

Для цитирования: Кадилова Д.К. Термоэлектрический интенсификатор теплопередачи проточного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 68-76. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-68-76

For citation: Kadirova D.K. Flow type thermoelectric heat transfer intensifier. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 68-76. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-68-76

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.382

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-68-76

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИНТЕНСИФИКАТОР ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРОТОЧНОГО ТИПА

Кадилова Д.К.

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, д.70, Россия,
e-mail: kadirova.djamilya@yandex.ru

Резюме: *Цель.* Целью исследования является разработка конструкции, обеспечивающей повышение интенсивности теплообмена между средами и оптимизацию энергетических и массогабаритных показателей приборов. **Метод.** Применен метод теоретического исследования термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, в котором за счет использования принудительного продува воздушного потока вдоль спаев термоэлементов обеспечивается более высокий коэффициент теплообмена между последними и движущимися в транспортных зонах средами, температура которых подлежит изменению. **Результат.** Предложена конструкция термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, в которой для увеличения коэффициента теплообмена между спаями термоэлементов и движущимися в транспортных зонах средами использован принудительный продув воздушного потока в соответствующих зазорах посредством вентиляторных агрегатов. Рассмотрена модель прибора, построенная на основе решения уравнений теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах, поверхностям термоэлектрической батареи, зазорах между транспортными зонами и поверхностями батареи для условий прямого тока. Проведены теоретические исследования интенсификатора теплопередачи по разработанной модели. Получены зависимости изменения температуры сред на выходе интенсификатора теплопередачи от величины коэффициента теплообмена между спаями термоэлектрической батареи и воздушной средой в зазоре при фиксированной величине тока питания термоэлектрической батареи, равной 5 А. **Вывод.** Установлено, что увеличение разницы температур сред на входе способствует более резкому убыванию функций зависимости предельных длин термоэлектрической батареи от коэффициента теплообмена между спаями термоэлектрической батареи и воздушной средой в зазоре при постоянном токе питания.

Ключевые слова: термоэлектрический интенсификатор теплопередачи, термоэлектрическая батарея, температура, модель, движущаяся среда, коэффициент теплообмена

TECHNICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING FLOW TYPE THERMOELECTRIC HEAT TRANSFER INTENSIFIER

Djamilia K. Kadirova.

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: kadirova.djamilya@yandex.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a construction design that increases the intensity of heat exchange between media and optimises the energy and mass dimensions of the instrument indicators. **Methods** A method for the theoretical investigation of thermoelectric heat transfer intensifiers is used, which, by means of forced air flows along the junctions of thermoelements, provides a higher coefficient of heat exchange between media moving in transport zones with altering temperature. **Results** The construction of a thermoelectric heat transfer intensifier is proposed, which uses fan assemblies to force air flow in the respective gaps between the junctions of the thermoelements and the media moving in transport zones to increase the heat transfer coefficient. A device model based on the solution of the heat balance equations for media flows in transport zones, thermoelectric battery surfaces and gaps between transport zones and battery surfaces for direct flow conditions is considered. Theoretical studies of the heat transfer intensifier using the developed model were carried out. The dependencies of the media temperature alterations at the output of the heat transfer intensifier on the value of the heat transfer coefficient between the junctions of the thermoelectric battery and the air medium in the gap are determined for a fixed value of the thermoelectric battery supply current equal to 5 A. **Conclusion** It is established that an increase in media temperature difference at the input contributes to a sharper decrease in the dependencies of the limiting lengths of the thermoelectric battery on the heat transfer coefficient between the junctions of the thermoelectric battery and the air medium in the gap at a constant supply current.

Keywords: thermoelectric heat transfer intensifier, thermoelectric battery, temperature, model, moving medium, heat transfer coefficient

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретают задачи исследования специальных технических средств для обеспечения интенсивной теплопередачи от источников с высокими тепловыми нагрузками к приемникам теплоты с целью выравнивания температурных уровней объектов [1-4]. Данные вопросы особенно актуальны для утилизации теплоты, выделяемой при выполнении тех или иных технологических процессов на производстве, отводе теплоты от охлаждающих жидкостей тепловыделяющих элементов - ТВЭЛов - ядерных реакторов и т.п.

Постановка задачи. Одним из перспективных направлений при создании систем подобного типа является использование термоэлектрических преобразователей энергии, обеспечивающих построение экономичных, малогабаритных теплообменных аппаратов с широкими функциональными возможностями по поддержанию заданного теплового режима [6-12]. Так, в этой области можно выделить работы, где исследованы возможности применения термоэлектрических преобразователей энергии для интенсификации теплообмена между потоками двух жидких или газообразных сред [13-27].

Однако несмотря на наличие теоретических и экспериментальных исследований в данной области все еще остается актуальным вопрос по повышению интенсивности теплообмена между средами, оптимизации энергетических и массогабаритных показателей приборов.

Методы исследования. В целях проведения исследования разработана конструкция прибора для интенсификации процесса теплопередачи между потоками двух сред, структурная схема которого изображена на рис.1, а внешний вид на рис.2.

Аппарат состоит из термоэлектрической батареи (ТЭБ) 1, составленной из идентичных по размерам и физическим свойствам термоэлементов, питаемой источником электрической энергии (на рис.1 не показан), обе поверхности которой находятся на некотором расстоянии от стенок 2 транспортных зон 3 с движущимися в них средами 4.

В начале и конце транспортных зон 3 в направлении, перпендикулярном движению сред 4 устанавливаются вентиляторные агрегаты 5, запитываемые от того же источника электрической энергии, что и ТЭБ 1.

Вентиляторные агрегаты 5 осуществляют продув воздуха в зазоре между стенками 2 транспортных зон 3 и поверхностями ТЭБ 1, причем один вентиляторный агрегат работает на вдув воздушного потока, а второй на его выдув.

ТЭБ 1, транспортные зоны 3 и вентиляторные агрегаты 5 образуют жесткую механическую конструкцию посредством крепежных приспособлений 6.

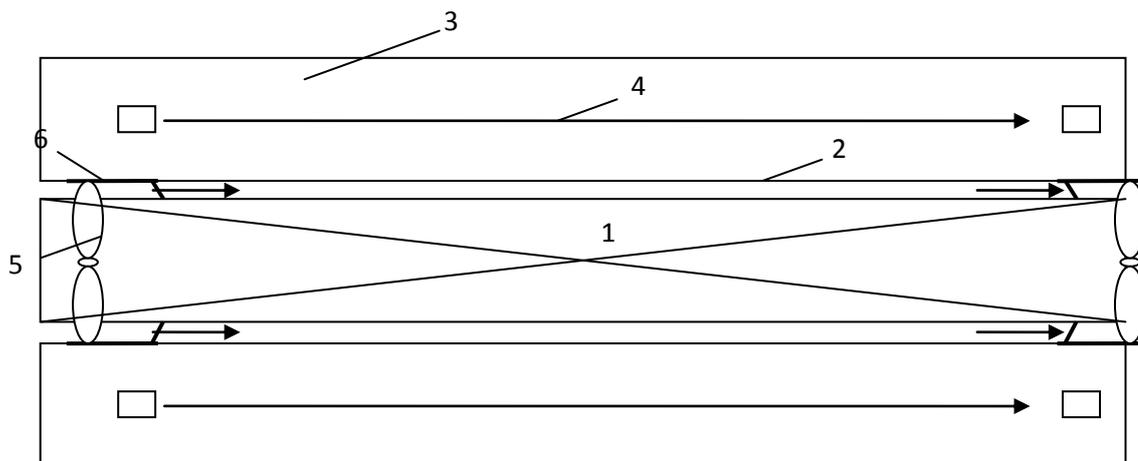


Рис.1. Структурная схема термоэлектрического интенсификатора теплопередачи
Fig.1. The structural scheme of the thermoelectric heat transfer intensifier



Рис.2. Внешний вид термоэлектрического интенсификатора теплопередачи
Fig.2. Appearance of the thermoelectric heat transfer intensifier

Термоэлектрический интенсификатор теплопередачи функционирует следующим образом.

При пропускании через ТЭБ 1 постоянного электрического тока от источника энергии на одних спаях термоэлементов будет поглощаться теплота Пельтье, а на других - выделяться.

Если холодные спаи термоэлементов будут находиться в непосредственной близости со стенкой 2 транспортной зоны 3 с горячей движущейся средой 4, а горячие спаи термоэлементов - со стенкой транспортной зоны с холодной движущейся средой, то за счет имеющегося перепада температур будет происходить интенсификация обмена тепловой энергией между двумя потоками сред. При этом продув воздуха в зазорах между стенками 2 транспортных зон 3 и поверхностями ТЭБ 1 воздушными агрегатами 5 даст возможность повысить коэффициент теплопередачи между ними за счет обеспечения режима вынужденной конвекции, при котором значение данного коэффициента выше, чем в случае кондуктивного механизма теплообмена.

Обсуждение результатов. Для рассмотренной конструкции разработана математическая модель, описывающая протекающие в приборе электро- и теплофизические процессы.

Модель построена на основе уравнений теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах, поверхностям ТЭБ, зазорах между транспортными зонами и поверхностями ТЭБ [5]. Рассматривается условие прямотока.

Уравнения теплового баланса в зазорах между стенками транспортных зон и спаями ТЭБ для приведенной схемы выглядят следующим образом:

$$W' \frac{dT_1}{dx} = \alpha' L (T_{1ТЭБ} - T_1) \quad (1)$$

$$W' \frac{dT_2}{dx} = \alpha' L (T_{2ТЭБ} - T_2) \quad (2)$$

где, $T_{1ТЭБ, 2ТЭБ}$ - температуры, соответственно, холодных и горячих спаев ТЭБ, $T_{1,2}$ - температуры воздушного потока в зазорах, W' - полная теплоемкость воздушной среды, протекающей вдоль спаев ТЭБ (в зазорах) в единицу времени (равна произведению массового расхода на удельную теплоемкость среды), L - длина транспортных зон, α' - коэффициент теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре.

Уравнения теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах определяются из соотношений:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 L (T_1' - T_1) \quad (3)$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 L (T_2' - T_2) \quad (4)$$

где, $T_{1,2}$ - температуры охлаждаемых и нагреваемых сред,

W_1 - полная теплоемкость среды, протекающей вдоль холодных спаев ТЭБ в единицу времени,

W_2 - полная теплоемкость среды, протекающей вдоль горячих спаев ТЭБ в единицу времени,

α' - коэффициент теплообмена между охлаждаемой воздушной средой в зазоре и охлаждаемой средой в транспортной зоне,

α_1 - коэффициент теплообмена между нагреваемой воздушной средой в зазоре и нагреваемой средой в транспортной зоне

Уравнения теплового баланса на спаях ТЭБ со стороны термоэлементов имеют вид:

$$\alpha' (T_1' - T_{1ТЭБ}) = \bar{e} j T_{1ТЭБ} - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2ТЭБ} - T_{1ТЭБ}), \quad (5)$$

$$\alpha' (T_{2ТЭБ} - T_2') = \bar{e} j T_{2ТЭБ} + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2ТЭБ} - T_{1ТЭБ}), \quad (6)$$

где, \bar{e} - коэффициент термо-ЭДС термоэлементов,

j - плотность электрического тока,

ρ - удельное электрическое сопротивление ветвей термоэлементов,

λ - удельный коэффициент теплопроводности ветвей термоэлемента, d - высота ветвей термоэлементов.

Решение системы уравнений (1)-(6) произведено численным методом конечных элементов. Результаты расчетов в представленные на рис.3.

В качестве среды выступала вода, характеристики термоэлементов следующие: $\lambda=1,5$ Вт/(м·К), $\rho=10,65 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\bar{\epsilon}=0,2 \cdot 10^{-3}$ В/К, $d=0,003$ м.

Коэффициенты теплообмена: $\alpha_1=\alpha_2=100$ Вт/(м²·К), величины $W'=90$ Вт/К, $W_1=W_2=120$ Вт/К.

Получены зависимости изменения температуры среды на выходе интенсификатора теплопередачи от величины коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре при фиксированной величине тока питания ТЭБ, равной 5 А, представленные на рис.3. Согласно полученным данным увеличение значения α' дает возможность снизить (увеличить) их температуру на выходе из теплообменного аппарата при его одинаковой длине.

Изменение α' на 10 Вт/(м²·К) в среднем изменяет температуру нагреваемой среды на 2 К, а нагреваемой - на 3 К.

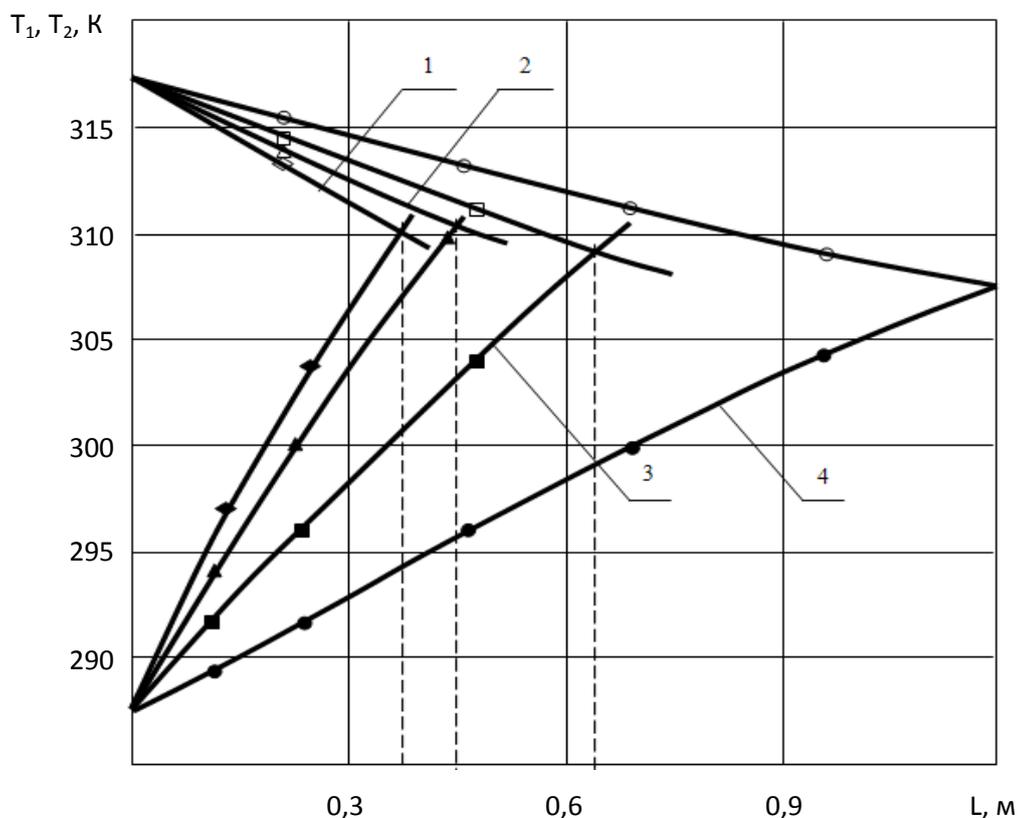


Рис.3. Изменение температуры сред на выходе из интенсификатора теплопередачи в зависимости от длины при различных величинах α' (1 - $\alpha' = 90$ Вт/(м²·К); 2 - $\alpha' = 80$ Вт/(м²·К); 3 - $\alpha' = 70$ Вт/(м²·К); 4 - $\alpha' = 60$ Вт/(м²·К))

Fig.3. The change in the temperature of the media at the exit from the heat transfer intensifier, depending on the length for different values of α' (1 - $\alpha' = 90$ W / (m²K), 2 - $\alpha' = 80$ W / (m²K), 3 - $\alpha' = 70$ W / (m²K), 4 - $\alpha' = 60$ W / (m²K))

На рис.4 представлены графики изменения предельных длин ТЭБ в зависимости от значения α' , т.е. тех длин, при которых температуры жидкостей на выходе из интенсификатора теплопередачи равны между собой. Как следует из представленных данных, чем больше разница температур теплоносителей на входе в устройство, тем больше длина ТЭБ, необходимая для удержания режима интенсификации. Графики носят монотонно убывающий характер в зависимости от коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре. Чем

больше разница температур сред на входе, тем резче убывают функции $L=L(\alpha')$ при постоянном токе питания $I=5A$.

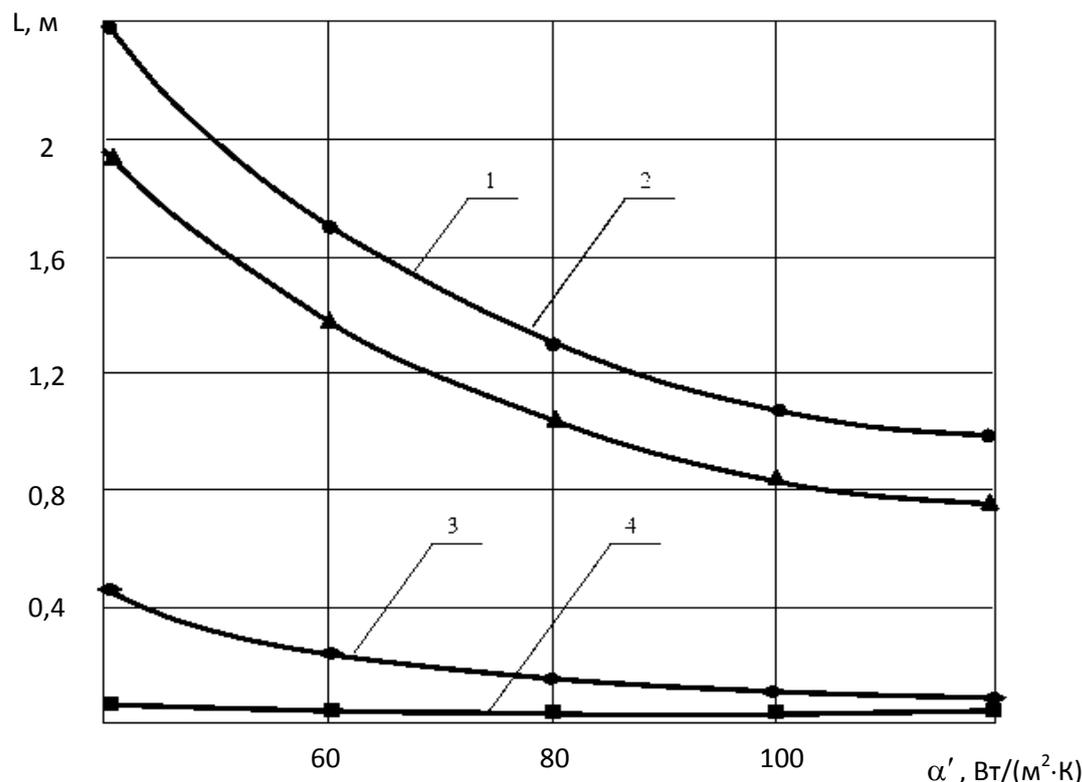


Рис.4. Зависимости предельных длин ТЭБ в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных значениях перепада температуры на входе в интенсификатор теплопередачи (1 – $\Delta T = 40$ К; 2 - $\Delta T = 30$ К; 3 - $\Delta T = 10$ К; 4 - $\Delta T = 5$ К; $I = 5A$)

Fig.4. Dependence of the limiting lengths of the TEB in the intensification mode on the filling factor for different values of the temperature difference at the entrance to the heat transfer intensifier (1 - $\Delta T = 40$ К, 2 - $\Delta T = 30$ К, 3 - $\Delta T = 10$ К, 4 - $\Delta T = 5$ К, $I = 5A$)

Вывод. Предложена конструкция термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, в которой для увеличения коэффициента теплообмена между спаями термоэлементов и движущимися в транспортных зонах средами использован принудительный продув воздушного потока в соответствующих зазорах посредством вентиляторных агрегатов.

Разработана модель термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, построенная на основе решения уравнений теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах, поверхностям ТЭБ, зазорах между транспортными зонами и поверхностями ТЭБ для условий прямого тока.

Установлено, что увеличение значения коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре дает возможность снизить (увеличить) их температуру на выходе из теплообменного аппарата при его одинаковой длине, при этом изменение α' на $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в среднем изменяет температуру нагреваемой среды на 2 К , а нагреваемой - на 3 К . Увеличение разницы температур сред на входе способствует более резкому убыванию функций зависимости предельных длин ТЭБ от коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре при постоянном токе питания.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника. - 2005. - 534 с.

2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. - Киев: Наукова Думка. - 1979. - 768 с.
3. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. - 2009. - №7. - С. 34-37.
4. Малкович Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург. - 2008. - С. 462-468.
5. Дрейцер Г. А., Лобанов И.Е. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока //ИФЖ. 2003. Т.76, №1. 46—51 с.;
6. Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е. Расчет конвективного теплообмена в трубах с периодическими выступами // Проблемы гидродинамики и теплообмена в энергетических установках. М.: Изд. МЭИ. 2003. Т.1. 57—60 с.;
7. Осипов М. И., Олесевич Р. К., Олесевич К. А. Экспериментальное и численное исследование теплообменных аппаратов шнекового типа //Труды Второй Российской национальной конференции по тепломассообмену. М.: МЭИ. 2002. Т.6. 159—162 с.;
8. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Под общ. Ред. Ю.Ф. Гортышова / Казань.2012. Изд. дом «Логос» -559с
9. Гортышов Ю. Ф., Олимпиаев В. В., Попов И. А. Эффективность промышленно эффективных интенсификаторов теплопередачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Известия РАН, Энергетика. 2002. № 3. 102—118 с.;
10. Walker, G., Industrial Heat Exchangers: A Basic Guide, 2nd ed., Hemisphere Publishing, Washington, 1990.
11. Hewitt, G.F., Heat Exchanger Design Handbook, Begell House, 1990
12. Shah, R.K. Compact Heat Exchangers – Recuperators and Regenerators. In Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Kreith F., Yogi Goswami D., Chap.13. eds. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
13. Zimparov V. D. Extended performance evaluation criteria for heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant wall temperatures //Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. v.43. No 17. P.3137—3150;
14. Chinangad R. S., Master B. I., Thome J. R. Helixchanger Heat Exchanger: Single — Phase and Two-Phase Enhancement // Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries. New York, Wallingford (UK). Begell House, Inc. 1999. P.471—477;
15. Dreitser G. A. Modern problems of cryogenic heat transfer and its enhancement (Generalization of experimental results. Practical recommendations and different applications) //Low Temperature and Cryogenic Refrigeration. Dordrecht, Boston, London. Kruger Academic Publications. 2003. P.201—220;
16. O.G. Martynenko International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 41, Issue 11, June 1998, Pages 1371-1384
17. Muhammad Sajid, Ibrahim Hassan, Aziz Rahman. An overview of cooling of thermoelectric devices// School of Mechanical & Manufacturing Engineering (SMME), National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan/ Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar. Energy. Volume 118, 1 January 2017, Pages 1035–1043
18. Kazuaki Yazawaa, Ali Shakouria, Terry J. Hendricksb. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes// Birk Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA/ NASA - Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA. Volume 185, 15 December 2016, Pages 598–602
19. Ahmed El-Desouky, Michael Carter, Matthieu A. Andre, Philippe M. Bardet, Saniya LeBlanc. Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices//Department of Mechanical & Aerospace Engineering, The George Washington University, USA. Progress in Materials Science. Volume 83, October 2016, Pages 330–382
20. Chhatrasal Gaynera, Kamal K. Kara. Recent advances in thermoelectric materials// Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Materials Science Programme, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India/ Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India. Applied Energy. Volume 168, 15 April 2016, Pages 65–74
21. T. Zhang. New thinking on modeling of thermoelectric devices//Institute of Northern Engineering, College of Engineering and Mines, University of Alaska Fairbanks, 306 Tanana Drive, Duckering Building, Fairbanks, AK 99775, USA/ Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 38, October 2014, Pages 903–916
22. Elena Otilia Virjogheb, Diana Enescua, Elena Otilia Virjogheb. A review on thermoelectric cooling parameters and performance// Department of Electronics, Telecommunications and Energy, Valahia University of Tar-

- goviste, Unirii Avenue 18-20, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania/ Department of Automatics, Informatics and Electrical Engineering, Valahia University of Targoviste, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania. Applied Thermal Engineering. Volume 66, Issues 1–2, May 2014, Pages 15–24
23. Dongliang Zhao, Gang Tan. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications// University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering, 1000 E. University Avenue, Dept. 3295, Laramie, WY 82071, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 23, Issue 8, June 2003, Pages 913–935
24. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications// Institute of Building Technology, School of the Built Environment, The University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK. Applied Thermal Engineering. Volume 64, Issues 1–2, March 2014, Pages 252–262
25. J. Steven Browna, Piotr A. Domanskib. Review of alternative cooling technologies// Department of Mechanical Engineering, Catholic University of America, 620 Michigan Avenue, NE, Washington, DC 20064, USA/ National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 63, Issue 1, 5 February 2014, Pages 33–39
26. Fábio A.S. Mota, Mauro A.S.S. Ravagnani, E.P. Carvalho. Optimal design of plate heat exchangers// Chemical Engineering Graduate Studies Program, State University of Maringá, Av. Colombo, 5790 Maringá, PR, Brazil. Возобновляемые и устойчивые источники энергии комментарии. Том 16, Выпуск 4, Май 2012, Стр. 1883-1891
27. Mazen M. Abu-Hader. Plate Heat Exchangers: Recent Achievements // Faculty of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Technology, Ltd.-Balka Applied University Address: P. O. Box: 9515 Al-weibedah, 11191, Amman, Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 9, December 2011, Pages 4855-4875

References:

1. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensivatory teploperedachi. SPb.: Politehnika; 2005. 534 s. [Ismailov T.A. Thermal-electric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint-Petersburg: Politehnika; 2005. 534 p. (in Russ.)]
2. Anatyshuk L.I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 s. [Anatyshuk L.I. Thermal elements and thermal-electric devices. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 p. (in Russ.)]
3. Bulat L.P. Prikladnye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. [Bulat L.P. Applied studies and developments in the area of thermal-electric cooling in Russia. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. (in Russ.)]
4. Malkovich B.E.-Sh. Termoelektricheskie moduli na osnove splavov tellurida vismuta. Doklady XI Mezhdunarodnogo seminar "Termoelektriki i ikh primeneniye". Sankt-Peterburg; 2008. S. 462-468. [Malkovich B.E.-Sh. Thermal electric units based on the bismuth telluride alloys. Proceedings of XI Interstate seminar "Thermo-electrics and their application". Sankt-Peterburg; 2008. P. 462-468. (in Russ.)]
5. Dreytser G.A., Lobanov I.E. Predel'naya intensivatsiya teploobmena v trubakh za schet iskusstvennoy turbulizatsii potoka. IFZh. 2003;76(1):46-51. [Dreytser G.A., Lobanov I.E. Terminal heat transfer intensification in pipes due to artificial flow turbulisation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003;76(1):46-51. (in Russ.)]
6. Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Raschet konvektivnogo teploobmena v trubakh s periodicheskimi vystupami. Problemy gidrodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh. M.: Izd. MEI; 2003;1:57-60. [Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat exchange in pipes with periodical protrusions. The problems of hydro-dynamics and heat exchange in energetic facilities. Moscow: Izd. MEI; 2003;1:57-60. (in Russ.)]
7. Osipov M.I., Olesevich R.K., Olesevich K.A. Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie teploobmennykh apparatov shnekovogo tipa. Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teplomassoobmenu. M.: MEI. 2002;6:159-162. [Osipov M.I., Olesevich R.K., Olesevich K.A. Experimental and numeric study of heat exchange apparatus of screw type. Proceedings of the Second Russian national conference on heat and mass exchange. Moscow: MEI. 2002;6:159-162. (in Russ.)]
8. Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primeneniye intensivatsii teploobmena. Pod obshch. Red. Yu.F. Gortyshova. Kazan': Izd. dom "Logos"; 2012. 559 s. [Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Physical fundamentals and industrial application of heat exchange intensification. Ed. Yu.F. Gortyshov. Kazan': Izd. dom "Logos"; 2012. 559 p. (in Russ.)]
9. Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V., Popov I.A. Effektivnost' promyshlenno effektivnykh intensivatorov teploperedachi (Obzor. Analiz. Rekomendatsii). Izvestiya RAN, Energetika. 2002;3:102-118. [Gortyshov

- Yu.F., Olimpiev V.V., Popov I.A. The efficiency of industrially-effective heat transfer intensifiers (Review. Analysis. Recommendations). Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2002;3:102-118. (in Russ.)]
10. Walker G. Industrial Heat Exchangers: A Basic Guide, 2nd ed., Washington: Hemisphere Publishing: 1990.
 11. Hewitt G.F. Heat Exchanger Design Handbook. Begell House; 1990.
 12. Shah R.K. Compact Heat Exchangers - Recuperators and Regenerators. In Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Kreith F., Yogi Goswami D., Chap.13. eds. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2007.
 13. Zimparov V.D. Extended performance evaluation criteria for heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant wall temperatures. Int. J. Heat Mass Transfer. 2000;43(17):3137-3150.
 14. Chinangad R.S., Master B.I., Thome J.R. Helixchanger Heat Exchanger: Single - Phase and Two-Phase Enhancement. Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries. New York, Wallingford (UK): Begell House, Inc; 1999. P. 471-477.
 15. Dreitser G.A. Modern problems of cryogenic heat transfer and its enhancement (Generalization of experimental results. Practical recommendations and different applications). Low Temperature and Cryogenic Refrigeration. Dordrecht, Boston, London: Kruger Academic Publications; 2003. P. 201-220.
 16. Martynenko O.G. Heat and mass transfer bibliography—CIS works. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998;41(11):1371-1384.
 17. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices. Energy. 2017;118:1035-1043.
 18. Yazawaa K., Shakouria A., Hendricks T.J. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes. Energy. 2016;185:598-602.
 19. El-Desouky A., Carter M., Andre M.A., Bardet P.M., LeBlanc S. Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices. Progress in Materials Science. 2016;83:330-382.
 20. Gaynera C., Kara K.K. Recent advances in thermoelectric materials. Applied Energy. 2016;168:65-74.
 21. Zhang T. New thinking on modeling of thermoelectric devices. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;38:903-916.
 22. Virjogheb E.O., Enescua D. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. Applied Thermal Engineering. 2014;66(1-2):15-24.
 23. Zhao D., Tan G. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. Applied Thermal Engineering. 2003;23(8):913-935.
 24. Riffat S.B., Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. Applied Thermal Engineering. 2014;64(1-2):252-262.
 25. Brown J.S., Domanski P.A. Review of alternative cooling technologies. Applied Thermal Engineering. 2014;63(1):33-39.
 26. Mota F.A.S., Ravagnani M.A.S.S., Carvalho E.P. Optimal design of plate heat exchangers. Applied Thermal Engineering. 2014;63:33-39.
 27. Mazen M.A.-K. Plate heat exchangers: Recent advances. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012;16(4):1883-1891.

Сведения об авторе:

Кадилова Джамиля Кадировна – соискатель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the author:

Dzhamilya K. Kadirova – aspirant, Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 29.05.2017.

Received 29.05.2017.

Принята в печать 17.06.2017.

Accepted for publication 17.06.2017.