

Для цитирования: Юсуфов Ш.А., Базаев А.Р., **Билалов Б.А.** Исследование интенсификатора теплопередачи проточного типа в составе термоэлектрической системы опреснения морской воды. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(3): 53-65. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-53-65

For citation: Sh.A. Yusufov, A.R. Bazaev, **B.A. Bilalov** Study of A flowing-type heat transfer intensifier USED as part of A thermoelectric sea water desalination system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3): 53-65. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-53-65

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.3

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-53-65

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАТОРА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРОТОЧНОГО ТИПА В СОСТАВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ

Юсуфов Ш.А.¹, Базаев А.Р.², Билалов Б.А.¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

²Институт проблем геотермии,

²367000, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 39А, Россия

Резюме. Целью исследования является анализ теплофизических процессов в термоэлектрическом интенсификаторе теплопередачи, работающей в составе опреснительной системы на базе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей. **Метод.** Предложена математическая модель для конструкции опреснителя, содержащего термоэлектрический теплообменник, в котором предусмотрено использование теплоперетоков естественной теплопроводностью за счет «тепловых мостиков». Предложенный метод использования дополнительных стоков теплоты на теплопоглощающей стороне устройства и дополнительных источников теплоты на тепловыделяющей стороне определяет необходимость в новой математической модели, отличающейся от известных математических моделей, описывающих теплопередачу в интенсификаторе теплопередачи проточного типа. **Результат.** Существенный вклад в температурное поле теплоносителей вносят члены, учитывающие теплопередачу через «тепловые мостики». Причем величина вклада тем больше, чем больше теплопроводность «тепловых мостиков» и разница температур между теплоносителями и поверхностью «тепловых мостиков». В соответствии со своим назначением ТЭИТ проточного типа для схемы использования в опреснителях должны обеспечивать эффективную передачу теплоты от потока охлаждаемого теплоносителя к потоку нагреваемого теплоносителя. Результаты показывают, что при заданной ограниченной длине теплообменника применение термоэлектробатареи совместно с «тепловыми мостиками» позволяет достичь равенства температур теплоносителей на выходе. **Вывод.** Для условия работы термобатареи в режиме интенсификатора длина не должна превышать той величины, при которой температуры теплоносителей на выходе становятся равными. Решение системы относительно длины, дает искомую длину термобатареи, при которой достигается равенство температур теплоносителей на выходе из режима функционирования ТЭИТ. Уменьшение длины теплообменника, при всех прочих равных условиях дает снижение массогабаритных показателей устройства в целом.

Ключевые слова: интенсификатор теплопередачи, опреснение морской воды, термоэлектрический модуль, термоэлектрическая система, температура, математическая модель

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

STUDY OF A FLOWING-TYPE HEAT TRANSFER INTENSIFIER USED AS PART OF A THERMOELECTRIC SEA WATER DESALINATION SYSTEM

Sh.A. Yusufov¹, A.R. Bazaev², **B.A. Bilalov¹**

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Institute of Geothermal Problems,

²39 A I. Shamilya Ave., Makhachkala 367000, Russia

Abstract Objectives To analyse the thermophysical processes in the thermoelectric heat transfer intensifier operating as part of a desalination system based on semiconductor thermoelectric converters. **Method** A mathematical model for the design of a desalter containing a thermoelectric heat exchanger, which provides for the use of heat flows by natural thermal conductivity due to so-called heat channels, is proposed. The proposed method of using additional heat sinks on the heat-absorbing side of the device and additional heat sources on the fuel side determines the need for a new mathematical model that differs from the known mathematical models describing heat transfer in the heat transfer flowing-type intensifier. **Results** The analysis of modelling results shows that a significant contribution to the temperature field of heat conductors is made when considering the heat transfer over the heat channels. The value of the contribution is the greater, the higher the thermal conductivity of the heat channels and the temperature difference between the heat conductors and the surface of the heat channels. In accordance with their purpose, flow-type thermoelectric heat transfer intensifiers (THTIs) for desalination applications must ensure efficient heat transfer from the cooled fluid flow to the heated fluid flow. The results show that, at a given limited length of the heat exchanger, the use of a thermoelectric battery together with heat channels allows equality of temperatures of heat conductors at the output to be achieved. **Conclusion** The modelling results show that, under the operating conditions of the thermal battery in intensifier mode, the length of the heat exchanger shall not exceed the value, at which the temperature of the heat conductor at the outlet becomes equal. The system solution provides the required length of the thermal battery, which allows equality of coolant temperatures to be achieved at the exit from the THTI operation mode. Following the logic of the desalter scheme under consideration, it is obvious that the reduction in the length of the heat exchanger, with all other things being equal, gives a reduction in the mass and size of the device as a whole.

Keywords: heat transfer intensifier, seawater desalination, thermoelectric module, thermoelectric system, temperature, mathematical model

Введение. Проведение исследований по разработке и усовершенствованию уже известных и поискам новых, перспективных методов опреснения соленых вод является актуальной задачей. В настоящее время в мировой практике накоплен значительный опыт по разработке и созданию опытных и промышленных образцов опреснительных установок, производящих пресную воду для бытового использования. Среди наиболее распространенных способов получения пресной воды можно отметить методы опреснения с изменением агрегатного состояния воды, эти методы достаточно просты и эффективны для бытового применения. Применение термоэлектрических преобразователей в составе тепловых насосов и интенсификаторов теплопередачи дает уникальную возможность создавать малогабаритные бытовые опреснители морской воды с функциональным блоком, служащим одновременно для охлаждения и нагрева или нагрева и конденсации, в зависимости от применяемого способа деминерализации воды [1-4].

Постановка задачи. На рис.1 показана схема опреснителя морской воды содержащего в своем составе термоэлектрические преобразователи и работающего по принципу выпаривания.

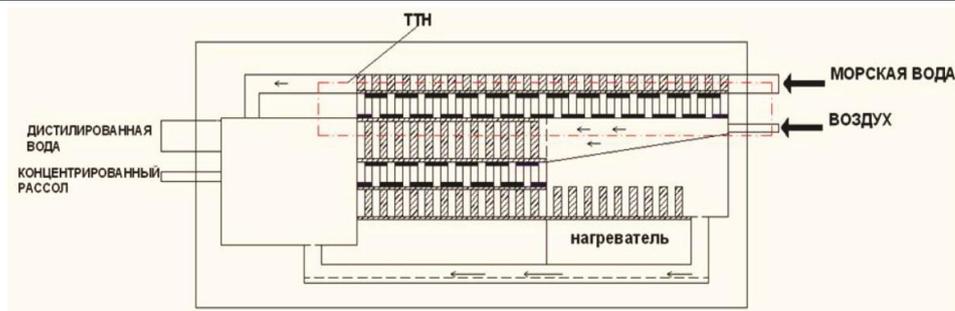


Рис. 1. Схема опреснителя морской воды
Figure 1. Scheme of desalination of sea water

Основными элементами опреснителя являются термоэлектрические модули, в данном конструктивном исполнении все модули соединены последовательно и через них проходит одинаковый ток, однако ввиду того что все батареи находятся в индивидуальных температурных режимах их энергетические характеристики также будут отличаться. Схематически данную конструктивную реализацию можно рассматривать как плоскую перегородку, составленную из идентичных по своим размерам и физическим свойствам термоэлементов, чередующихся с тепловыми мостиками (пластины из высокотеплопроводного материала, с идентичными термоэлектрическим модулям по геометрическим размерам), одна поверхность которой, обтекается паром в камере конденсации, а другая – жидкостью, отбирающей тепло от горячих спаев, и является теплообменником-рекуператором, работающим в режиме интенсификации теплопередачи, в котором на поверхности стенки, разделяющей потоки теплоносителей, происходит дополнительное выделение и поглощение тепла Пельтье, а в объеме стенки выделение джоулева тепла.

Применение полупроводниковых термоэлектрических преобразователей в дистилляционных опреснителях является наиболее надежным и энерговыгодным, ввиду особенностей своего функционирования [5-10]. Также следует учесть, что, если дистилляцию проводить при атмосферном давлении, воду надо нагревать до 100°C, а при более низком давлении температура кипения воды понижается, и, следовательно, дистилляция требует меньших тепловых затрат [11-13].

Методы исследования. В полупроводниковом термоэлектрическом преобразователе в режиме работы интенсификатора теплопередачи направления потока передаваемой модулем теплоты совпадает с направлением передачи теплоты естественной теплопроводностью при располагаемой разности температур потоков теплоносителей. Указанное определяет конструктивные особенности ТЭИТ проточного типа. В отличие от ТЭИТ контактного типа, рассмотренных в опубликованных работах, по ТЭИТ проточного типа данные в литературе рассмотрены недостаточно полно.

В конструкциях теплообменников с термоэлектрическими преобразователями необходимо обеспечение эффективную теплоизоляции в зазорах между ветвями термоэлементов и отдельными термоэлектробатареями с целью снижения необратимых тепловых потерь [14-17]. Однако для ряда технических решений, такие теплоперетоки, наоборот, играют положительную роль, что определяет их конструктивные особенности [18-20]. В [1] предложены конструкции термоэлектрических теплообменников, в которых предусмотрены «тепловые мостики» для обеспечения теплоперетоков естественной теплопроводностью. Наличие дополнительных стоков теплоты на теплопоглощающей стороне устройства и дополнительных источников теплоты - на тепловыделяющей стороне определяет необходимость в новых математических моделях, отличающихся от известных математических моделей, описывающих теплопередачу в интенсификаторе теплопередачи проточного типа.

Обсуждение результатов. Отличительной особенностью термоэлектрических устройств проточного типа является изменение температуры потоков теплоносителей вдоль спаев термо-

электробатарей, что определяет индивидуальные режимы работы термоэлементов на каждом элементарном участке длины батареи.

В работах [1-4] приведены математические модели для прямо- и противоточных термоэлектрических тепловых насосов с учетом изменения температур теплоносителей в виде системы дифференциальных уравнений, включающих уравнения холодо- и теплопроизводительности термобатареи, уравнения теплообмена на теплопоглощающих и тепловыделяющих спаеях и уравнения теплового баланса для потоков теплоносителей.

Система уравнений в этом случае в безразмерной форме имеет следующий вид:

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = N(\Theta_1' - \Theta_1);$$

$$\frac{d\Theta_2}{dx} = \frac{\eta}{m} N(\Theta_2' - \Theta_2); \quad (1)$$

$$\Theta_1 - \Theta_1' = \beta(v \cdot \Theta_1' - \frac{v^2}{2} - \Delta\Theta');$$

$$\Theta_2' - \Theta_2 = m\beta(v \cdot \Theta_2' + \frac{v^2}{2} - \Delta\Theta');$$

где: $X=x/l$; $N = \frac{\alpha_1}{W} S$; $\eta = \frac{W_1}{W_2}$; $m = \frac{Bi_1}{Bi_2}$; $\beta = Bi_1^{-1}$; ; $S = lL$; $\Delta\Theta' = \Theta_2' - \Theta_1'$.

$$Bi_{1,2} = \alpha_{1,2} d / \lambda$$

- Θ_1, Θ_2 - температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей соответственно;
- x - координата на оси OX, направленной вдоль термобатареи;
- l - длина термобатареи вдоль потока теплоносителей;
- α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи на охлаждаемых и нагреваемых сторонах термобатареи соответственно;
- v - скорость течения жидкости;
- d - высота термоэлемента;
- λ - коэффициент теплопроводности термоэлемента;
- L - ширина термобатареи;
- W_1, W_2 - водяные эквиваленты охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей.

Исключая из выше указанных уравнений значения температур спаев Θ_1' и Θ_2' , получается системы дифференциальных уравнений, определяющих изменение температуры теплоносителей вдоль координаты X.

Решение такой системы для проточных ТТН, когда на входе заданы граничные условия

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H; \quad (2)$$

имеет вид:

$$\Theta_1(x) = \frac{1}{\Psi} [\Theta_1^* (\Psi ch \Psi x - vsh \Psi x) + \Theta_2^* b \eta sh \Psi x] e^{-Ux} - 1 + \frac{v}{2}; \quad (3)$$

$$\Theta_2(x) = \frac{1}{\Psi} [\Theta_2^* (\Psi ch \Psi x + vsh \Psi x) + \Theta_1^* b \eta sh \Psi x] e^{-Ux} - 1 - \frac{v}{2}. \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\Theta_1^* &= \Theta_1^H + 1 - \frac{\nu}{2}; & \Theta_2^* &= \Theta_2^H + 1 + \frac{\nu}{2}; \\ H_1 &= 1 + \nu - \nu^2 m \beta, & H_2 &= 1 - \nu - \nu^2 \beta; \\ U &= \frac{b}{2}(H_1 + \eta H_2); & \nu &= \frac{b}{2}(H_1 - \eta H_2); \\ \Psi &= \sqrt{\nu^2 + \eta b^2}; & \text{где } b &= \frac{KS}{W_1}.\end{aligned}$$

А решение для случая противотока при граничных условиях

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (5)$$

имеет вид:

$$\Theta_1(x) = \frac{\Theta_2^*[Ush\varphi(1-x) + \varphi ch\varphi(1-x)] + \Theta_2^*be^{\varphi}sh\varphi x}{(Ush\varphi + \varphi ch\varphi)e^{\varphi x}} - (1 - \frac{\nu}{2}); \quad (6)$$

$$\Theta_2(x) = \frac{\Theta_2^*(Ush\varphi x)e^{\varphi} + \Theta_1^*b\eta sh\varphi(1-x)}{(Ush\varphi + \varphi ch\varphi)e^{\varphi x}} - (1 + \frac{\nu}{2}). \quad (7)$$

$$\text{где } \varphi = \sqrt{U^2 - \eta b^2}; \varphi^2 > 0$$

В вышеприведенной модели не учитываются теплоперетоки через зазоры между полупроводниковыми ветвями, а в случае использования стандартных термоэлектрических батарей, между батареями. В тоже время, для работы термоэлектрического преобразователя в режиме интенсификации возможно усиление вклада в теплопереток через тепловые мостики. В этом случае на элементарном участке dx длины батареи обеспечивается теплопередача, как через термоэлементы, так и через «тепловые мостики» с интенсивностью теплообмена, определяемой числами Био соответственно для полупроводника – $Bi_{1;2}$; для «теплового мостика» - $Bi'_{1;2}$. (рис. 2). Коэффициент заполнения ξ , который в данном случае характеризуется отношением площади полупроводника на элементарном участке к площади элементарного участка. Тогда на элементарном участке длины dx площадь спаев термоэлементов занимает поверхность ξLdx , а площадь поверхности «теплового мостика» – $(1-\xi) Ldx$, где L – ширина термобатареи.

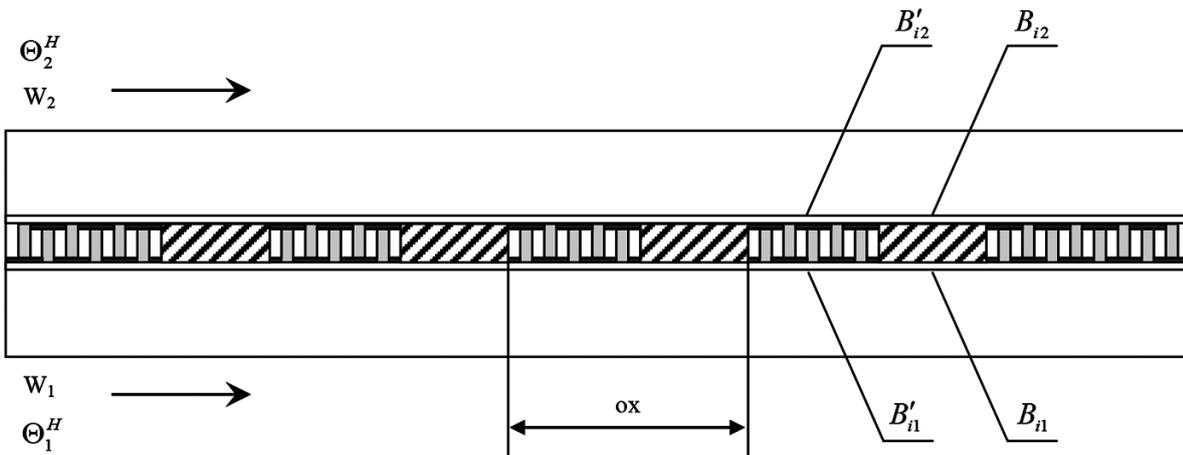


Рис.2. Усиление вклада в теплопереток через тепловые мостики
 Fig. 2. Strengthening the contribution to heat transfer through

Коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности и толщину, соответственно, для полупроводника и «теплового мостика» обозначим через $\alpha_{1;2}$, $\alpha'_{1;2}$, $\lambda_{1;2}$, $\lambda'_{1;2}$, d , d' .

Примем, что температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей на входе в термобатарею соотносятся, как $T_1 > T_2$. остальные допущения соответствуют общепринятым для проточных ТТН: потоки абсолютно перемешиваются в направлении, перпендикулярном направлению движения; свойства теплоносителей и материалов не зависят от температуры; теплопередача через неучтенные элементы конструкции отсутствует.

При таком рассмотрении уравнения теплового баланса по потокам теплоносителей будут иметь вид:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 \xi L (T_{1П} - T_1) + \alpha'_1 (1 - \xi) L (T_{1М} - T_1), \quad (8)$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 \xi L (T_{2П} - T_2) + \alpha'_2 (1 - \xi) L (T_{2М} - T_2), \quad (9)$$

где $T_{1П;2П}$ – температуры спаев термоэлементов,

$T_{1М;2М}$ – температуры поверхностей тепловых мостиков,

$T_{1;2}$ – температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей.

Уравнения теплового баланса на поверхностях, омываемых потоками теплоносителей, имеют вид для спаев термоэлементов:

$$\alpha_1 (T_1 - T_{1П}) = \bar{e} j T_{1П} - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2П} - T_{1П}), \quad (10)$$

$$\alpha_2 (T_{2П} - T_2) = \bar{e} j T_{2П} + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2П} - T_{1П}), \quad (11)$$

где \bar{e} – коэффициент термо-ЭДС,

j – плотность электрического сопротивления «термоэлемента» для «тепловых мостиков»:

$$\alpha'_1 (T_1 - T_{1М}) = K' (T_1 - T_2), \quad (12)$$

$$\alpha'_2 (T_{2М} - T_2) = K' (T_1 - T_2), \quad (13)$$

где $K' = \left(\frac{1}{\alpha'_1} + \frac{1}{\alpha'_2} + \frac{d'}{\lambda'} \right)^{-1}$ – коэффициент теплопередачи через тепловой мостик.

Исключая температуры поверхностей $T_{1П;2П}$ и $T_{1М;2М}$ и приводя выражения к безразмерному виду по аналогии с [20-23], получим выражения для изменения температур потоков теплоносителей вдоль теплообменной поверхности ТЭИТ проточного типа.

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = b \xi \left\{ [m\beta v^2 - (1 + v)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{v^2}{2} [1 + (2 - v)m\beta] \right\} + b' (1 - \xi) (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (14)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dx} = \eta b \xi \left\{ [\beta v^2 - (1 - v)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{v^2}{2} [1 + (2 + v)\beta] \right\} + \eta b' (1 - \xi) (\Theta_1 - \Theta_2), \quad (15)$$

где $b' = \frac{K}{W_1} S$; $K = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda} + v \left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{v\lambda}{\alpha_1 \alpha_2 d} \right) \right]^{-1}$,

$$b' = \frac{K'}{W_1} S; \quad \Theta_1 = \frac{\bar{e}^2}{\rho\lambda} T_1; \quad \Theta_2 = \frac{\bar{e}^2}{\rho\lambda} T_2; \quad \nu = \frac{\bar{e}d}{\lambda} j.$$

Эти уравнения отличаются от приведенных в с [2-3] членами с b' .

Граничные условия запишем в виде –для прямотока

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \quad \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (16)$$

Решая полученную систему дифференциальных уравнений с граничными условиями, получим следующие выражения для определения температур теплоносителей вдоль термобатареи для прямотока [191]:

$$\Theta_1 = C_1(\Psi_1 - b_2) \frac{e^{\Psi_1 x}}{b_1} + C_2(\Psi_2 - b_2) - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} (\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1} (\Psi_2 - b_2), \quad (17)$$

$$\Theta_1 = C_1 e^{\Psi_1 x} + C_2 e^{\Psi_2 x} - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}, \quad (18)$$

где $C_1 = [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2)\Theta_2^H + (\Psi_2 - b_2)V - b_1\delta]/(\Psi_1 - \Psi_2);$

$$C_2 = [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2)\Theta_2^H + (\Psi_1 - b_2)V - b_1\delta]/(\Psi_2 - \Psi_1);$$

$$P_1 = (a_3 b_1 - b_3 \Psi_2 + b_3 b_2)/(\Psi_1 - \Psi_2);$$

$$P_2 = (a_3 b_1 - b_3 \Psi_1 + b_3 b_2)/(\Psi_2 - \Psi_1);$$

$$\delta = \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} (\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1} (\Psi_2 - b_2); \quad V = -\frac{P_1}{\Psi_1} - \frac{P_2}{\Psi_2};$$

$$\Psi_{1;2} = \frac{b_2 + a_1 \pm \sqrt{(b_2 - a_1)^2 + 4a_2 b_1}}{2};$$

$$a_1 = b\xi [v^2 m\beta - (1 + \nu)] - b'(1 - \xi); \quad a_2 = b\xi + b'(1 - \xi);$$

$$a_3 = b\xi \frac{v^2}{2} [1 + (2 - \nu)m\beta]; \quad b_1 = \eta b\xi + \eta b'(1 - \xi)$$

$$b_2 = \eta b\xi [v^2 \beta - (1 - \nu)] - b'\eta(1 - \xi); \quad b_3 = \eta b\xi \frac{v^2}{2} [1 + (2 + \nu)\beta].$$

Как видно из выражений (8) – (18), существенный вклад в температурное поле теплоносителей вносят члены, учитывающие теплопередачу через «тепловые мостики». Причем величина вклада тем больше, чем больше теплопроводность «тепловых мостиков» и разница температур между теплоносителями и поверхностью «тепловых мостиков».

В соответствии со своим назначением ТЭИТ проточного типа для нашей схемы должны обеспечивать эффективную передачу теплоты от потока охлаждаемого теплоносителя к потоку нагреваемого теплоносителя. При этом применение термоэлектробатареи позволяет при ограниченной длине теплообменника достичь равенства температур теплоносителей на выходе. Чтобы термобатарея работала, как интенсификатор, длина uu не должна превышать той величины, при которой температуры теплоносителей на выходе становятся равными. Таким обра-

зом, одним из характерных режимов работы ТЭИТ проточного типа является режим обеспечения равных температур потоков на выходе, т.е. условие $\Theta_1(l) = \Theta_2(l)$, где l – длина термобатарей. Это означает, что нужно подобрать такое значение l , при котором для случая прямотока соблюдается следующее равенство:

$$\begin{aligned} \Theta_1^H - \frac{C_1}{b_1}(\Psi_1 - b_2)(1 - e^{\Psi_1}) + \frac{C_2}{b_1}(\Psi_2 - b_2)(1 - e^{\Psi_2}) = \\ = \Theta_2^H + C_1(e^{\Psi_1} - 1) + C_2(e^{\Psi_2} - 1); \end{aligned} \quad (19)$$

Решение этого уравнения относительно длины l , дает искомую длину термобатарей, при которой достигается равенство температур теплоносителей на выходе из данного режима функционирования ТЭИТ. Исходя из логики работы опреснителя, приведенного на рис. 1 очевидно, что снижение данного параметра, при всех прочих равных дает снижение массогабаритных показателей устройства в целом.

На рис. 3 представлены графики изменения температур на выходе из теплообменника в зависимости от его длины, по лученные по результатам численного расчета. Анализ полученных зависимостей показывает, что более глубокого охлаждения при равных токах питания термобатарей, конструкция должна предполагать использование более длинных термобатарей с низким коэффициентом заполнения.

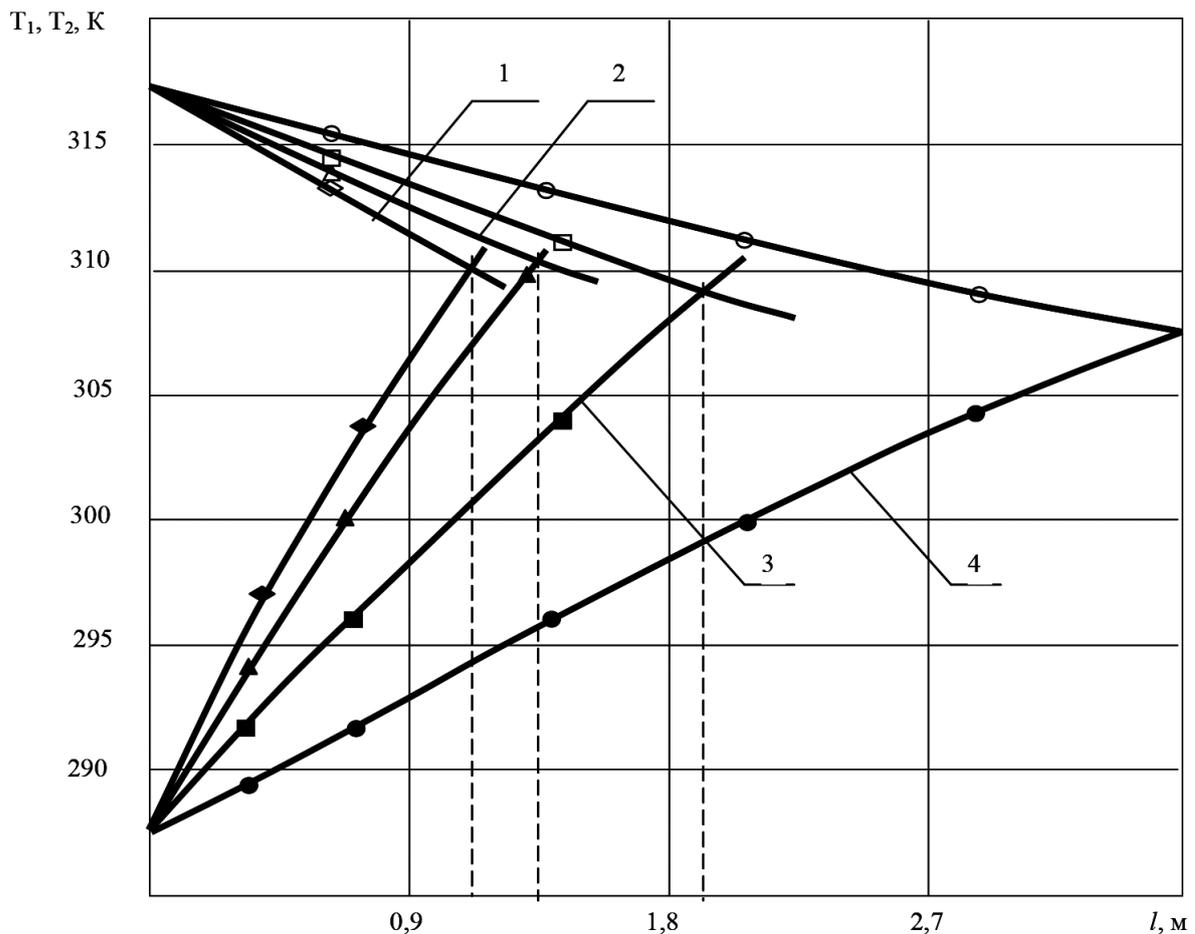


Рис. 3 Изменения температур жидкостей на выходе из теплообменника в зависимости от длины при различных коэффициентах заполнения (1 – $\xi = 1$; 2 – $\xi = 0,8$; 3 – $\xi = 0,5$; 4 – $\xi = 0,2$; $I = 10$ А)
 Fig. 3 Changes in the temperatures of liquids at the outlet of the heat exchanger as a function of length for different filling factors (1 - $\xi = 1$; 2 - $\xi = 0.8$; 3 - $\xi = 0.5$; 4 - $\xi = 0.2$; $I = 10$ BUT)

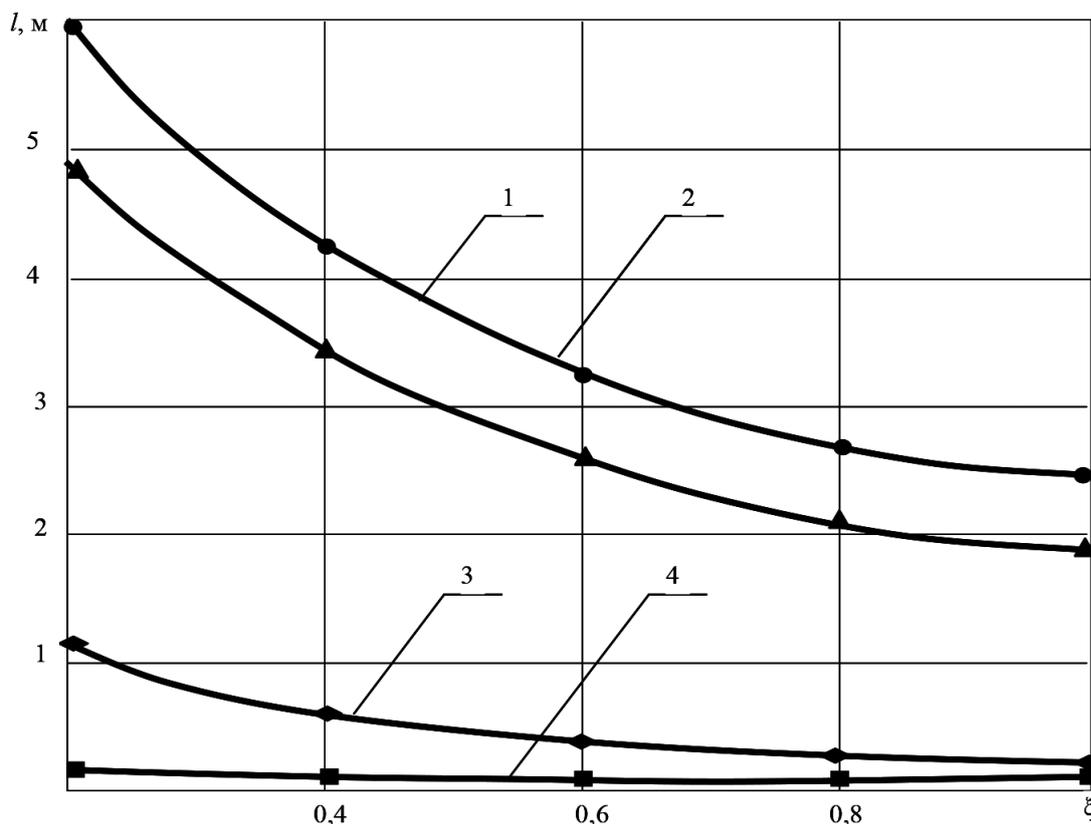


Рис. 4. Зависимости предельных длин термопарей в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных температурах (1 - $T^H = 327\text{K}$; 2 - $T^H = 318\text{K}$; 3 - $T^H = 297\text{K}$; 4 - $T^H = 293\text{K}$; $T^H_2 = 287\text{K}$; $I = 5\text{A}$)
 Fig. 4. Dependences of the limiting lengths of thermopiles in the intensification mode on the fill factor at various temperatures (1 - $T^H = 327\text{K}$; 2 - $T^H = 318\text{K}$; 3 - $T^H = 297\text{K}$; 4 - $T^H = 293\text{K}$; $T^H_2 = 287\text{K}$; $I = 5\text{A}$)

На рис. 4 представлены графики зависимости от коэффициента заполнения предельных длин термопарей, т.е. тех длин, при которых температуры жидкостей на выходе из теплообменника равны между собой.

Как следует из графиков, чем больше разница температур теплоносителей на входе в теплообменник, тем больше длина термопарей, необходимая для удержания режима интенсификации.

Чем больше разница температур теплоносителей на входе, тем резче убывают функции $l=l(\xi)$ при постоянном токе питания $I=5\text{A}$.

На рис. 5 приведены графики зависимости предельных длин термопарей в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных токах питания и постоянной разности температур теплоносителей на входе в теплообменник.

Функции $l=l(\xi)$ носят монотонно убывающий характер. При этом, чем больше значение тока питания, тем меньше длина термопарей для удержания режима интенсификации.

В тоже время необходимо отметить, что коэффициент заполнения существенно влияет на область изменения тока для режима интенсификации.

Большее значение коэффициента заполнения ведет уменьшению области изменения тока для режима интенсификации. Более глубокого охлаждения можно добиться в режиме интенсификации меньшими токами, но при больших значениях коэффициента заполнения ξ .

Но при меньших значениях ξ такого охлаждения может вовсе и не быть, так как сильное увеличение тока приводит к дальнейшему нагреванию охлаждаемого теплоносителя. Что касается нагреваемого теплоносителя, то при одном и том же значении тока более высокий нагрев происходит при малых значениях коэффициента ξ .

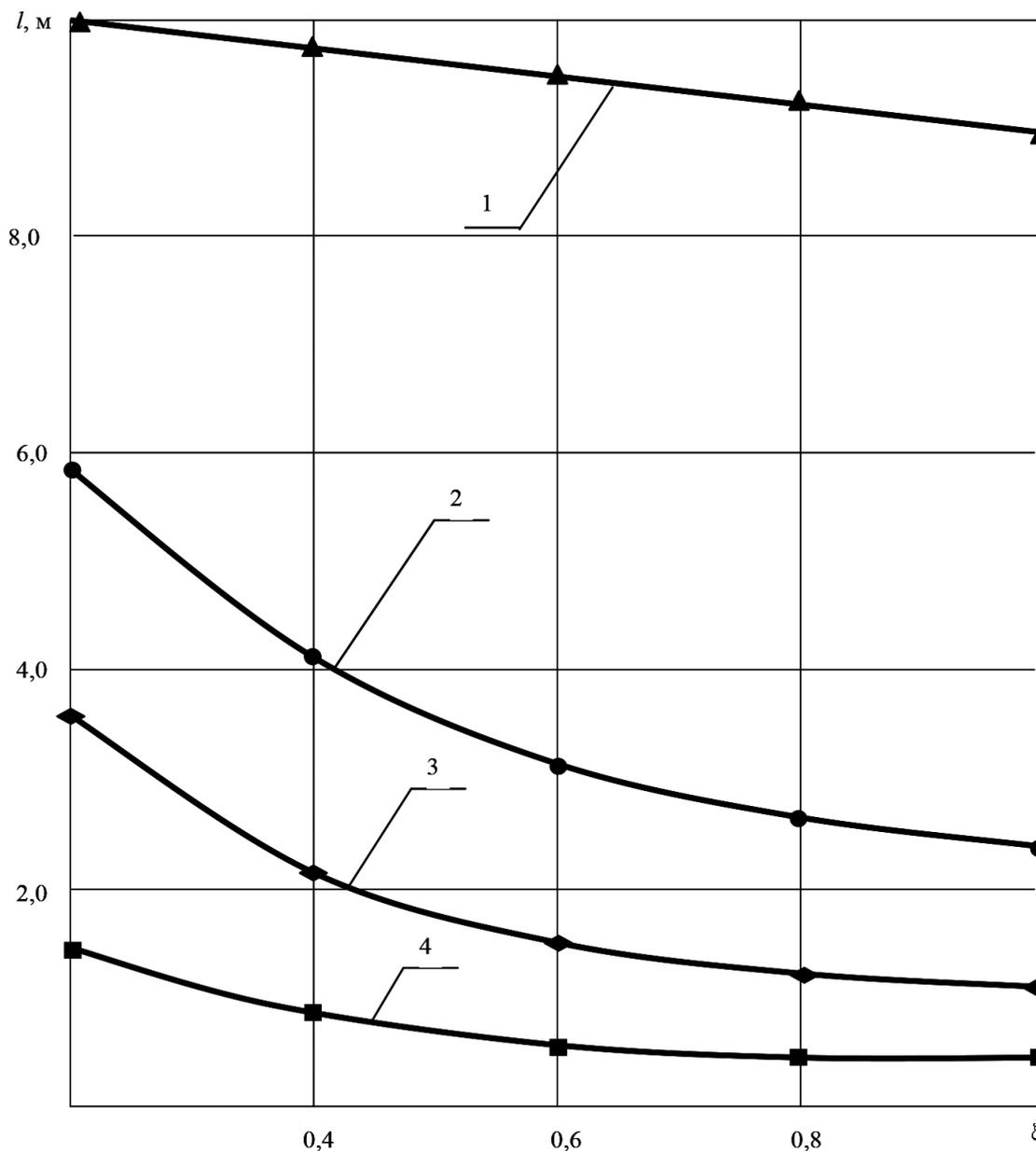


Рис. 5. Зависимости предельных длин термопар в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных токах питания (1 – I = 1А; 2 – I = 5А; 3 – I = 10А; 4 – I = 20А; $T_{H1} = 318\text{ К}$; $T_{H2} = 287\text{ К}$;) Fig. 5. Dependences of the limiting lengths of thermopiles in the intensification mode on the duty cycle at various supply currents (1 - I = 1A; 2 - I = 5A; 3 - I = 10A; 4 - I = 20A; $T_{H1} = 318\text{ K}$; $T_{H2} = 287\text{ K}$;))

Вывод. Для условия работы термопары в режиме интенсификатора длина не должна превышать той величины, при которой температуры теплоносителей на выходе становятся равными. Решение системы относительно длины, дает искомую длину термопары, при которой достигается равенство температур теплоносителей на выходе из режима функционирования ТЭИТ. Уменьшение длины теплообменника, при всех прочих равных условиях дает снижение массогабаритных показателей устройства в целом.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника. - 2005. - 534 с.
2. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. - 2009. - №7. - С. 34-37.
3. Дрейцер Г. А., Лобанов И.Е. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной

- турбулизации потока //ИФЖ. 2003. Т.76, №1. 46—51 с.;
4. Кадилова Д. К. Термоэлектрический интенсификатор теплопередачи проточного типа // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2017. №2.
 5. 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.;
 6. Осипов М. И., Олесевич Р. К., Олесевич К. А. Экспериментальное и численное исследование теплообменных аппаратов шнекового типа //Труды Второй Российской национальной конференции по тепломасообмену. М.: МЭИ. 2002. Т.6. 159—162 с.;
 7. 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
 8. Гортышов Ю. Ф., Олимпиев В. В., Попов И. А. Эффективность промышленно эффективных интенсификаторов теплопередачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Известия РАН, Энергетика. 2002. № 3. 102—118 с.;
 9. 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.
 10. 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;
 11. 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;
 12. 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
 13. Kazuaki Yazawaa, Ali Shakouria, Terry J. Hendricksb. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes// Birck 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
 14. 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
 15. 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
 16. 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
 17. Elena Otilia Vijogheb, Diana Enescua, Elena Otilia Vijogheb. A review on thermoelectric cooling parameters and performance// Department of Electronics, Telecommunications and Energy, Valahia University of Targoviste, 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
 18. 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
 19. 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
 20. 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, pp. 33-39
 21. Fabio 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 Maringa, Av. Colombo, 5790 Maringa, PR, Brazil.
 22. 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

23. Павлова, И. Б. Методы термодинамического анализа эффективности теплоэнергетических установок / И. Б. Павлова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 112 с.

References:

1. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivatory teploperedachi. - SPb.: Politekhnik. - 2005. - 534 s. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - SPb.: Polytechnic. - 2005. - 534 p. (In Russ)]
2. Bulat L.P. Prikladnyye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii // Kholodil'naya tekhnika. - 2009. - №7. - S. 34-37. [Bulat L.P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia // Refrigeration equipment. p2009. pNo. 7. pp. 34-37. (In Russ)]
3. Dreytser G. A., Lobanov I.Ye. Predel'naya intensivatsiya teploobmena v trubakh za schet iskusstvennoy turbulizatsii potoka // IFZH. 2003. T.76, №1. 46—51 s. [Dreitser G. A., Lobanov I.E. Extreme intensification of heat transfer in pipes due to artificial flow turbulization // IFZh. 2003. Vol. 76, No. 1. pp. 46-51 (In Russ)]
4. Kadirova D. K. Termoelektricheskiy intensivator teploobmena v trubakh s periodi-cheskimi vystupami // Problemy gidrodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh. M.: Izd. MEI. 2003. T.1. 57—60 s. [Kadirova D. K. Thermoelectric intensifier of heat transfer of flow type // Bulletin of DGTU. Technical science. 2017. No2. (In Russ)]
5. Dreytser G. A., Isaev S. A., Lobanov I. E. Calculation of convective heat transfer in pipes with periodic protrusions // Problems of hydrodynamics and heat teploperedachi protochnogo tipa // Vestnik DGTU. Tekhnicheskiye nauki. 2017. №2. [Dreytser G. A., Isayev S. A., Lobanov I. Ye. Raschet konvektivnogo transfer in power plants. M.: Publishing. MPEI. 2003.V.1. pp. 57-60 (In Russ)]
6. Osipov M. I., Olesevich R. K., Olesevich K. A. Eksperimental'noye i chislennoye issledovaniye teplo-obmennyykh apparatov shnekovogo tipa // Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teplomassoobmenu. M.: MEI. 2002. T.6. 159—162 s.; [Osipov M. I., Olesevich R. K., Olesevich K. A. Experimental and numerical study of screw-type heat exchangers // Transactions of the Second Russian National Conference on Heat and Mass Transfer. M.: MPEI. 2002.V.6. pp. 159-162 (In Russ)]
7. Popov I.A., Makhyanov K.H.M., Gureyev V.M. Fizicheskiye osnovy i promyshlennoye primeneniye intensivatsii teploobmena. Pod obshch. Red. YU.F. Gortyshova / Kazan'.2012. Izd. dom «Logos» -559s [Popov I.A., Makhyanov H.M., Gureev V.M. Physical foundations and industrial application of heat transfer intensification. Under the total. Ed. Yu.F. Gortyshova / Kazan. 2012. Ed. Logos house -559p. (In Russ)]
8. Gortyshov YU. F., Olimpiyev V. V., Popov I. A. Effektivnost' promyshlenno effektivnykh in-tensifikatorov teploperedachi (Obzor. Analiz. Rekomendatsii) // Izvestiya RAN, Energetika. 2002. № 3. 102—118 s.; [Gortyshov Yu. F., Olimpiyev VV, Popov I. A. Efficiency of industrially effective heat transfer intensifiers (Review. Analysis. Recommendations) // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Energy. 2002. No. 3. pp.102-118 p (In Russ)]
9. 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.
10. 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. pp.3137-3150;
11. Dreytser 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. pp.201-220;
12. 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. En-ergy. Volume 118, 1 /January 2017, pp. 1035-1043
13. Kazuaki Yazawaa, Ali Shakouria, Terry J. Hendricksb. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes // Birc Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA / NASA - Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA. Volume 185, December 15, 2016, pp. 598-602
14. 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, pp. 330-382
15. Chhatrasal Gaynera, Kamal K. Kara. Recent advances in thermoelectric materials // Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Materials Science Program, 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, April 15, 2016, pp. 65-74
16. 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, pp. 903-916

17. Elena Otilia Vijjogheb, Diana Enescua, Elena Otilia Vijjogheb. A review on thermoelectric cooling parameters and performance // Department of Electronics, Telecommunications and Energy, Valahia University of Targoviste, 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, pp. 15-24
18. 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, pp. 913-935
19. 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, pp. 252-262.
20. J. Steven Brown, 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, pp. 33-39.
21. Fabio 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 Maringa, Av. Colombo, 5790 Maringa, PR, Brazil.
22. 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, pp. 4855-4875.
23. Pavlova I. B. Metody termodinamicheskogo analiza effektivnosti teploenergeticheskikh ustanovok / I. B. Pavlova. — M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2011. 112 s. [Pavlova, I. B. Methods of thermodynamic analysis of the efficiency of heat power plants / I. B. Pavlova. M.: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2011.112 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

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

Базаев Ахмед Рамазанович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, лаборатория теплофизики геотермальных систем; e-mail: ran_ipg@mail.ru.

Билалов Билал Аругович, доктор технических наук, профессор.

Information about authors:

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

Akhmed R. Bazaev, Dr. Sci. (Technical), Chief Researcher, Laboratory of Thermophysics of Geothermal Systems; e-mail: ran_ipg@mail.ru.

Bilal A. Bilalov, Dr. Sci. (Technical), Prof.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.05.2019.

Принята в печать 22.08.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.05.2019.

Accepted for publication 22.08.2019.