

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-6-13



Оригинальная статья /Original article

Исследование термоэлектрического нуля-термостата

О.В. Евдулов, Д.А. Магомедов, Р.М. Магомедов, К.А. Шихабидов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка и исследование конструкции термоэлектрического нуля-термостата, отличающейся малым энергопотреблением, в которой высокая точность стабилизации температуры опорных спаев дифференциальных термопар достигается за счет размещения их непосредственно вблизи границы раздела вода - лед. **Метод.** Исследование проводилось на экспериментальной модели термоэлектрического нуля-термостата. Для исследования процессов теплообмена осуществлялось визуальное наблюдение за перемещением границы раздела фаз лед-вода в камере нуля-термостата. Регистрировались значения температур у нижнего и верхнего оснований камеры, а также, на горячем и холодном спае термоэлектрического модуля (ТЭМ) с помощью термопар. **Результат.** Получены зависимости изменения температуры верхнего и нижнего оснований рабочей камеры, а также границы раздела фаз во времени, продолжительности времени полного проплавления льда от тока питания ТЭМ, разности температур, соответственно, между поверхностью холодного спае ТЭМ и нижнего основания рабочей камеры, поверхностью горячего спае термомодуля и верхнего основания рабочей камеры. **Вывод.** Установлено, что скорость перемещения границы раздела фаз сильно зависит от величины тока питания термоэлектрической батареи, что соответствует тепловому потоку на верхнем и нижнем основании рабочей камеры. Как следует из приведенных данных, изменение температуры верхнего основания ощутимее, чем нижнего. При токе 2, 4 и 6 А скорость перемещения границы раздела фаз составляет соответственно 0,007 м/ч, 0,01 м/ч и 0,013 м/ч. При этом длительность полного проплавления льда, соответствующая продолжительности функционирования нуля - термостата при изменении тока питания ТЭМ с 2 до 7 А сокращается с $1,91 \cdot 10^4$ с до $1,38 \cdot 10^4$.

Ключевые слова: термоэлектрический нуля-термостат, дифференциальная термопара, термоэлектрический модуль, граница фазового перехода, эксперимент, измерение, температура.

Для цитирования: О.В. Евдулов, Д.А. Магомедов, Р.М. Магомедов, К.А. Шихабидов. Исследование термоэлектрического нуля-термостата. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-6-13

Research of thermoelectric null-thermostat

O.V. Evdulov, D.A. Magomedov, R.M. Magomedov, K.A. Shikhabidov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop and study the design of a thermoelectric null-thermostat, characterized by low power consumption, in which high accuracy of temperature stabilization of the reference junctions of differential thermocouples is achieved by placing them directly near the water-ice interface. **Method.** The study was carried out on an experimental model of a thermoelectric null-thermostat. To study heat transfer processes, visual observation of the movement of the ice-water interface in the null-thermostat chamber was carried out. Temperature values were recorded at the lower and upper bases of the chamber, as well as at the hot and cold junctions of the thermoelectric module (TEM) using thermocouples. **Result.** The dependences of the change in temperature of the upper

and lower base of the working chamber, as well as the phase boundary over time, the duration of time for complete ice penetration on the TEM supply current, and the temperature difference, respectively, between the surface of the cold junction of the TEM and the lower base of the working chamber were obtained, the surface of the hot junction of the thermal module and the upper base of the working chamber. **Conclusion.** It has been established that the speed of movement of the phase boundary strongly depends on the value of the supply current of the thermoelectric battery, which corresponds to the heat flow at the upper and lower base of the working chamber. As follows from the data presented, the change in temperature of the upper base is more noticeable than the lower one. At a current of 2, 4 and 6 A, the speed of movement of the phase boundary is 0.007 m/h, 0.01 m/h and 0.013 m/h, respectively. In this case, the duration of complete melting of ice, corresponding to the duration of operation of the null thermostat, when the TEM supply current changes from 2 to 7 A, is reduced from $1,91 \cdot 10^4$ s to $1,38 \cdot 10^4$.

Keywords: thermoelectric null thermostat, differential thermocouple, thermoelectric module, phase transition boundary, experiment, measurement, temperature.

For citation: O.V. Evdulov, D.A. Magomedov, R.M. Magomedov, K.A. Shikhabidov. Research of thermoelectric null-thermostat. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-6-13

Введение. Развитие современной измерительной техники требует совершенствования методов и средств контроля различных физических величин при проведении экспериментальных исследований, лабораторных испытаниях новых устройств или в области управления технологическими процессами на производстве. Как правило, прецизионному контролю могут подляжать самые различные параметры, однако, одной из наиболее часто измеряемых физических величин является температура.

Важным элементом любой системы измерения температуры является температурный преобразователь - датчик, параметры и схема включения которого во многом определяют точность всей системы. Известны различные типы датчиков температуры, из них на практике чаще всего применяются различные разновидности резистивных и полупроводниковых датчиков и др., а также дифференциальные термодпары [1]. Причем, последние выделяются некоторыми своими положительными качествами, основными из которых являются высокая достижимая точность измерений, широкий диапазон рабочих температур, возможность длительной эксплуатации в условиях агрессивных внешних сред с сохранением основных параметров. К их недостаткам при проведении точных измерений можно отнести необходимость в термостабилизации опорных спаев при определенном значении температуры, чаще всего, при нуле градусов по Цельсию.

Среди наиболее распространенных устройств, применяемых для термостабилизации опорных спаев при данной температуре выделяется сосуд Дьюара и его различные модификации, которые, в общем, представляют собой сосуд, заполненный тающим льдом [2, 3]. Недостатки подобных конструкций заключаются в необходимости частой замены рабочего вещества, больших размерах, а также наличии неравномерности распределения температуры в сосуде, снижающей точность термостатирования опорных спаев термодпар. Известны также конструкции [4], принцип работы которых основан на применении датчика температуры, который включен в схему двухпозиционного регулирования. При этом точность термостабилизации зависит от точности используемого датчика, что является их существенным недостатком.

В [5] предложен подход с применением термоэлектрической системы для термостатирования рабочего вещества, где контрольный спай дифференциальной термодпары при помощи поплавковой конструкции размещается на границе раздела твердой и жидкой фазы вещества, положение которой регулируется с помощью стандартного термоэлектрического модуля (ТЭМ). Применение ТЭМ для целей стабилизации температуры является обоснованным и доказанным в работах [6-14], что обусловлено такими их достоинствами, как малые габаритные размеры, возможность работы как в режиме охлаждения, так и нагрева, бесшумность и экологичность [15-19].

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка и исследование конструкции термоэлектрического нуля-термостата, отличающейся малым энергопотреблением, в которой высокая точность стабилизации температуры опорных спаев дифференциальных термопар достигается за счет размещения их непосредственно вблизи границы раздела вода - лед.

Методы исследования. Исследование проводилось на экспериментальной модели термоэлектрического нуля-термостата (рис.1), состоящего из цилиндрической камеры 3, имеющей прозрачные стенки с низкой теплопроводностью и заполненной рабочим веществом 4 - дистиллированной водой, изначально находящейся в твердой фазе (лед). ТЭМ 2 закреплен между двумя теплопроводящими пластинами 6 и 7, выполненными из алюминия, причем, пластина 6 закреплена у верхнего основания (горячего спае) термомодуля, пластина 7 – находится в хорошем тепловом контакте с его нижним основанием (холодный спай). Конструкция выполнена таким образом, что тепло от горячего спае ТЭМ 2 подводится посредством теплопроводящей пластины 6 к верхнему основанию цилиндрической камеры 3, а посредством холодного спае ТЭМ 2 через теплопроводящую пластину 7 производится охлаждение нижнего основания цилиндрической камеры 3.

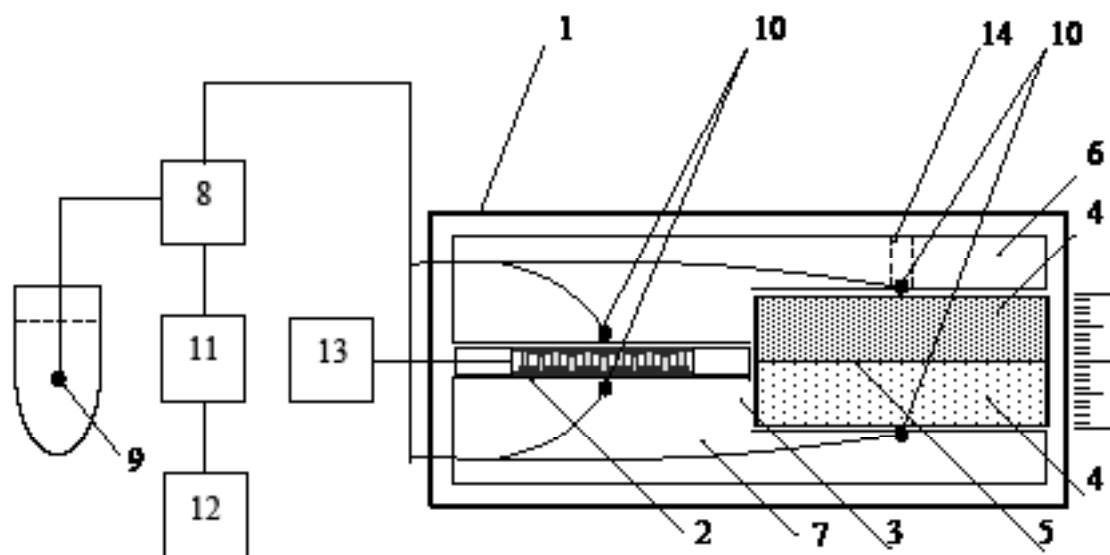


Рис.1. Схема экспериментального стенда для изучения процессов теплообмена в термоэлектрическом нуле-термостате

Fig.1. Scheme of an experimental stand for studying heat transfer processes in a thermoelectric null-thermostat

Для снижения влияния внешних факторов, в том числе уменьшения теплообмена с окружающей средой, конструкция размещается в теплоизоляционном кожухе 1. Для компенсации изменений в объеме при фазовых переходах рабочего вещества используется отводная трубка 14.

Для проведения замеров значений температуры в характерных точках конструкции, использовались медь-константановые термопары 10, опорные спаи которых размещены в сосуде Дьюара 9, заполненном тающим льдом. Сигналы с термопар через многоканальный переключатель 8 поступали на измерительный комплекс 11, значения измеренного сигнала с которого передавались на персональный ЭВМ 12 посредством интерфейса связи RS-232. ТЭМ питается от управляемого источника электрической энергии 13, величина силы тока и напряжения в цепи контролируется с помощью встроенного в источник электрической энергии 13 вольтметра и амперметра. Для исследования процессов теплообмена, осуществлялось визуальное наблюдение за перемещением границы раздела фаз 5, образующейся в результате плавления рабочего вещества 4, изначально находящегося в твердой фазе (лед) в цилиндрической камере 3. Регистрировались значения температур у нижнего и верхнего ос-

нований цилиндрической камеры 3, а также, на горячем и холодном спае ТЭМ 2 с помощью термопар 10. Сила тока питания ТЭМ варьировались в пределах от 2 до 6 А.

Обсуждение результатов. На основе разработанного макета были проведены экспериментальные исследования термоэлектрического нуля-термостата на эффекте пограничного слоя плавления.

Исследования проводились при использовании в качестве рабочего вещества дистиллированной воды с теплотой плавления $335 \cdot 10^3$ Дж/кг, теплоемкостью 4200 Дж/К·кг и плотностью 1000 кг/м³.

Визуальное наблюдение за процессами плавления и затвердевания в исследуемой полости с веществом выявило наличие четкой поверхности раздела твердой и жидкой фаз. При этом поверхность раздела фаз перемещалась в плоскости, параллельной поверхности нагрева и охлаждения. Это позволяет утверждать, что граничные условия, принятые в математическом описании соответствуют физической картине процесса превращения.

На рис.2-5 приведены данные, полученные при экспериментальном исследовании опытного образца термоэлектрического нуля-термостата.

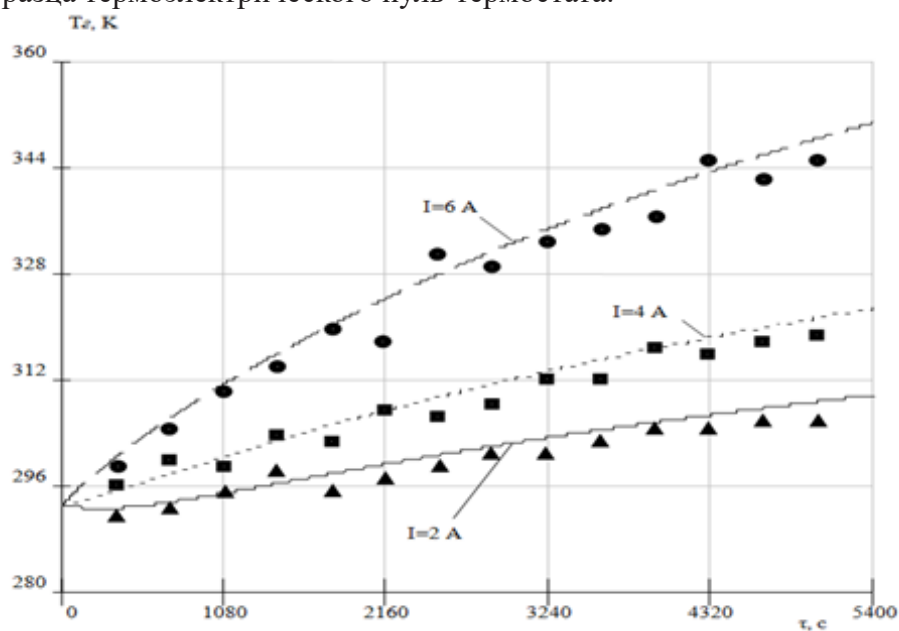


Рис.2. Зависимость температуры верхнего основания цилиндрической камеры от времени при различных токах питания ТЭМ

Fig.2. Dependence of the temperature of the upper base of a cylindrical chamber on time at different TEM supply currents

Представлены зависимости изменения температуры верхнего и нижнего основания рабочей камеры, а также границы раздела фаз во времени, продолжительности времени полного проплавления льда от тока питания ТЭМ, разности температур соответственно между поверхностью холодного спае ТЭМ и нижнего основания рабочей камеры и поверхностью горячего спае термомодуля и верхнего основания рабочей камеры.

Согласно полученным зависимостям увеличение силы тока питания ТЭМ, связанное с возрастанием величины тепловых потоков на нижнем и верхнем основании рабочей камеры приводит соответственно к увеличению температуры верхнего и нижнего основания камеры. Так увеличение тока питания ТЭМ с 2 до 4 А через 1,5 ч увеличивает значение температуры верхнего основания камеры с 309 до 324 К, а нижнего основания камеры снижает с 267 до 258 К. Причем как следует из приведенных данных изменение температуры верхнего основания ощутимее, чем нижнего.

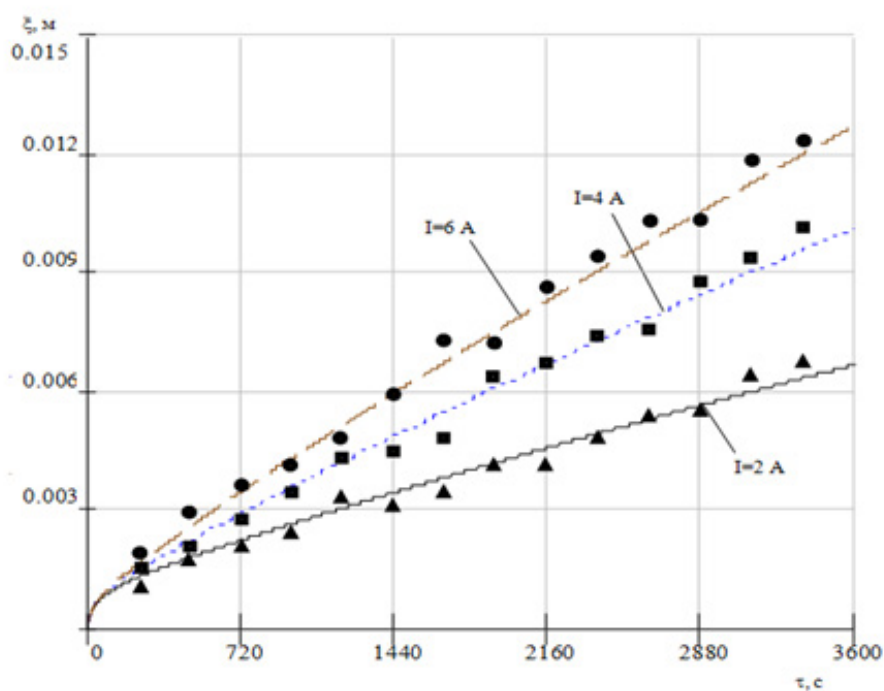


Рис.3. Зависимость изменения координаты границы раздела фаз во времени при различных значениях тока питания ТЭМ

Fig.3. Dependence of the change in the coordinates of the phase interface over time at different values of the TEM supply current

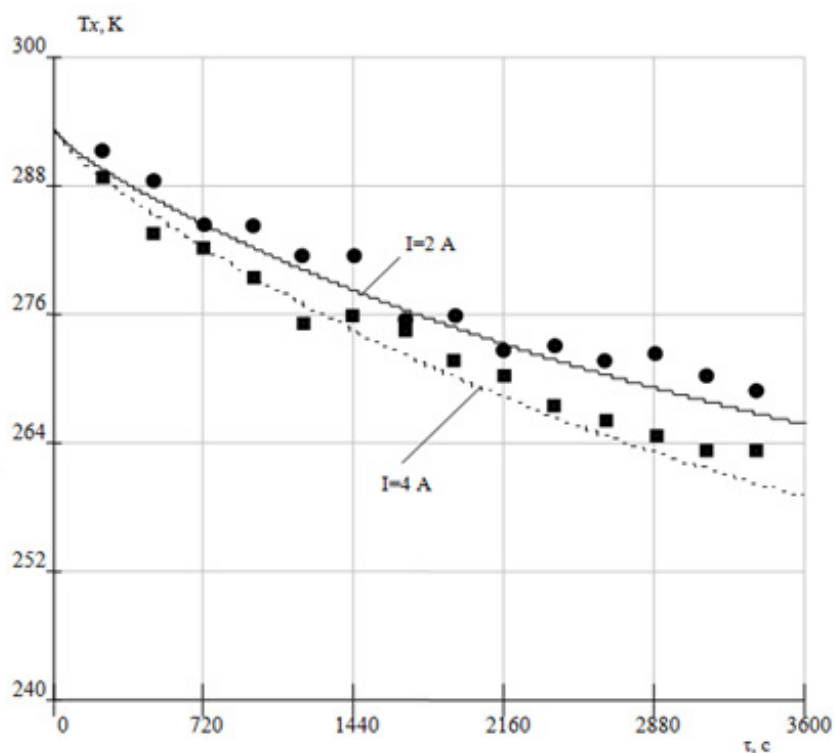


Рис.4. Зависимость температуры нижнего основания цилиндрической камеры от времени

Fig.4. Dependence of the temperature of the lower base of a cylindrical chamber on time

Данное обстоятельство связано с более значительным ростом величины тепловыделений на горячем спае ТЭМ (теплопроизводительности) по сравнению с ростом ее холодопроизводительности при увеличении энергопотребления. Поэтому увеличение тока питания ТЭМ ускоряет процесс проплавления льда.

Согласно полученным данным при токе 2, 4 и 6 А скорость перемещения границы раздела фаз составляет соответственно 0,007 м/ч, 0,01 м/ч и 0,013 м/ч. При этом длительность полного проплавления льда, соответствующая продолжительности функционирования нуль-термостата при изменении тока питания ТЭБ с 2 до 7 А сокращается с $1,91 \cdot 10^4$ с до $1,38 \cdot 10^4$. Отсюда следует необходимость ограничения силы тока питания ТЭМ верхним пределом, соответствующим необходимой продолжительности нуль-термостата.

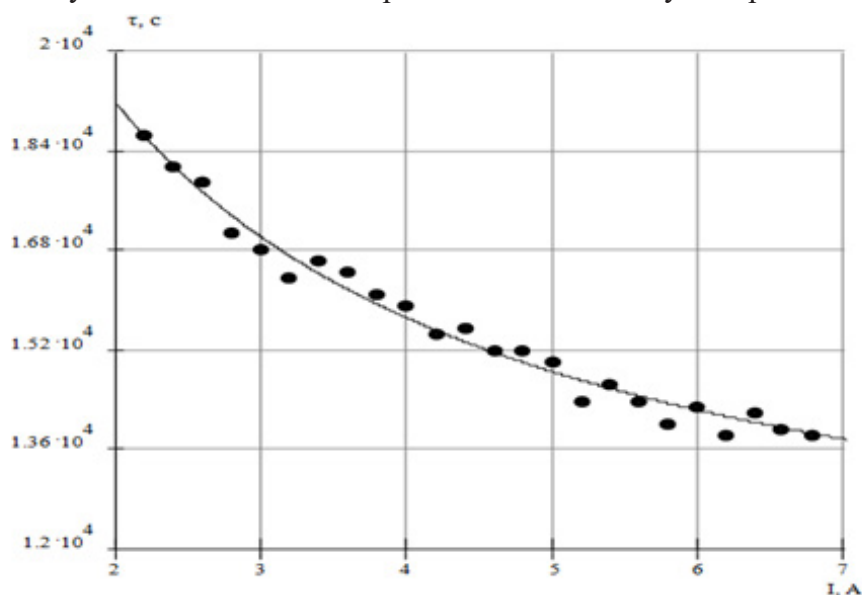


Рис.5. Зависимость изменения времени полного проплавления рабочего вещества от тока питания ТЭМ

Fig.5. Dependence of change in time of complete penetration working substance from the TEM supply current

Для оценки потерь теплоты на теплопроводящих пластинах получены данные, где представлено изменение во времени разности температур соответственно горячего спае ТЭМ и верхнего основания рабочей камеры и нижнего основания рабочей камеры и холодного спае ТЭМ. Как следует из представленных графиков в первом и втором случаях в начальный момент времени после включения прибора (подвода тока к термомодулю) данные разности при токах 4 и 6 А для верхнего основания составляют 10,5 и 11,5 К, а для нижнего 12 и 14,5 К. Далее, их величина уменьшается и при выходе системы на стационарный тепловой режим разности температур между верхним и нижним основанием рабочей камеры и горячим и холодным спаем ТЭМ при токах питания 4 и 6 А составляют соответственно 4 и 5 К. Результаты сравнения расчетных [20] и экспериментальных значений, приведенные на рис.2-5 показывают их удовлетворительную сходимость. Отличие результатов расчета от экспериментальных данных не превышает 7 %.

Вывод. Разработана конструкция термоэлектрического нуль-термостата. Она реализована в виде емкости, заполненной рабочим веществом (лед, вода), находящемся в состоянии фазового перехода. При этом на нижней поверхности осуществляется отток тепла за счет ее сопряжения с холодными спаями ТЭМ, а на верхней поверхности имеет место подвод тепла. Величина теплового потока на нижней поверхности емкости соответствует холодопроизводительности ТЭМ, а тепловой поток на верхней поверхности зависит от теплопроизводительности ТЭМ и рассеянии тепла с боковой поверхности емкости.

Установлено, что скорость перемещения границы раздела фаз сильно зависит от величины тока питания термоэлектрической батареи, что соответствует тепловому потоку

на верхнем и нижнем основании рабочей камеры. Причем, как следует из приведенных данных, изменение температуры верхнего основания ощутимее, чем нижнего. При токе 2, 4 и 6 А скорость перемещения границы раздела фаз составляет соответственно 0,007 м/ч, 0,01 м/ч и 0,013 м/ч. При этом длительность полного проплавления льда, соответствующая продолжительности функционирования нуля - термостата при изменении тока питания ТЭМ с 2 до 7 А сокращается с $1,91 \cdot 10^4$ с до $1,38 \cdot 10^4$.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правомочность разработанной математической модели. Отличие расчетных данных от экспериментальных не превышает 7 % во всем диапазоне измерений.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомедов Р.А.-М. Охлаждающие системы на базе высокоэффективных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
2. Теория тепломассообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 464 с.
3. Александров А.А., Архаров А.М., Архаров И.А., [и др.]. Теплотехника. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 880 с.
4. Абоуеллаиль А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 70-78.
5. Прецизионный малогабаритный ноль-термостат. Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А. Патент на изобретение RU 2215270 С1, 27.10.2003. Заявка № 2002130184/28 от 11.11.2002.
6. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Набиев Н.А., Магомедова С.Г. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны // Медицинская техника. 2020. № 1. С. 40-43.
7. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives // Chemical engineering journal. 2022. Vol. 437. P.135268.
8. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement // Nano energy. 2021. Vol. 90. P. 106572.
9. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. 240 p.
10. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx // Journal of Thermoelectricity. 2015. № 2. P. 86-94.
11. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 419-430
12. Дашевский З.М., Константинов П.П., Скипидаров С.Я. Новое направление применения термоэлектрических преобразователей энергии // Физика и техника полупроводников. 2019. № 7. С.875-878.
13. Драбкин И.А., Ершова Л.Б. Гибридные режимы работы термоэлектрических модулей // Физика и техника полупроводников. 2022. № 1. С.13-17.
14. 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.
15. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D., [et al.] Distributed and localized cooling with thermoelectrics // Future energy. 2021. Vol. 5. P.748-51.
16. Sennoga T., Jie Z., Yuying A., Bo L. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. 2016. Vol. 65. P.114-121.
17. 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.
18. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Абдулхакимов У.И., Евдулов Д.В. Термоэлектрическая система для проведения тепловых косметологических процедур на лице // Медицинская техника. 2017. № 4. С.38-42.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Казумов Р.Ш. Экспериментальные исследования термоэлектрических теплообменных аппаратов проточного типа с тепловыми мостиками // Вестник Международной академии холода. 2010. № 4. С. 5-7.
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Губа А.А. Математическая модель термоэлектрического нуля-термостата // Известия вузов. Пищевые технологии. 2007. №4. С. 99-102.

References

1. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. Cooling systems based on high-current thermo-electric semiconductor converters. St. Petersburg: Politekhnik, 2020; 285. (In Russ)
2. Theory of heat and mass transfer. Sub. ed. A.I. Leontyev. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2018; 464. (In Russ)

3. Aleksandrov A.A., Arkharov A.M., Arkharov I.A., [etc.]. Heat engineering. M: MSTU im. N.E. Bauman, 2017; 880. (In Russ)
4. Abouellail A.A., Chan Ts., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of the thermoelectric method for monitoring the contact resistance. *Defectoscopy*. 2022; 12: 70-78. (In Russ)
5. Precision small-sized null thermostat. Ismailov T.A., Aminov G.I., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A. Patent for invention RU 2215270 C1, 10/27/2003. Application No. 2002130184/28 dated November 11, 2002. (In Russ)
6. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Nabiev N.A., Magomedova S.G. Model of a thermoelectric device for thermal influence on reflexogenic zones. *Medical technology*. 2020; 1: 40-43. (In Russ)
7. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
8. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021; 90: 106572.
9. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013; 240.
10. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2: 86-94.
11. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of heat exchangers of a thermoelectric cooling unit. *Thermal physics and aeromechanics*. 2022; 29(3): 419-430 (In Russ)
12. Dashevsky Z.M., Konstantinov P.P., Skipidarov S.Ya. New direction of application of thermoelectric energy converters. *Physics and technology of semiconductors*. 2019; 7:875-878. (In Russ)
13. Drabkin I.A., Ershova L.B. Hybrid operating modes of thermoelectric modules. *Physics and technology of semiconductors*. 2022; 1:13-17. (In Russ)
14. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices. *Chemical reviews*. 2020; 15:7399-515.
15. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D., [et al.] Distributed and localized cooling with thermoelectrics. *Future energy*. 2021; 5:748-51.
16. Sennoga T., Jie Z., Yuying A., Bo L. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016; 65:114-121.
17. Zhang L., Shi X.-L., Yang Y.-L., Chen Z.-G. Flexible thermoelectric materials and devices: from materials to applications. *Materials today*. 2021; 46:62-108.
18. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Abdulkhakimov U.I., Evdulov D.V. Thermoelectric system for carrying out thermal cosmetic procedures on the face. *Medical technology*. 2017; 4:38-42. (In Russ)
19. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Kazumov R.Sh. Experimental studies of flow-type thermoelectric heat exchangers with thermal bridges. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2010; 4: 5-7. (In Russ)
20. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Aminov G.I., Guba A.A. Mathematical model of a thermoelectric null-thermostat. *News of universities. Food technologies*. 2007; 4: 99-102. (In Russ)

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; ole-ole-ole@rambler.ru

Магомедов Давуд Ахмеднабиевич, доктор технических наук, профессор кафедры биотехнических и медицинских аппаратов и систем; kbimais@dstu.ru.

Магомедов Рамазан Магомедович, старший преподаватель кафедры информационной безопасности; indiansbobi@gmail.com.

Шихабидов Камал Асхабович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; shixabidov17@mail.ru.

Information about authors:

Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Davud Ak. Magomedov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems; kbimais@dstu.ru.

Ramazan M. Magomedov, Senior Lecturer, Information Security Department; indiansbobi@gmail.com.

Kamal A. Shikhabidov, Graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; shixabidov17@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 28.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 19.08.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.08.2023.