

# Влияние неравномерности тепловыделения в реакторе на электрические характеристики термоэмиссионного преобразователя

К. А. УШАКОВ, В. Д. НИКИТИН, В. Ю. КОРБУТ

УДК 621.362

Ядерный реактор со встроенными в активную зону термоэмиссионными преобразователями (например, по типу реактора ITR [1]) при достаточно большой электрической мощности должен иметь значительное количество единичных термоэмиссионных преобразователей (ТЭП), поскольку полезное напряжение каждого ТЭП мало. Возможные неравномерности тепловыделения по активной зоне реактора могут оказывать сильное влияние на электрические характеристики как единичного преобразователя, так и реактора в целом, особенно при последовательном электрическом соединении нескольких ТЭП. Кроме того, рабочие температуры катодов преобразователей с плотностью полезной электрической мощности, представляющей практический интерес, близки к предельно допустимым рабочим температурам материалов, рассматриваемых в качестве катодных материалов. Поэтому значительная неравномерность тепловыделения по объему активной зоны может вызвать локальное превышение допустимой рабочей температуры катодов ТЭП и, как следствие, нарушение нормального функционирования ТЭП. Физическое профилирование тепловыделения в активной зоне реактора с помощью непрерывного изменения концентрации делящегося вещества позволяет достичь равномерного распределения тепловыделения по активной зоне реактора [2]. Однако подобная задача является технически очень сложной и не всегда возможной по технологическим или конструктивным соображениям. Зонное профилирование тепловыделения, когда концентрация делящегося вещества внутри каждой зоны остается постоянной, меняясь скачком от зоны к зоне, позволяет получить почти одинаковые по всему объему реактора интегральные тепловыделения в каждой зоне. Но внутри каждой зоны тепловыделение оказывается существенно неравномерным [3].

На рис. 1 приведено распределение тепловыделения по полувысоте активной зоны реактора с термоэмиссионными преобразователями, предполагаемая электрическая мощность которого равна 1 Мвт [4]. Распределение получено при профилировании тепловыделения изменением концентрации делящегося вещества в трех

зонах (зоны I, II, III + IV). Если высота каждой зоны I — IV соответствует длине ТЭП, то очевидно, что интегральные тепловыделения в каждой зоне различны и тепловыделение по катоду каждого ТЭП распределено неравномерно.

Таким образом, в реакторе со встроенными в активную зону термоэмиссионными преобразователями даже при наличии физического зонного профилирования тепловыделения по реактору при расчете электрических характеристик и температурного режима каждого ТЭП необходимо учитывать, во-первых, возможное различие интегральных по каждой зоне тепловыделений и, во-вторых, неравномерность распределения тепловыделения в каждой зоне.

В данной работе влияние указанных эффектов на электрические характеристики и температурный режим ТЭП рассмотрено для дугового режима работы ТЭП, представляющего наибольший практический интерес. Конструкция ТЭП подобна конструкции (рис. 2), приведенной в работах [1, 4].

**Методика расчетов.** Решение задачи о влиянии неравномерности тепловыделения на температурный режим катодов ТЭП и его электрические характеристики сводится к самосгла-

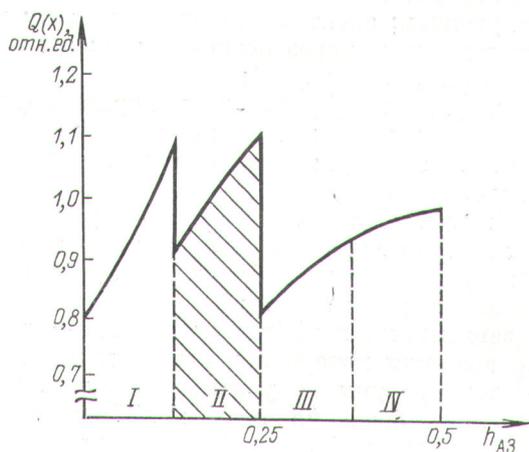
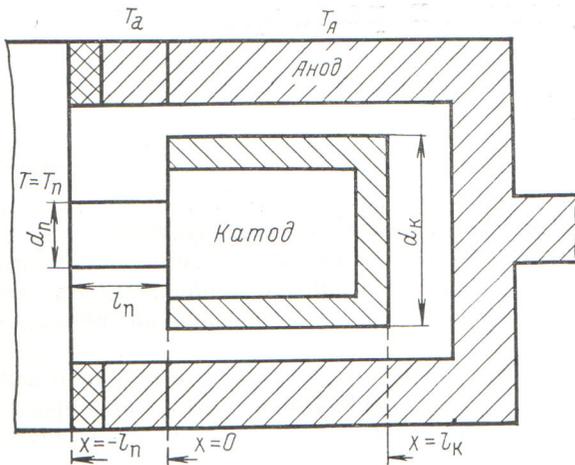


Рис. 1. Распределение тепловыделения по полувысоте активной зоны реактора.

Затрихованная площадь соответствует интегральному тепловыделению во второй зоне.



Р и с. 2. Схема единичного термоэмиссионного преобразователя.

сованному решению уравнения теплопроводности катода и уравнения, определяющего распределение потенциала по катоду, с использованием зависимости плотности эмиссионного тока от температуры и разности потенциалов между катодом и анодом.

При решении указанной задачи учитывались основные эффекты, влияющие на температурный режим катода ТЭП и его электрические характеристики:

- неравномерность тепловыделения по катоду;
- потери тепла катодом (теплопроводностью через проводник-переходник, соединяющий катод с анодом соседнего ТЭП или же с токовводом);
- излучением; электронным охлаждением; теплопроводностью через цезиевый пар; излучением со свободного торца);
- джоулев нагрев катода и переходника;
- падение напряжения по катоду;
- падение напряжения на переходнике и на аноде.

Были сделаны следующие допущения: локальные эффекты, связанные с отсутствием непосредственного контакта оболочки и горючего, не учитывались;

зависимость коэффициентов тепло- и электропроводности материалов катода и переходника от температуры не учитывалась, т. е. использовались значения этих коэффициентов при соответствующей средней рабочей температуре;

рассматривалась одномерная задача. Одномерное уравнение теплопроводности для катода с учетом перечисленных выше эффектов подобно соответствующему уравнению

работ [5, 6]:

$$\lambda_K \pi r_K^2 \frac{d^2 T}{dx^2} = 2\pi r_K \epsilon_K \sigma [T^4(x) - T_A^4] + 2\pi r_K [\varphi_K(T, T_{Cs}) + 2kT] j(T, V_x) - 2\pi r_K \lambda_{Cs} [T(x) - T_A] - \pi r_K^2 Q_{дж}(x) - \pi r_K^2 Q(x), \quad (1)$$

где  $T$  — температура катода;  $T_{Cs}$  — температура жидкого цезия;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $Q_{дж}(x)$  — тепловыделение в катоду за счет джоулева тепла,  $вт/см^3$ ;  $Q(x)$  — тепловыделение в катоду,  $вт/см^3$ ;  $T_A$  — средняя температура части анода, расположенной против катода;  $j$  — плотность эмиссионного тока;  $\varphi_K$  — работа выхода катода;  $V_x$  — падение напряжения на участке катода от точки  $x = 0$  до точки  $x = x$ ; индекс «к» относится к катоду, остальные обозначения приведены в табл. 1.

Значения параметров, использованные в расчетах

Таблица 1

Параметр	Катод		Катодный проводник
	оболочка	горючее	
Радиус $r$ , см . . . . .	0,5	0,4	0,4
Длина $l$ , см . . . . .	4,0; 5,0	4,0; 5,0	2,0
Средний коэффициент электропроводности $\rho$ , $ом \cdot см$ . . . . .	$0,56 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$
теплопроводности $\lambda$ , $вт/см \cdot ^\circ K$ . . . . .	1,2	0,48	0,46
эффективной излучательной способности $\epsilon$ . . . . .	0,25	—	0,25

Одномерное уравнение теплопроводности для переходника имеет вид

$$\lambda_{\Pi} \pi r_{\Pi}^2 \frac{d^2 T_{\Pi}}{dx^2} = 2\pi r_{\Pi} \epsilon_{\Pi} \sigma [T_{\Pi}^4(x) - T_A^4] - \frac{I^2 \rho_{\Pi}}{\pi r_{\Pi}^2}, \quad (2)$$

где  $I$  — полный ток преобразователя; индекс «п» относится к переходнику.

Граничные условия имеют вид (см. рис. 2):

$$T|_{x=-l_{\Pi}} = T_{\Pi}; \quad T|_{x=+0} = T|_{x=-0};$$

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=l_K} = \pi r_K^2 \epsilon_K \sigma [T^4(x=l_K) - T_{ат}^4];$$

$$\pi r_K^2 \lambda_K \frac{dT}{dx} \Big|_{x=+0} = \pi r_{\Pi}^2 \lambda_{\Pi} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=-0}, \quad (3)$$

где  $T_A$  — температура части анода, расположенной против переходника;  $T_{ат}$  — температура элемента конструкции, расположенного против свободного торца катода;  $d$  — межэлек-

тричное расстояние. В общем случае

$$T_A \neq T_a \neq T_{ат} \neq T_{п}.$$

Зависимость работы выхода катода  $\varphi_k(T, T_{Cs})$ , входящей в уравнение (1), от  $T$  и  $T_{Cs}$  определяется с помощью эмпирической формулы, предложенной авторами:

$$\varphi(T, T_{Cs}) = \varphi_0 + \varphi_1 \left\{ 1 + \exp \left[ \alpha \left( \frac{T_{Cs}}{T} - \beta \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Для вольфрама коэффициенты, входящие в формулу (4), имеют следующие значения:  $\varphi_0 = 2,08$  эв;  $\varphi_1 = 2,48$  эв;  $\alpha = 40,77$ ;  $\beta = 0,288$ .

Коэффициенты теплопроводности  $\lambda_k$  и электропроводности  $\rho_k$  для катода, состоящего из горючего и оболочки из тугоплавкого металла, определялись по формулам:

$$\lambda_k = \lambda_{об} - \frac{\delta}{r_k} \left( 2 - \frac{\delta}{r_k} \right) + \lambda_{г} \left( 1 - \frac{\delta}{r_k} \right)^2;$$

$$\rho_k = \rho_{об} \left[ \frac{\delta}{r_k} \left( 2 - \frac{\delta}{r_k} \right) + \frac{\rho_{об}}{\rho_{г}} \left( 1 - \frac{\delta}{r_k} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $\lambda_{об}$ ,  $\lambda_{г}$  — коэффициенты теплопроводности оболочки и горючего соответственно;  $\rho_{об}$ ,  $\rho_{г}$  — коэффициенты электропроводности оболочки и горючего соответственно;  $\delta$  — толщина оболочки катода.

Распределение потенциала по катоду (рис. 3) определяется уравнением

$$\frac{dV(x)}{dx} = \rho_k \frac{I(x)}{\pi r_k^2}, \quad (6)$$

где  $V(x)$  — потенциал точки катода с координатой  $x$  относительно анода;  $I(x)$  — полный ток, проходящий по катоду через сечение с координатой  $x$ . Этот ток определяется выражением

$$\frac{dI(x)}{dx} = -2\pi r_k j(T, V_x). \quad (7)$$

Очевидно,  $I(0) = I$ .

Уравнения (6) и (7) сводятся к следующему:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{2\pi\rho_k}{r_k} j(T, V_x). \quad (8)$$

Граничные условия имеют вид

$$\left. \frac{dV(x)}{dx} \right|_{x=l_k} = 0; \quad V(0) = V_{пр} + V_{п} + V_a, \quad (9)$$

где  $V_x|_{x=l_k} = V_k$  — падение напряжения на катоде;  $V_{пр}$  — полезное напряжение преобразователя;  $V_{п}$  — падение напряжения на переходнике;  $V_a$  — падение напряжения на аноде.

Система уравнений (1), (2), (8) с граничными условиями (3) и (9) записывалась в конечно-

разностной форме и решалась с помощью ЭВМ. Значения  $j(T, V_x)$  задавались в виде таблицы.

Для произвольных значений температур катода  $T$  и потенциала  $V_x$  плотности эмиссионного тока  $j$  находились соответствующей интерполяцией по значениям тока в соседних точках.

**Результаты.** Зависимости электрических характеристик и распределения температуры по катоду от интегрального тепловыделения в ТЭП и неравномерности тепловыделения по катоду определяются многими параметрами работы ТЭП, в том числе геометрическими размерами, режимом работы ТЭП, свойствами используемых материалов. Ниже приведены результаты расчета для практически наиболее интересного дугового режима работы ТЭП с вольфрамовым катодом при типичных значениях остальных параметров, приведенных в табл. 1 [4—6]. При определении  $j(T, V_x)$  было использовано семейство экспериментальных вольт-амперных характеристик преобразователя с изотермическим катодом из вольфрама при межэлектродном расстоянии  $d = 0,05$  мм и  $T_{Cs} = 593^\circ$  К [7].

Длины катода  $l_k$  и переходника  $l_{п}$  были приняты равными 5 и 2 см, что соответствует оптимальным значениям с точки зрения полезной электрической мощности ТЭП при  $\delta = 0,1$  см,  $T_A = T_a = T_{п} = 1000^\circ$  К,  $T_{ат} = 1300^\circ$  К и значениях остальных параметров, указанных в табл. 1. Электрическое сопротивление анода  $R_a$  было принято равным  $\frac{1}{4} R_k$  (где  $R_k$  — полное сопротивление катода),  $\epsilon_k = 0,25$ ,  $\lambda_{Cs} = 0,65 \cdot 10^{-4}$  вт/см $\cdot$ °К.

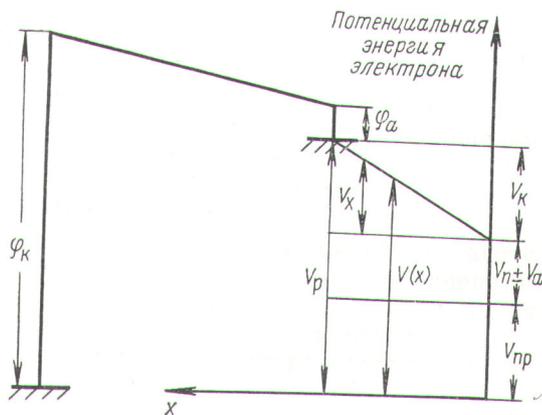
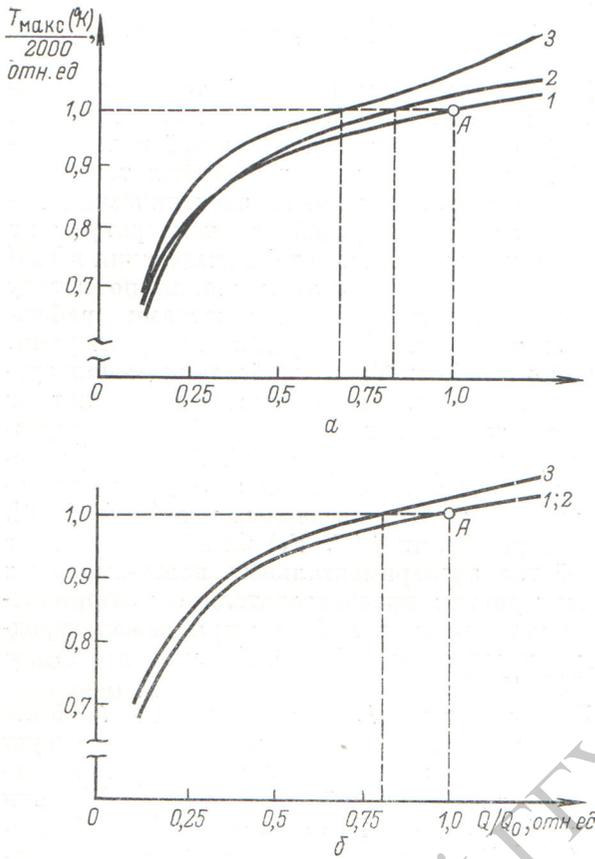


Рис. 3. Диаграмма потенциальной энергии электрона ( $\varphi_a$  — работа выхода анода;  $V_p$  — экспериментальное значение полезного напряжения преобразователя с изотермическим катодом).



Р и с. 4. Зависимость максимальной температуры катода от интегрального тепловыделения в преобразователе ( $Q = 1215 \text{ вт}$ ).

Для а: 1 —  $\kappa_z = 1,0$ ; 2 —  $\kappa_z^+ = 1,6$ ; 3 —  $\kappa_z^- = 1,6$ . Для б: 1 —  $\kappa_z = 1,0$ ; 2 —  $\kappa_z^+ = 1,3$ ; 3 —  $\kappa_z^- = 1,3$ .

Рассмотрены различные значения интегрального тепловыделения в катоде, а также два возможных типа линейного изменения тепловыделения  $Q(x)$  по катоду (т. е. два типа перекоса распределения тепловыделения по катоду относительно точки  $x = l_K/2$ ):

1) максимальное тепловыделение на границе катода с переходником ( $x = 0$ ) и минимальное — на свободном конце катода ( $x = l_K$ );

2) минимальное тепловыделение на границе катода с переходником ( $x = 0$ ) и максимальное — на свободном конце ( $x = l_K$ ).

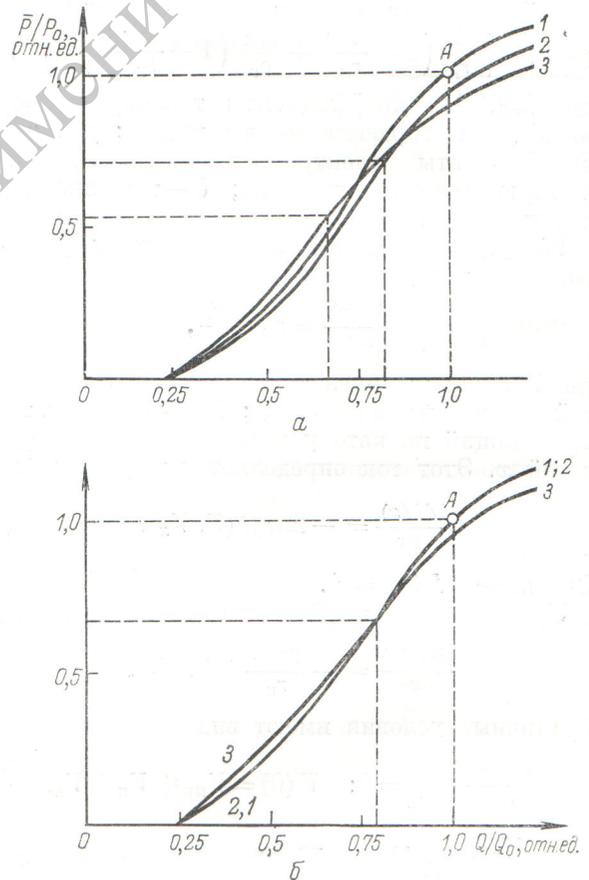
Неравномерность тепловыделения по катоду характеризуется коэффициентом неравномерности тепловыделения по катоду  $\kappa_z$ , который определяется как отношение максимального

тепловыделения в катоде к тепловыделению, среднему по катоду, т. е.

$$\kappa_z = \frac{Q_{\text{макс}}}{\frac{1}{l_K} \int Q(x) dx}$$

Коэффициент неравномерности, соответствующий первому типу неравномерности тепловыделения (с минимумом на свободном конце), обозначим через  $\kappa_z^+$ , а коэффициент неравномерности, соответствующий второму типу неравномерности тепловыделения (с максимумом на свободном конце), обозначим через  $\kappa_z^-$ .

Расчеты были проведены для различных значений коэффициента неравномерности  $\kappa_z^\pm$  в пределах  $1 \geq \kappa_z^\pm 1,6$  и для различных значений интегрального тепловыделения по катоду  $Q$ , соответствующих диапазону изменения рабочих



Р и с. 5. Зависимость средней плотности полезной электрической мощности преобразователя от интегрального тепловыделения в преобразователе ( $Q = 1215 \text{ вт}$ ,  $p_0 = 9,7 \text{ вт/см}^2$ ).

Для а: 1 —  $\kappa_z = 1,0$ ; 2 —  $\kappa_z^+ = 1,6$ ; 3 —  $\kappa_z^- = 1,6$ ; Для б: 1 —  $\kappa_z = 1,0$ ; 2 —  $\kappa_z^+ = 1,3$ ; 3 —  $\kappa_z^- = 1,3$ .

температур катода  $1700-2100^\circ \text{K}$ , где  $Q = -\sigma \epsilon_z^{\pm} \int_0^L Q(x) dx$ .

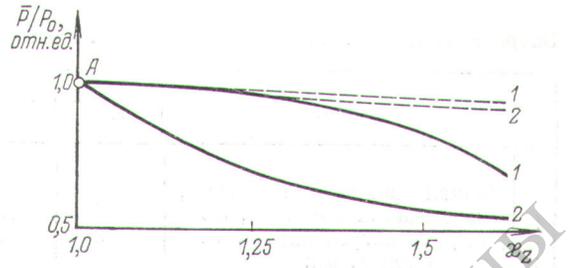
На рис. 4 а и б приведены зависимости максимальных температур катода от интегрального тепловыделения по катоду при различных перекосах тепловыделения по катоду:  $\kappa_z = 1$ ;  $\kappa_z^{\pm} = 1,3$ ;  $\kappa_z^{\pm} = 1,6$ . Данные этого рисунка показывают, что при одинаковых интегральных тепловыделениях, когда минимум тепловыделения приходится на область катода, примыкающую к переходнику, перекосы второго типа значительно сильнее влияют на максимальные рабочие температуры катода, чем перекосы первого типа, когда максимум тепловыделения приходится на область катода с повышенным охлаждением (через переходник).

На рис. 5 приведены зависимости средней по катоду плотности полезной электрической мощности от интегрального тепловыделения по катоду при значениях коэффициентов неравномерности тепловыделения по катоду  $\kappa_z^{\pm}$ , равных 1,3 и 1,6.

Максимально допустимая рабочая температура катода является одной из важнейших величин, определяющих надежную длительную работу ТЭП. При большом числе термоэмиссионных преобразователей в реакторе при наличии неоднородности распределения тепловыделения по активной зоне необходимо обеспечить условия их работы, при которых рабочие температуры каждого ТЭП не превышали бы максимально допустимую температуру катода. Приведенные на рис. 4 зависимости позволяют для рассмотренного типа преобразователя и указанных параметров определить по заданным значениям максимально допустимой температуры катода величину интегрального тепловыделения по катоду при различных перекосах тепловыделения в нем. Для этих значений интегрального тепловыделения приведенные на рис. 5 зависимости позволяют определить электрическую мощность преобразователя при различных  $\kappa_z^{\pm}$ .

Таким образом, приведенные на рис. 4 и 5 данные для различных  $\kappa_z^{\pm}$  позволяют определить зависимость полезной электрической мощности ТЭП от коэффициента неравномерности тепловыделения по катоду  $\kappa_z^{\pm}$  при условии, что рабочие температуры катода не превышают заданного значения максимально допустимой температуры катода.

На рис. 6 приведена указанная зависимость для случая, когда максимально допустимая температура катода принята равной  $2000^\circ \text{K}$



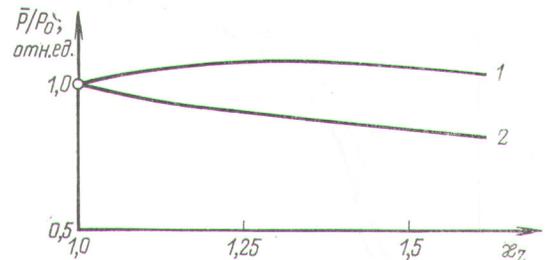
Р и с. 6. Зависимость средней плотности полезной электрической мощности преобразователя от коэффициента неравномерности тепловыделения по катоду  $\kappa_z$  для дугового режима с  $j \approx 10 \text{ а/см}^2$ ;  $p_0 = 9,7 \text{ ат/см}^2$ :

1 — минимум тепловыделения на свободном конце катода; 2 — максимум тепловыделения на свободном конце катода.

(сплошная черта). Снижение средней плотности полезной электрической мощности с увеличением  $\kappa_z^{\pm}$  связано с тем, что для выполнения условия  $T_{\text{макс}} \leq 2000^\circ \text{K}$  необходимо уменьшить интегральное по катоду тепловыделение  $Q$ . Пунктирные кривые на этом рисунке показывают зависимости средней по катоду плотности полезной электрической мощности от коэффициента неравномерности при условии  $Q = \text{const} = 1215 \text{ вт}$ .

На рис. 7 приведены зависимости средней плотности полезной электрической мощности ТЭП, работающего в дуговом режиме с плотностями снимаемого тока  $j \approx 40 \text{ а/см}^2$ , от коэффициента  $\kappa_z^{\pm}$ . Эти зависимости получены при условии, что максимальная температура катода не превышает  $2000^\circ \text{K}$  и с помощью семейства вольт-амперных характеристик ТЭП с изотермическим катодом при  $d = 0,127 \text{ мм}$ ,  $T_{\text{Cs}} = 653^\circ \text{K}$  [8]. Оптимальная длина катода в этом случае равна  $4,0 \text{ см}$ .

На рис. 8 для этого же случая дугового режима приведены зависимости средней плот-



Р и с. 7. Зависимость средней плотности полезной электрической мощности преобразователя от коэффициента неравномерности тепловыделения по катоду  $\kappa_z$  для дугового режима с  $j \approx 40 \text{ а/см}^2$  при условии  $T_{\text{макс}} = 2000^\circ \text{K}$ ,  $p_0 = 13,25 \text{ ат/см}^2$ :

1 — минимум тепловыделения на свободном конце катода; 2 — максимум тепловыделения на свободном конце катода.

Энергетический баланс ТЭП

Таблица 2

Параметр		Первый режим	Второй режим	
Тепловой баланс	Полная тепловая мощность, подводимая к катоду, <i>вт</i>	1215	1790	
	Джоулев нагрев катода, <i>вт</i>	8	43	
	Потери тепла, <i>вт</i> :			
	излучением . . . . .	309	250	
	током эмиссии . . . . .	554	1370	
	теплопроводностью через переходник . . . . .	107	95	
	теплопроводностью через цезий . . . . .	197	61	
	излучением с торца . . . . .	56	57	
	Электрический баланс	Полная полезная электрическая мощность, <i>вт</i> . . . . .	152	166
		Потери, <i>вт</i> :		
на катоде . . . . .		8	43	
на аноде . . . . .		2	10	
на переходнике . . . . .		12,6	50	
Полный ток, <i>а</i> . . . . .		180	505	
Средняя плотность:				
мощности, <i>вт/см<sup>2</sup></i> . . . . .		9,7	13,25	
тока, <i>а/см<sup>2</sup></i> . . . . .		11,5	40,2	
Полезное напряжение, <i>в</i> . . . . .		0,84	0,33	
К. п. д., % . . . . .	12,5	9,3		

ности электрической мощности преобразователя от интегрального тепловыделения при  $\kappa_z = 1,0$  и  $\kappa_z^\pm = 1,6$ . В табл. 2 описан энергетический баланс ТЭП для двух случаев дугового режима: первый режим, когда плотность

тока  $j = 10 \text{ а/см}^2$ , полезное напряжение преобразователя  $V_{пр} \approx 0,86 \text{ в}$  (соответствует точке А на рис. 4, 5, 6), второй режим, когда плотность тока  $j \approx 40 \text{ а/см}^2$ , полезное напряжение  $V_{пр} \approx 0,3 \text{ в}$  (соответствует точке А на рис. 7, 8). Сравнение приведенных на рис. 6 и 7 зависимостей показывает, что при работе ТЭП в режиме с большими плотностями тока его электрические характеристики в меньшей мере зависят от неравномерности тепловыделения по катоду, чем в случае ТЭП с умеренными плотностями тока.

Сравнение зависимостей полезной электрической мощности ТЭП от интегрального тепловыделения в катоде, приведенных на рис. 5, а, с аналогичной зависимостью для ТЭП с плотностью тока  $j \approx 40 \text{ а/см}^2$  (см. рис. 8) показывает, что и в этом случае в режиме с плотностями тока  $j \approx 40 \text{ а/см}^2$  электрические характеристики ТЭП в меньшей степени зависят от изменения интегрального тепловыделения, чем в случае ТЭП с  $j \approx 10 \text{ а/см}^2$ .

Дуговой режим может осуществляться при различных значениях  $j$  и  $V_{пр}$ , однако большая часть возможных случаев осуществления дугового режима лежит между рассмотренными выше двумя случаями (первый и второй режимы).

Приведенные результаты расчета указывают на необходимость профилирования тепловыделения по объему реактора и на необходимость учета как неравномерности тепловыделения по катоду, так и неравномерности в интегральных тепловыделениях в ТЭП при определении их электрических характеристик и всего реактора.

Авторы выражают благодарность В. П. Гришину, принимавшему участие в работе.

Поступила в Редакцию 15/X 1970 г.  
В окончательной редакции 12/III 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Grob et al. Kerntechnik, № 7, 381 (1969); «Атомная техника за рубежом», № 2, 3 (1970).
2. Н. Н. Пономарев-Степной. «Атомная энергия», 12, 415 (1962).
3. Г. А. Бать, В. Н. Гулимов, В. К. Обухов. «Атомная энергия», 26, 7 (1969).
4. P. Bolan et al. Space Power Systems Engineering. Academic Press, 1966, p. 605.
5. A. Shosk. Доклад F-12 на Второй международной конференции по термоэмиссионному преобразованию энергии (Италия, 1968 г.).
6. Ю. А. Бровальский и др. Там же, доклад G-3.
7. V. Zilson et al. Effort to increase thermionic output and efficiency. Preprint Intern. Conf. Therm. Electr. Power Generation. London, 1965.
8. V. Wilson, I. Lawrence. J. Adv. Energy Conf., № 4, 4 (1964).

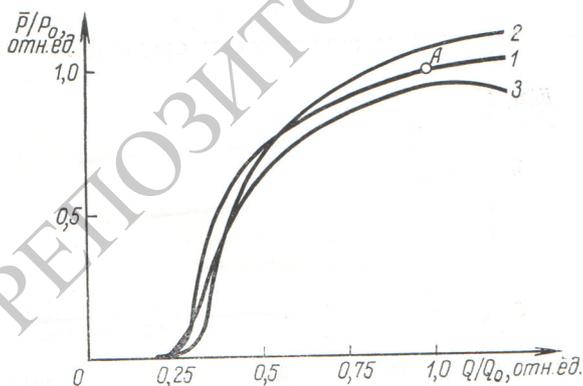


Рис. 8. Зависимость средней плотности полезной электрической мощности преобразователя от интегрального тепловыделения для дугового режима с  $j \approx 40 \text{ а/см}^2$ ,  $\Omega = 1790 \text{ вт}$ ,  $p_0 = 13,25 \text{ вт/см}^2$ :

1 —  $\kappa_z = 1,0$ ; 2 —  $\kappa_z^+ = 1,6$ ; 3 —  $\kappa_z^- = 1,6$ .