

Для цитирования: Марченко А.С., Сулин А.Б. Эффективные решения теплообменников для термоэлектрических трансформаторов теплоты. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):63-72 .DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72

For citation: Marchenko A.S., Sulin A.B. Effective solutions for thermoelectric heat transformers using heat converters. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43(4):63-72 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.565.83

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛОТЫ

Марченко А.С.², Сулин А.Б.¹

^{1,2}Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий механики и оптики,
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский,
¹e-mail:miconata@rambler.ru, ²e-mail:mandserg@gmail.com

Резюме: Цель. В статье на основании анализа причин термодинамических потерь в термоэлектрических трансформаторах теплоты показано, что на данном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние потери в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. Внешние технические потери обусловлены необратимостью процессов в элементах системы. Они определяются ее техническим решением и могут быть снижены благодаря особым подходам к конструированию и проектированию. **Методы.** Приведены примеры эффективных технических решений термоэлектрических блоков типа «воздух-воздух» и «воздух-жидкость», в которых минимизированы внешние потери за счет применения теплообменников на базе двухфазных термосифонов специальной конфигурации. Для воздушных теплообменников с классическим цельнометаллическим оребрением на основании методики анализа чувствительности выполнены расчеты зависимости эффективности термоэлектрического блока от характеристик теплообменника. **Результаты.** По результатам расчетов построены зависимости холодопроизводительности термоэлектрического блока, коэффициента преобразования энергии, эксергетического коэффициента полезного действия (КПД) и относительного эксергетического КПД от характеристик геометрии воздушного канала теплообменника. Зависимости холодопроизводительности термоэлектрического блока и коэффициента преобразования приведены в функции от материала и толщины ребра, от межреберного расстояния и от высоты канала воздушного теплообменника. **Вывод.** В качестве примеров эффективных технических решений предложены тепловые схемы термоэлектрических трансформаторов теплоты с изменением направления тепловых потоков и с теплообменниками на базе двухфазных термосифонов. Классические решения цельнометаллических теплообменников также могут быть оптимизированы на основе методологии анализа чувствительности систем.

Ключевые слова: термоэлектрический блок, характеристики теплообменника, анализ чувствительности, двухфазный термосифон

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
EFFECTIVE SOLUTIONS FOR THERMOELECTRIC HEAT TRANSFORMERS
USING HEAT CONVERTERS

Andrey S. Marchenko², Alexander B. Sulin¹.

^{1,2}St. Petersburg National Research Institute

Mechanics and Optics Information Technologies,

49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

¹e-mail:miconta@rambler.ru, ²e-mail:mandserg@gmail.com

Abstract: Objectives. The present article is based on the examination of the causes of thermodynamic heat loss in thermoelectric heat transformers. It is shown that the external loss in a real system is comparable to the internal loss in thermoelements at the present stage of thermoelectric engineering instrument development. External technical losses are attributed to the irreversibility of processes in system elements. These are determined by their technical resolution and can be lowered by means of specific approaches to design and construction. **Methods.** Examples of effective technical solutions for thermoelectric units of the "air-to-air" and "air-to-liquid" types, in which external losses are minimised due to the application of heat exchangers based on two-phase thermosyphons of special configuration, are given. For air coolers with a classic all-metal fin design based on the sensitivity analysis method, the dependence of the thermoelectric unit efficiency on the heat exchanger characteristics was calculated. **Results.** As a result, calculations of the dependence of cooling unit refrigeration capacity on the energy transformation ratio, power transfer coefficient, energy conversion efficiency (ECE) and the relative energetic efficiency of ECE were performed based on the characteristic of the heat exchanger air passage geometry. There is a dependence relationship between the thermoelectric conversion cooling unit refrigeration capacity and transformation ratio within the function of material and thickness of the ribs on the intercostal distance and on the height of the air heat exchanger channel. **Conclusion.** Examples of the proposed effective thermal circuit technical solutions are based on thermoelectric heat transformers with heat flow direction change and with heat exchangers, which are based on two-phase thermosyphons. Classical solutions of all-metal heat exchangers can also be optimised on the basis of the sensitivity analysis methodology.

Keywords: thermoelectric unit, heat exchanger characteristics, sensitivity analysis, two-phase thermosyphon

Введение. Сфера практического применения эффекта Пельтье растет не только в традиционных его приложениях таких как космос, военная техника, теплофизическое приборостроение, но также и в медицине, биологии, промышленности, бытовой технике и др. [1,2]. Принято считать, что термоэлектрические системы начинают конкурировать с традиционными методами искусственного охлаждения в диапазоне холодопроизводительности до нескольких сотен ватт, а для объектов со специальными требованиями по массогабаритным, виброакустическим и надежностным характеристикам практически не имеют конкурентов [3].

Постановка задачи. В этой связи представляет интерес анализ причин, вызывающих термодинамические потери в термоэлектрических трансформаторах теплоты (ТТТ) для выявления путей повышения их эффективности. Анализ эффективности ТТТ, основанный на эксергетическом методе, позволяет выявить составляющие внутренних и внешних потерь эксергии в данных системах [4]. Внутренние потери, определяемые необратимыми процессами в полупроводниках при реализации эффектов Пельтье, Джоуля и Томсона, являются

функцией характеристик термоэлектрического вещества и в данной статье не рассматриваются. В то же время внешние (технические) потери эксергии в ТТТ обусловлены необратимостью процессов в элементах системы, определяются ее техническим решением и могут быть снижены благодаря особым подходам к конструированию и проектированию.

На рис. 1 приведена конфигурация реального и идеального ТТТ. В то время как реальная система, функционирующая в диапазоне температур сред T_1 и T_2 , в общем случае, состоит из термоэлектробатареи, теплообменных устройств и побудителей расхода.

Под идеальным термоэлектрическим трансформатором теплоты (ТТТ) понимается система с нулевыми внешними потерями, т.е. система без термических и гидравлических сопротивлений и с бесконечно большой теплоемкостью теплоносителей. Практически, идеальным ТТТ при данном подходе является термоэлектробатарея, у которой температуры теплопоглощающей и тепловыделяющей стороны постоянны и равны температурам теплоносителей на входе в систему.

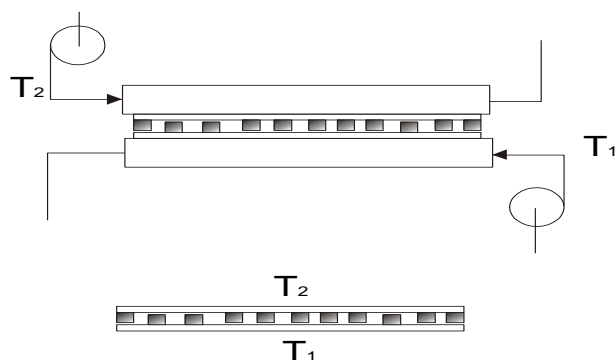


Рис.1. Конфигурация реального и идеального термоэлектрического трансформатора теплоты (ТТТ)

Fig.1. The configuration of a real and ideal thermoelectric heat transformer (TTT)

На рис. 2 приведен пример расчета относительного эксергетического к.п.д. η_e^* для некоторого реального ТТТ.

$$\eta_e^* = \eta_e^{(p)} / \eta_e^{(и)} = E''^{(p)} / E''^{(и)},$$

где $\eta_e^{(p)}$ – эксергетический к.п.д. реальной системы; $\eta_e^{(и)}$ – эксергетический к.п.д. идеальной системы; E'' – полезно используемая эксергия.

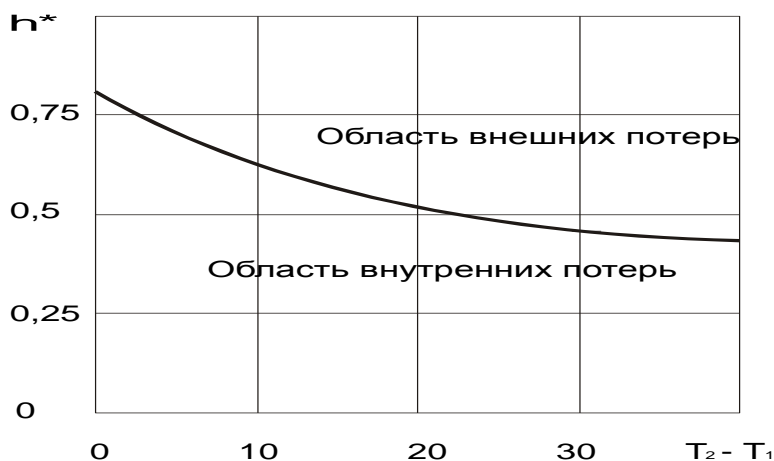


Рис. 2. Относительный эксергетический к.п.д. реального термоэлектрического трансформатора теплоты (ТТТ)

Fig. 2. Relative exergetic coefficient of efficiency real thermoelectric heat transformer (TTT)

Из приведенного примера видно, что на данном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние технические потери эксергии в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. В этой связи исследования, направленные на сни-

жение потерь, определяемых техническим решением ТТТ, так же актуальны, как и повышение параметра добротности.

Методы исследования. Результаты анализа технических потерь показывают, что они складываются из нескольких составляющих:

- Потери, определяемые контактными термическими сопротивлениями между термоэлектробатареей и теплообменниками.
- Теплоперетоки по элементам конструкции, обеспечивающим сборку устройства в единую конструкцию.
- Термические сопротивления тепловому потоку за счет теплопроводности в стенках теплообменников.
- Термические сопротивления теплоотдаче на поверхностях теплообмена.

В каждом ТТТ может быть выделена сборочная единица «теплопоглощающий теплообменник – термоэлектробатарея – тепловыделяющий теплообменник». Эффективность и надежность ТТТ в основном определяется конструктивным решением данной сборочной единицы.

В этой связи рассмотрим три основных подхода к проектированию термоэлектрического блока: схема с общими теплообменниками на теплопоглощающей и тепловыделяющей сторонах (рис. 3а); схема с индивидуальными теплообменниками на одной стороне и с общим теплообменником на другой (рис. 3б) и схема с индивидуальными теплообменниками как на теплопоглощающей, так и на тепловыделяющей стороне (рис. 3в).

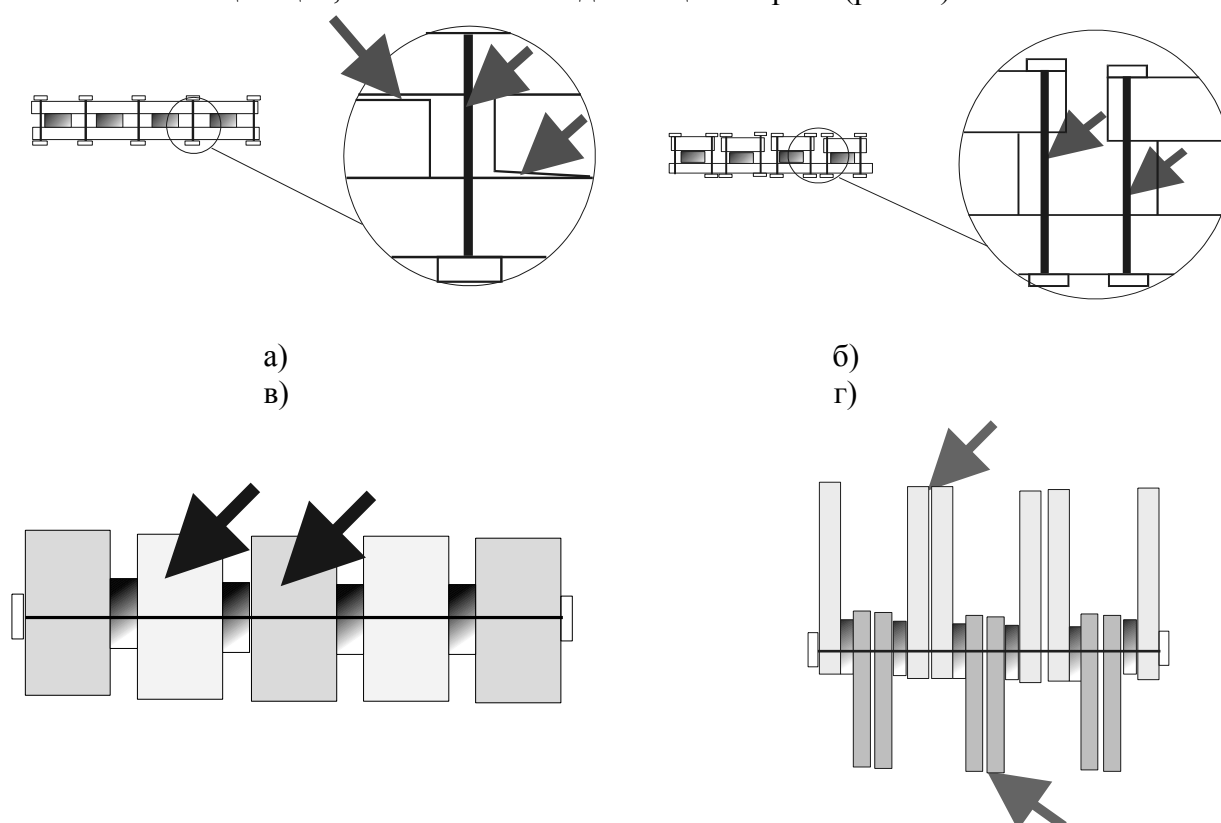


Рис. 3. Схемные решения сборочных единиц термоэлектрических блоков

Fig. 3. Circuit solutions of thermoelectric unit assemblies

Достоинством схемы, приведенной на рис. 3а, является относительная простота, технологичность изготовления теплообменников и обеспечение целостности устройства простыми средствами. К недостаткам этой схемы относятся: повышенные требования к плоскопараллельности поверхностей термоэлектробатарей; повышенные требования к унификации термоэлектробатарей по толщине; недостаточная надежность в части устойчивости к термическим напряжениям в термоэлементах и элементах конструкции; теплоперетоки по элементам крепления; низкая ремонтпригодность. Кроме указанного, наличие общих теп-

лообменников снижает эффективность термоэлектрического блока при противоточном движении теплоносителей в связи с увеличением рабочей разности температур из-за теплопередачи вдоль основания теплообменников.

Важным преимуществом компоновки блока с отдельными теплообменниками, приведенной на рис. 3б, являются менее жесткие требования к плоскопараллельности и унификации термоэлектробатарей по толщине, а также меньшая чувствительность к термическим напряжениям. Но при этом возникают новые конструктивные сложности в части обеспечения целостности устройства. Остается нерешенной также задача по снижению теплоперетоков через элементы крепления.

На рис. 3в показано, что использование общих теплообменников позволяет решить как задачу обеспечения целостности конструкции, так и задачу снижения теплоперетоков по элементам крепления, не выдвигая при этом повышенных требований к плоскопараллельности и толщине термоэлектробатарей. Данное схемное решение обладает при этом существенным недостатком, связанным с резким усложнением в организации движения охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей. Возникающие в этой связи конструктивные сложности практически исключают реализацию данного конструктивного решения.

Сохранение преимуществ схемного решения термоэлектрического блока, изображенного на рис. 3в, при упрощении организации движения теплоносителей возможно за счет изменения направления тепловых потоков в устройстве, которые предлагается подводить (отводить) от термоэлектробатарей не перпендикулярно, а параллельно теплопоглощающей и тепловыделяющей поверхностям (рис. 3г). При этом теплообменные устройства на теплопоглощающей и тепловыделяющей сторонах конструктивно разнесены друг от друга, что принципиально упрощает организацию движения теплоносителей. Однако, из рис. 3г видно, что без дополнительных конструктивных изменений невозможно обеспечить циркуляцию теплоносителей. Кроме того, необратимые кондуктивные потери в цельнометаллических теплообменниках при данном схемном решении будут весьма высоки.

На рис. 4 приведена схема термоэлектрического блока, которая свободна от перечисленных выше недостатков [5, 6]. Изменение геометрии теплообменников в данной схеме обеспечивает простую собираемость блока в единое целое, а применение теплообменных устройств с механизмом теплопереноса на основе двухфазного процесса (рис. 5) существенно снижают необратимые потери. Следует отметить, что фазовые переходы в теплообменниках ТТТ все чаще используются разработчиками как в тепловых насосах для задач охлаждения [7, 8] и нагрева [9], так и в генераторах электроэнергии [10, 11, 12].

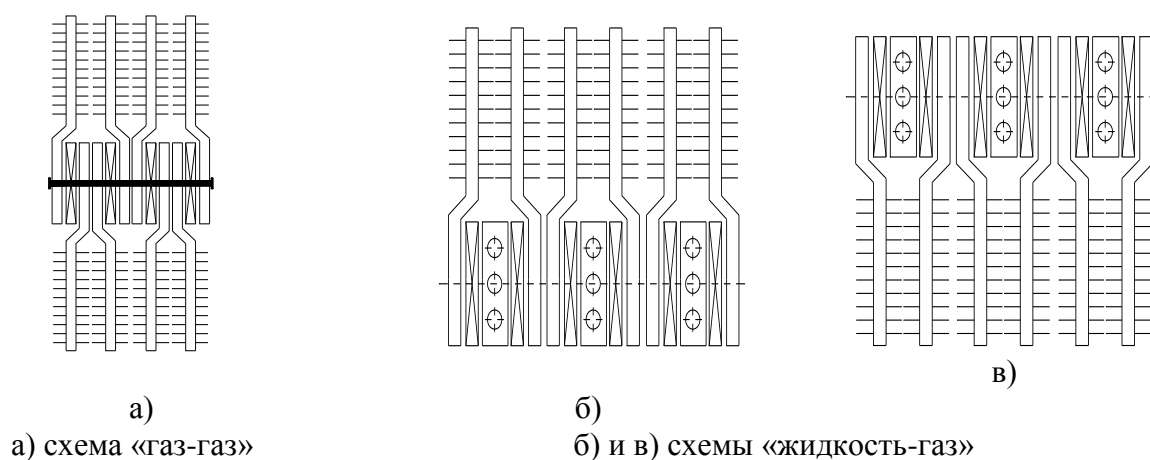


Рис. 4. Тепловые схемы ТТТ с минимизированными внешними потерями
Fig. 4. Thermal circuits TTT with minimized external losses

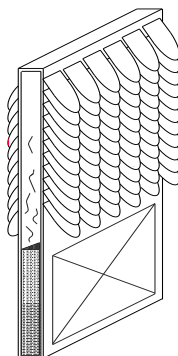


Рис. 5. Двухфазный теплообменник-термосифон на основе плоскоовальных алюминиевых трубок

Fig. 5. Two-phase heat exchanger-thermosiphon based on flat-oval aluminum tubes

Недостатки данного схемного решения характерны для теплообменных устройств с двухфазным процессом теплопереноса и связаны с рядом технологических сложностей при заправке теплоносителем термосифонов и тепловых труб. В то же время не исчерпаны способы повышения эффективности ТТТ с теплообменниками, использующими классическое цельнометаллическое оребрение [13 - 16].

Рассмотрим объект исследования, представляющий собой водовоздушный ТТТ. В рассматриваемую систему входят тангенциальный вентилятор, две термоэлектрические батареи и воздушный теплообменник, представляющий собой радиатор с плоскими ребрами (рис. 6).

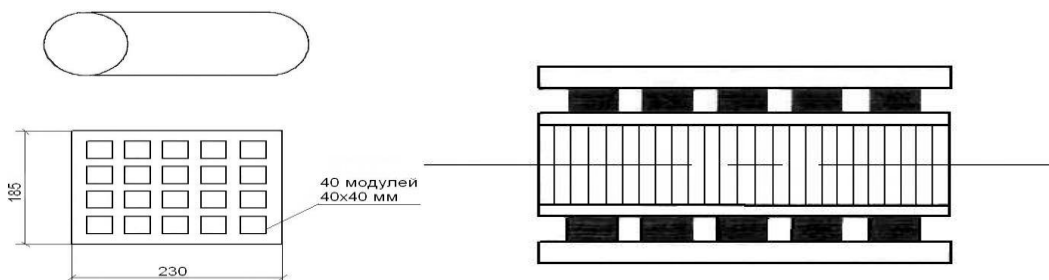


Рис. 6. Элементы термоэлектрического блока

Fig. 6. Elements of the thermoelectric unit

Анализ зависимости эффективности термоэлектрического блока от характеристик воздушного теплообменника проводился с использованием методики анализа чувствительности [17]. Под чувствительностью понимается свойство системы изменять характеристики функционирования под влиянием изменений собственных параметров системы и внешних возмущающих воздействий.

В работе были составлены три математические модели, описывающие процессы в данной системе теплообмена: математическая модель процессов теплопередачи в щелевых каналах теплообменника; математическая модель аэродинамических характеристик вентилятора и теплообменника; математическая модель процессов переноса теплоты в термоэлектрических модулях. В качестве характеристических критериев были выбраны коэффициент преобразования (COP), эксергетический КПД ($\eta_{\text{экс}}$) и относительный эксергетический КПД ($\eta_{\text{отн}}$).

В соответствии с методологией анализ выполнялся при фиксированном значении эксергии (в данном случае – потребляемой электрической мощности) на входе в систему. В процессе исследования подбирались такие параметры энергопитания системы «термоэлектрический блок – электровентилятор», при которых энергопотребление системы оставалось постоянным при изменении геометрических характеристик и материала воздушного теплообменника. По результатам вычислений построены графики зависимостей холодопроизводительности термоэлектрического блока, коэффициента преобразования энергии, эксергети-

ческого КПД и относительного эксергетического КПД от характеристик геометрии канала (рис. 7-10).

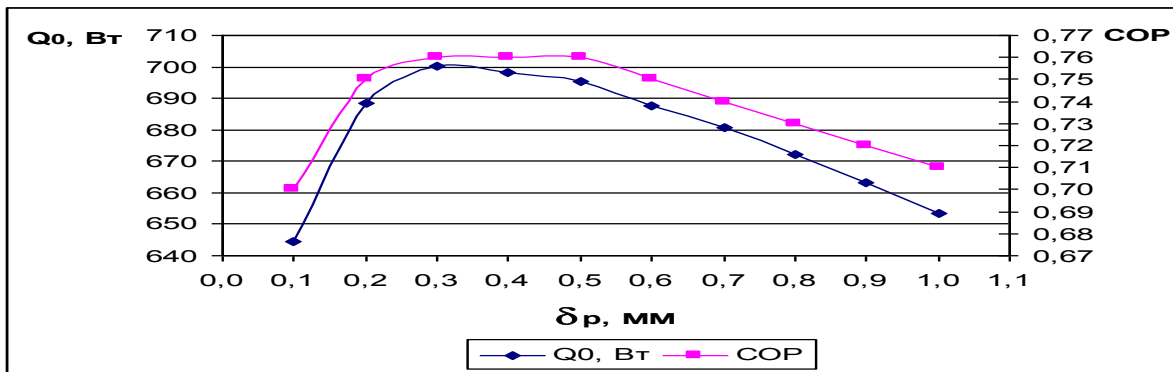


Рис. 7. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от толщины ребра. Высота канала 70 мм, температура воды 35 °С, материал ребра алюминий, межреберное расстояние 2 мм

Fig. 7. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the thickness of the rib. Channel height 70 mm, water temperature 35 °C, fin material aluminum, intercostal distance 2 mm

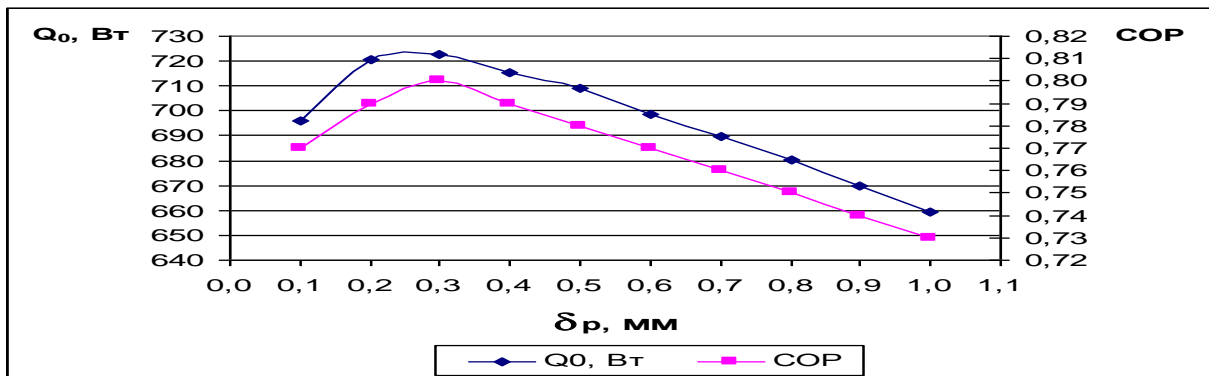


Рис.8. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от толщины ребра. Высота канала 70 мм, температура воды 35 °С, материал ребра медь, межреберное расстояние 2 мм

Fig.8. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the thickness of the rib. Channel height 70 mm, water temperature 35 °C, copper fin material, interturbid distance 2 mm

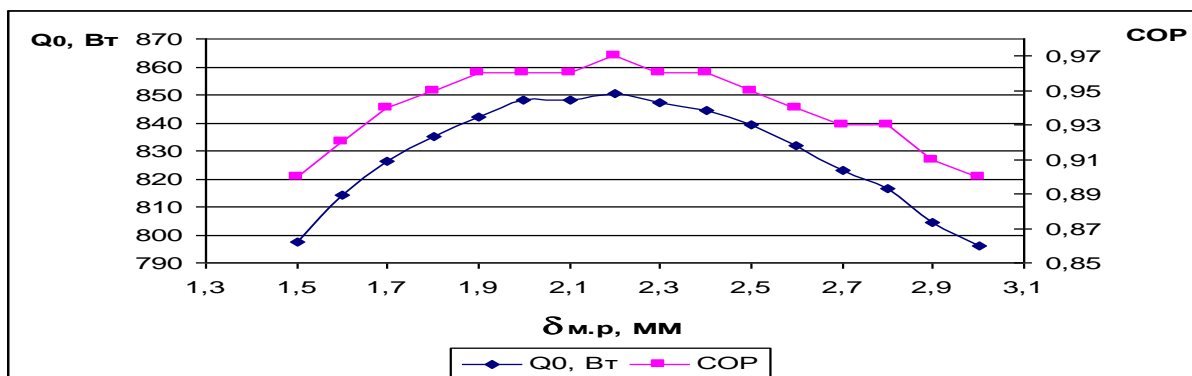


Рис. 9. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от межреберного расстояния. Высота канала 70 мм, температура воды 25 °С, материал ребра медь, толщина ребра 0,3 мм

Fig. 9. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the inter-edge distance. Channel height 70 mm, water temperature 25 °C, copper fin material, rib thickness 0,3 mm

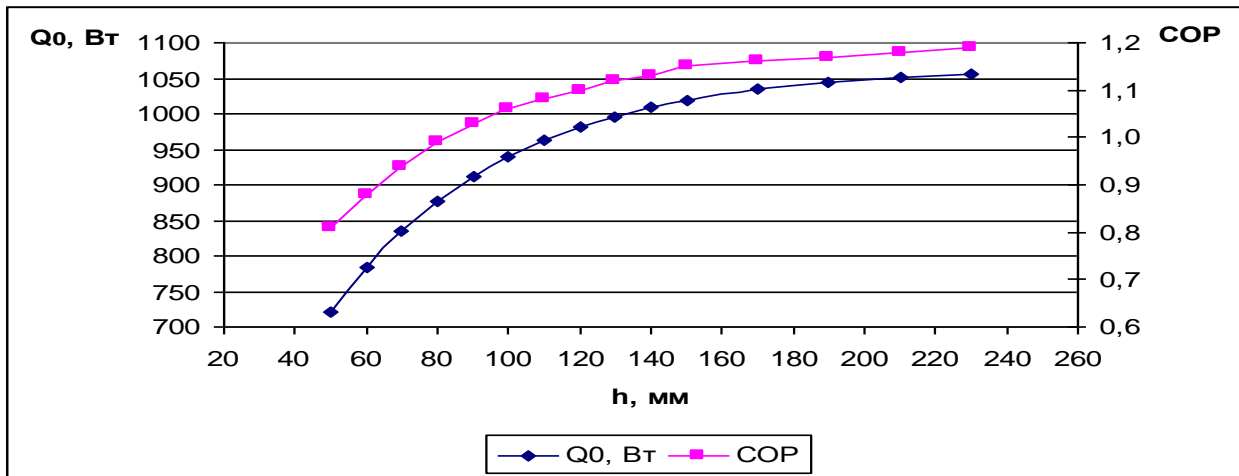


Рис.10. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от высоты ребра. Температура воды 25 °С, материал ребра медь, толщина ребра 0,5 мм, межреберное расстояние 2 мм

Fig.10. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the height of the edge. Water temperature 25 °С, copper fin material, rib thickness 0,5 mm, interturbid distance 2 mm

Обсуждение результатов. Обобщая полученные в ходе анализа чувствительности результаты, можно определить область наиболее эффективной геометрии теплообменника для рассматриваемой системы.

Наиболее эффективной толщиной ребра из меди является толщина 0,3 ÷ 0,4 мм, при этом следует заметить, что по технологии изготовления ребер его минимальная толщина составляет 0,5 мм. Наиболее эффективным межреберным расстоянием является расстояние 2,2 ÷ 2,3 мм для толщины ребра 0,5 мм. В связи с тем, что при больших значениях высоты канала, рассмотренные характеристики теплообменника меняются незначительно, то в целях снижения металлоемкости и габаритов канала рекомендуется ограничить его высоту величиной 150 мм.

Вывод. Эксергетический анализ составляющих термодинамических потерь в термоэлектрических трансформаторах теплоты показывает, что на данном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние технические потери в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. Поэтому исследования, направленные на снижение потерь, определяемых техническим решением устройства, не менее актуальны, чем повышение параметра добротности термоэлектрического материала.

В качестве примеров эффективных технических решений предложены тепловые схемы термоэлектрических трансформаторов теплоты с изменением направления тепловых потоков и с теплообменниками на базе двухфазных термосифонов. Классические решения цельнометаллических теплообменников также оптимизированы на основе методологии анализа чувствительности систем.

Библиографический список:

1. Dongliang Zhao, Gang Tan. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications. Applied Thermal Engineering, Volume 66, Issues 1–2, May 2014, Pages 15-24.
2. Diana Enescu, Elena Otilia Virjoghe. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 38, October 2014, Pages 903-916.
3. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: Состояние и перспективы // Холодильная техника, №5, 1999, с. 12-14.
4. Бродянский В.М., Фратшер В, Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-288с.

5. Sulin A.B. New approach to thermoelectric air-cooled subunit configuration // 14th Int. Conf. on Thermoelectrics, St.Petersburg, 1995, pp.453-454.
6. Патент РФ 2112908//Термоэлектрический блок (варианты)//Сулина.Б., Емельянов А.Л., Мощенко В.И., Назарцев А.А. Оpubл. в БИ № 16. 10.06.98, с. 363.
7. Gang Tan, Dongliang Zhao. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material. *Applied Thermal Engineering*, Volume 86, 5 July 2015, Pages 187-198
8. Dongliang Zhao, Gang Tan. Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling. *Energy*, Volume 68, Issuenuull, Pages 658-666
9. Syed IhtshamulHaq Gilani, Muhammad Hammad Khan, William Pao. Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings. *Energy Procedia*. Volume 75, August 2015, Pages 1373–1379
10. Steven P. Benn, Leonard M. Poplaski, Amir Faghri, Theodore L. Bergman. Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation. *Applied Thermal Engineering*, Volume 104, 5 July 2016, Pages 358-374
11. Ashwin Date, Abhijit Date, Chris Dixon, Aliakbar Akbarzadeh. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Solar Energy*, Volume 105, July 2014, Pages 656-668
12. Wei Jieting^{1,a}, Xiong Linchang^{2,b}, Wang Hao^{1,c}. The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems
13. Anjan Sarkar, Swarup K. Mahapatra. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink. *Applied Thermal Engineering*, Volume 69, Issues 1–2, August 2014, Pages 39-45.
14. Xiao Wang, Jianlin Yu, Ming Ma. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric cooling system based on entropy generation analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 63. August 2013, Pages 361-365
15. Lin Zhu, Hongbo Tan, Jianlin Yu. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*, Volume 76, December 2013, Pages 685-690.
16. Matthieu Cosnier, Gilles Fraisse, Lingai Luo. An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system. *International Journal of Refrigeration*, Volume 31, Issue 6, September 2008, Pages 1051-1062.
17. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

References:

1. Zhao D., Tan G. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering*. May 2014; 66(1–2):15-24.
2. Enescu D., Virjoghe E.O. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:903-916.
3. Bulat L.P. Termoelektricheskoye okhlazhdenie: Sostoyanie i perspektivy. *Kholodilnaya tekhnika*. 1999;5:12-14. [Bulat L.P. Thermoelectric cooling: status and prospects. *Refrigerating Engineering*. 1999;5:12-14. (In Russ.)]
4. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya. М.: Energoatomizdat; 1988. 288 s. [Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. Exergic method and its application. Moscow: Energoatomizdat; 1988. 288 p. (In Russ.)]
5. Sulin A.B. New approach to thermoelectric air-cooled subunit configuration. 14th Int. Conf. On Thermoelectrics, St.Petersburg, 1995. 453-454.

6. Sulin A.B., Emelyanov A.L., Moshchenko V.I., Nazartsev A.A. Termoelektricheskiy blok (varianty). Patent RF 2112908. Opubl. V BI №16. 10.06.98, 363. [Sulin A.B., Emelyanov A.L., Moshchenko V.I., Nazartsev A.A. The thermoelectric unit (options). Patent Russia №2112908. Publ. №16. 10.06.98, 363. (In Russ.)]
7. Tan G., Zhao D. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 5 July 2015;86:187-198.
8. Zhao D., Tan G. Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling. *Energy*. 68:658-666.
9. Gilani S.I.H., Khan M.H., Pao W. Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings. *Energy Procedia*. August 2015;75:1373–1379.
10. Benn S.P., Poplaski L.M., Faghri A., Bergman T.L. Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation. *Applied Thermal Engineering*. 5 July 2016;104:358-374.
11. Date A., Date A., Dixon C., Akbarzadeh A. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Solar Energy*. July 2014;105:656-668.
12. Jieting W., Linchang X., Hao W. The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems
13. Sarkar A., Mahapatra S.K. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink. *Applied Thermal Engineering*. August 2014;69(1-2):39-45.
14. Wang X., Yu J., Ma M.. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric coolingsystem based on entropy generation analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. August 2013;63:361-365.
15. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*. December 2013;76:685-690.
16. Cosnier M., Fraisse G., Luo L. An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system. *International Journal of Refrigeration*. September 2008;31(6):1051-1062.
17. Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Guryeva L.V. Optimizatsiya teploobmennykh protsessov i sistem. M.: Energoatomizdat; 1988. 192 s. [Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Guryeva L.V. Optimization of heat transfer processes and systems. Moscow: Energoatomizdat; 1988. 192 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Сулин Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры кондиционирования воздуха.

Марченко Андрей Сергеевич – аспирант кафедры кондиционирования воздуха.

Information about the authors.

Alexander B. Sulin – Dr. Sc. (Technical), Prof., Department of air-conditioning.

Andrei S. Marchenko - Graduate student.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 27.09.2016.

Принята в печать 05.11.2016.

Conflict of interest

Received 27.09.2016.

Accepted for publication 05.11.2016.