

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ТЕРМОЭМИССИОННОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КАНАЛА РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**М.А. Полоус**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Проведена модификация алгоритма численного расчета электротеплофизических характеристик электрогенерирующих каналов термоэмиссионных реакторов-преобразователей. Разработан программный блок для аппроксимации экспериментальных вольтамперных характеристик. Усовершенствован численный метод решения уравнений теплопроводности для эмиттера и распределения разности потенциалов между электродами.

**Ключевые слова:** термоэмиссия, термоэмиссионный преобразователь (ТЭП), электрогенерирующий канал (ЭГК), электрогенерирующий элемент (ЭГЭ), реактор-преобразователь, электроды, эмиттер, коллектор, вольтамперная характеристика (ВАХ), аппроксимация.

**Key words:** thermionic conversion, thermionic converter, electricity generation channel, electricity generation element, reactor-converter, electrodes, emitter, collector, voltage-current characteristic, approximation.

## ВВЕДЕНИЕ

Перспективы развития космической техники связаны с совершенствованием технологий, открывающих новые возможности в освоении и использовании космического пространства для решения научных, социально-экономических и оборонных задач в интересах устойчивого развития России и мира в целом. Основные направления НИОКР по созданию космических ЯЭУ нового поколения связаны с необходимостью радикального увеличения к.п.д. с ~10% до 20–30%, величины выходной электрической мощности, ресурса работы электрогенерирующих каналов (ЭГК) и систем в составе ЯЭУ с 1–2 до 7–10 лет при существенном ограничении массогабаритных характеристик.

Достижение этих целей в значительной степени связано с уменьшением потерь в термоэмиссионном преобразователе (ТЭП), величина которых характеризуется обобщенным показателем эффективности, называемом барьерным индексом  $V_B$ , и

равна сумме потерь напряжения в зазоре и работы выхода коллектора. Достигнутый уровень барьерного индекса электрогенерирующих систем первого поколения (космическая ЯЭУ «Топаз» и ЯЭУ «Енисей») составил 2,15–2,25 эВ, что соответствовало к.п.д. 8–12% (при температуре эмиттера 1600–1800 К). Летные испытания двух образцов ЯЭУ «Топаз» впервые в мире были проведены в 1987–1988 гг. в составе космического аппарата «Плазма-А» («Космос-1818» и «Космос-1867»). ЯЭУ «Топаз» проработала в составе одного космического аппарата в течение 142 суток, а в составе другого – в течение 342 суток. Окончание работы обоих летных образцов ЯЭУ было связано с плановым исчерпанием запасов цезия в генераторе паров цезия. В таблице 1 представлены основные характеристики космических ЯЭУ, использовавшихся в составе космических аппаратов в США и СССР (России) [1, 3].

Таблица 1

	<b>ТОПАЗ</b>	<b>БУК</b>	<b>SNAP-10A</b>
Тепловая мощность, кВт	150	100	34
Электрическая мощность, кВт	7	2,5	0,54
Ресурс, мес.	12	6	1,5
Масса, т	1,2	0,9	0,45
Количество запусков	2	32	1
Год запуска	1987	1970–1988	1965

Для будущих прикладных задач необходимы уровень барьерного индекса 1,7–1,8 эВ и температура эмиттера ниже 1750 К, что в свою очередь позволит достичь требуемого ресурса работы ЭГК и космической ЯЭУ. Увеличение ресурса, в основном, связано с последовательным совершенствованием технологии изготовления ЭГК, разработкой новых конструкций и процессов изготовления электродов и электрогенерирующих систем, поиском новых электродных материалов и схем организации рабочего процесса для высокоэффективных низкотемпературных ТЭП нового поколения [2, 3].

Одной из актуальных задач, возникающих при разработке и совершенствовании термоэмиссионных ЯЭУ, является расчет электротеплофизических характеристик ЭГК, т.к. процессы переноса в низкотемпературной плазме зависят от большого числа параметров и весьма сложны для теоретического описания. Следует также отметить, что для применения в расчетных методиках экспериментально полученных вольтамперных характеристик (ВАХ) требуется многомерная аппроксимация, а сами характеристики определяются при постоянстве большей части параметров, например, температуры коллектора, давления паров цезия в межэлектродном зазоре (МЭЗ), величины МЭЗ. Космические ЯЭУ нового поколения также могут иметь более сложную геометрическую структуру ЭГК и систем в составе ЯЭУ по сравнению с геометрией многоэлементных ЭГК для космических ЯЭУ первого поколения, что в значительной степени усложняет процессы расчетов. Поэтому совершенствование характеристик ЭГК и ЯЭУ нового поколения требует развития методик расчета, учитывающих как новые экспериментальные данные о характеристиках электродов, так и сложную геометрическую структуру ЭГК, характеризующуюся большим набором тепловых сред разной теплопроводности, сложной формой электродных оболочек, коммутационных переключателей и других конструктивных элементов [4].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существующий алгоритм численного расчета выходных характеристик ЭГК [5] основан на быстросходящемся численном методе решения дифференциальных уравнений и позволяет с достаточной точностью производить расчеты при минимальных затратах машинного времени. Алгоритм расчета реализован в виде компьютерной программы, состоящей из трех блоков: блока линейной аппроксимации экспериментальных ВАХ, блока численного решения дифференциальных уравнений теплопроводности и блока итераций по току для построения ВАХ ЭГК.

В работе ставится задача модификации этого алгоритма. Требуется повысить степень аппроксимации экспериментальных ВАХ, поднять скорость сходимости численного метода для энергонапряженных режимов, и подготовить программу для решения задач расчета электротеплофизических характеристик ЭГК со сложной структурой электродов в трехмерной геометрии.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим задачу теплового и электрического расчета ЭГК на основе одномерной математической модели. В настоящее время эта модель чаще всего используется для проведения расчетов ЭГК, т.к. при сравнительной простоте она позволяет рассчитывать характеристики ЭГК с достаточной для практики точностью. На рисунке 1 представлена конструктивная схема многоэлементного ЭГК [5].

Расчет многоэлементного ЭГК обычно сводится к последовательному расчету всех входящих в него электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) и суммированию их характеристик при заданной величине электрического тока  $I$ , одинакового для всех ЭГЭ. Таким образом, основным блоком такой методики является решение системы тепловых и электрических уравнений для ЭГЭ. Сделав ряд допущений, для каждого ЭГЭ можно записать систему нелинейных дифференциальных уравнений, состоящую из уравнений теплопроводности для эмиттера и коллектора и распределения разности потенциалов между электродами [5–8]:

$$-\lambda_E S_E \frac{d^2 T_E}{dz^2} + 2\pi r_E \left[ \epsilon \sigma (T_E^4 - T_C^4) + k_{CS} (T_E - T_C) + j(u + u_C) - q_E \right] = I_E^2 \frac{\rho_E}{S_E}, \quad (1)$$

$$(T_C - T_{TH}) k_T = \int_0^L \left[ 2\pi r_C \left[ -\epsilon \sigma (T_E^4 - T_C^4) - k_{CS} (T_E - T_C) - j u_C + q_C \right] + I_C^2 \frac{\rho_C}{S_C} \right] dz, \quad (2)$$

$$-\frac{d^2 u}{dz^2} = 2\pi r_E \left( \frac{\rho_E}{S_E} + \frac{\rho_C}{S_C} \right) j, \quad (3)$$

$$\frac{dI_E}{dz} = 2\pi r_E j, \quad (4)$$

$$\frac{dI_C}{dz} = -2\pi r_C j, \quad (5)$$

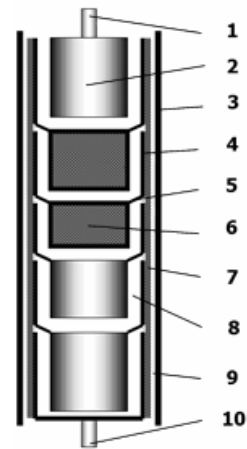


Рис. 1. Конструктивная схема многоэлементного ЭГК:  
1 – эмиттерный токовывод;  
2 – эмиттер; 3 – чехол;  
4 – коллектор;  
5 – коммутационная перемычка;  
6 – ядерное топливо;  
7 – электрическая изоляция;  
8 – межэлектродный зазор;  
9 – теплоноситель;  
10 – коллекторный токовывод

где  $\lambda_E, \lambda_C$  – теплопроводность материала эмиттера и коллектора соответственно, Вт/(см·град);  $k_T$  – удельный коэффициент теплопередачи от коллектора к теплоносителю, Вт/(см<sup>2</sup>·град);  $T_E, T_C$  – температура эмиттера и коллектора соответственно, К;  $T_{TH}$  – средняя температура теплоносителя напротив данного ЭГЭ, К;  $r_E, r_C$  – радиус эмиттера и коллектора соответственно, см;  $j$  – плотность электрического тока в МЭЗ, А/см<sup>2</sup>;  $u$  – разность потенциалов между точками электродов с одной аппликатором, В;  $u_C$  – потенциал, соответствующий энергии конденсации электронов на коллекторе, В;  $q_E$  – плотность теплового потока на эмиттер, Вт/см<sup>2</sup>;  $q_C$  – плотность теплового потока с коллектора, Вт/см<sup>2</sup>;  $\rho_E, \rho_C$  – удельное электрическое сопротивление материала эмиттера и коллектора, Ом·см;  $S_E, S_C$  – площадь поперечного сечения эмиттера и коллектора соответственно, см<sup>2</sup>;  $I_E, I_C$  – электрический ток в эмиттере и коллекторе соответственно, направленный вдоль оси  $z$ , А;  $L$  – длина ЭГЭ, см.

В системе тепловых и электрических уравнений для ЭГЭ (1)–(5) токи утечки через электроизоляцию на корпус полагаются равными нулю, в связи с этим в уравнениях не учитываются. Тепловая задача для коллектора рассматривается в «точечном» приближении, т.е. определяется только средняя температура коллектора  $T_C$  (2).

Уравнения (1)–(5) вместе с граничными условиями (6)–(9)

$$\left. \frac{dT_E}{dz} \right|_{z=0} = \alpha_1 (T_E - T_{0E}) \Big|_{z=0}, \quad (6)$$

$$\left. \frac{dT_E}{dz} \right|_{z=L} = -\alpha_2 (T_E - T_{0E}) \Big|_{z=L}, \quad (7)$$

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = \frac{\rho_C}{S_C} I, \quad (8)$$

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=L} = -\frac{\rho_E}{S_E} I \quad (9)$$

образуют одномерную математическую модель ЭГЭ ( $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплопередачи торцов ЭГЭ, Вт/(см<sup>2</sup>·град);  $T_{0E}$  – температура окружающей среды эмиттера, К;  $I$  – полный электрический ток ЭГЭ, А).

## АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Замыкающим соотношением в любой задаче электротеплофизического расчета ЭГК является зависимость плотности тока в МЭЗ от величины межэлектродного напряжения. Такая зависимость получила название локальной ВАХ ТЭП. В наиболее общем случае в расчетных методиках принимается, что плотность тока в МЭЗ является функцией нескольких переменных:

$$j = j(u, T_E, T_C, P_{CS}, d, \varphi_E, \varphi_C), \quad (10)$$

где  $u$  – величина межэлектродного напряжения;  $T_E$  – температура эмиттера;  $T_C$  – температура коллектора;  $P_{CS}$  – давление паров цезия в МЭЗ;  $d$  – величина МЭЗ;  $\varphi_E$  – работа выхода эмиттера;  $\varphi_C$  – работа выхода коллектора.

При проведении расчетов электротеплофизических характеристик ЭГК важнейшими требованиями, предъявляемыми к методике задания локальной ВАХ, являются возможность встраивания их в расчетный алгоритм и быстроедействие.

На основе данных, полученных в ходе экспериментов на стендах с электронагревом, формируются базы данных, как правило, состоящих из наборов ВАХ вида

$j = j(u, T_E, T_C)$  при различных фиксированных значениях остальных параметров. Результаты экспериментальных исследований ТЭП используются как для определения внутренних параметров термоэмиссионного процесса, что позволяет тем самым исследовать процессы в плазме МЭЗ и на электродах, так и в составе расчетных методик, разработанных для сопровождения экспериментальных исследований, обоснования конструкции термоэмиссионных электрогенерирующих систем и термоэмиссионных реакторов-преобразователей и оптимизации их выходных характеристик [8]. С точки зрения обеспечения точности расчетов выходных характеристик ЭГК наиболее перспективным является моделирование ВАХ на основе обработки баз экспериментальных данных.

В разработанной программе теплового и электрического расчета ЭГК строится поверхностная аппроксимация экспериментальных данных на основе зависимости  $j = j(u, T_E)$  при прочих фиксированных параметрах. В качестве аппроксимирующей функции был выбран полином пятой степени от двух переменных вида

$$j(u, T_E) = a_1 u^5 + a_2 u^4 + a_3 u^3 + a_4 u^2 + a_5 u + a_6 + a_7 u^4 T_E + a_8 u^3 T_E + a_9 u^2 T_E + a_{10} u T_E + a_{11} T_E + a_{12} u^3 T_E^2 + a_{13} u^2 T_E^2 + a_{14} u T_E^2 + a_{15} T_E^2 + a_{16} u^2 T_E^3 + a_{17} u T_E^3 + a_{18} T_E^3 + a_{19} u T_E^4 + a_{20} T_E^4 + a_{21} T_E^5, \quad (11)$$

где  $a_1$ – $a_{21}$  – искомые коэффициенты, поиск которых осуществлялся с помощью метода наименьших квадратов.

В качестве исходных данных, необходимых для расчета выходных характеристик ЭГК, было отобрано семейство из 11 локальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП [9]. ВАХ были получены на стенде с электронагревом при величине межэлектродного зазора 0.4 мм и давлении паров цезия 1.5 мм рт. ст. Температура эмиттера изменялась в интервале от 1400 до 1900 К, межэлектродное напряжение – от 0.1 до 1.1 В, а соответствующая им плотность тока в межэлектродном зазоре – от 1 до 25 А/см<sup>2</sup>. Полученное семейство ВАХ представлено на рис. 2.

На рисунке 3 изображен результат аппроксимации выборки локальных ВАХ полиномом пятой степени.

Для данной выборки степень аппроксимирующего полинома, равная пяти, достаточна для использования в практических расчетах, поскольку оцененная максимальная погрешность аппроксимации экспериментальных данных не превышала 3%.

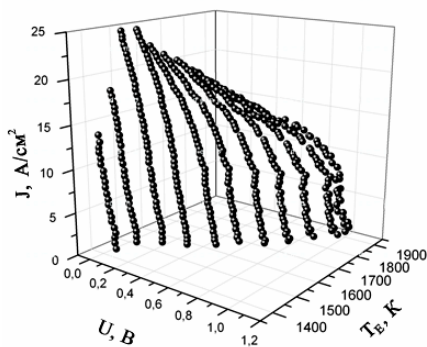


Рис. 2. Семейство экспериментальных ВАХ ТЭП, используемых в расчете выходных характеристик ЭГК

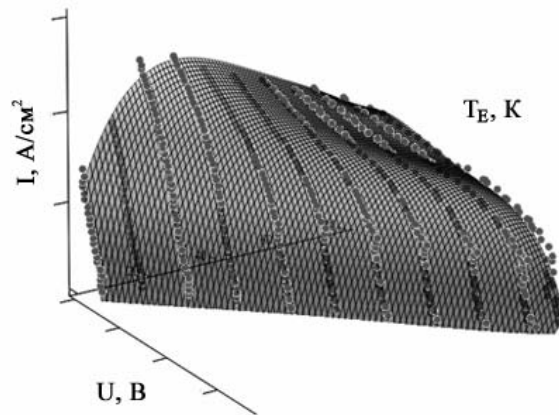


Рис. 3. Аппроксимация экспериментальных ВАХ ТЭП

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЭГЭ

Приведем дифференциальные уравнения (1)–(5) с соответствующими граничными условиями (6)–(9) к конечно-разностной форме. Для этого на оси  $z$  введем равномерную сетку узлов от 0 до  $n$  так, что узлы 0 и  $n$  совпадают с границами эмиттера, шаг сетки полагается равным  $h = L/n$ , где  $L$  – длина ЭГЭ (рис. 4). В работе количество узлов сетки  $n$  принято равным 100.

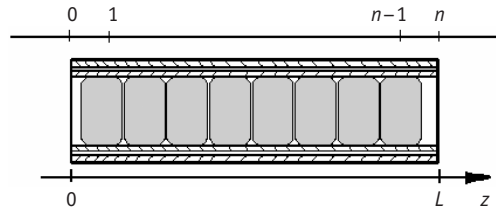


Рис. 4. Схема сетки расчетных узлов ЭГЭ

Вторая производная в уравнениях заменяется дифференциально-разностным отношением вида

$$\frac{d^2T}{dz^2} = \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{h^2}, \quad (12)$$

где  $i$  – номер узла сетки,  $T_i$  – значение функции  $T(z)$  в узле с номером  $i$ . Первая производная граничных условий заменяется дифференциально-разностным отношением

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_1 - T_0}{h} \quad (\text{левый торец ЭГЭ}), \quad (13)$$

где  $T_1$  и  $T_0$  – значения функции  $T(z)$  в узлах с номерами 1 и 0 соответственно, и по формуле

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_n - T_{n-1}}{h} \quad (\text{правый торец ЭГЭ}), \quad (14)$$

где  $T_{n-1}$  и  $T_n$  – значения функции  $T(z)$  в узле с номерами  $n-1$  и  $n$ . Таким образом, для каждого внутреннего узла сетки будут получены уравнения, соответствующие дифференциальным уравнениям (1)–(5) и граничным условиям (6)–(9). Необходимо было свести полученную нелинейную задачу к линейной, для чего был применен метод квазилинеаризации (метод Ньютона) [10].

## МЕТОД КВАЗИЛИНЕАРИЗАЦИИ

Краевая задача для нелинейного дифференциального уравнения второго порядка с граничными условиями третьего рода

$$\frac{d^2T}{dz^2} = f(T), \quad (15)$$

$$\alpha_0 \frac{dT(0)}{dz} + \alpha_1 T(0) = A, \quad (16)$$

$$\beta_0 \frac{dT(L)}{dz} + \beta_1 T(L) = B, \quad (17)$$

где числа  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  считаются известными и  $\alpha_0^2 + \alpha_1^2 \neq 0$ ,  $\beta_0^2 + \beta_1^2 \neq 0$ , была представлена в виде системы, записанной в конечно-разностной форме,

$$\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{h^2} = f(T_i), \quad (18)$$

$$\alpha_0 \frac{T_1 - T_0}{h} + \alpha_1 T_0 = A, \quad (19)$$

$$\beta_0 \frac{T_n - T_{n-1}}{h} + \beta_1 T_n = B, \quad (20)$$

где  $i = 0, 1, \dots, n$ ,  $h = L/n$ .

Для решения данной системы уравнений задается некоторое начальное приближение к искомой функции  $T_i^0 = \theta(z_n)$  и строится итерационный процесс с использованием линейного приближения функции правой части

$$f(T_i^{k+1}) \approx f(T_i^k) + \frac{df(T_i^k)}{dT} (T_i^{k+1} - T_i^k), \quad (21)$$

$$\frac{T_{i-1}^{k+1} - 2T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1}}{h^2} = f(T_i^k) + \frac{df(T_i^k)}{dT} (T_i^{k+1} - T_i^k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (22)$$

где  $k$  является итерационным индексом, а начальное приближение  $T_i^0 = \theta(z_n)$  удовлетворяет граничным условиям (16), (17).

На первой итерации, т.е. при  $k = 0$ , получаем первое приближение к искомому решению, решая методом прогонки разностное уравнение [11]

$$\frac{T_{i-1}^1 - 2T_i^1 + T_{i+1}^1}{h^2} = f(T_i^0) + \frac{df(T_i^0)}{dT} (T_i^1 - T_i^0), \quad T_i^0 = \theta_i. \quad (23)$$

Полученное первое приближение вновь подставляем в линеаризованную разностную задачу и методом прогонки получаем второе приближение. Аналогично поступаем и далее, до достижения заданной точности в соответствии с условием

$$|T^{k+1} - T^k| \leq \varepsilon. \quad (24)$$

Представленная методика решения одного нелинейного дифференциального уравнения второго порядка была реализована для системы нелинейных дифференциальных уравнений (1)–(5) с граничными условиями (6)–(9) путем последовательного задания начальных приближений для функции разности потенциалов  $u$  и температуры эмиттера  $T_E$ .

Начальные приближения задавались в виде линейных функций  $u_i^0 = 0.5 \text{ В}$ ,  $T_{Ei}^0 = 1500 \text{ К}$ . Далее производилось поочередное решение уравнений для  $u$  и  $T_E$ , следуя методике (12)–(23), пока не было достигнуто условие (24).

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭГК

Обычно тепловой и электрический расчеты ЭГК проводятся с целью получения таких его основных характеристик, как изомощностная ВАХ ЭГК, т.е. зависимость электрического тока ЭГК от его напряжения при заданных тепловой мощности и давлении паров цезия и зависимости его электрической мощности и к.п.д. от тока или напряжения. Часто эти характеристики называют выходными энергетическими характеристиками ЭГК. В качестве примера на рис. 5–6 приводятся расчетные выходные энергетические характеристики 9-элементного унифицированного ЭГК реактора-преобразователя, полученные с помощью разработанного программного комплекса.

Одновременно в ходе теплового и электрического расчетов ЭГК можно получить температуры электродов (в первую очередь, эмиттеров), а также значения плотности тока и межэлектродного напряжения в каждом ЭГЭ для заданных значений тепловой мощности и электрического тока ЭГК.



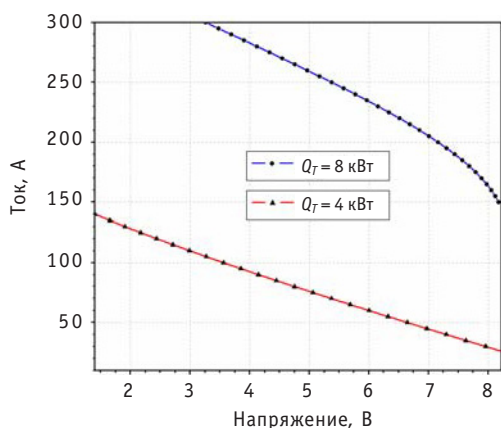


Рис. 5. Зависимость электрического тока ЭГК от напряжения при различных значениях тепловой мощности и сопротивлении коммутационных перемычек 0,0005 Ом

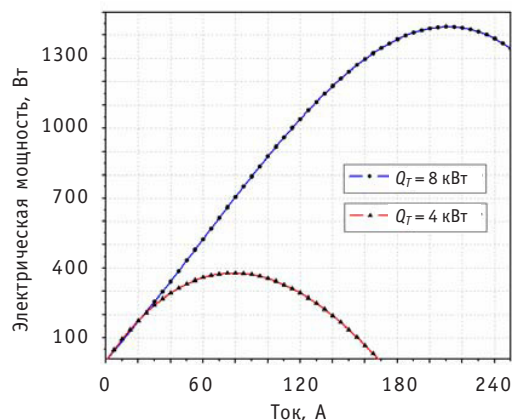


Рис. 6. Зависимость генерируемой ЭГК электрической мощности от электрического тока, протекающего в ЭГК при различных значениях тепловой мощности

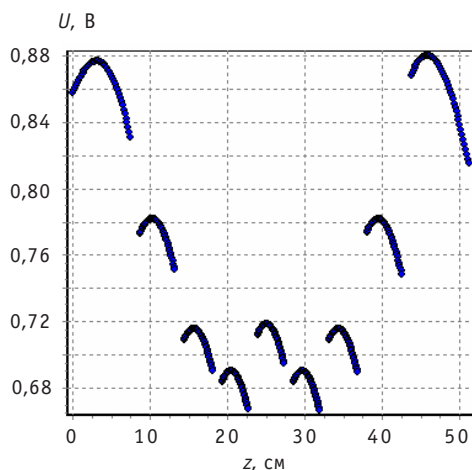


Рис. 7. Распределение вдоль ЭГК разности потенциалов между электродами при тепловой мощности 8 кВт и токе 280 А

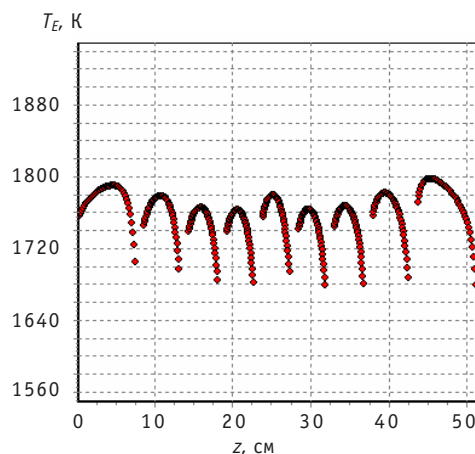


Рис. 8. Распределение вдоль ЭГК температуры эмиттеров при тепловой мощности 8 кВт и токе 280 А

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модификация алгоритма численного расчета выходных характеристик ЭГК, который был реализован в виде программы на языке *Delphi* для персонального компьютера. Программа представлена в форме двух автономных программных блоков. Первый блок отвечает за полиномиальную аппроксимацию экспериментальных ВАХ на основе зависимости  $j = j(u, T_E)$ , второй — численный расчет электротеплофизических характеристик ЭГК, итерационный процесс которого имеет сходимость для широкого диапазона токов от 10 до 1000 А и тепловой мощности ЭГК до 15 кВт. Реализация алгоритма расчета многоэлементного ЭГК в одномерной геометрии показала, что данный алгоритм может быть развит для случая ЭГК в трехмерной геометрии. Данная программа будет использоваться для проведения проектных расчетов, а также для анализа результатов длительных реакторных испытаний унифицированного ЭГК. Ввиду простоты, удобного программного интерфейса и минимальных затрат машинного времени на расчеты разработанная программа эффективна для использования в разного рода оптимизационных расчетах ЭГК и реактора в целом.



Автор выражает благодарность научному руководителю В.И. Ярыгину за постановку задачи и обсуждение полученных результатов, Е.Г. Виноградову за консультации при подготовке настоящей работы и заместителю заведующего кафедрой «Перспективные методы получения и преобразования энергии» ИАТЭ В.Л. Шаблову за полезные дискуссии и советы.

### **Литература**

1. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «Топаз-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка / Природа. – 1991. – Вып. 10. – С. 29-36.
2. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / Под ред. И.П. Стаханова. – М.: Атомиздат, 1973.
3. Ярыгин В.И. Термоэлектричество и термоэмиссия в космических ядерных энергетических установках прямого преобразования. Современное состояние и перспективы / Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе – 2005» (Москва-Подольск, 2005): Сб. докл. – Т. 1.
4. Лазаренко Д.Г. Теплоэлектрофизические характеристики термоэмиссионных электрогенерирующих систем для ядерных энергетических установок нового поколения / Автореферат диссертации. – Обнинск: ИАТЭ, 2009.
5. Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И. Методика расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионного электрогенерирующего канала: Учебное пособие по курсу «Перспективные методы получения и преобразования энергии». – Обнинск: ИАТЭ, 2008.
6. Линник В.А. Расчетно-теоретические методы исследования выходных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих элементов, электрогенерирующих сборок (каналов) и реакторов-преобразователей космических ЯЭУ / Препринт ФЭИ-3058. – Обнинск, 2005.
7. Ружников В.А. Методы расчета тепловых и электрических характеристик систем прямого преобразования энергии. Ч. 1. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал ЭГК. – Обнинск: ФЭИ, 2001.
8. Синяевский В.В. Методы определения характеристик термоэмиссионных твэлов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И. Демонстрационная база экспериментальных данных (БД ВАХ ТЭП) лабораторного термоэмиссионного преобразователя (учебный ТЭП), ГНЦ РФ-ФЭИ, ИАТЭ (кафедра ПМПЭ): Материалы кафедры. – Обнинск, 2007.
10. Петров И.Б., Лобанов А.И. Лекции по вычислительной математике: Учебное пособие. – М.: Интернет-Университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 260 с.
11. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1989.

Поступила в редакцию 20.01.2010

There are represented the results of calculation and experimental research of hydrodynamics in a contour of repeated compulsory circulation RBMK and behaviour of impurity during a stop of the block (decrease in power). Recommendations for an effective using of the given processes to decrease a concentration of impurity in volume of contour of repeated compulsory circulation, to lower a dose of radiation during repair work is developed.

#### **УДК 621.039.534**

*Control of Flow Rate in Fuel Channel RBMK-type Reactor from Information about Coolant Activity* \ A.M. Zagrebayev, S.V. Kostanbayev, N.V. Ovsyannikova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

The paper presents the computational and measuring system for control of coolant flow rate in technological channels of RBMK-type reactors from experimental data about intensity of gamma-radiation emitted by  $^{16}\text{N}$  isotope in light-water coolant. Also, the paper presents the following aspects of computational and measuring system: mathematical model of coolant activation process, numerical algorithm for determination of coolant flow rate in technological channels, structure and operation of the computational and measuring system, the results obtained in trial operation of the computational and measuring system at Kursk NPP Unit 1, applicability area and typical errors in determination of coolant flow rate.

#### **УДК 621.039.548**

*Measurement of Thermal Properties of the Fuel Rods Power Nuclear Reactors by Method of Pulse Heating* \ V.B. Kruglov, A.B. Kruglov, I.G. Pozdeeva, V.S. Kharitonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 illustrations. – References, 8 titles.

In the work the method of definition of thermophysical properties of the fuel elements of power nuclear reactors such as heat conductivity, a thermal capacity of fuel and heat transfer factor between fuel and rod cover is offered. Results of check of a method of definition of a thermophysical capacity of the fuel rod elements reactor VVER are shown.

#### **УДК 621.039.52:615.849.1**

*The MARS and TAPIRO Small Capacity Reactors for BNCT Applications* \ Yu.A. Kurachenko, D.N. Moiseenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 25 titles.

The advantages and disadvantages of two small capacity reactors: TAPIRO (Italy, existing now) and MARS (Russia, projectible) are analyzed for boron neutron capture therapy (BNCT) applications. Comparison of the installations is done for a set of characteristics, namely, core composition, maximal & average flux in a core, leakage spectrum etc. Special attention is focused on a comparison of the installations with respect to radiation and nuclear safety. The advantages of the MARS reactor are apparent here. The next batch of comparing characteristics was the beam quality rating relative to BNCT (accordingly to «in air» and «in phantom» criteria). Besides, patient protection at therapy session was analyzed by computation. A conclusion is drawn that relative to radiation & nuclear safety, overall dimensions & total mass and manufacturability as well, the projectible MARS reactor exceeds the existing TAPIRO one. As for BNCT applications, the MARS reactor is highly competitive with the TAPIRO. The sole (but indisputable) advantage of the TAPIRO facility is its real existence.

#### **УДК 621.039.51**

*Updating of Procedure of Calculation of the Reactor-Converter Multicell Thermionic Fuel Element output Characteristics* \ M.A. Polous; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 11 titles.

A modification of an algorithm of numerical computation of the electrothermophysical characteristics of the thermionic reactors-converters fuel elements has been made. The program block for approximation of experimental voltage-current characteristics has been developed. The numerical method of the solution of equations of heat conduction for the emitter and of potential distribution between electrodes has been perfected.

#### УДК 621.039.54

*Burnup Features with SCALE 5 Code Package* \S.N. Filimonov, V.V. Artisyuk, A.Yu. Stankovskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 17 titles.

This paper deals with validation/verification of SCALE 5 code package coupled with ENDF/B-V cross-section data in order to reveal the domain of its application in simulating burnup dependent dynamics of important nuclides in reactor fuel. Two benchmarks were calculated (UOX & MOX) followed by in-pellet burnup analysis.

## НАШИ АВТОРЫ

**Антонова А.М.** – к.т.н., доцент кафедры атомных и тепловых электрических станций Томского политехнического университета. E-mail: anton@tpu.ru.

**Балыбердин А.С.** – магистрант первого года обучения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). E-mail: ats@nntu.sci-nnov.ru.

**Бородин С.С.** – аспирант кафедры «Атомные, тепловые станции и медицинская инженерия» НГТУ. E-mail: ats@nntu.sci-nnov.ru.

**Веселова И.Н.** – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетические технологии и оборудование» Волгодонского института (филиала) ЮРГТУ (НПИ). E-mail: anri@vdonk.ru.

**Гримов А.А.** – студент Курского государственного технического университета. E-mail: Grimmer2007@yandex.ru;

**Дмитриев С.М.** – д.т.н., профессор, проректор НГТУ, директор Института ядерной энергетики и технической физики, заведующий кафедрой «Атомные, тепловые станции и медицинская инженерия».

**Дрейзин В.Э.** – д.т.н., профессор, зав. кафедрой конструирования и технологии электронных средств Курского государственного технического университета. E-mail: drejzin\_ve@mail.ru.

**Загребаев А.М.** – д.ф.-м.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), кафедра «Математическое обеспечение систем». E-mail: zagrk533@yandex.ru.

**Катереев Р.О.** – студент пятого курса Московского энергетического института (технического университета). Email: futnaf@yandex.ru.

**Комолов И.А.** – студент кафедры «Атомные и тепловые энергетические установки» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. E-mail: kia081@rambler.ru.

**Костанбаев С.В.** – аспирант кафедры «Математическое обеспечение систем» НИЯУ МИФИ. E-mail: Sergey.kostanbaev@gmail.com.

**Круглов А.Б.** – к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры теплофизики НИЯУ МИФИ

**Круглов В.Б.** – старший преподаватель кафедры теплофизики НИЯУ МИФИ. E-mail: viktorzir@mail.ru.

**Кряжев А.В.** – студент шестого курса кафедры атомных и тепловых станций Томского политехнического университета. E-mail: KryazhevAV@mail.ru.

**Легчанов М.А.** – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Атомные, тепловые станции и медицинская инженерия» НГТУ. E-mail: ats@nntu.sci-nnov.ru.

**Логвинов Д.И.** – студент Курского государственного технического университета.

**Лощаков И.И.** – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой «Атомные и тепловые энергетические установки» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. E-mail: Tim41@list.ru.

**Львов А.В.** – магистрант первого года обучения НГТУ.

**Мазепа И.Н.** – студент Курского государственного технического университета.

**Наумов А.А.** – студент Уральского государственного технического университета – УПИ (Екатеринбург).

**Новикова О.Ю.** – главный специалист департамента эксплуатации АЭС с ВВЭР концерна «Росэнергоатом»

**Овсянникова Н.В.** – к.ф.-м.н., доцент НИЯУ МИФИ, кафедра «Математическое обеспечение систем». E-mail: ovs33@yandex.ru.