

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. А. Бровальский, В. В. Лебедева, И. И. Райков, Н. М. Рожкова, В. В. Синявский, Расчетные исследования энергетических характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих элементов и сборок, *ТВТ*, 1975, том 13, выпуск 1, 171–175

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.81

15 февраля 2025 г., 03:21:15



УДК 537.581

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭМИССИОННЫХ
ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СБОРОК**

*Ю. А. Бровальский, В. В. Лебедева, И. И. Райков,
Н. М. Рожкова, В. В. Сильяевский*

Описывается разработанный алгоритм расчета на ЭЦВМ и результаты исследования вольт-амперных диаграмм термоэмиссионных электрогенерирующих элементов иборок со средней плотностью тока 5-15 а/см². Для эффективныхборок средние плотности мощности в элементе примерно на 1/3 ниже мощности ТЭП при тех же температурах эмиттера (для элемента максимальной). Дляборок суммарные потери достигают 50%. Основной вклад в снижение мощности дают распределенности параметров как в элементах, так и вбороках. Приводятся значения коэффициентов неравномерности основных параметров элемента иборок.

Алгоритм расчета электрогенерирующих каналов (ЭГК) включает несколько подпрограмм для ЭЦВМ, которые могут быть использованы как самостоятельно, так и в единой программе.

Подпрограмма № 1 рассчитывает распределение температуры по эмиттерной оболочке и коммутации $T_E(\xi)$, распределение по длине эмиттера плотности тока $j(z)$, разности потенциалов $v(z)$ и плотности электрической мощности $w(z)$, энергетический баланс и к.п.д. и как интегральный результат — вольт-амперные диаграммы электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) $I(V)_{\bar{v}=\text{const}}$ и $I(V)_{T_E=\text{const}}$. Метод расчета, изложенный в [1], заключается в самосогласованном решении системы дифференциальных уравнений, описывающих распространение тепла по эмиттерной оболочке и изменение разности потенциалов между электродами

$$\nabla_{\xi}^2 T_E = -\alpha_1 q(\xi) + \alpha_2 (T_E^4 - T_c^4) + \alpha_3 j(\xi) (v(\xi) + q_c) + \alpha_4 (T_E - T_c) - \alpha_5 \left[\int_{r_E}^{l_E} j(\xi) d\xi \right]^2, \tag{1}$$

$$\frac{dv}{dz} = \beta_1 \int_z^{l_E} j dz - \beta_2 \int_0^z j dz, \tag{1a}$$

с граничными условиями

$$\left. \frac{dT_E}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0, \quad T_E|_{\xi=l_E+l_k} = T_a, \tag{2}$$

$$v(z)|_{z=0} = V + \beta_3 \int_0^z \int_0^z j(T_E(z), v(z)) dz + \beta_4 \int_0^{l_E} j(T_E(z), v(z)) dz,$$

причем уравнение (1) записывается отдельно для торцов ЭГЭ, боковой поверхности и коммутации, которые дополняются условиями сопряжения на границах областей. В (1) и (2) ξ — текущая координата эмиттерной оболочки, равная для соответствующих областей r или z ; T_e , T_h — температура коллектора и коммутации, q_c — теплота конденсации электронов на коллекторе; V — напряжение нагрузки; α , β — коэффициенты, учитывающие геометрические и теплофизические характеристики элемента.

Система (1) дополняется уравнением исходных вольт-амперных характеристик ТЭП

$$j = j(T_E, v, T_c), \quad (3)$$

полученных экспериментально или теоретически.

Расчет ЭГК по подпрограмме № 2 заключается в учете зависимости переменных расчета ЭГЭ от координат при дополнительном условии, определяемом схемой коммутации. Благодаря замене координатной зависимости распределенных параметров $q(z)$, $T_c(z)$ зависимостью сосредоточенных параметров от номера ячейки $\{q_i\}$, $\{T_{c_i}\}$, метод распространяется на системы с различными размерами элементов или ячеек. Применительно к ЭГК с n последовательно соединенными ЭГЭ вольт-амперные характеристики $q = \text{const}$ получают суммированием рабочих напряжений ЭГЭ

$$V(I, \{q_i\}, \{T_{c_i}\}, \dots) = \sum_{i=1}^n V_i(I, q_i, T_{c_i}, \dots) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

при заданных видах функций $\{q_i\}$, $\{T_{c_i}\}$, ...

Характеристики $T_E = \text{const}$ получают из характеристик $q = \text{const}$, причем для ЭГК

$$T_E = \max[T_{E, \text{макс } i}] \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Особенностью алгоритма расчета ЭГК является возможность получения не только интегральных, но и распределенных характеристик при любом виде исходных характеристик ТЭП.

Расчету ЭГК предшествует также анализ экспериментальных или расчет теоретических вольт-амперных характеристик изотермичного ТЭП $j = j(T_E, v, T_c)$. Одновременно с расчетом ЭГК с помощью специальной подпрограммы возможна оптимизация распределения длин элементов по высоте ЭГК аналогично [2].

Ниже представлены результаты анализа большого количества расчетов коротких ЭГЭ с поликристаллическим вольфрамовым эмиттером, межэлектродным зазором 0,3 мм и максимальной температурой эмиттера $T_{E, \text{макс}} = 1800 - 1900^\circ \text{C}$.

В оптимальных по мощности точках характеристик $T_{E, \text{макс}} = \text{const}$ вследствие неизотермичности эмиттера и электрических потерь средняя плотность мощности w примерно на 30—40% ниже мощности ТЭП при тех же температурах. Отношение рабочих напряжений V , мощности W и к.п.д. η в точках максимума мощности и максимума к.п.д. (соответственно индексы W и η) составляет:

$$V_w/V_\eta = 0,65 \div 0,8, \quad W_w/W_\eta = 1,15 \div 1,3, \quad \eta_w/\eta_\eta = 0,8 - 0,9.$$

Зависимость V , w и η от $T_{E, \text{макс}}$ для этих точек приведена на рис. 1.

Распределение температуры $T_E(z)$ и плотности тока $j(z)$ вдоль эмиттера наиболее чувствительно к величине плотности электронного охлаждения. Увеличение $\bar{j} = \frac{1}{l_E} \int_0^{l_E} j dz$ приводит к заметному выравниванию

$T_E(z)$ и $j(z)$ (рис. 2). Для оптимальных точек изотермических характе-

ристок

$$T_{E, \text{ макс}} - T_{E, \text{ мин}} = (100 - 200)^\circ \text{C}.$$

При переходе к точке короткого замыкания возможно повышение температуры эмиттера у торцов.

Распределение разности потенциалов $v(z)$ между электродами слабо изменяется вдоль эмиттера.

Процесс преобразования удобно характеризовать составляющими полного к.п.д.

$$\eta_q = Q_e/Q, \quad \eta_e = W_t/Q_e, \quad \eta_s = W/W_t,$$

где Q — полная тепловая мощность; Q_e — тепло, уносимое электронами;

$W_t = \int_0^{i_s} j \cdot v \, dz$ — генерируемая на электродах мощность; $W = I \cdot V$ — полезная электрическая мощность.

В рабочих точках $\eta_q = 0,65 - 0,75$, $\eta_e = 0,2 - 0,25$, $\eta_s = 0,65 - 0,85$. Полный к.п.д.

$$\eta = \eta_q \cdot \eta_e \cdot \eta_s = 0,11 \div 0,14.$$

Интегральные характеристики коротких ЭГЭ вследствие краевых эффектов и сильной зависимости $j(T_E)$ при $p_{cs} \approx p_{opt}$ слабо зависят от аксиаль-

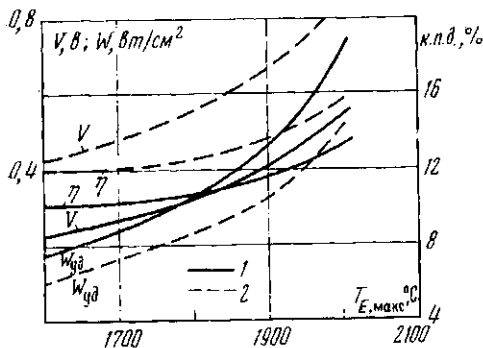


Рис. 1

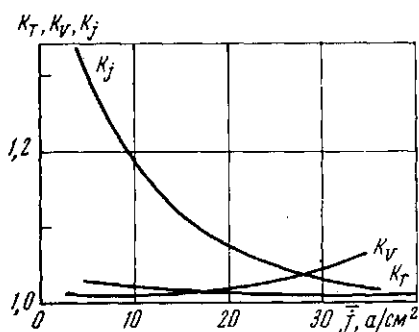


Рис. 2

Рис. 1. Напряжение, мощность и к.п.д. элемента в зависимости от максимальной температуры эмиттера:

1 — в точках максимума мощности; 2 — в точках максимума к.п.д.

Рис. 2. Зависимость коэффициентов неравномерности температуры эмиттера, разности потенциалов и плотности тока элемента от средней плотности тока вдоль изотермических характеристик

ной неравномерности энергосвечения $q(z)$. Так, при $q_{\text{ макс}}/\bar{q} = 1,2$ уменьшение мощности изотермических характеристик при $T_E = 1900^\circ \text{C}$ составляет всего лишь 3—6% по сравнению со случаем $q_{\text{ макс}}/\bar{q} = 1$. Последнее позволяет при расчете ЭГЭ не учитывать неравномерность $q(z)$ внутри одного элемента и рассматривать неравномерность средних по сердечнику элемента \bar{q} . Однако для длинных ЭГЭ с невысокой удельной мощностью влияние неравномерности энергосвечения на изотермические характеристики существенно и зависит от положения максимума энергосвечения.

Вольт-амперные характеристики $T_E = \text{const}$ слабо зависят от теплопроводности материала сердечника и приведенной степени черноты электродов, однако к.п.д. с увеличением степени черноты уменьшается.

Исследование влияния различных законов распределения энергосвечения $q(z)$ при последовательном и параллельном соединениях ячеек показало, что характеристики $\bar{q} = \text{const}$ при $p_{cs} \geq p_{cs}^{\text{opt}}$ относительно слабо за-

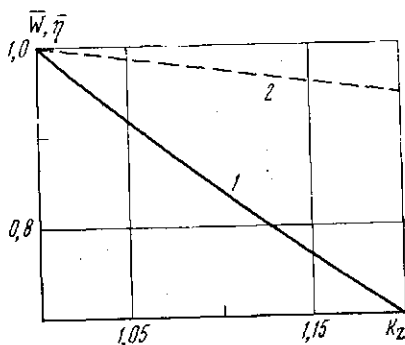


Рис. 3

Рис. 3. Влияние неравномерности энерговыведения на мощность (1) и к.п.д. (2) термоэмиссионных сборок

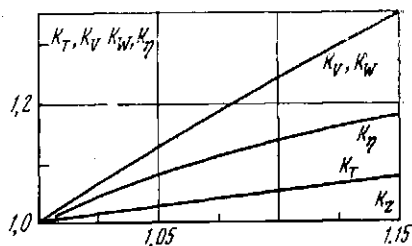


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость коэффициентов неравномерности максимальных температур эмиттера, рабочего напряжения, мощности и к.п.д. сборки от неравномерности энерговыведения

висят от коэффициента неравномерности энерговыведения. Характеристики $T_E = \text{const}$ ЭГК с одинаковыми размерами элементов ухудшаются с ростом неравномерности $q(z)$, причем при последовательном соединении даже небольшая неравномерность энерговыведения существенно изменяет мощность. Изменение к.п.д. вследствие слабой зависимости характеристик $\bar{q} = \text{const}$ от $q(z)$ невелико. На рис. 3 представлены зависимости относительной мощности $\bar{W} = W(K_z)/W_{K_z=1}$ и относительного к.п.д. $\bar{\eta} = \eta(K_z)/\eta_{K_z=1}$ для оптимальных точек изотермических характеристик от коэффициента неравномерности энерговыведения $K_z = q_{\text{max}}/\bar{q}$ при косинусоидальном законе распределения энерговыведения для ЭГК с последовательно соединенными ЭГЭ.

Полученные для этих условий зависимости $\bar{W}(K_z)$, $\eta(K_z)$ могут быть аппроксимированы линейными функциями

$$\begin{aligned} \bar{W} &= 2,52 - 1,52K_z, \\ \eta &= 1,275 - 0,275K_z. \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 4 показана зависимость коэффициентов неравномерности мощности K_W , рабочего напряжения K_V , к.п.д. K_η и температуры эмиттера K_T

$$\begin{aligned} K_V &= \max(V_i) / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i, & K_W &= \max(W_i) / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i, \\ K_\eta &= \max(\eta_i) / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i, & K_T &= \max(T_{E_i}) / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{E_i} \end{aligned}$$

от K_z для косинусоидального закона распределения $q(z)$.

При параллельном соединении влияние неравномерности $q(z)$ значительно слабее вследствие эффекта выравнивания распределений $\{T_E\}$ электронным током. С увеличением эффективности ТЭП влияние неравномерности $q(z)$ возрастает при последовательном соединении и уменьшается при параллельном.

Отклонение температуры коллектора T_c от оптимальной T_c^{opt} приводит к ухудшению характеристик ТЭП [3], что в свою очередь ухудшает характеристики ЭГЭ и ЭГК, причем изменяются как характеристики $q = \text{const}$, так и $T_E = \text{const}$ (рис. 5). При постоянном энерговыведении с от-

клонением T_c от T_c^{opt} происходит одновременное уменьшение мощности и повышение T_E . В результате характеристики $T_E = \text{const}$ более сильно зависят от T_c , чем характеристики $q = \text{const}$, причем с увеличением неоптимальности T_c ухудшаются как мощность, так и к.п.д. Влияние неоптимальности T_c увеличивается от ТЭП к ЭГЭ и от ЭГЭ к ЭГК (рис. 6).

При совместном влиянии нескольких распределенных параметров, например $q(z)$, $T_c(z)$, $p_{cs}(z)$, выходные характеристики ЭГК, например мощность W , к.п.д. η , удобно рассчитывать через характеристики идеального ЭГК W_0 , η_0

$$W = W_0 \prod_{i=1}^n K_{W_i}, \quad \eta = \eta_0 \prod_{i=1}^n K_{\eta_i},$$

$$K_{W_i} \leq 1, \quad K_{\eta_i} \leq 1,$$

где K_i — соответствующие коэффициенты неидеальности, учитывающие влияние отдельного фактора.

Однако сравнение результатов расчетов, учитывающих аддитивное влияние отдельных факторов с прямым расчетом по разработанному алгоритму, показало, что коэффициенты неидеальности взаимосвязаны и прямой расчет дает более высокие характеристики.

Разработанный алгоритм расчета характеристик электрогенерирующих сборок позволил определить полные потери мощности в элементе и сборке по сравнению с ТЭП. Для эффективных сборок средние плотности электрической мощности в элементе примерно на $1/3$ ниже мощности ТЭП при тех же температурах эмиттера (для ЭГЭ — максимальной). Уменьшение мощности является следствием психотермичности эмиттера и джоулевых потерь на электродах и коммутации. При наличии неравномерности энерговыделения и других параметров по высоте сборки потери мощности зависят от схемы коммутации. Выбор оптимальной геометрии ЭГЭ в сборке позволит довести эти суммарные потери плотности электрической мощности в сборке по сравнению с ТЭП до 50%.

Авторы выражают благодарность В. Д. Юдицкому за советы и обсуждения.

Москва

Поступила в редакцию
23 IV 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Бровальский, Н. М. Рожкова, В. В. Синяевский, В. Д. Юдицкий. В сб. Термоэмиссионное преобразование энергии. Изд. АН СССР, 1969.
2. E. Woff, W. Naug. Atomkernenergie, 16, 213, 1970.
3. Б. П. Вараксин, В. З. Кайбышев и др. В сб. Термоэмиссионное преобразование энергии. Изд. АН СССР, 1969.

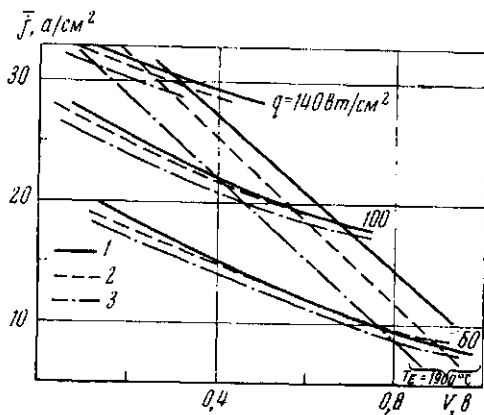


Рис. 5. Вольт-амперная диаграмма сборки для разных температур коллектора:
1 — $\bar{T}_c = T_c^{opt}$; 2 — $\bar{T}_c = T_c^{opt} + 50^\circ \text{C}$; 3 — $\bar{T}_c = T_c^{opt} + 100^\circ \text{C}$

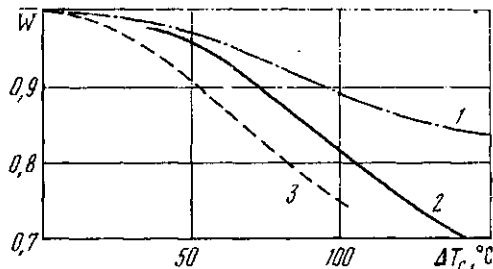


Рис. 6. Влияние неоптимальности температуры коллектора на мощность ТЭП (1), элемента (2) и сборки (3)