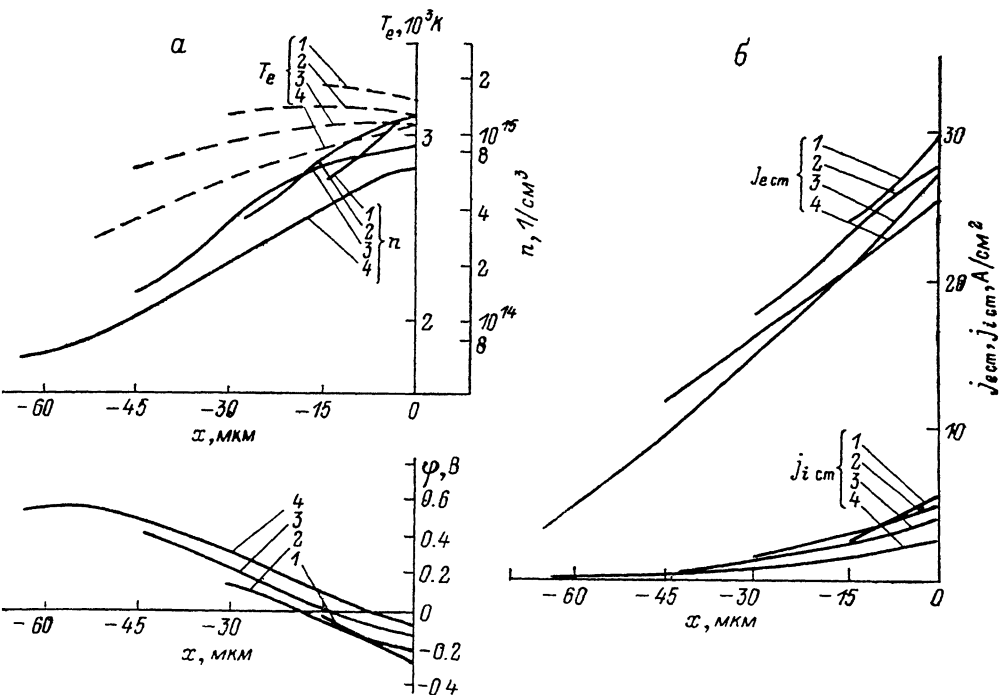


Рис. 3. Распределение параметров плазмы в полости.

$T_k = 2153$ К; $T_a = 1011$ К, $p_{Cs} = 6$ Тор, $b_x = 75$ мкм, $j = 40$ А/см²; l_x , мкм; 1 - 15, 2 - 30, 3 - 45, 4 - 65.

является функцией параметров режима и составляет 100-200 мкм, то характеристики преобразователя с макрополостным катодом становятся хуже характеристик ТЭП с гладким катодом. При фиксированном значении ширины полости с ростом давления цезия глубина токоотбора из полости уменьшается, что качественно совпадает с результатами, полученными при исследовании дуговых полых катодов [11].

Таким образом, результаты расчета характеристик ТЭП с макрополостным катодом позволяют сделать вывод, что с уменьшением геометрических размеров полостей мощность, генерируемая таким преобразователем, возрастает. Так как применимость математической модели ТЭП с макрополостной структурой поверхности катода ограничена величинами ширины и глубины полостей $\sim 10-30$ мкм, то рассмотрение полостей меньших размеров необходимо проводить в рамках другой математической модели, описывающей процессы в преобразователе с микрополостными электродами [12].

Представленные выше ВАХ и распределения параметров плазмы были получены для идеализированного случая развития поверхности катода, когда степень пористости Π_k близка к единице. Уменьшение параметра Π_k , например,

в 2 раза ($P_k=0.5$) практически во столько же раз снижает выигрыш по мощности, обусловленный использованием в ТЭП макрополостного катода (табл. 2). Как видно из табл. 2, при каждом значении температуры оптимальное давление цезия для преобразователя с макрополостным катодом (при $P_k=0.5$, $b_k=40$ мкм, $l_k - \text{opt}$) на 1—3 Тор меньше, а мощность, соответствующая этому давлению, на 10—12 % выше, чем для ТЭП с гладким катодом.

Необходимо отметить, что во всем диапазоне исследованных температур зависимости максимальной мощности от давления цезия для преобразователей с гладким и многополостным катодами имеют важную особенность: при давлениях, существенно меньших оптимального, различие между уровнями мощности, генерируемой такими преобразователями, резко возрастает. Например, при $T_k=2153$ К и $p_{Cs}=4$ Тор мощность ТЭП с макрополостным катодом ($P_k=0.5$, $b_k=40$ мкм, $l_k - \text{opt}$) почти в 1.5 раза превышает мощность преобразователя с гладким катодом. С увеличением давления цезия характеристики сравнимых ТЭП сближаются.

Исследование вопроса о влиянии вакуумной работы выхода катодного материала $W_k^{(0)}$ на характеристики преобразователя с многополостным катодом показало, что с уменьшением $W_k^{(0)}$ преимущества ТЭП с таким катодом возрастают. Так, согласно расчетам для поликристаллического вольфрама с $W_k^{(0)}=4.6$ эВ коэффициент увеличения мощности составляет 1.3—1.4 при $P_k=1$ и 1.15—1.2 при $P_k=0.5$.

С ростом ширины МЭЗ различие между энергетическими характеристиками преобразователей с гладким и макрополостным катодами также увеличивается.

Изложенное выше объясняет результаты расчета, полученные в [3], согласно которым мощность ТЭП с макрополостным катодом примерно в 2.6 раза превышает мощность преобразователя с гладким катодом. Во-первых, в качестве катодного материала был выбран поликристаллический вольфрам с вакуумной работой выхода $W_k^{(0)}=4.52$ эВ. Во-вторых, для гладкого катода из данного материала при температуре $T_k=1830$ К давление цезия $p_{Cs}=2$ Тор, при котором был выполнен расчет, намного меньше оптимального ($(p_{Cs})_{\text{opt}} \approx 6-8$ Тор). Таким образом, приведенные в работе [3] теоретические данные характеризуют область параметров режима и эмиссионных свойств катодного материала, где использование катодов с макрополостной структурой поверхности обеспечивает максимальное увеличение мощности преобразователя. Некоторое увеличение разницы между энергетическими характеристиками ТЭП с гладким и макрополостным катодами обусловлено также и большей величиной МЭЗ ($d=0.03$ см). Кроме того, в [3] сравнение распределений параметров плазмы проводилось при токах, соответствующих максимумам мощности каждого из сравниваемых преобразователей и существенно различающихся по величине для макрополостного и гладкого катодов ($j=13.5$ и 6 А/см² соответственно). Этим объясняются более высокие значения концентрации плазмы и температуры электронов в случае преобразователя с макрополостным катодом. Как уже отмечалось, ряд существенных недостатков математической модели и алгоритма, представленных в [3], не позволил на том этапе исследований выполнить сравнительный анализ характеристик преобразователей с гладким и макрополостным катодами в широком диапазоне изменения геометрических размеров полостей, параметров режима и эмиссионных свойств катодного материала. Эти задачи были решены в настоящей работе.

Результаты расчетов параметров плазмы и вольт-амперных характеристик ТЭП с макрополостным анодом

Результаты выполненных ранее исследований [2, 4, 5] показали, что использование в термоэмиссионном преобразователе анода, имеющего макрополостную структуру поверхности с характерными геометрическими размерами, превышающими длину свободного пробега электронов l_e в плазме, приводит к существенному (в среднем на 40 %) увеличению мощности, генерируемой преобразователем. Описанная выше математическая модель ТЭП с макрополостными электродами позволила проанализировать свойства преобразователя с макрополостным анодом в более широком диапазоне изменения параметров режима, а также

исследованы теоретически их зависимость от ширины полостей b_a , глубины полостей l_a и степени пористости рабочей поверхности Π_a .

Рассмотрим основные результаты сравнительного анализа расчетных характеристик ТЭП с гладким и макрополостным анодами. На рис. 4, а представлены вольт-амперные характеристики преобразователя для одного из значений ширины анодных полостей $b_a=100$ мкм. Глубина полостей l_a изменялась от нуля (гладкий анод) до 65 мкм, а степень пористости рабочей поверхности анода Π_a полагалась близкой к единице, что соответствует некоторому идеализированному случаю предельного развития поверхности. Параметры режима были выбраны следующими: температура катода $T_k=2123$ К, температура анода $T_a=950$ К, давление паров цезия $p_{Cs}=12$ Тор, ширина межэлектродного зазора $d=0.025$ см. Согласно полученным расчетным данным, при переходе от гладкого

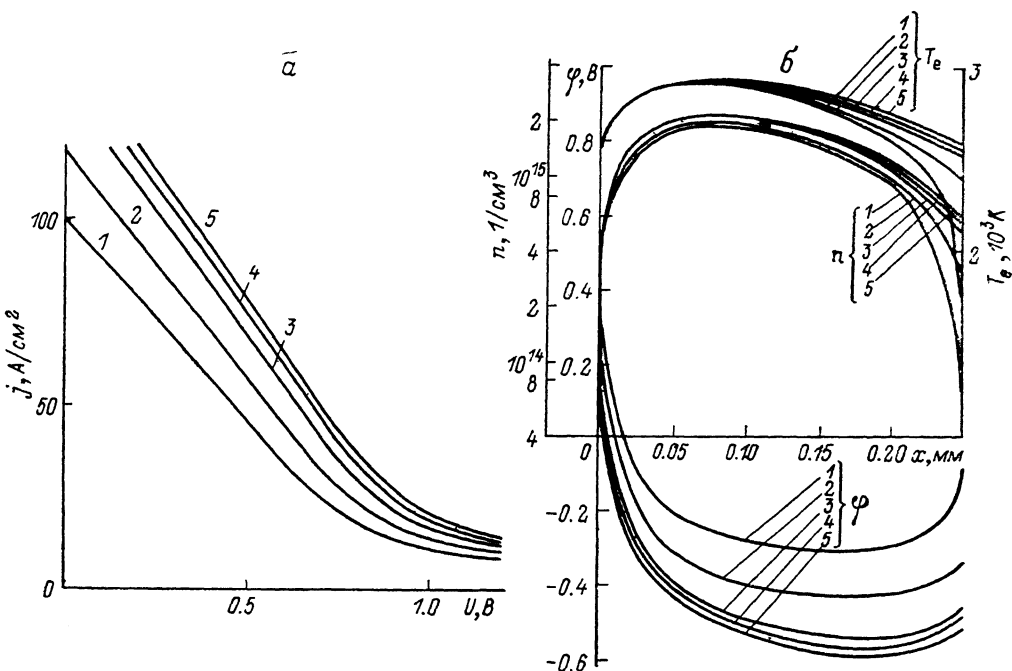


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики (а) и распределения параметров плазмы в МЭЗ (б) для ТЭП с гладким и макрополостным анодами.

$T_k=2123$ К, $T_a=950$ К, $p_{Cs}=12$ Тор, $b_a=100$ мкм, $j=40$ А/см², l_a , мкм: 1 — 0, 2 — 15, 3 — 30, 4 — 45, 5 — 65.

анода к макрополостному и с ростом глубины полостей происходит почти эквидистантное смещение ВАХ в сторону больших напряжений. При этом удельная мощность, генерируемая преобразователем, увеличивается.

На рис. 4, б представлены распределения параметров плазмы (температуры электронов T_e , концентрации плазмы n и потенциала φ) в МЭЗ для точек, рассмотренных ВАХ, соответствующих одному из значений тока $j=40$ А/см². Параметры плазмы в характерных точках межэлектродного зазора приведены в табл. 3 (φ_0 — потери напряжения в плазме, φ_k — величина прикатодного скачка потенциала, $T_{e, \max}$ — максимальная электронная температура, n_{\max} — максимальная концентрация плазмы, T_{ek} — температура электронов вблизи катода, n_k — концентрация плазмы в прикатодной области). Анализ полученных результатов показывает, что наличие на поверхности анода макрополостей почти не изменяет концентрацию плазмы и температуру электронов в прикатодной области зазора. При этом величина прикатодного скачка потенциала остается практически постоянной. Вблизи анода n и T_e возрастают. Однако наиболее заметно в межэлектродном зазоре и особенно в прианодной области изменяется распределение потенциала плазмы. Действительно, в случае макрополостного анода кривая потенциала $\varphi(x)$ лежит существенно ниже, а вид кривой

l_a , мкм	φ_0 , В	φ_K , В	T_e max, 10^3 /К	n_{max} , 10^{14} /1/см ³	T_{eK} , 10^3 /К	n_K , 10^{14} /1/см ³
0	0.53	0.148	2.91	1.99	2.44	3.04
15	0.43	0.153	2.93	2.1	2.44	3.11
30	0.34	0.155	2.94	2.17	2.45	3.15
45	0.31	0.155	2.94	2.17	2.44	3.14
60	0.305	0.154	2.94	2.15	2.44	3.12

несколько деформируется. При этом смещается в сторону анода минимум потенциала, соответствующий границе между областями ускоряющего и тормозящего полей (по отношению к электронам). На рис. 5 представлены распределения параметров плазмы в единичной полости. Как показали расчеты, по мере увеличения глубины полости происходит постепенное уменьшение концентрации плазмы и температуры электронов (рис. 5, а). По всей видимости, при достаточно

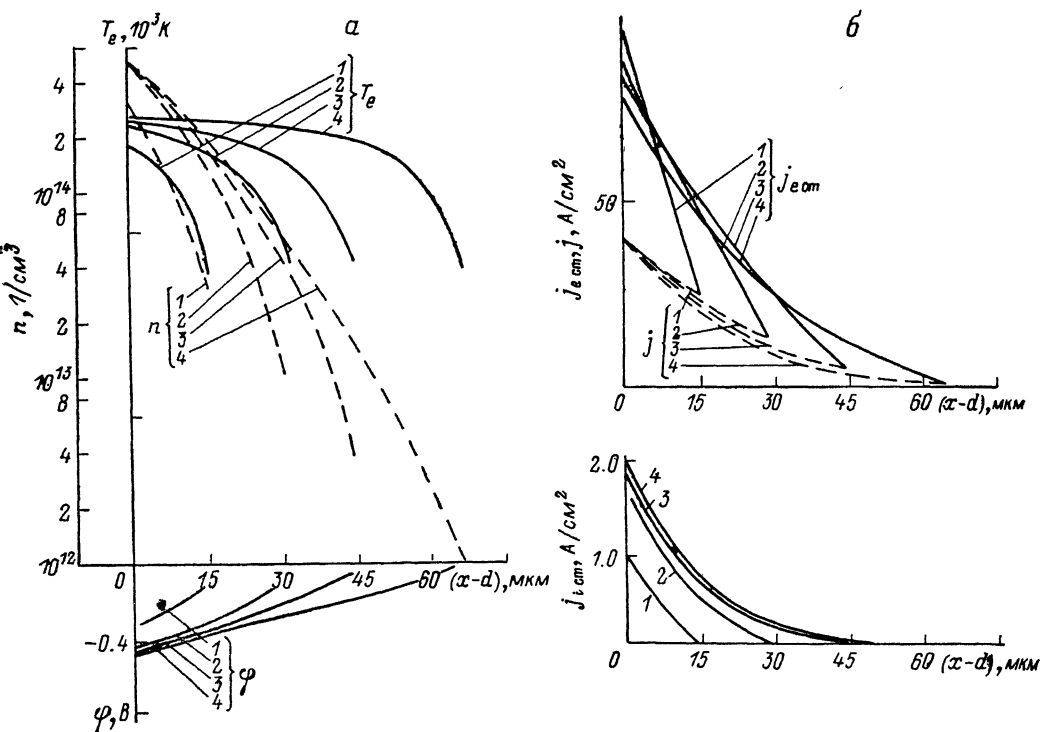


Рис. 5. Распределение параметров плазмы в полости.

$T_K=2123$ К, $T_A=950$ К, $p_{CS}=12$ Тор, $b_a=100$ мкм, $j=40$ А/см²; l_a , мкм: 1 — 15, 2 — 30, 3 — 45, 4 — 65.

больших l_a все параметры плазмы должны достигать своих равновесных значений $T_e \rightarrow T_A=950$ К, $n \rightarrow n(T_A)=1.44 \cdot 10^8$ 1/см³, $\varphi \rightarrow \varphi_{\mu a}$, где $\varphi_{\mu a}$ — химический потенциал плазмы, вычисленный с учетом того, что за нуль отсчета выбрана поверхность анода. Однако при таких значениях равновесных параметров плазмы дебаевский радиус экранирования L_D становится сравнимым с размерами полостей. Напомним, что используемая для расчетов математическая модель применима лишь при выполнении неравенства

$$b_a, l_a \gg L_D \gg L_p = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n q^2}},$$

где k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона.

В анодной полости длина свободного пробега электронов определяется в основном рассеянием на нейтральных атомах. С уменьшением концентрации

плазмы дебаевский радиус экранирования возрастает и при $n \sim 10^{12}$ 1/см $l_d \approx L_D = 2-3$ мкм. При этом нарушается условие применимости математической модели. Согласно расчетным данным, такая величина концентрации достигается в полости на глубине $\sim 65-70$ мкм. Поэтому в рассматриваемых физических условиях ($T_k = 2123$ К, $T_a = 950$ К, $p_{Cs} = 12$ Тор, $j = 40$ А/см², $b_a = 100$ мкм) не удалось выполнить расчет характеристик ТЭП с глубиной анодных полостей $l_a > 65$ мкм. Таким образом, начиная с некоторой глубины в анодной полости становится несправедливым допущение о бесконечно малой толщине приэлектродных слоев и не выполняется условие применимости гидродинамического приближения. В этом случае расчет параметров плазмы в полости возможен лишь с помощью двумерных кинетических уравнений, что является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому целесообразнее исследовать вопрос об оптимальной глубине полости экспериментальным путем [2].

На рис. 5, 6 показано, как изменяются по глубине полости величины направленного тока j , а также электронного и ионного токов на боковые стенки ($j_{e,ст}$ и $j_{i,ст}$): уменьшаясь, они стремятся к нулю, что соответствует состоянию, близкому к термодинамическому равновесию. Остановимся еще раз на распределении потенциала плазмы в МЭЗ и полости. Поскольку в полости $\varphi(x)$ стремится в пределе к некоторому равновесному значению $\varphi_{равн} > 0$, а в зазоре $\varphi_{мин}$ уменьшается по мере увеличения глубины полости l_a , то возрастает перепад потенциала $\Delta\varphi = \varphi(d + l_a) + |\varphi_{мин}|$, характеризующий величину электрического поля, тормозящего электроны. При этом происходит более эффективный отбор энергии от электронов, что компенсирует затраты напряжения на их разогрев в прикатодной области. Все это в свою очередь уменьшает суммарные потери напряжения в зазоре на 0.23—0.25 В в области токов, соответствующих максимуму мощности. Такое смещение ВАХ в сторону больших напряжений приводит к увеличению мощности преобразователя примерно в 1.70 раз (при $l_a = 65$ мкм, $\Pi_a = 1$). Следует отметить, что с ростом l_a сдвиг кривых становится все меньше (рис. 4, а) и рост мощности преобразователя замедляется. Поэтому можно считать, что при $l_a > 65$ мкм характеристики ТЭП изменяются незначительно. В дальнейшем при рассмотрении преимуществ преобразователей с макрополостными анодами будем подразумевать расчетные данные для максимальной глубины полости, соответствующей границе применимости математической модели.

Исследование вопроса о влиянии ширины полости на характеристики ТЭП показало, что при малых глубинах ($l_a \leq 30-35$ мкм) увеличение мощности преобразователя тем больше, чем меньше ширина полости. Однако при дальнейшем росте l_a максимум мощности преобразователя стремится примерно к одной величине (для всех исследованных $b_a = 50-200$ мкм). Таким образом, результаты расчета не выявили ярко выраженной зависимости максимальной мощности N_{max} от ширины полости. Поэтому дальнейшие вычисления проводились для одного значения $b_a = 100$ мкм.

Сравнение ВАХ преобразователей с различными анодами в интервале давлений цезия показало, что с ростом p_{Cs} отношение K максимальной мощности ТЭП с макрополостным анодом к максимальной мощности ТЭП с гладким анодом увеличивается (табл. 4).

Если же сопоставить максимумы мощности преобразователей при соответствующих оптимальных давлениях цезия (для гладкого анода ($p_{Cs})_{opt} = 12$ Тор, а для макрополостного ($p_{Cs})_{opt} = 14$ Тор), то $K = 1.8$ при $\Pi_a \rightarrow 1$ и $K = 1.4$ при $\Pi_a = 0.5$. Как и следовало ожидать, уменьшение степени пористости анодной поверхности снижает выигрыш по мощности, обусловленный использованием в ТЭП макрополостного анода.

Расчеты характеристик преобразователей с макрополостным развитием поверхности анода были проведены и для некоторых других температур катода: $T_k = 1853, 2003$ и 2253 К. Анализ полученных результатов показал, что для всех

Таблица 4

$p_{Cs}, \text{Тор}$	K	
	$\Pi_a = 1$	$\Pi_a = 0.5$
10	1.4	1.15
12	1.75	1.37
14	2.06	1.53
16	2.42	1.7
18	2.62	1.8

исследованных T_k распределения параметров плазмы в МЭЗ и полости, а также изменения ВАХ аналогичны рассмотренному выше случаю $T_k=2123$ К. Согласно расчетным данным, в указанном интервале температур использование макрополостного анода со степенью пористости поверхности $\Pi_a=0.5$ приводит к повышению мощности на 35—45 %. При этом оптимальное давление цезия увеличивается на 2—3 Тор по сравнению с $(p_{Cs})_{opt}$ для ТЭП, имеющего гладкий анод. Необходимо отметить, что создание на поверхности анода макроскопической структуры увеличивает более чем в 2 раза приведенную степень черноты электродной пары преобразователя. Рост доли лучистых потерь в общем энергобалансе приводит к тому, что КПД преобразователя с макрополостным анодом имеет примерно такую же величину, что и для ТЭП с гладким анодом.

Сравнение результатов теоретических исследований, представленных в настоящей работе, с экспериментальными данными [2] свидетельствует об их достаточно хорошем соответствии. Некоторое качественное расхождение с расчетными распределениями параметров плазмы в МЭЗ, полученными при использовании обобщенной математической модели [4], может быть объяснено в основном различием в режимах преобразователя. Как показали дальнейшие исследования, давление цезия, для которого в [4] приведены результаты расчета, было значительно ниже величины, оптимальной для ТЭП с макрополостным анодом.

Заключение

Выполненные теоретические исследования процессов в ТЭП с макрополостными электродами подтвердили основные результаты предшествующих работ и показали, что создание на поверхности катода или анода макрополостной структуры может быть использовано для увеличения мощности, генерируемой термоэмиссионным преобразователем. Представленная математическая модель позволила проанализировать характеристики ТЭП с макрополостным электродом при изменении геометрических размеров полостей, при различных эмиссионных свойствах электронного материала, а также в зависимости от параметров режима преобразователя. На основании полученных расчетных данных можно выделить область значений перечисленных параметров, где применение макрополостных электродов дает максимальное увеличение генерируемой мощности.

Авторы выражают благодарность В. Д. Юдицкому, В. Н. Сидельникову, Л. Н. Тащилину и А. Н. Евдокимову за полезные советы и обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] Атамасов В. Д., Скребков С. А., Тащилин 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] Атамасов В. Д., Иванова П. А., Тащилин Л. Н., Тимашев С. В. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 741—746.
- [4] Атамасов В. Д., Евдокимов А. Н., Иванова Н. А., Тимашев С. В. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 734—740.
- [5] Гердцители И. Г., Менабде Н. К., Цхакая В. К., Цакадзе Л. М. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 8. С. 1766—1767.
- [6] Бахит Ф. Г., Коробова И. Л., Мойжес Б. Я. // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 11. С. 2474—2479.
- [7] Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б. Я. Мойжеса и Г. Е. Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.
- [8] Физические основы термоэмиссионного преобразователя энергии / Под ред. И. П. Стаханова. М.: Атомиздат, 1973. 374 с.
- [9] Сидельников В. Н. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 2. С. 385—387.
- [10] Сидельников В. Н., Шутько А. В. // Численные методы динамики вязкой жидкости. Новосибирск, 1979. С. 182—186.
- [11] Бахит Ф. Г., Рыбаков А. Б. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1846—1849.
- [12] Абрамова Л. П., Гунько В. М., Кучеров Р. Я. // Письма в ЖТФ. 1971. Т. 3. Вып. 14. С. 668—673.

Поступило в Редакцию
12 декабря 1988 г.
В окончательной редакции
10 апреля 1989 г.