**Для цитирования:** Ш.А. Юсуфов. Термоэлектрический теплообменник — интенсификатор теплопередачи для обеспечения теплового режима электронных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47(1): 48-57. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-48-57

For citation: Sh.A. Yusufov. Thermoelectric heat exchanger - Heat transmission intensifier for maintaining a thermal regime in electronic systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1): 48-57. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-48-57

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 637.

**DOI:**10.21822/2073-6185-2020-47-1-48-57

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛООБМЕННИК – ИНТЕНСИФИКАТОР ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

## Ш.А. Юсуфов

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

**Резюме. Цель.** В статье рассматривается термоэлектрический теплообменник – интенсификатор теплопередачи, предназначенный для обеспечения теплового режима электронного оборудования, размещенного во внешних установках. Метод. Применены методы моделирования теплообменных процессов. Результат. Предлагается термоэлектрическая система, представляющая собой теплообменник – интенсификатор теплопередачи, который размещен во внешней установке. Конструктивно внешняя установка содержит первый отсек с электронными тепловыделяющими компонентами, в котором предусмотрены проходы или каналы для продува внешнего воздуха и второй отсек, содержащий элементы с необходимостью герметизации от внешних воздействий и недопустим контакт с внешним охлаждающим воздухом. Приведена математическая модель, которая позволяет определить температуру потоков воздуха по теплообменным поверхностям термоэлектрической системы (ТЭС), а также предельную длину термоэлектрической системы для достижения равенства температур потоков на выходе при заданных токах питания термоэлектрических батарей. Вывод. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что большей длине термоэлектрической системы для обеспечения режима интенсификации соответствует большая разница температур теплоносителей на входе. Очевидно, что при дальнейшем увеличении длины термоэлектрический теплообменник переходит в режим работы термоэлектрической холодильной машины, и температура потока воздуха на выходе становится ниже.

**Ключевые слова:** термоэлектрическая система, система обеспечения теплового режима, термоэлектрический теплообменник, математическая модель

#### POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

# THERMOELECTRIC HEAT EXCHANGER - HEAT TRANSMISSION INTENSIFIER FOR MAINTAINING A THERMAL REGIME IN ELECTRONIC SYSTEMS

# Sh.A. Yusufov

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

Abstract. Aim. The article presents a thermoelectric heat exchanger / heat transfer intensifier design for ensuring the thermal regime of electronic equipment located in external installations. Method. Methods for modelling heat exchange processes were applied. Result. A thermoelectric system is proposed, consisting of a heat exchanger / heat transfer intensifier component located in an external installation. In structural terms, the external installation comprises a compartment disposing electronic heat-generating components, in which are located channels for ventilating external air, while a second compartment contains elements that require to be sealed from external influences, including contact with external cooling air. A mathematical model is provided for determining the temperature of air flows from the heat-exchange surfaces of a thermoelectric system (TES), as well as the limiting length of a thermoelectric system to achieve equal output temperature at given supply currents of thermoelectric batteries. Conclusion. On the basis of the conducted studies, it is concluded that a longer thermoelectric system for ensuring the intensification mode corresponds to an increased difference in the temperature of the coolant at the inlet. The temperature of the air flow at the outlet becomes lower with a further increase in length due to the thermoelectric heat exchanger entering the operating mode of the thermoelectric refrigeration unit.

**Keywords:** thermoelectric system, thermal regime control system, thermoelectric heat exchanger, mathematical model

**Введение.** Преобразователи напряжения, силовые электронные компоненты и иная полупроводниковая элементная база, используемая в составе электронных систем, излучают большое количество тепла, которое необходимо отводить в окружающую среду. До 90% излучаемой теплоты приходится на выходные каскады оборудования. При этом охлаждение достигается в основном за счет выбора соответствующей конструкции корпуса, а не при помощи использования холодильного оборудования или установок [1].

В случае использования электронных систем, используемых в составе возобновляемых источников энергии, для их разрешения, как правило, применяются внешние установки.

В настоящее время используются внешние установки трех типов: непосредственно охлаждаемые окружающим воздухом; герметизированные корпуса, оснащенные теплообменниками; герметизированные корпуса, оснащенные оборудованием кондиционирования и охлаждения воздуха. Установки первого типа содержат внешний корпус, вмещающий электронное оборудование, предназначенное для работы во внутренних помещениях, и охлаждаются при помощи внешнего воздуха, проходящего эффективную очистку фильтрацией. Хотя в процессе фильтрации и устраняются твердые загрязняющие вещества, но влага и кислотные газы, которые могут повредить электронное оборудование, не удаляются.

В установках второго типа излучаемое тепло отводится в воздух окружающей среды через теплообменники. В этом случае излучаемое тепло, мощность которого может достигать несколько кВт, должно пройти несколько стадий прежде, чем будет рассеяно в окружающем воздухе: от элемента к теплоотводу, к воздуху внутри корпуса или шкафа, и через теплообменники во внешний воздух. Каждая стадия или этап приводят к некоторому повышению температуры элемента.

Теплообменник может привести к повышению температуры воздуха внутри корпуса по сравнению с окружающей средой на  $15^{\circ}$ C. В климатических условиях с температурой 45-50  $^{\circ}$ C

такая конструкция позволяет поддерживать температуру электронных и радиотехнических устройств равной 70-80 <sup>0</sup>C. Теплообменники должны быть рассчитаны для всего проходящего тепла, и в случае рассеяния одного-двух кВт означает, что размеры теплообменника должны быть сопоставимы или почти равняться размерам электронного или радиооборудования.

Используемое в установках третьего типа охлаждающее оборудование, включающее устройства охлаждения, а также, возможно, и теплообменники, может иметь размеры, достигающие половины размеров электронного и радиооборудования. При этом сложно обеспечить резервирование. Устройство имеет высокую сложность и требует совершенной системы охлаждения. Текущая стоимость нуждающегося в резервировании оборудования достигает одной трети или даже половины стоимости целевого оборудования базовой станции. Расходы на эксплуатацию также весьма высоки. При отводе тепла из корпуса устройством охлаждения выделяется дополнительно тепло, мощность которого составляет более одной трети от тепла, излучаемого электронным оборудованием. Это дополнительное тепловыделение оказывает влияние на окружающие предметы. Однако охлаждающие устройства такого типа являются единственными устройствами, которые могут удовлетворить требованиям к температуре электронного оборудования, предъявляемым с учетом как внешних, так и внутренних условий.

Использование в качестве охлаждающих и теплообменных устройств полупроводниковых термоэлектрических модулей позволяет избавиться от таких недостатков установок третьего типа, как громоздкость, выделение дополнительного тепла в охлаждаемом объеме, совместимость с электронным устройством по питанию и т.д.

Преимуществом термоэлектрических систем (ТЭС) является то, что тип и режим работы системы определяется комбинацией таких факторов как направление потока теплоты, направление потока электрической энергии и температуры объекта теплового воздействия относительно температуры среды.

Вектор потока теплоты в ТЭС может либо совпадать с вектором потока процесса естественной теплопередачи, то есть быть направленным от больших температур к меньшим, либо направлен навстречу вектору естественной теплопередачи.

Вектор потока электроэнергии может быть направлен либо к термоэлектрической батарее, что соответствует подключению ее к внешнему источнику питания, либо от термоэлектрической системы, которая в этом случае будет термоэлектрическим генератором.

Термоэлектрическая система, разделяющая две среды с различными температурами, будет находиться в потоке теплоты естественного направления, если электрическая цепь разомкнута. Наличие перепада температур обуславливает появление разности потенциалов на клеммах термоэлектрической системы и в этом случае, будет работать в режиме генерации электрической энергии.

При подключении системы к внешнему источнику в ней возникает ток, который в свою очередь порождает эффект Пельтье, то есть, выделение тепла на спаях с низкой температурой и поглощение тепла на спаях с высокой температурой. Изменение направления вектора потока теплоты в устройстве на противоположный направлению естественной теплопередачи, вследствие подвода электроэнергии необходимой полярности, определяет его функционирование либо в режиме теплового насоса с нагреванием объекта до температуры большей, чем температура среды, либо в режиме холодильной машины с охлаждением объекта до температуры меньшей, чем температура среды. Если направление теплового потока за счет подводимой электроэнергии к термобатарее совпадает с направлением потока естественной теплопередачи в ней, то усиливается процесс теплопередачи. Термоэлектрические устройства, работающие в этом режиме, являются интенсификаторами теплопередачи. В зависимости от соотношения температур среды и объекта теплового воздействия, последний, либо охлаждается, либо нагревается.

Комбинации направлений потоков тепловой и электрической энергии, реализуемых в системе, и определяет возможные типы ТЭС: на термоэлектрические генераторы, термоэлектрические тепловые насосы, холодильные машины и интенсификаторы теплопередачи.

**Постановка задачи.** Существует множество вариаций конструктивной реализации термоэлектрических систем, определяемых спецификой сред источников теплоты и системы теплосброса, но разработки новых вариантов с целью улучшения энергоэффективности и КПД актуальны и сегодня [2-3, 5-19].

Предлагается термоэлектрическая система, представляющая собой теплообменник — интенсификатор теплопередачи, который размещен во внешней установке.

Конструктивно внешняя установка содержит первый отсек с электронными тепловыделяющими компонентами, в котором предусмотрены проходы или каналы для продува внешнего воздуха и второй отсек, содержащий элементы с необходимостью герметизации от внешних воздействий и недопустим контакт с внешним охлаждающим воздухом.

На рис. 1 схематически показано разработанное устройство блока преобразовательного оборудования, с использованием системы обеспечения теплового режима на основе термоэлектрического теплообменника — интенсификатора теплопередачи.

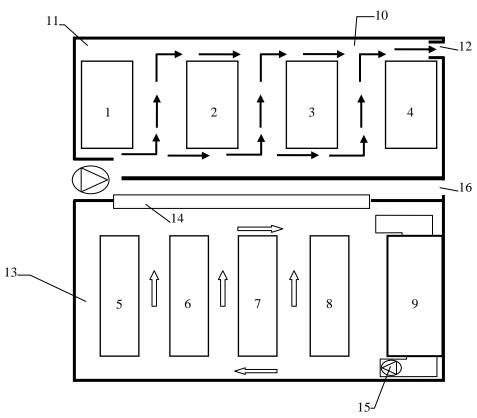


Рис.1. Внешняя установка (шкаф) для оборудования Fig. 1. External installation (cabinet) for equipment

Электронное оборудование размещено в шкафу и включает в себя электронные элементы, оконечные каскады, преобразователи переменного/постоянного тока, мощные элементы (каскады) и т.п. Шкаф разделен на первый отсек 10 и второй герметично закрытый отсек 13. В первом отсеке располагаются элементы 1 - 4 с невысоким уровнем тепловыделений и некритичных к параметрам охлаждающей среды. Для охлаждения этих элементов используется воздушный поток с температурой равной температуре окружающей среды и подаваемый в отсек посредством вентилятора 11.

Элементы 5-8, излучающие наибольшее количество тепла, типа мощных элементов, радиопередатчиков, оконечных каскадов и т.п., заключенных в герметичные экранированные кожухи, обеспечивающие электромагнитную совместимость и снабженные радиаторами, размещены в герметичном отсеке 13. Охлаждение воздушного потока, создаваемого вентилятором

15, в этом отсеке осуществляется ТЭС 14 и в данном случае работает как теплообменник-интенсификатор теплопередачи.

Направления потоков в этом случае и схематичное представление теплообменника может быть представлено как на рис. 2.

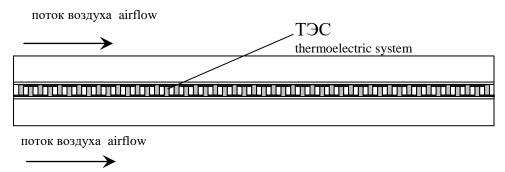


Рис.2. Схема термоэлектрического теплообменника теплопередачи

Fig. 2. Scheme of thermoelectric heat transfer heat exchanger

**Методы исследования.** Особенностью работы термоэлектрического теплообменникаинтенсификатора теплопередачи является совпадение потока передаваемой устройством теплоты с направлением передачи теплоты естественной теплопроводностью.

Для данной конструктивной схемы уравнения теплового баланса по потокам теплоносителей (воздуха) будут определены как [4]:

$$W_{1} \frac{dT_{1}}{dx} = \alpha_{1} \xi L(T_{1T3B} - T_{1}) + \alpha_{1}(1 - \xi)L(T_{1M} - T_{1}), \tag{1}$$

$$W_{2} \frac{dT_{2}}{dx} = \alpha_{2} \xi L(T_{2T35} - T_{2}) + \alpha_{2}'(1 - \xi)L(T_{2M} - T_{2}),$$
(2)

где  $T_{1TЭБ,2TЭБ}$  — температуры спаев TЭ,  $T_{1м,2м}$  — температуры поверхностей тепловых мостиков,  $T_{1,2}$  — температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей.

Тепловые процессы в данной конструкции целесообразно рассматривать с учетом теплового для спаев термоэлементов, из которых состоит ТЭС [4]:

$$\alpha_1(T_1 - T_{1T36}) = \overline{e}jT_{1T36} - \frac{1}{2}j^2\rho d - \frac{\lambda}{d}(T_{2T36} - T_{1T36}),$$
 (3)

$$\alpha_2(T_{2T9B} - T_2) = \overline{e}jT_{2T9B} + \frac{1}{2}j^2\rho d - \frac{\lambda}{d}(T_{2T9B} - T_{1T9B}),$$
 (4)

где  $\bar{e}$  – коэффициент термо-ЭДС, j – плотность электрического тока.

В соответствии с [4], необходимо исключить температуры поверхностей термобатарей и в безразмерном виде изменение температуры потоков воздуха вдоль теплообменника будет определяться как:

$$\frac{d\Theta_{1}}{dx} = b\xi \left\{ \left[ m\beta v^{2} - (1+v) \right] \Theta_{1} + \Theta_{2} + \frac{v^{2}}{2} \left[ 1 + (2-v)m\beta \right] \right\} + b'(1-\xi)(\Theta_{2} - \Theta_{1}), \tag{5}$$

$$\frac{d\Theta_{2}}{dx} = \eta b\xi \left\{ \left[ \beta v^{2} - (1 - v) \right] \Theta_{1} + \Theta_{2} + \frac{v^{2}}{2} \left[ 1 + (2 + v)\beta \right] \right\} + \eta b' (1 - \xi)(\Theta_{1} - \Theta_{2}), \tag{6}$$

где:

$$\begin{split} b' &= \frac{K}{W_1} S; \ \Theta_1 = \frac{\overline{e}^2}{\rho \lambda} T_1; \ \Theta_2 = \frac{\overline{e}^2}{\rho \lambda} T_2; \ \nu = \frac{\overline{e} d}{\lambda} j; \\ b &= \frac{K}{W_1} S; K = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda} + \nu (\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{\nu \lambda}{\alpha_1 \alpha_2 d}) \right]^{-1}. \end{split}$$

В зависимости от конструктивной реализации возможно обеспечение функционирования теплообменника, как для режима прямотока, так и для противотока.

Для рассматриваемого случая прямотока граничные условия будут иметь вид:

$$\Theta_1 \Big|_{\mathbf{x}=0} = \Theta_1^{\mathrm{H}}; \Theta_2 \Big|_{\mathbf{x}=0} = \Theta_2^{\mathrm{H}}. \tag{7}$$

Решение вышеприведенной системы дифуравнений с граничными условиями для прямотока получим выражения для определения температур теплоносителей вдоль ТЭС:

$$\Theta_{1} = C_{1} (\Psi_{1} - b_{2}) \frac{e^{\Psi_{1}X}}{b_{1}} + C_{2} (\Psi_{2} - b_{2}) - \frac{P_{1}}{\Psi_{1}b_{1}} (\Psi_{1} - b_{2}) - \frac{P_{2}}{\Psi_{2}b_{1}} (\Psi_{2} - b_{2}), \quad (8)$$

$$\Theta_{1} = C_{1}e^{\Psi_{1}X} + C_{2}e^{\Psi_{2}X} - \frac{P_{1}}{\Psi_{1}b_{1}} - \frac{P_{2}}{\Psi_{2}b_{1}},$$
(9)

где

$$\begin{split} C_1 = & \left[ \Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2) \Theta_2^H + (\Psi_2 - b_2) V - b_1 \delta \right] / (\Psi_1 - \Psi_2), \\ C_2 = & \left[ \Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2) \Theta_2^H + (\Psi_1 - b_2) V - b_1 \delta \right] / (\Psi_2 - \Psi_1), \\ P_1 = & \left( a_3 b_1 - b_3 \Psi_2 + b_3 b_2 \right) / (\Psi_1 - \Psi_2), \\ P_2 = & \left( a_3 b_1 - b_3 \Psi_1 + b_3 b_2 \right) / (\Psi_2 - \Psi_1), \\ \delta = & \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} (\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1} (\Psi_2 - b_2), V = -\frac{P_1}{\Psi_1} - \frac{P_1}{\Psi_2}, \end{split}$$

$$\begin{split} \Psi_{1;2} &= \frac{b_2 + a_1 \pm \sqrt{(b_2 - a_1)^2} + 4a_2b_1}{2}, \\ a_1 &= b\xi \Big[ v^2 m\beta - (1 + v) \Big] - b'(1 - \xi), a_2 = b\xi + b'(1 - \xi), \\ a_3 &= b\xi \frac{v^2}{2} \Big[ 1 + (2 - v)m\beta \Big], b_1 = \eta b\xi + \eta b'(1 - \xi), \\ b_2 &= \eta b\xi \Big[ v^2\beta - (1 - v) \Big] - b'\eta(1 - \xi), b_3 = \eta b\xi \frac{v^2}{2} \Big[ 1 + (2 + v)\beta \Big]. \end{split}$$

**Обсуждение результатов.** Особенностью использования в ТЭС в качестве теплообменника-интенсификатора в конкретном рассматриваемом случае является возможность эффективной передачи теплоты от одного потока к другому при ограниченной длине теплообменника, что и является основным вопросом при обеспечении теплового режима теплонагруженного электронного устройства.

В случае работы теплообменника как интенсификатора теплопердачи граничным условием является не превышение длины теплообменника той величины, при которой температуры потоков вдоль теплообменниками станут равными.

Исходя из анализа результатов численного расчета на рис. 3 представлен график изменения предельной длины ТЭС, с учетом коэффициента заполнения [4], т.е. тех длин, при которых температуры потоков воздуха на выходе равны между собой.

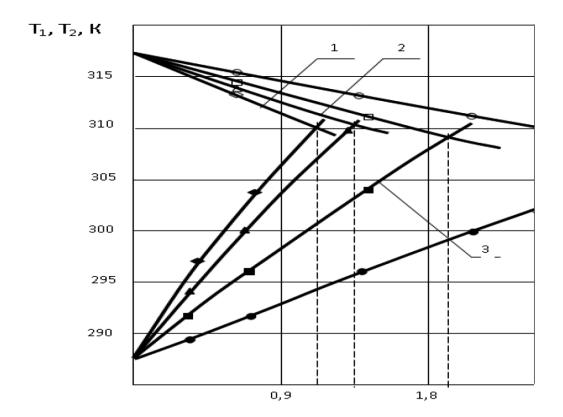


Рис.3. Зависимость температур потоков на выходе из ТЭС в зависимости от длины  $(1-\xi=1;\,2-\xi=0.8;\,3-\xi=0.5;\,I=10\;A)$ 

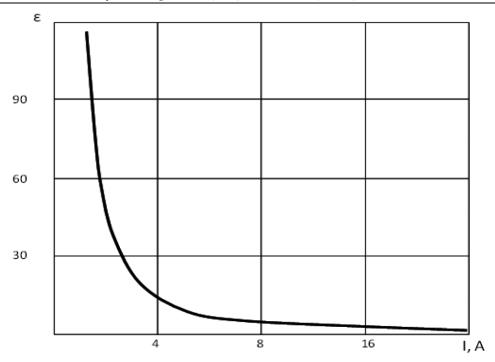
Fig. 3. The dependence of the temperature of the flows at the outlet of the thermoelectric system depending on the length at the outlet  $(1 - \xi = 1; 2 - \xi = 0.8; 3 - \xi = 0.5; I = 10 \text{ A})$ 

Как показывают зависимости, большей длине ТЭС для обеспечения режима интенсификации соответствует большая разница температур теплоносителей на входе. Очевидно, что при дальнейшем увеличении длины термоэлектрический теплообменник переходит в режим работы термоэлектрической холодильной машины, и температура потока воздуха на выходе становится ниже.

Анализ холодильного коэффициента для ТЭС тока (рис. 4) показывает, что имеется область применимого повышения тока, и у, кроме того, зависит от коэффициента заполнения. Это обстоятельство объясняется тем, что у ТЭС с меньшим коэффициентом заполнения он больше, при прочих равных иных параметрах, по сравнению с большим его значение, в связи с тем, что затраты энергии в первом случае меньше, чем во втором.

Поскольку параметры ТЭС зависят от коэффициента заполнения, то были проанализировано его влияние на пределы изменения тока для удержания режима интенсификации теплообмена. Как показал анализ, больший коэффициент заполнения приводит к уменьшению области изменения тока питания термобатарей для режима интенсификации.

В случае высоких уровней тепловыделения и необходимости более низкого охлаждения потока воздуха можно добиться лишь при высоких значениях коэффициента заполнения. Данный режим возможен на практике, когда имеются ограничения на потребляемую электрическую мощность от сети в целом устройство или ограничение по потреблению системой обеспечения теплового режима.



Puc.4. Зависимость холодильного коэффициента от тока Fig. 4. Refrigeration coefficient versus current

**Вывод.** Предложена конструкция внешней установки для размещения электронного оборудования с обеспечением теплового режима с использованием термоэлектрической системы, работающей как теплообменник-интенсификатор.

Предложенная математическая модель позволяет проанализировать зависимость предельной длины теплообменника-интенсификатора от тока питания и коэффициента заполнения ТЭС, а также обеспечения заданного температурного режима воздушного потока на сторонах теплообменника.

#### Библиографический список:

- 1. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. 165 с.
- 2. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. 149 с.
- 3. Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
- 4. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. С-Пб.: Политехника, 2005.
- 5. Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г. Термоэлектрическая система для обеспечения теплового режима модульного электронного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):53-64. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64
- 6. Патент РФ № 2203523 Шкаф для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Цеханская Т.Э., Салманов Н.Р., Юсуфов Ш.А.
- 7. Патент РФ №369860. Устройство охлаждения аппаратуры / Воронин Г.И., Антонов Ю.В., Федоров В.Н., Чижиков Ю.В., Дрынь В.П.
- 8. Патент РФ №1755398 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Сидорин В.И.
- 9. Патент РФ №1287699 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. /Абросимов А.И.
- 10. Патент РФ №1595321 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Калишин Н.А., Колесников А.А., Максимова М.А., Ульянов Н.А.
- 11. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов //Воронеж: ВГТУ, 2013. 222 с.
- 12. Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфи-

- лов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. N 2. C. 41-43.
- 13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7(8), 5273–5290. doi:10.3390/en7085273
- 14. Chen, G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebarjadi. M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.* 2012.
- 15. Apertet, Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoeur, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.
- 16. Das, R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <a href="http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-471 00005925.as">http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-471 00005925.as</a>
- 17. Haddad, C., Périlhon, C., Danlos, A., François, M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. Energy Procedia, 50, 1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125
- 18. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082\_cleary\_2014\_o.pdf
- 19. Jovovic, V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from <a href="http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080">http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080</a> barnhart 2014 o.pdf

#### **References:**

- 1. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M. Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye. Makhachkala: IPTS DGTU, 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Cooling of electronic systems: a training manual. Makhachkala: CPI DGTU, 2012. 165 p. (In Russ.)]
- 2. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovykh termoelektricheskikh ustroystv.- Makhachkala: IPTS DGTU, 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Nezhvedilov T.D. Thermostabilization of microelectronic equipment using semi-conductor thermoelectric devices. Makhachkala: CPI DGTU, 2013. 149 p. (In Russ.)]
- Rashidkhanov A.T., Yusufov SH.A. Sistema obespecheniya teplovogo rezhima shkafa telekommunikatsionnogo oborudovaniya. / Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekh-nicheskiye nauki. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96 [Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. The system for ensuring the thermal regime of the telecommunication equipment cabinet. / Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (2): 87-96. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2017-44-2-87-96. (In Russ.)]
- 4. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensifikatory teplopere-dachi. S-Pb.: Politekhnika, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. St. Petersburg: Polytechnic, 2005. . (In Russ.)]
- 5. Yusufov SH.A., Ibragimova A.M., Peredkov S.A., Sarkarov T.E., Mitarov R.G. Termoelektricheskaya sistema dlya obespecheniya teplovogo rezhima modul'nogo elektronnogo oborudovaniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2019;46(4):53-64. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64 [Yusufov Sh.A., Ibragimova A.M., Peredkov S.A., Sarkarov T.E., Mitarov R.G. Thermoelectric system to ensure the thermal regime of modular electronic equipment. Herakd of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2019; 46 (4): 53-64. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64. (In Russ.)]
- 6. Patent RF № 2203523 Shkaf dlya okhlazhdeniya radioelektronnoy apparatury / Ismailov T.A., Tse-khanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov SH.A. [RF patent No. 2203523 Cabinet for cooling electronic equipment / Ismailov T.A., Tsekhanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov Sh.A. (In Russ.)]
- 7. Patent RF №369860. Ustroystvo okhlazhdeniya apparatury / Voronin G.I., Antonov YU.V., Fedorov V.N., Chizhikov YU.V., Dryn' V.P. [RF patent No. 369860. Equipment cooling device / Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Drin V.P. (In Russ.)]
- 8. Patent RF №1755398 Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Sidorin V.I. [RF patent №1755398 A device for cooling fuel equipment. / Sidorin V.I. (In Russ.)]
- 9. Patent RF №1287699 Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. /Abrosimov A.I. [RF patent No. 1287699 A device for cooling fuel equipment. / Abrosimov A.I. (In Russ.)]
- 10. Patent RF №1595321 Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A. [RF patent No. 1595321 Device for cooling fuel equipment. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ulyanov N.A. (In Russ.)]
- 11. Razrabotka i modelirovaniye mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya [Tekst]: monografiya / D.A. Ko-novalov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov //Voronezh: VGTU, 2013. 222 s. [Development and modeling of microchannel cooling systems [Text]: monograph / D.A. Konovalov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VSTU, 2013. 222 p. (In Russ.)]

- 12. Proyektirovaniye i ispytaniya okhladiteley silovykh poluprovodnikovykh priborov [Tekst] / C.A. Panfilov V.M. Kalikanov, YU.A. Fomin, A.S. Savanin// // Pribory i sistemy Upravleniye, kontrol', diagnostika. 2008 №3. S. 41-43. [Design and testing of power semiconductor device coolers [Text] / C.A. Panfilov, V.M. Kalikanov, Yu.A. Fomin, A.S. Savanin // Devices and Systems. Management, control, diagnostics, 2008. No. 3. pp. 41-43. (In Russ.)]
- 13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. Energies, 7(8), 5273–5290. doi:10.3390/en7085273
- 14. Chen, G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebarjadi. M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. Energy Environ. Sci. 2012.
- 15. Apertet, Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoeur, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.
- 16. Das, R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <a href="http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-471">http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-471</a> 00005925.as
- 17. Haddad, C., Périlhon, C., Danlos, A., François, M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. Energy Procedia, 50, 1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125
- 18. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082\_cleary\_2014\_o.pdf
- 19. Jovovic, V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from <a href="http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080\_barnhart\_2014\_o.pdf">http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080\_barnhart\_2014\_o.pdf</a>

### Сведения об авторе:

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: yshirali@yandex.ru

#### **Information about authors:**

Shirali A.Yusufov, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: yshirali@yandex.ru

#### Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. Поступила в редакцию 18.02.2020.

Принята в печать 12.03.2020.

#### Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 18.02.2020.

Accepted for publication 12.03.2020.