

УДК 621.362

Математическая модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных электрорадиоэлементов

Д-р техн. наук **О. В. ЕВДУЛОВ¹, А. М. ИБРАГИМОВА**
Дагестанский государственный технический университет
¹E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

Проведено математическое моделирование и исследование термоэлектрической системы (ТЭС) для охлаждения дискретных электрорадиоэлементов (ЭРЭ). Рассмотрено устройство, в состав которого входят основная и дополнительные секции однотипных термоэлектрических модулей (ТЭМ), а также основная и дополнительная теплообменные системы. Особенностью прибора является возможность обеспечения отвода теплоты от ЭРЭ одновременно с его верхней и нижней поверхности.

Математическая модель ТЭС состоит в решении системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс нестационарной теплопередачи в каждом из элементов конструкции ТЭС и ЭРЭ, методом конечных элементов, а также расчете ТЭМ в программно-вычислительном комплексе Thermoelectric system calculation (изготовитель ООО «Криотерм», Санкт-Петербург). Результаты численного эксперимента представлены в виде трехмерного и одномерных температурных полей структуры ТЭС-ЭРЭ при ее выходе на стационарный режим работы и графиков изменения температуры во времени в контрольных точках в зависимости от тепловыделений ЭРЭ, мощности ТЭМ, коэффициентов теплообмена с окружающей средой теплообменных систем, а также различных материалов, из которых последние предположительно будут изготовлены. В результате моделирования установлено, что качестве источника холода в ТЭС целесообразным является применение трех стандартных ТЭМ DRIFT-1,5 (ООО «Криотерм»), обеспечивающих диапазон мощностей 17–40 Вт при силе тока питания 2–6 А и потребляемой электроэнергии в единицу времени 40–130 Вт, имеющих холодильный коэффициент 0,17–1,3.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, электрорадиоэлемент, охлаждение, термоэлектрическая система, термоэлектрический модуль, моделирование, численный эксперимент, температура.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 22.03.2023, одобрена после рецензирования 17.05.2023, принята к печати 25.05.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-53-60

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Евдулов О. В., Ибрагимова А. М. Математическая модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных электрорадиоэлементов // Вестник Международной академии холода. 2023. № 3. С. 53-60. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-53-60

Mathematical model of a thermoelectric system for cooling discrete electric radio elements

D. Sc. **O. V. YEVDULOV¹, A. M. IBRAGIMOVA**
Dagestan State Technical University
¹E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

The article is devoted to mathematical modeling and research of a thermoelectric system (TES) for cooling discrete electric radio elements (ERE). The device is investigated, which includes the main and additional sections of the same type of thermoelectric modules (TEM), as well as the main and additional heat exchange systems. A feature of the device is the ability to provide heat removal from the ERE simultaneously from its upper and lower surfaces.

The mathematical model of the thermal power plant consists in solving a system of differential equations describing the process of non-stationary heat transfer in each of the elements of the thermal power plant and ERE design by the finite element method, as well as calculating the TEM in the Thermoelectric System Calculation software and computer complex (manufactured by Cryotherm Company, St. Petersburg).

The results of the numerical experiment are presented in the form of three-dimensional and one-dimensional temperature fields of the TES-ERE structure when it enters stationary operation and graphs of temperature changes over time at control points depending on the heat release of the ERE, the power of the TEM, the coefficients of heat exchange with the environment of heat exchange systems, as well as various materials from which the latter are expected to be made. As a result of modeling, it was found that it is advisable to use three standard TEMs by Cryotherm DRIFT-1.5 Company as a source of cold in thermal power plants. The TEMs provide a power range of 17–40 W with a power supply current of 2–6 A and electricity consumed per unit of time of 40–130 W and have a cooling coefficient of 0.17–1.3.

Keywords: electronic equipment, electric radio element, cooling, thermoelectric system, thermoelectric module, modeling, numerical experiment, temperature.

Article info:

Received 22/03/2023, approved after reviewing 17/05/2023, accepted 25/05/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-53-60

Article in Russian

For citation:

Yevdulov O. V., Ibragimova A. M. Mathematical model of a thermoelectric system for cooling discrete electric radio elements. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 3. p. 53-60. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-53-60

Введение

При функционировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), значительная доля питающей ее энергии превращается в теплоту с соответствующим перегревом электрорадиоэлементов (ЭРЭ), что негативно сказывается на параметрах радиоэлектронных систем [1, 2]. В случае выхода температурного режима элементов РЭА за требуемый диапазон последние не в состоянии реализовать на практике все свои функциональные возможности, также велика вероятность выхода прибора из строя за счет перегрева составляющих его компонентов. Одновременно в процессе эксплуатации радиоэлектронных средств достаточно часто вероятно существенное варьирование внешних температурных условий эксплуатации составляющих их элементов, что также существенно влияет на надежность всей системы. По совокупности наличия внутренних и внешних перегревов существенно ухудшает характеристики РЭА, ведет к деградации ее параметров, а зачастую является причиной выхода аппаратуры из строя. Поэтому задача обеспечения необходимых температурных режимов работы радиоэлектронных систем является одной из основных при их проектировании.

В настоящее время она решается путем использования, совместно с РЭА, специальных охлаждающих систем, при разработке которых важным является обеспечение их соответствия с ЭРЭ по массогабаритным и энергетическим характеристикам [3, 4]. Работа такой охлаждающей аппаратуры основывается на отводе теплоты, выделяемой ЭРЭ, в окружающую среду за счет кондуктивного и конвективного механизмов. Для охлаждения РЭА и входящих в ее состав отдельных ЭРЭ в настоящее время применяются системы, основанные на воздушном, жидкостном, испарительном, кондуктивном теплоотводе, реализованные на основе применения различного рода тепловых аккумуляторов, а также некоторые специальные [5]–[8].

Все из перечисленных систем теплоотвода РЭА имеют определенные недостатки. Так, воздушное охлаждение, несмотря на свою простоту, позволяет обеспечить снижение температуры ЭРЭ только до температуры окружающей среды, жидкостные и испарительные системы громоздки и зависят от действия гравитационных сил, кондуктивные технические средства теплоотвода характеризуются низкой интенсивностью передачи теплоты от объектов воздействия к системе теплосброса. В этих условия для эффективного охлаждения отдельных ЭРЭ, входящих в состав РЭА, перспективным является применение охлаждающих ТЭС [9]–[14], отличающихся высоким ресурсом работы, бесшумностью, экологично-

стью, незначительными габаритными размерами, универсальностью, независимостью от действия гравитационных сил.

Целью работы является разработка математической модели ТЭС для охлаждения дискретных ЭРЭ, исследование на ее основе происходящих в последних теплофизических процессов.

Математическая постановка задачи исследования

Исследуемая ТЭС и принцип ее работы описан в [15]. В состав прибора входят основная и дополнительные секции однотипных ТЭМ, а также основная и дополнительная теплообменные системы. Особенностью прибора является возможность обеспечения отвода теплоты от ЭРЭ одновременно с его верхней и нижней поверхности. Данное обстоятельство позволяет повысить количество теплоты, отводимой в единицу времени от ЭРЭ за счет увеличения площади соприкосновения последнего и теплоотводящей структуры. Также в данном варианте охлаждающей ТЭС за счет применения одинаковых по своим свойствам ТЭМ обеспечивается возможность использования оптимального токового режима питания прибора.

Тепловая модель ТЭС совместно с ЭРЭ изображена на рис. 1, где выделены следующие области: 1 — ЭРЭ; 2 — ТЭМ; 3 — тепло- и электроизоляция; 4 — основная теплообменная система; 5 — дополнительная теплообменная система.

В модели каждая структурная составляющая, включая ТЭМ и ЭРЭ, представлена в виде целостной конструк-

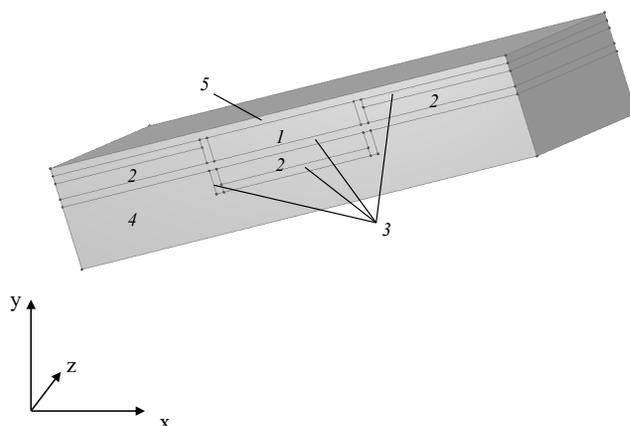


Рис. 1. Тепловая модель ТЭС для охлаждения ЭРЭ
Fig. 1. Thermal model of a thermoelectric system (TES) for cooling electric radio elements (ERE)

ции, имеющей свои эффективные теплофизические и электрические параметры (теплоемкость, теплопроводность, удельное электрическое сопротивление, плотность). При этом в объеме ТЭМ учтено наличие выделения теплоты Джоуля, а в ЭРЭ — его теплоты рассеяния. Поглощение и выделение теплоты Пельтье учитывается в условиях сопряжения ТЭМ с ЭРЭ, основной и дополнительной теплообменной системой. Данное допущение упрощает математическую модель, незначительно сказываясь на ее точности [16].

С учетом принятых допущений математическая постановка задачи расчета температурного поля структуры ТЭС-ЭРЭ имеет следующий вид [17]:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ТЭМ}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{ТЭМ}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{ТЭМ}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{ТЭМ}}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.ТЭМ}} &= \rho_{\text{ТЭМ}} C_{\text{ТЭМ}} \frac{\partial T_{\text{ТЭМ}}}{\partial \tau}; \\ \lambda_{\text{ЭРЭ}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{ЭРЭ}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{ЭРЭ}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{ЭРЭ}}}{\partial z^2} \right) + P_{\text{ЭРЭ}} &= \rho_{\text{ЭРЭ}} C_{\text{ЭРЭ}} \frac{\partial T_{\text{ЭРЭ}}}{\partial \tau}; \\ \lambda_{\text{отс}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{отс}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{отс}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{отс}}}{\partial z^2} \right) &= \rho_{\text{отс}} C_{\text{отс}} \frac{\partial T_{\text{отс}}}{\partial \tau}; \\ \lambda_{\text{дтс}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{дтс}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{дтс}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{дтс}}}{\partial z^2} \right) &= \rho_{\text{дтс}} C_{\text{дтс}} \frac{\partial T_{\text{дтс}}}{\partial \tau}; \\ \lambda_{\text{т}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{т}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{т}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{т}}}{\partial z^2} \right) &= \rho_{\text{т}} C_{\text{т}} \frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные условия:

$$T_{\text{ТЭМ}} = T_{\text{ЭРЭ}} = T_{\text{отс}} = T_{\text{дтс}} = T_{\text{т}} = T_{\text{ср}}, \text{ при } \tau = 0$$

Граничные условия определяют собой соотношения, определяющие равенство тепловых потоков на контактах всех областей в тепловой модели, а также наличие конвективного теплообмена поверхностей объектов с окружающей средой.

В системе уравнений приняты следующие обозначения переменных: T — температура; λ — коэффициент теплопроводности; C — теплоемкость; ρ — плотность; x, y, z — координаты; $Q_{\text{Дж.ТЭМ}}$ — количество теплоты Джоуля, выделяемое в единицу времени в единице объема ТЭМ; $P_{\text{ЭРЭ}}$ — мощность тепловыделений ЭРЭ в единице объема; индексы при переменных: ТЭМ — термомодуль; ЭРЭ — электрорадиоэлемент, т — теплоизоляция, отс — основная теплообменная система, дтс — дополнительная теплообменная система, ср — окружающая среда.

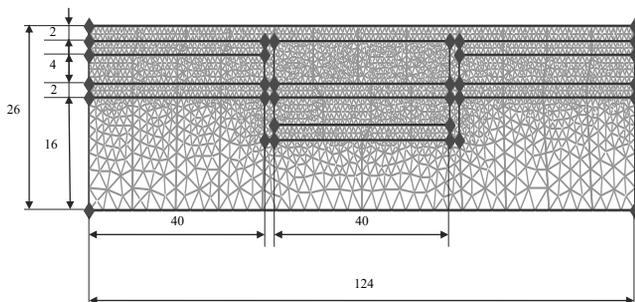


Рис. 2. Сечение системы ТЭС — ЭРЭ по вертикали в поперечном направлении

Fig. 2. Vertical cross-section of the TES-ERE system

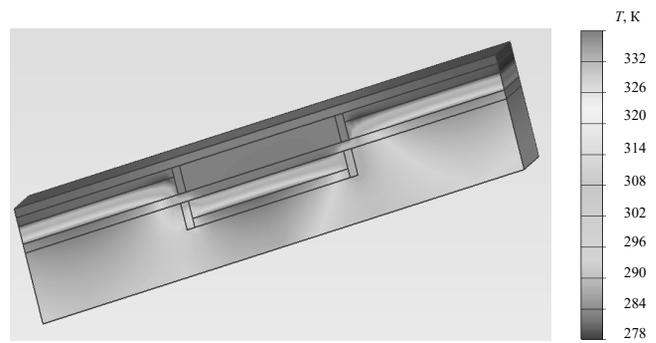


Рис. 3. Трехмерное температурное поле структуры ТЭС — ЭРЭ

Fig. 3. Vertical cross-section of the TES — ERE system

Решение системы дифференциальных уравнений (1) численным методом конечных элементов произведено в пакете прикладных программ Elcut (производитель ООО «Тор», Санкт-Петербург). Применение данной программы дает возможность определить температурное поле структуры ТЭС-ЭРЭ в трех-, двух- и одномерном виде в стационарном режиме, а также изменение температуры в ее контрольных точках во времени для различных характеристик ТЭМ, теплообменных систем, условий теплообмена с окружающей средой.

На основе анализа значений мощности ТЭМ, определяющих температурный режим ЭРЭ, осуществлен расчет характеристик последних. Искомыми величинами являлись тип стандартного ТЭМ, в данном случае производства ООО «Криотерм», его геометрические, энергетические и электрические параметры. Их расчет, на основе известных методик [18], произведен в программно-вычислительном комплексе Thermoelectric system calculation [19].

Результаты исследования

На основе тепловой модели, математической постановки задачи определения температурного поля структуры ТЭС-ЭРЭ, проведен численный эксперимент.

Расчет осуществлен при следующих исходных данных:

- $\lambda_{\text{ТЭМ}} = 1,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda_{\text{т}} = 0,03 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda_{\text{ДЭРЭ}} = 149 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$,
- $\lambda_{\text{отс}} = 395 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (медь), $\lambda_{\text{дтс}} = 395 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (медь), $\lambda_{\text{отс}} = 210 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (алюминий), $\lambda_{\text{дтс}} = 210 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (алюминий), $\lambda_{\text{отс}} = 121 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (латунь), $\lambda_{\text{дтс}} = 121 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (латунь);
- $\rho_{\text{ТЭМ}} = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\rho_{\text{т}} = 1100 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\rho_{\text{ДЭРЭ}} = 2330 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\rho_{\text{отс}} = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (медь), $\rho_{\text{дтс}} = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (медь), $\rho_{\text{отс}} = 2700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (алюминий), $\rho_{\text{дтс}} = 2700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (алюминий), $\rho_{\text{отс}} = 8560 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (латунь), $\rho_{\text{дтс}} = 8560 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (латунь);
- $C_{\text{ТЭМ}} = 123 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $C_{\text{т}} = 1100 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $C_{\text{ДЭРЭ}} = 712 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $C_{\text{отс}} = 383 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (медь), $C_{\text{дтс}} = 383 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (медь), $C_{\text{отс}} = 236 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (алюминий), $C_{\text{дтс}} = 236 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (алюминий), $C_{\text{отс}} = 380 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (латунь), $C_{\text{дтс}} = 380 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (латунь);
- коэффициент термо-ЭДС ТЭМ $\alpha = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$;
- $T_{\text{ср}} = 295 \text{ К}$;
- удельное электрическое сопротивление ТЭМ $\gamma_{\text{ТЭМ}} = 10,65 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

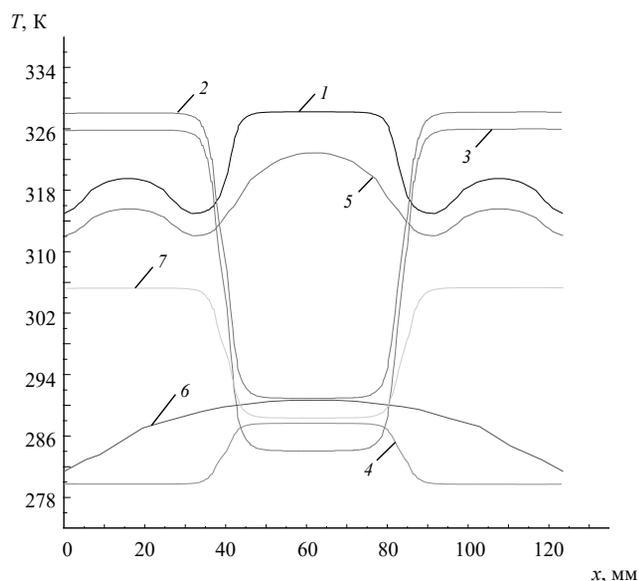


Рис. 4. Изменение температуры в структуре ТЭС — ЭРЭ в поперечном направлении: 1 — на уровне горячих спаев основной секции ТЭМ; 2 — на уровне горячих спаев дополнительных секций ТЭМ; 3 — на уровне холодных спаев основной секции ТЭМ; 4 — на уровне холодных спаев дополнительных секций ТЭМ; 5 — через центр основной теплообменной системы; 6 — через центр дополнительной теплообменной системы; 7 — через центр ЭРЭ

Fig. 4. Temperature changes of the TES-ERE transversely: 1 — at the level of hot junctions in the main section of TEM; 2 — at the level of hot junctions in the additional section of TEM; 3 — at the level of cold junctions in the main section of TEM; 4 — at the level of cold junctions in the additional section of TEM; 5 — via the center of the main heat exchange system; 6 — via the center of the additional heat exchange system; 7 — via the center of ERE

- коэффициент теплообмена между основной теплообменной системой и окружающей средой $\beta_{отс} = 10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$,
- коэффициент теплообмена между дополнительной теплообменной системой и окружающей средой $\beta_{дтс} = 10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$.

Размеры объектов (мм), принятые для расчетов, показаны на рис. 2, где изображено сечение системы ТЭС-ЭРЭ по вертикали в поперечном направлении с конечно-элементной сеткой. Ширина всех элементов составляет 40 мм.

На рис. 3–8 представлены результаты вычислений. На рис. 3 изображено трехмерное температурное поле структуры ТЭС-ЭРЭ при мощности тепловыделений последнего 32 Вт и мощности ТЭМ $P_{ТЭМ} = 18 \text{ Вт}$ для основной и дополнительной теплообменной системы, изготовленной из меди. На его основе можно осуществить качественный анализ картины температурного поля системы.

Согласно результатам расчетов следует, что температурное поле структуры ТЭС-ЭРЭ неоднородно. Минимальная температура структуры приходится на холодные спаи основной и дополнительных секций ТЭМ. Максимальная — на область горячих спаев этих же элементов. Распределение температуры по объему основной теплообменной системы более однородно, что связано с ее относительно большими размерами и теплоемкостью.

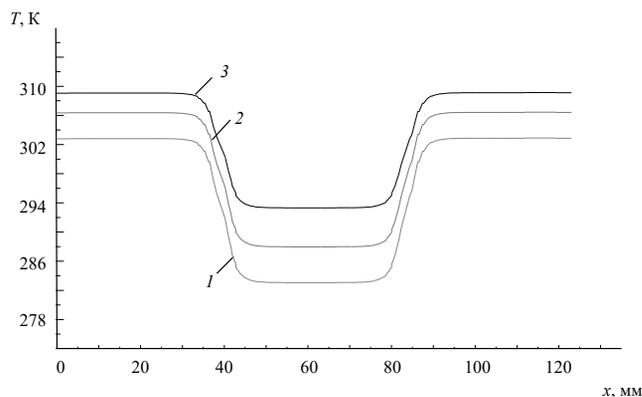


Рис. 5. Изменение температуры в структуре ТЭС — ЭРЭ через центр ЭРЭ для различных величин $P_{ЭРЭ}$: 1 — $P_{ЭРЭ} = 24 \text{ Вт}$; 2 — $P_{ЭРЭ} = 32 \text{ Вт}$; 3 — $P_{ЭРЭ} = 40 \text{ Вт}$

Fig. 5. Temperature changes of the TES-ERE structure via the ERE center for different values of $P_{ЭРЭ}$: 1 — $P_{ЭРЭ} = 24 \text{ W}$; 2 — $P_{ЭРЭ} = 32 \text{ W}$; 3 — $P_{ЭРЭ} = 40 \text{ W}$

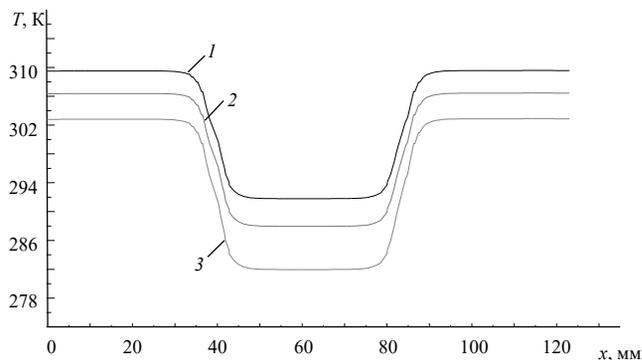


Рис. 6. Изменение температуры в структуре ТЭС — ЭРЭ через центр ЭРЭ для различных коэффициентов теплообмена с окружающей средой основной и дополнительной теплообменной системы: 1 — $\beta_{омс} = 5 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$, $\beta_{дмс} = 5 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$; 2 — $\beta_{омс} = 10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$, $\beta_{дмс} = 10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$; 3 — $\beta_{омс} = 15 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$, $\beta_{дмс} = 5 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$

Fig. 6. Temperature changes of the TES-ERE structure via the ERE center for different coefficients of heat-exchange with the environment for main and additional heat exchange systems:

- 1 — $\beta_{омс} = 5 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$, $\beta_{дмс} = 5 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$;
- 2 — $\beta_{омс} = 10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$, $\beta_{дмс} = 10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$;
- 3 — $\beta_{омс} = 15 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$, $\beta_{дмс} = 5 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$

Температура в ЭРЭ имеет практически равномерное распределение, что связано с наличием интенсивного отвода теплоты с его нижней и верхней поверхности. Температура холодных спаев дополнительных секций ТЭМ уменьшается в направлении от ЭРЭ, что связано с наличием в нем тепловыделений.

Для анализа количественных характеристик температурного поля системы более информативны одномерные графики изменения температуры как в пространственных, так и временных координатах.

На рис. 4 изображены одномерные графики распределения температуры в отдельных зонах структуры ТЭС-ЭРЭ в поперечном направлении при мощности рассеяния элемента ЭРЭ и холодопроизводительности ТЭМ, соответствующих рис. 3. В соответствие с расчетными

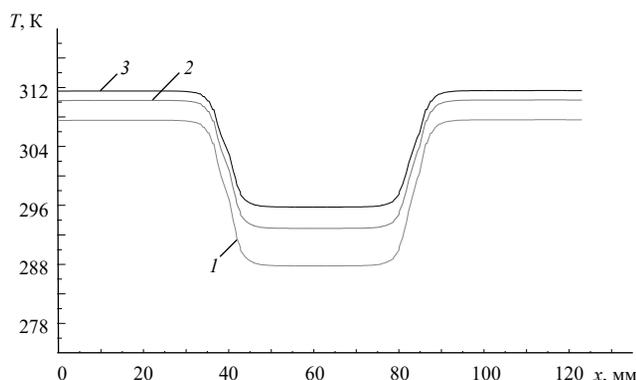


Рис. 7. Изменение температуры в структуре ТЭС — ЭРЭ через центр ЭРЭ для различных материалов, из которых изготовлены основная и дополнительная теплообменная система: 1 — медь; 2 — алюминий; 3 — латунь

Fig. 7. Temperature changes of the TES-ERE structure via the ERE center for different materials used for main and additional heat exchange systems: 1 — copper; 2 — aluminum; 3 — brass

кривыми максимально низкая температура наблюдается на уровне холодных спаев дополнительных секций ТЭМ и составляет 280 К, на холодных спаев основной секции ТЭМ значение температуры 284 К. Различие в данных величинах связано с теплопритоком на холодные спаи основной секции ТЭМ от горячих спаев дополнительных секций термомодулей. Значение температуры ЭРЭ составляет 288 К. Максимальная величина температуры в системе составляет 328 К и приходится на температуру горячих спаев основной и дополнительных секций ТЭМ. Изменение температуры в основной и дополнительной теплообменной системе в поперечном сечении практически одинаково, ее градиент составляет 0,08 К/м, что объясняется одинаковым материалом, из которого они изготовлены, и, соответственно равными теплофизическими характеристиками обеих систем.

На рис. 5, 6 представлено изменение температуры в поперечном сечении структуры ТЭС-ЭРЭ через центр ЭРЭ для различных величин $P_{ЭРЭ}$ при фиксированных значениях холодопроизводительности ТЭМ, соответствующих рис. 4, а также коэффициентах теплообмена с окружающей средой основной и дополнительной теплообменной системы.

Согласно расчетным графикам при увеличении мощности ЭРЭ увеличивается его температура при неизменных величинах холодопроизводительности ТЭМ, приходящихся на единицу площади. Рост температуры ЭРЭ равномерен и его скорость для рассмотренных условий составляет 0,625 К/Вт. Это очевидно и связано с повышением тепловой нагрузки на элемент РЭА за счет увеличения его теплоты рассеяния.

При увеличении коэффициентов теплообмена с окружающей средой основной и дополнительной теплообменной системы температура ЭРЭ уменьшается. При рассмотрении кривых 1 и 2 на рис. 6, можно сделать вывод, что рост $\beta_{отс}$ и $\beta_{дтс}$ с 5 до 10 Вт·(м²·К⁻¹) приводит к уменьшению температуры ДЭРЭ на 4 К. На данный процесс оказывают влияние два обстоятельства: улучшение отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ, что повышает хо-

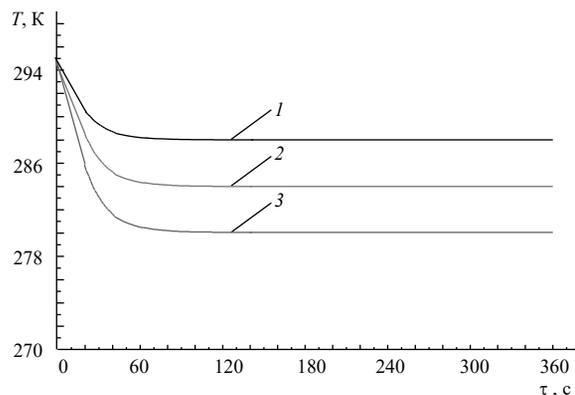


Рис. 8. Изменение во времени температуры в центре ЭРЭ: 1 — $P_{ТЭМ}=18$ Вт; 2 — $P_{ТЭМ}=22$ Вт; 3 — $P_{ТЭМ}=26$ Вт

Fig. 8. Changes of temperature over time in the center of ERE: 1 — $P_{ТЭМ}=18$ W; 2 — $P_{ТЭМ}=22$ W; 3 — $P_{ТЭМ}=26$ W

лодопроизводительность последних, и соответственно, интенсивность охлаждения ЭРЭ, а также увеличение теплопритока из окружающей среды через дополнительную теплообменную систему, что повышает тепловую нагрузку на ЭРЭ. Из расчетов следует, что первый фактор в данном случае в большей степени влияет на процесс охлаждения элемента РЭА, чем второй. Об этом свидетельствует ход кривой 3, согласно которой повышение $\beta_{отс}$ с 5 до 15 Вт·(м²·К⁻¹) при $\beta_{дтс}$, равном 5 Вт·(м²·К⁻¹) уменьшает температуру ЭРЭ не на 4 К, а на 6 К.

Здесь также необходимо отметить, что увеличение теплопритока к ЭРЭ из окружающей среды через дополнительную теплообменную систему будет наблюдаться только при температуре электрорадиоэлемента ниже температуры окружающей среды. Для многих практических случаев, когда необходимо обеспечить отвод теплоты от элемента РЭА, при котором его температура будет превышать температуру окружающей среды, данный фактор также будет нести положительный эффект, направленный на увеличение интенсивности охлаждения ЭРЭ, так как в этом случае градиент температуры поменяет знак на обратный.

На рис. 7 изображено изменение температуры в поперечном сечении структуры ТЭС-ЭРЭ через центр ЭРЭ для различных материалов, из которых изготовлены основная и дополнительная теплообменная система (медь, алюминий, латунь) при $P_{ЭРЭ}=32$ Вт и мощности ТЭМ 18 Вт.

В соответствии с полученными данными, наилучшим материалом для теплообменных систем, с точки зрения возможности уменьшения температуры ЭРЭ, является медь (обеспечивает снижение температуры элемента РЭА до 288 К). Это связано с ее более высоким коэффициентом теплопроводности, что дает возможность осуществить наиболее интенсивный отвод теплоты от горячих спаев ТЭМ. Теплообменные системы из алюминия и латуни позволяют обеспечить температурные режим ЭРЭ при равных условиях на уровне 293 и 296 К, соответственно. При этом сравнивая параметры трех материалов, необходимо отметить, что в случае, когда необходимо обеспечить наименьшую массу конструкции ТЭС, наиболее подходящим материалом теплообменных систем

будет являться алюминий, вес которого при том же объеме будет в 2,8 раза меньше, чем у меди и 3,2 меньше, чем у латуни.

Для анализа динамических параметров структуры ТЭС-ЭРЭ получены данные об изменении температуры ее контрольных точек во времени при различных величинах мощности ЭРЭ и ТЭМ. На рис. 8 изображено изменение во времени температуры в центре ЭРЭ. Также получены сведения об изменении температуры холодных спаев в центре основной и дополнительных секций ТЭМ, горячих спаев в центре основной секции ТЭМ и температуры в центре основной теплообменной системы при $P_{ЭРЭ}=32$ Вт и различных величинах холодопроизводительности ТЭМ, приходящейся на единицу площади для медных теплообменных систем. Коэффициенты теплообмена с окружающей средой основной и дополнительной теплообменной системы составляют $10 \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1})$.

В соответствии с расчетом время выхода на режим всех составных частей системы ТЭС-ЭРЭ относительно невелико. Наименьшая продолжительность выхода на стационарный режим работы у холодных и горячих спаев ТЭМ. В первом случае она составляет 40 с, а во втором 60 с, что связано с малыми габаритными размерами термомодулей и малой инерционностью эффекта Пельтье. Длительность выхода на режим ЭРЭ несколько больше и составляет 90 с, что объясняется его несколько большими габаритами, а также влиянием на процесс теплообмена теплопритоков из внешней среды через дополнительную теплообменную систему. Наибольшее время, необходимое для достижения стационарного режима в основной теплообменной системе, составляющее 190 с из-за ее наибольших размеров и массы, а также большой площади контакта с внешней средой, где осуществляется конвективный теплообмен.

Для всех графиков наблюдается равномерное изменение температуры с увеличением холодопроизводительности ТЭМ, приходящейся на единицу площади. В случае ЭРЭ, а также холодных спаев основной и дополнительной секций ТЭМ наблюдается уменьшение температуры в первом случае со скоростью 1 К/Вт , а во втором $1,25 \text{ К/Вт}$. Температура горячих спаев ТЭМ и основной теплообменной системы увеличивается и скорость ее изменения составляет $0,375 \text{ К/Вт}$.

Наименьшая температура в структуре ТЭС-ЭРЭ приходится на холодные спаи дополнительных секций ТЭМ при $P_{ТЭМ}=26$ Вт и составляет 270 К, наибольшая — на горячие спаи ТЭМ и равняется 330 К при той же мощности термомодулей.

Важным фактором энергетической эффективности работы ТЭМ является перепад температур между его холодными и горячими спаями, значение которого для современных термоэлементов ограничено величиной 68–70 К. Чем больше перепад температур между спа-

ями ТЭМ, тем меньше его холодильный коэффициент, отражающий энергетическую эффективность работы. Как показывают расчеты для исследуемых случаев данный перепад температур изменяется от 40 К при $P_{ТЭМ}=18$ Вт до 56 К при $P_{ТЭМ}=26$ Вт. Данное обстоятельство дает возможность сделать вывод о приемлемой энергетической эффективности работы системы для стандартных ТЭМ, выпускаемых фирмами производителями.

По результатам анализа температурного поля структуры ТЭС-ЭРЭ, в частности определяемым величинами мощности ТЭМ, произведен подбор его типа из стандартного перечня продукции ООО «Криотерм». В результате установлено, что качестве источника холода в ТЭС целесообразным является применение трех стандартных ТЭМ ООО «Криотерм» DRIFT-1,5, обеспечивающих диапазон мощностей 17–40 Вт при силе тока питания 2–6 А и потребляемой электроэнергии в единицу времени 40–130 Вт, имеющих холодильный коэффициент 0,17–1,3.

Заключение

Разработана ТЭС для охлаждения дискретных ЭРЭ, особенностью которой является использование нескольких секций ТЭМ совместно с теплообменными системами, обеспечивающими отвод теплоты от тепловыделяющего элемента с его нижней и верхней поверхности. Рассмотрена математическая модель данной системы. Математическая модель ТЭС состоит в решении системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс нестационарной теплопередачи в каждом из элементов конструкции ТЭС и ЭРЭ, методом конечных элементов, а также расчете ТЭМ в программно-вычислительном комплексе Thermoelectric system calculation (изготовитель ООО «Криотерм», Санкт-Петербург).

Результаты численного эксперимента представлены в виде трехмерного и одномерных температурных полей структуры ТЭС-ЭРЭ при ее выходе на стационарный режим работы и графиков изменения температуры во времени в контрольных точках в зависимости от тепловыделений ЭРЭ, мощности ТЭМ, коэффициентов теплообмена с окружающей средой теплообменных систем, а также различных материалов, из которых последние предположительно будут изготовлены. В результате моделирования установлено, что качестве источника холода в ТЭС целесообразным является применение трех стандартных ТЭМ ООО «Криотерм» DRIFT-1,5, обеспечивающих диапазон мощностей 17–40 Вт при силе тока питания 2–6 А и потребляемой электроэнергии в единицу времени 40–130 Вт, имеющих холодильный коэффициент 0,17–1,3.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Литература

1. Филоненко И. Н., Улицкий Г. А., Шиндяпкин Н. А. Автоматизация процесса проектирования охладителей для силовых полупроводников. // Машиностроение и инженерное образование. 2019. № 4 (61). С. 32–41.

References

1. Filonenko I. N., Ulitsky G. A., Shindyapkin N. A. Automation of the design process of coolers for power semiconductors. *Mechanical engineering and engineering education*. 2019. No. 4 (61). pp. 32–41. (in Russian)

2. Кудж С. А. Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных интерфейсов / С. А. Кудж, В. С. Кондратенко, В. В. Кадомкин, А. А. Высоканов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 347–357.
3. Гайдин Н. М. Исследование влияния конструктивных особенностей теплоотвода на эффективность охлаждения процессора / Н. М. Гайдин, М. В. Поклонская, А. В. Палий // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10 (82). С. 77–85.
4. Иванов И. А., Увайсов Р. М. Исследование тепловых и механических характеристик бортового устройства вторичного электропитания. // Наукоемкие технологии. 2022. Т. 23. № 6. С. 21–30.
5. Бекисhev А. Т. Новый подход к решению задачи охлаждения многоканальных приема-передающих модулей АФАР / А. Т. Бекисhev, А. А. Смоляков, М. В. Исаков, А. А. Попель, Д. Л. Пономарев // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 1 (94). С. 64–69.
6. Шарков А. В. Системы охлаждения и термостатирования / А. В. Шарков, В. А. Кораблев, В. В. Герасименко, Ю. П. Заричняк. СПб.: НИУ ИТМО, 2021. 89 с.
7. Макушина Н. В. Перспективные капиллярные системы охлаждения изделий микроэлектроники / Н. В. Макушина, А. П. Радчук, И. О. Яковлев // Технологии инженерных и информационных систем. 2022. № 2. С. 79–90.
8. Архаров И. А., Махотин И. Д. Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных. Часть 2. Экономическая эффективность систем с жидкостным и воздушным охлаждением. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 21–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28
9. Васильев Е. Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники. // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 2. С. 133–141.
10. Finn P.-A. Thermoelectric materials: current status and future challenges / P.-A. Finn, C. Asker, K. Wan, E. Bilotti, O. Fenwick, C.-B Nielsen // *Frontiers in electronic materials*. 2021. Vol. 1. P. 1–13.
11. Snyder G. J. Distributed and localized cooling with thermoelectrics / G. J. Snyder, S. LeBlanc, D. Crane, et al. // *Future energy*. 2021. Vol. 5. P. 748–51.
12. Zhang L. Flexible thermoelectric materials and devices: from materials to applications / L. Zhang, X.-L. Shi, Y.-L. Yang, Z.-G. Chen // *Materials today*. 2021. Vol. 46. P. 62–108.
13. Драбкин И. А., Ершова Л. Б. Термоэлектрические интенсификаторы теплообмена. // Физика и техника полупроводников. 2022. № 1. С. 3–7.
14. Марков О. И. Вклад распределенного эффекта Пельтье в эффективность ветви термоэлектрического охладителя. // Физика и техника полупроводников. 2022. № 1. С. 48–53.
15. Ибрагимова А. М., Евдулов О. В. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для отвода теплоты от элементов РЭА // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: сборник научных трудов X Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 27–29 окт. 2021 г.). СПб., 2021. С. 12–15.
16. Исмаилов Т. А. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей / Т. А. Исмаилов, О. В. Евдулов, Р. А.-М. Магоматов. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
2. Kudzh S. A. Analysis of the efficiency of heat removal in heat-generating devices when using various interfaces / S. A. Kudzh, V. S. Kondratenko, V. V. Kadomkin, A. A. Vysokanov. *Izvestia of higher educational institutions. Electronics*. 2020. vol. 25. No. 4. pp. 347–357. (in Russian)
3. Gaidin N. M. Investigation of the influence of the design features of the heat sink on the cooling efficiency of the processor / N. M. Gaidin, M. V. Poklonskaya, A. V. Paly. *Engineering Bulletin of the Don*. 2021. No. 10 (82). pp. 77–85. (in Russian)
4. Ivanov I. A., Uvaysov R. M. Investigation of thermal and mechanical characteristics of the on-board secondary power supply device. *High-tech technologies*. 2022. Vol. 23. No. 6. pp. 21–30. (in Russian)
5. Bekishev A. T. A new approach to solving the problem of cooling multichannel receiving and transmitting AFAR modules / A. T. Bekishev, A. A. Smolyakov, M. V. Isakov, A. A. Popel, D. L. Ponomarev. *Aerospace sphere*. 2018. No. 1 (94). pp. 64–69. (in Russian)
6. Sharkov A. V. Cooling and thermostating systems / A. V. Sharkov, V. A. Korablev, V. V. Gerasimenko, Yu. P. Zarichnyak. St. Petersburg: ITMO, 2021. 89 p. (in Russian)
7. Makushina N. V. Perspective capillary cooling systems of microelectronics products / N. V. Makushina, A. P. Radchuk, I. O. Yakovlev. *Technologies of engineering and information systems*. 2022. No. 2. pp. 79–90. (in Russian)
8. Arkharov I. A., Makhotin I. D. A comparative analysis of ways to cool data center servers and data banks. Part 2. Cost-effectiveness of liquid and air-cooled systems. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28. (in Russian)
9. Vasiliev E. N. Thermoelectric cooling of heat-loaded electronics elements. *Microelectronics*. 2020. Vol. 49. No. 2. pp. 133–141. (in Russian)
10. Finn P.-A. Thermoelectric materials: current status and future challenges / P.-A. Finn, C. Asker, K. Wan, E. Bilotti, O. Fenwick, C.-B Nielsen. *Frontiers in electronic materials*. 2021. Vol. 1. P. 1–13.
11. Snyder G. J. Distributed and localized cooling with thermoelectrics / G. J. Snyder, S. LeBlanc, D. Crane, et al. *Future energy*. 2021. Vol. 5. P. 748–51.
12. Zhang L. Flexible thermoelectric materials and devices: from materials to applications / L. Zhang, X.-L. Shi, Y.-L. Yang, Z.-G. Chen. *Materials today*. 2021. Vol. 46. P. 62–108.
13. Drabkin I. A., Ershova L. B. Thermoelectric heat transfer intensifiers. *Physics and Technology of semiconductors*. 2022. No. 1. pp. 3–7. (in Russian)
14. Markov O. I. Contribution of the distributed Peltier effect to the efficiency of the thermoelectric cooler branch. *Physics and Technology of semiconductors*. 2022. No. 1. pp. 48–53. (in Russian)
15. Ibragimova A. M., Evdulov O. V. Thermoelectric semiconductor devices for heat removal from REA elements. *Low-temperature and food technologies in the XXI century: an article in the collection of scientific papers of the X International Scientific and Technical Conference (St. Petersburg, October 27–29, 2021)*. St. Petersburg, 2021. pp. 12–15. (in Russian)
16. Ismailov T. A. Cooling systems based on high-current thermoelectric semiconductor converters / T. A. Ismailov, O. V. Evdulov, R. A.-M. Magomadov. St. Petersburg: Polytechnic, 2020. 285 p. (in Russian)

17. Теория тепломассообмена / Под. ред. А. И. Леонтьева. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 464 с.
18. Shi X.-L. Fiber-based thermoelectrics for solid, portable, and wearable electronics / X.-L. Shi, W.-G. Chen, T. Zhang, J. Zou, Z.-G. Chen // *Energy environ science*. 2021. Vol. 14. P. 729–764.
19. <http://kryotherm.spb.ru> (дата доступа 21.03.2023).
17. Theory of heat and mass transfer / Edited by A. I. Leontiev. M.: Bauman Moscow State Technical University, 2018. 464 p. (in Russian)
18. Shi X.-L. Fiber-based thermoelectrics for solid, portable, and wearable electronics / X.-L. Shi, W.-G. Chen, T. Zhang, J. Zou, Z.-G. Chen. *Energy environ science*. 2021. Vol. 14. P. 729–764.
19. <http://kryotherm.spb.ru> (access date 21.03.2023). (in Russian)

Сведения об авторах

Евдулов Олег Викторович

Д. т. н., доцент кафедры теоретической и общей электротехники, Дагестанский государственный технический университет, 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, ole-ole-ole@rambler.ru

Ибрагимова Асият Магомедовна

Аспирант, Дагестанский государственный технический университет, 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, ibrasya@mail.ru

Information about authors

Yevdulov Oleg V.

D. Sc., Associate professor of the department of Theoretical and general electrical engineering, Dagestan State Technical University, 70 Imam Shamil ave., Makhachkala, 367026, ole-ole-ole@rambler.ru

Ibragimova Asiyat M.

Postgraduate student, Dagestan State Technical University, Imam Shamil ave., 70, Makhachkala, 367026, ibrasya@mail.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



Выставка продуктов питания и напитков

InterFood Krasnodar

23–25 апреля 2024 г.

InterFood Krasnodar – эффективная бизнес-площадка для прямого контакта производителей и поставщиков с представителями предприятий оптовой торговли, независимой и сетевой розничной торговли, а также предприятий общественного питания регионов России.

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- ✓ Мясо и птица.
- ✓ Рыбная продукция.
- ✓ Молочная продукция. Сыры.
- ✓ Бакалея. Зернопродукты. Макароны изделия.
- ✓ Кондитерская продукция. Хлебопекарная продукция.
- ✓ Безалкогольные и слабоалкогольные напитки.
- ✓ Продукты и напитки для предприятий общественного питания.
- ✓ Пиво и снековая продукция.

Организатор выставки: Компания MVK
г. Краснодар, ул. Конгрессная 1, павильон 2
Тел.: +7 (861) 200 12 34
e-mail: krasnodar@mvk.ru

Место проведения:
ВКК «Экспоград Юг»,
г. Краснодар, ул. Конгрессная, 1
<https://inter-food-su/ru-RU/>