

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ**

А. М. ИБРАГИМОВА*, О. В. ЕВДУЛОВ

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия
**ibrasya@mail.ru*

Аннотация. Разработано устройство, предназначенное для охлаждения дискретных электрорадиоэлементов (ДЭРЭ), источником холода в котором являются стандартные термоэлектрические модули (ТЭМ), образующие две секции с основной и дополнительной теплообменными системами. Описан экспериментальный стенд, приведены результаты натурных испытаний прибора. В различных точках структуры термоэлектрического устройства (ТЭУ) — имитатора ДЭРЭ для набора значений силы тока питания ТЭМ и мощности имитатора ДЭРЭ — экспериментально получены графики изменения температуры во времени. Определено, что в разработанном ТЭУ могут быть использованы ТЭМ типа DRIFT-1,5 производства ООО „Криотерм“ (Санкт-Петербург). Установлено, что в случае применения данного типа термомодулей температура ДЭРЭ может быть снижена до 272 К при токе питания, близком к оптимальному (5 А), при этом время выхода на режим составляет 90 с. Расхождение экспериментальных и расчетных данных составило не более 10 %.

Ключевые слова: электрорадиоэлемент, термоэлектрическое устройство, термоэлектрический модуль, лабораторный образец, охлаждение, экспериментальная установка, измерительный эксперимент

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Ссылка для цитирования: Ибрагимова А. М., Евдулов О. В. Экспериментальное исследование термоэлектрического устройства для охлаждения дискретных электрорадиоэлементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 704—710. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-704-710.

**EXPERIMENTAL STUDIES OF A THERMOELECTRIC DEVICE FOR COOLING DISCRETE
ELECTRIC RADIO ELEMENTS**

A. M. Ibragimova*, O. V. Evdulov

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia
**ibrasya@mail.ru*

Abstract. A device is developed for cooling discrete electrical radio elements (DERE). The sources of cold in the device are standard thermoelectric modules (TEMs), which form two sections with the main and additional heat exchange systems. An experimental stand is described, and results of full-scale tests of the device are presented. Graphs of temperature changes over time at various points of the thermoelectric device (TED) structure - the DERE simulator for a set of values of the TEM supply current and the power of the DERE simulator are obtained experimentally. It is determined that the developed thermal power plant can use TEM of the DRIFT-1.5 type produced by Cryotherm (St. Petersburg). It is been found that when using this type of thermal modules, the temperature of the DERE can be reduced to 272 K at a power current close to the optimal (5 A), while the time to enter the mode is 90 s. The discrepancy between experimental and calculated data is estimated to be no more than 10 %.

Keywords: electric radio element, thermoelectric device, thermoelectric module, laboratory sample, cooling, experimental installation, measuring experiment

Acknowledgment: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

For citation: Ibragimova A. M., Evdulov O. V. Experimental studies of a thermoelectric device for cooling discrete electric radio elements. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 8. P. 704—710 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-704-710.

Введение. В настоящее время актуальна и практически значима задача разработки технических средств охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и составляющих ее дискретных электрорадиоэлементов (ДЭРЭ) с целью обеспечения оптимальных температурных режимов функционирования. Эта задача решается путем использования совместно с РЭА специальных охлаждающих систем, при разработке которых важно обеспечить их соответствие с ДЭРЭ по массогабаритным и энергетическим характеристикам [1]. Работа такой охлаждающей аппаратуры основывается на обеспечении переноса теплоты от РЭА в окружающую среду за счет конвективных механизмов. Для этих целей активно применяются воздушные, жидкостные, испарительные системы, аппаратура, работающая на основе кондуктивной теплопередачи, различного рода тепловые аккумуляторы и устройства, реализующие специальные методы теплоотвода [2—4]. Перечисленные средства охлаждения РЭА имеют определенные недостатки. Так, воздушное охлаждение, несмотря на свою простоту, позволяет снизить температуру ДЭРЭ 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 теплоотвода. В этих условиях для охлаждения ДЭРЭ, входящих в состав РЭА, перспективным является применение охлаждающих ТЭУ [5—9], характеризующихся малыми размерами и массой, независимостью от действия гравитационных сил, высокой надежностью и ресурсом работы, экологической безопасностью и бесшумностью [10—12].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование термоэлектрических устройств (ТЭУ) для охлаждения ДЭРЭ, отличающегося повышенной эффективностью отвода теплоты за счет увеличения площади теплообмена между прибором и электрорадиоэлементом.

Описание измерительного стенда и методики натурных исследований. Для проведения эксперимента разработан измерительный стенд (рис. 1, а). На нем исследовался лабораторный образец ТЭУ [13], состоящий из основной 1 и двух дополнительных 2 секций термоэлектрического модуля (ТЭМ), соприкасающихся с основной 3 и дополнительной 4 теплообменными системами. На холодных спаях основной секции ТЭМ размещался имитатор ДЭРЭ 5, своей верхней поверхностью контактирующий с центральной частью дополнительной теплообменной системы, по краям сопряженной с холодными спаями дополнительных секций ТЭМ. Внешний вид лабораторного образца ТЭУ показан на рис. 1, б.

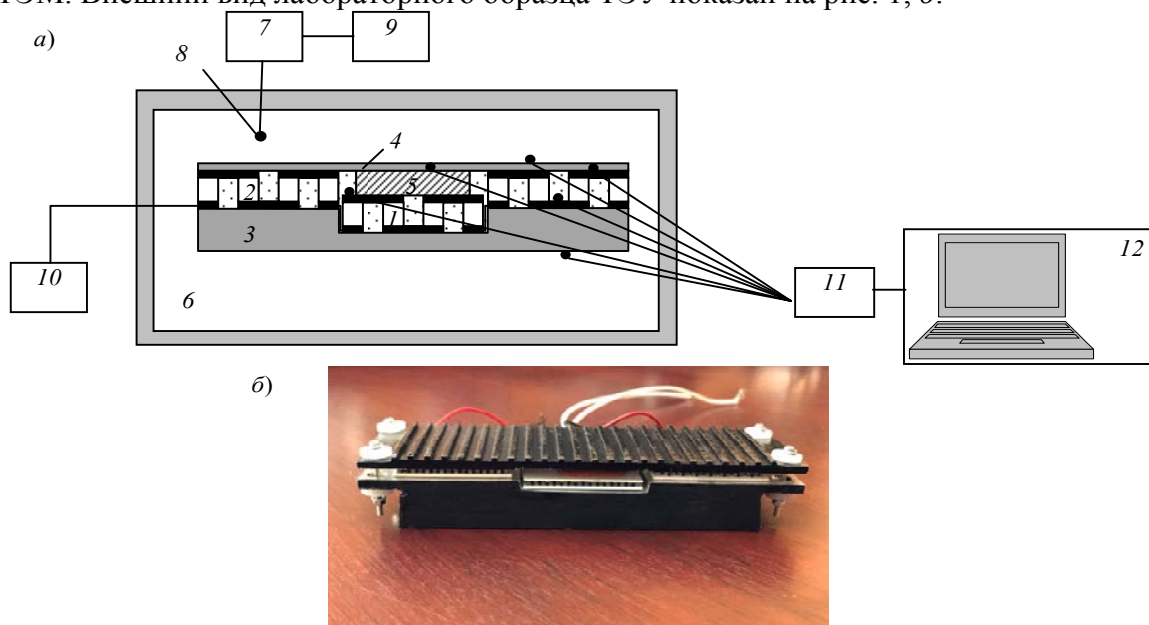


Рис. 1

В качестве имитатора ДЭРЭ использован плоский электронагреватель. Секции ТЭМ реализованы на основе трех стандартных ТЭМ DRIFT-1,5 производства ООО „Криотерм“ (Санкт-Петербург) [14]. Лабораторный образец ТЭУ располагался в специальном термостатированном объеме 6, его температура и влажность регулировались управляющим блоком 7, информация на который поступала от датчиков температуры и влажности 8 и высвечивалась на цифровом экране 9.

Секции ТЭМ запитывались от источника постоянного электрического тока 10, напряжение и сила тока на котором контролировались встроенными вольтметром и амперметром. Измерение температуры в контрольных точках системы ТЭУ—ДЭРЭ производилось с помощью прибора ИРТМ 2402/ МЗ 11, рассчитанного на двенадцать измерительных каналов, данные с которых поступали на ПЭВМ 12 и после соответствующего преобразования выводились в виде временных графиков.

При проведении измерений регистрировались напряжение и сила тока, питающие секции ТЭМ, значение температуры на спаях ТЭМ, имитаторе ДЭРЭ, в центре основной и дополнительной теплообменной системы, термостатируемом объеме, мощность имитатора электрорадиоэлемента. Непосредственно измерение температуры осуществлялось посредством медь-константановых термопар 13.

В результате измерительного эксперимента получены кривые изменения во времени температуры в различных точках структуры ТЭУ—ДЭРЭ. Результаты измерений после обработки представлялись в виде зависимостей изменения температуры во времени в контрольных точках структуры ТЭУ—ДЭРЭ для набора значений силы тока питания ТЭМ и мощности имитатора ДЭРЭ.

Результаты натуральных испытаний устройства. В соответствии с разработанной методикой эксперимента на измерительном стенде исследован лабораторный образец, предназначенный для охлаждения ДЭРЭ. Были заданы [15]:

- температура в термостатируемом объеме — 295 К;
- относительная влажность в термостатируемом объеме — 55 %;
- варьирование температуры в термостатируемом объеме — не более 0,5 К;
- температура всех составляющих частей системы ТЭУ—ДЭРЭ в первоначальный момент времени — 295 К.

На рис. 2 представлены графики изменения температуры имитатора ДЭРЭ (а), холодных спаев основной (б) и дополнительных (в) секций ТЭМ во времени для различных значений мощности тепловыделений имитатора ДЭРЭ (1 — $P_{\text{ДЭРЭ}} = 24$, 2 — 32, 3 — 40 Вт) и фиксированном токе питания термомодулей (3 А). Также получены аналогичные данные для различных токов питания ТЭМ и фиксированной мощности тепловыделений имитатора ДЭРЭ.

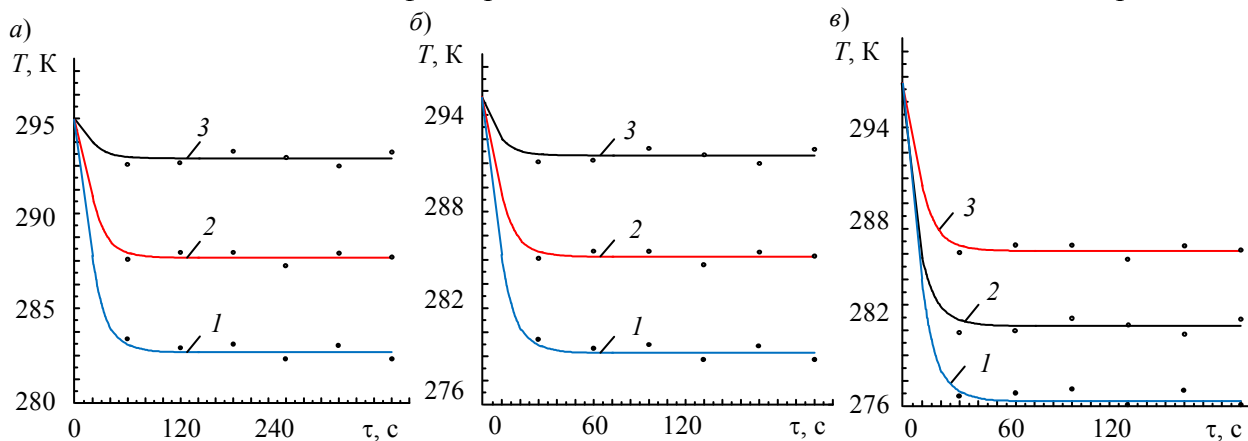


Рис. 2

Как следует из зависимостей, с ростом тепловыделений имитатора ДЭРЭ наблюдается повышение температуры как его самого, так и холодных спаев ТЭМ при токе питания 3 А (что соответствует мощности термомодулей 17 Вт). При этом увеличение мощности тепловыделений имитатора ДЭРЭ на 16 Вт приводит к повышению его температуры, а также температуры основной и дополнительных секций ТЭМ на 8 К. Рост температуры последних при фиксированном токе питания связан с увеличением действующей на них тепловой нагрузки.

С повышением тока питания ТЭМ увеличивается их холодопроизводительность, снижается температура холодных спаев, имитатора ДЭРЭ. В частности, при максимальном из рассмотренных в данном случае токе питания ТЭМ 5 А (соответствует мощности термомодулей 35 Вт) температура холодных спаев дополнительных секций термомодулей составляет 266 К, основной секции ТЭМ — 269 К, имитатора ДЭРЭ — 272 К в стационарном режиме. Снижение силы тока питания ТЭМ увеличивает температуру как обеих секций ТЭМ, так и имитатора ДЭРЭ. Так, снижение силы тока питания ТЭМ до 3 А приводит к увеличению температуры холодных спаев дополнительных секций ТЭМ до 280 К, основной секции — до 284 К, а имитатора ДЭРЭ — до 288 К.

Важными с точки зрения надежности работы ТЭС являются данные о температуре горячих спаев основной и дополнительных секций ТЭМ, а также теплообменных систем. С целью оценки возможности стабильной работы исследуемой системы на рис. 3 рассмотрены кривые изменения температуры горячих спаев в центре основной (а) и дополнительной (б) секций ТЭМ, а также теплообменных систем (в — в центре основной теплообменной системы, г — с краю основной, д — в центре дополнительной) во времени для набора значений силы тока питания термомодулей (1 — $I_{ТЭМ} = 3$, 2 — 4, 3 — 5 А) при мощности ДЭРЭ 32 Вт.

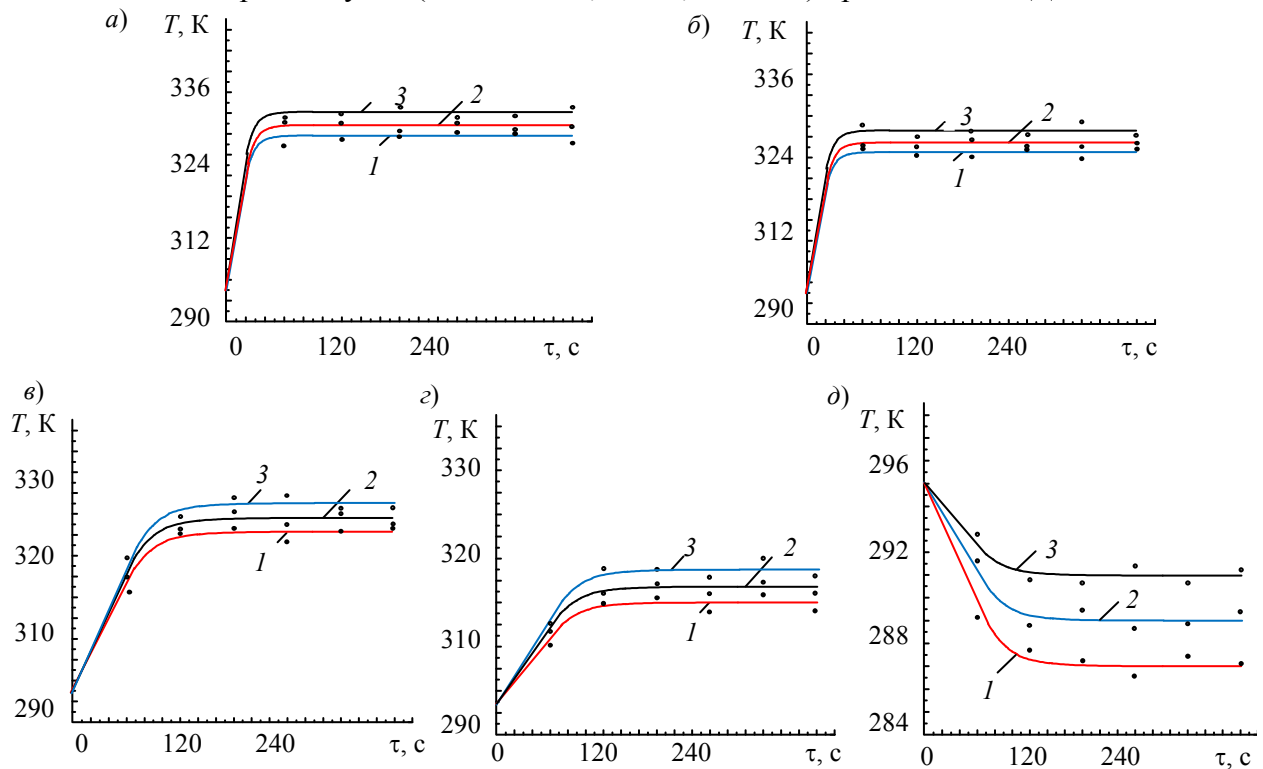


Рис. 3

Согласно результатам измерений, температура горячих спаев использованного в ТЭУ ТЭМ типа DRIFT-1,5 находится в приемлемых пределах. Так, для максимальной величины тока питания ТЭМ 6 А максимальное измеренное значение температуры равняется 332 К. Это свидетельствует об эффективности применения основной теплообменной системы, реализованной в виде радиатора, обеспечивающего естественный воздушный отвод теплоты от горячих спаев ТЭМ. Для повышения эффективности теплоотвода от горячих спаев ТЭМ будет

рациональным использование оребрения основной теплообменной системы, а также применение в качестве нее наполненного радиатора с плавящимся рабочим веществом, имеющим большую теплоту плавления и температуру плавления, находящуюся в пределах 310—340 К.

Графики, приведенные на рис. 2, 3, позволяют исследовать динамические параметры ТЭУ. Согласно им, время выхода в стационарный режим работы структуры ТЭУ—ДЭР относительно невелико. Для холодных и горячих спаев основной и дополнительной секций ТЭМ данное время составляет соответственно 40 и 60 с, ДЭРЭ — 90 с, теплообменных систем — 200 с.

Сопоставление показывает хорошую сходимость результатов измерений и расчета [16]. Так, наибольшее отклонение экспериментальных данных от теоретических не превышает 10 %, оно приходится на промежуток времени, связанный с выходом ТЭУ и ДЭРЭ в стационарный режим функционирования.

Заключение. В результате проведенных исследований:

1) разработано ТЭУ для охлаждения ДЭРЭ, особенностью которого является использование нескольких секций ТЭМ совместно с теплообменными системами, обеспечивающими отвод теплоты от тепловыделяющего элемента с его нижней и верхней поверхностей;

2) создан измерительный стенд для экспериментальных исследований ТЭУ, позволяющий регистрировать изменение температуры в различных точках структуры ТЭУ—ДЭРЭ для набора значений силы тока питания ТЭМ и мощности имитатора электрорадиоэлемента;

3) определено, что с увеличением мощности имитатора ДЭРЭ растет температура всех составляющих структуры ТЭУ—ДЭРЭ. При этом увеличение тепловыделений имитатора ДЭРЭ на 16 Вт приводит к повышению его температуры, а также температуры основной и дополнительных секций ТЭМ на 8 К;

4) определено, что при фиксированной мощности ДЭРЭ и увеличении тока питания ТЭМ вплоть до максимального значения уменьшается температура холодных спаев термомодулей и имитатора ДЭРЭ. В частности, при токе питания ТЭМ 5 А температура холодных спаев дополнительных секций термомодулей составляет 266 К, основной секции ТЭМ — 269 К, имитатора ДЭРЭ — 272 К при выходе системы на стационарный режим работы;

5) установлено, что в исследованном диапазоне мощностей ДЭРЭ (до 40 Вт) и токов питания ТЭМ (до 6 А) температура горячих спаев термомодулей составляет 332 К, что свидетельствует об эффективности применения основной теплообменной системы, реализованной в виде воздушного радиатора;

6) показано, что ТЭУ имеет высокие динамические характеристики. Согласно эксперименту, время выхода на режим холодных и горячих спаев ТЭМ находится в диапазоне 40—60 с, ДЭРЭ — 90 с, теплообменных систем — 200 с;

7) выявлено, что наибольшее различие результатов измерений от расчета составляет 10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарков А. В., Кораблев В. А., Герасютенко В. В., Заричняк Ю. П. Системы охлаждения и термостатирования. СПб: НИУ ИТМО, 2021. 89 с.
2. Архаров И. А., Махотин И. Д. Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных. Ч. 2. Экономическая эффективность систем с жидкостным и воздушным охлаждением // Вестн. Международной академии холода. 2022. № 4. С. 21—28.
3. Гайдин Н. М., Поклонская М. В., Палий А. В. Исследование влияния конструктивных особенностей теплоотвода на эффективность охлаждения процессора // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10(82). С. 77—85.
4. Кудж С. А., Кондратенко В. С., Кадомкин В. В., Высоканов А. А. Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных интерфейсов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25, № 4. С. 347—357.

5. Sennoga T., Zhu J., Yuying A., Li B. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 65. P. 114—121.
6. Васильев Е. Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники // *Микроэлектроника*. 2020. Т. 49, № 2. С. 133—141.
7. Snyder G. J., LeBlanc S., Crane D. et al. Distributed and localized cooling with thermoelectrics // *Future energy*. 2021. Vol. 5. P. 748—751.
8. Tan H., Fu H., Yu J. Evaluating optimal cooling temperature of a single-stage thermoelectric cooler using thermodynamic second law // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 123. P. 845—851.
9. Zhang L., Shi X.-L., Yang Y.-L., Chen Z.-G. Flexible thermoelectric materials and devices: from materials to applications // *Materials today*. 2021. Vol. 46. P. 62—108.
10. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Магомедов Р. А.-М. Охлаждающие системы на базе высокоточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб: Политехника, 2020. 285 с.
11. Finn P.-A., Asker C., Wan K. et al. Thermoelectric materials: current status and future challenges // *Frontiers in electronic materials*. 2021. Vol. 1. P. 1—13.
12. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices // *Chemical reviews*. 2020. Vol. 15. P. 7399—515.
13. Ибрагимова А. М., Евдулов О. В. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для отвода теплоты от элементов РЭА // X Междунар. науч.-техн. конф. „Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке“. СПб, 27—29 окт. 2021 г. С. 12—15.
14. [Электронный ресурс]: <<http://www.kryotherm.spb.ru>>. (дата доступа 02.05.2023)
15. Васильев Е. Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. Т. 29, № 3. С. 419—430.
16. Евдулов О. В., Ибрагимова А. М., Магомедов Т. Ю. Расчетная модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2022. Т. 49, № 2. С. 9—17.

Сведения об авторах

- Асият Магомедовна Ибрагимова** — Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники; соискатель;
E-mail: ibrasya@mail.ru
- Олег Викторович Евдулов** — д-р техн. наук, доцент; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

Поступила в редакцию 09.03.2023; одобрена после рецензирования 21.03.2023; принята к публикации 22.06.2023.

REFERENCES

1. Sharkov A.V., Korablev V.A., Gerasyutenko V.V., Zarichnyak Yu.P. *Sistemy okhlazhdeniya i termostatirovaniya* (Cooling and Temperature Control Systems), St. Petersburg, 2021, 89 p. (in Russ.)
2. Arkharov I.A., Makhotin I.D. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2022, no. 4, pp. 21—28. (in Russ.)
3. Gaydin N.M., Poklonskaya M.V., Paliy A.V. *Engineering journal of Don*, 2021, no. 10(82), pp. 77—85. (in Russ.)
4. Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Visokanov A.A. *Proceedings of universities. Electronics*, 2020, no. 4(25), pp. 347—357. (in Russ.)
5. Sennoga T., Zhu J., Yuying A., Li B. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, vol. 65, pp. 114—121.
6. Vasil'ev E.N. *Russian Microelectronics*, 2020, no. 2(49), pp. 123—131.
7. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. et al. *Future energy*, 2021, vol. 5, pp. 748—751.
8. Tan H., Fu H., Yu J. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 123, pp. 845—851.
9. Zhang L., Shi X.-L., Yang Y.-L., Chen Z.-G. *Materials today*, 2021, vol. 46, pp. 62—108.
10. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. *Okhlazhdayushchiye sistemy na baze sil'notochnykh termoelektricheskikh poluprovodnikovyykh preobrazovateley* (Cooling Systems Based on High-Current Thermoelectric Semiconductor Converters), St. Petersburg, 2020, 285 p. (in Russ.)
11. Finn P.-A., Asker C., Wan K. et al. *Frontiers in electronic materials*, 2021, vol. 1, pp. 1—13.
12. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. *Chemical reviews*, 2020, vol. 15, pp. 7399.
13. Ibragimova A.M., Evdulov O.V. *Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke* (Low-Temperature and

- Food Technologies in the 21st Century), X International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, October 27–29, 2021, pp. 12–15. (in Russ.)
14. <http://www.kryotherm.spb.ru>. (in Russ.)
15. Vasil'ev E.N. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2022, no. 3(29), pp. 419–430. (in Russ.)
16. Evdulov O.V., Ibragimova A. M., Magomedov T.Yu. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*, 2022, no. 2(49), pp. 9–17. (in Russ.)

Data on authors

- Asiiat M. Ibragimova** — Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; PhD Candidate; E-mail: ibrasya@mail.ru
- Oleg V. Evdulov** — Dr. Sci., Associate Professor; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

Received 09.03.2023; approved after reviewing 21.03.2023; accepted for publication 22.06.2023.