

Исмаилов Т.А., Казумов Р.Ш., Рамазанова Д.К.

ФГБОУ ВПО «Дагестанский государственный
технический университет», Россия,
г. Махачкала, пр. имама Шамиля, д.70, 367015

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТИПА С ТЕПЛОВЫМИ МОСТИКАМИ

В работе рассмотрена конструкция термоэлектрического теплообменного аппарата с тепловыми мостиками. Представлены результаты ее математического моделирования и натурных испытаний опытного образца. Приведены расчетные и экспериментальные графики изменения температуры в различных точках аппарата. Полученные результаты дают возможность сделать вывод об эффективности использования конструкции теплообменного аппарата на практике.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, термоэлектрическая батарея, теплоноситель, температурное поле, математическая модель, опытный образец, эксперимент.

This paper dwells upon the design of a thermoelectric heat-exchange apparatus with thermal bridges. The results of its mathematical simulation and full-scale test of the prototype are presented. Calculated and experimental plots of temperature variation at different points of the apparatus are given. The results obtained allow for a conclusion on the efficient practical application of heat-exchange apparatus.

Key words: heat-exchange apparatus, thermopile, heat carrier, temperature field, mathematical model, prototype, experiment.

Введение

На данном этапе развития науки и техники задачи исследования специальных средств для обеспечения интенсивной теплопередачи от источников с высокими тепловыми нагрузками, создания принципиально новых высокоэффективных систем охлаждения и термостабилизации, отвечающих специфическим требованиям, проектирования теплообменных аппаратов, обладающих улучшенными характеристиками, являются все более насущными и актуальными [1]. Это связано с насыщением мирового рынка новыми техническими средствами, обладающими большими функциональными возможностями и высоким быстродействием, но характеризующимися повышенным значением удельных тепловых перегрузок и перегревов, что сказывается на надежности их работы.

Одним из перспективных направлений при создании систем охлаждения и термостабилизации аппаратуры является использование полупроводниковых термоэлектрических преобразователей, обеспечивающих построение экономичных, малогабаритных холодильников и стабилизаторов температуры с широкими функциональными возможностями по поддержанию заданного теплового режима [2, 3]. Теория и возможности

практического применения приборов подобного типа достаточно подробно описаны в работах Иоффе А.Ф., Стильбанса Л.С., Коленко А.Е., Бурштейна А.И., Каганова М.А., Привина М.Р., Анатычука Л.И., Вайнера А.Л., Иорданишвили Е.К., Зорина И.В. и др. В данных работах произведен расчет параметров устройств, работающих в различных режимах, определена энергетическая эффективность их применения. Основной упор здесь сделан на исследование теплофизических процессов при неизменной температуре на спае термоэлектрических преобразователей энергии.

Однако существует много областей применения термоэлектрических устройств, где имеет место изменение температуры теплоносителей вдоль поверхностей термоэлектрической батареи (ТЭБ), поглощающих и выделяющих тепло. В первую очередь сюда необходимо отнести различные типы теплообменных аппаратов: охладители и нагреватели потоков жидкости, воздухоохладители, кондиционеры и т.п., то есть все приборы, в которых циркуляция теплоносителей происходит вдоль спаев ТЭБ. При значительном прогрессе в термоэлектрической технике работы по устройствам подобного типа практически отсутствуют, не разработаны в полной мере их теоретические основы, не указаны эффективные режимы работы, не определены области целесообразного применения и т.д.

Представляет интерес исследование термоэлектрических теплообменных аппаратов специальной конструкции с улучшенными энергетическими характеристиками, их оптимизация, определение основных параметров, а также рациональных областей применения. Указанный интерес обусловлен недостаточностью исследований в этой области наряду с острой необходимостью разработки действенных высокоэффективных теплообменных аппаратов с улучшенными свойствами. Отмеченные обстоятельства и определяют актуальность настоящего исследования.

Целью работы является исследование термоэлектрического теплообменного аппарата рекуперативного типа с тепловыми мостиками с улучшенными энергетическими, массогабаритными и надежностными показателями.

Математическая модель теплообменного аппарата

Расчетная схема прибора приведена на рис. 1. В ней на элементарном участке dx длины ТЭБ обеспечивается теплопередача, как через термоэлементы (ТЭ), так и через высокотеплопроводные тепловые мостики с интенсивностью теплообмена, определяемой числами Био соответственно для ТЭБ – $Bi_{1,2}$; для теплового мостика – $Bi'_{1,2}$. Вводится понятие коэффициента заполнения ξ , который в данном случае характеризуется отношением площади ТЭБ на элементарном участке к площади элементарного участка. Тогда на элементарном участке длины dx площадь спаев ТЭ занимает поверхность ξLdx , а площадь поверхности теплового мостика – $(1-\xi)Ldx$, где L – ширина ТЭБ.

Коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности и толщину, соответственно, для ТЭБ 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 ТЭБ соотносятся как $T_1 > T_2$. Остальные допущения соответствуют общепринятым для проточных термоэлектрических тепловых насосов: потоки абсолютно перемешиваются в направлении, перпендикулярном направлению движения; свойства теплоносителей и материалов не зависят от температуры; теплопередача через неучтенные элементы конструкции отсутствует.

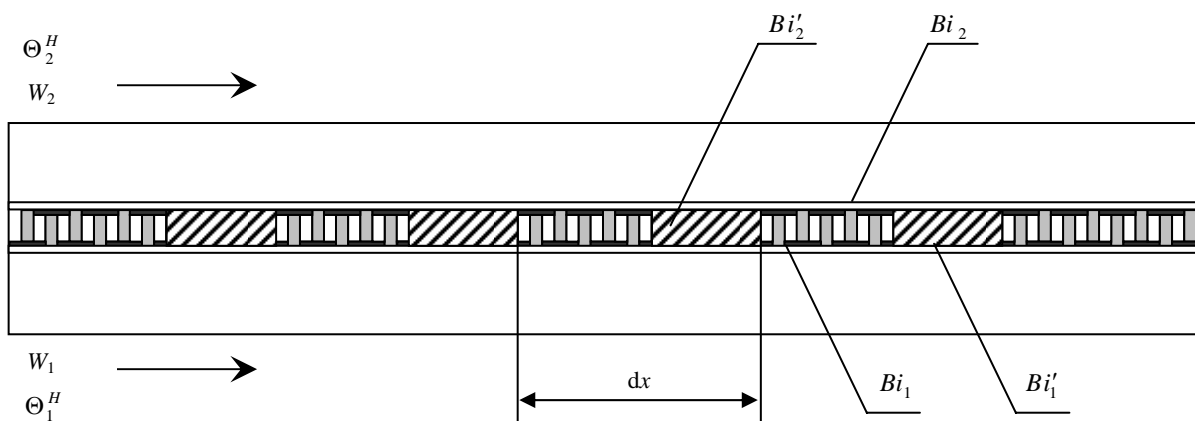


Рис. 1. Расчетная схема термоэлектрического теплообменного аппарата с тепловыми мостиками.

Уравнения теплового баланса по потокам теплоносителей для приведенной схемы в условиях прямотока выглядят следующим образом:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 \xi L (T_{1TЭБ} - T_1) + \alpha_1' (1 - \xi) L (T_{1м} - T_1),$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 \xi L (T_{2TЭБ} - T_2) + \alpha_2' (1 - \xi) L (T_{2м} - T_2),$$

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

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

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

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

где \bar{e} – коэффициент термоЭДС, j – плотность электрического тока;

для тепловых мостиков:

$$\alpha_1' (T_1 - T_{1м}) = K' (T_1 - T_2),$$

$$\alpha_2' (T_{2м} - T_2) = K' (T_1 - T_2),$$

где $K' = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d'}{\lambda} \right)^{-1}$ – коэффициент теплопередачи через тепловой мостик.

После исключения температур поверхностей $T_{1TЭБ}, T_{2TЭБ}$ и $T_{1м}, T_{2м}$ и приведения выражения к безразмерному виду, выражения для изменения температур потоков теплоносителей вдоль теплообменной поверхности теплообменного аппарата принимают вид:

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

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

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

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

Граничные условия записываются для случая прямотока в виде

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (3)$$

Решение полученной системы дифференциальных уравнений (1), (2) с граничными условиями (3) для условия прямотока записывается следующим образом:

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

$$\Theta_2 = C_1 e^{\Psi_1 x} + C_2 e^{\Psi_2 x} - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1},$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В случае противотока, знак левой части второго уравнения исходной системы для описания полей температур теплоносителей вдоль теплообменника следует изменить на противоположный. Это равносильно тому, что во всех выражениях для определения Θ_1 и Θ_2 в случае прямотока вместо b_1, b_2, b_3 , необходимо взять $-b_1, -b_2, -b_3$.

Кроме того, постоянные C_1 и C_2 должны быть определены из граничных условий:

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H, \Theta_2|_{x=1} = \Theta_2^H.$$

В соответствии с изложенным для определения C_1 и C_2 в случае противотока используются следующие соотношения:

$$\begin{cases} \Theta_1^H = C_1 (\Psi_1 - b_2) \frac{1}{b_1} + C_2 (\Psi_2 - b_2) \frac{1}{b_1} + \delta, \\ \Theta_2^H = C_1 e^{\Psi_1} + C_2 e^{\Psi_2} + V. \end{cases} \quad (4)$$

Из системы получим:

$$C_1 = \frac{-b_1 (\Theta_1^H - \delta) e^{\Psi_2} + (\Theta_2^H - V) (\Psi_2 - b_2)}{(\Psi_2 - b_2) e^{\Psi_2} - (\Psi_1 - b_2) e^{\Psi_1}}, \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{-b_1(\Theta_1^H - \delta)e^{\Psi_1} + (V - \Theta_2^H)(\Psi_1 - b_2)}{(\Psi_2 - b_2)e^{\Psi_1} - (\Psi_1 - b_2)e^{\Psi_2}}. \quad (6)$$

В данных выражениях также нужно заменить b_1, b_2, b_3 , на $-b_1, -b_2, -b_3$. А температуры теплоносителей при этом определяются по тем же формулам, что и для прямотока.

Отличительной особенностью режима противотока является то, что в этом случае подкоренное выражение в Ψ_1 и Ψ_2 может оказаться отрицательной величиной, т.е.

$$(b_2 - a_1)^2 + 4a_2b_1 < 0.$$

Если такой случай имеет место, то Ψ_1 и Ψ_2 можно представить в комплексном виде:

$$\Psi_1 = \phi + j\Psi, \quad \Psi_2 = \phi - j\Psi,$$

где $\phi = (b_2 + a_1)/2$, $\Psi = \sqrt{|(b_2 - a_1)^2 + 4a_2b_1|}$.

В этом случае изменение температур Θ_1 и Θ_2 вдоль теплообменника будет носить характер гармонических колебаний.

В случае, когда Ψ_1 и Ψ_2 действительны в режиме противотока, полные изменения температур в потоках охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей при прохождении через теплообменник равны:

$$\Delta\Theta_1 = \Theta_1|_{x=0} - \Theta_1|_{x=1} = \frac{C_1}{b_1}(\Psi_1 - b_2)(1 - e^{\Psi_1}) + \frac{C_2}{b_1}(\Psi_2 - b_2)(1 - e^{\Psi_2}),$$

$$\Delta\Theta_2 = \Theta_2|_{x=0} - \Theta_2|_{x=1} = C_1(1 - e^{\Psi_1}) + C_2(1 - e^{\Psi_2}).$$

Результаты вычислительного эксперимента приведены на рис. 2 – рис. 4.

Как следует из рис. 2, где представлены графики изменения температур на выходе из теплообменника в зависимости от его длины, для наилучшего использования термоэлектрического теплообменного аппарата необходимо исходить из определенных требований к нему. Например, если требуется получить более глубокое охлаждение при одной и той же величине тока, то необходимо использовать более длинную ТЭБ, а коэффициент заполнения более низкий. При этом выигрыш в экономии ТЭ по сравнению со случаем, когда ими покрыта вся поверхность ($\xi = 1$), достаточно ощутима. Из графика следует, что при $\xi = 1$ максимальная длина ТЭБ в теплообменном аппарате для указанных выше условий равна 1.1 м, а жидкость охлаждается при этом с 318 К до 312 К. Площадь поверхности ТЭ в этом случае $S_1 = L \cdot \xi = 1.1 \text{ L м}^2$. Когда $\xi = 0.2$, длина ТЭБ в теплообменном аппарате, при котором достигается максимально возможное охлаждение жидкости, равна 3.6 м. В этом случае теплоноситель охлаждается с 318 К до 308 К, площадь поверхности ТЭ при этом $S_2 = 0.38 \text{ м}^2$.

Если теперь сравнить эти два случая, то охлаждение жидкости на выходе во втором случае более глубокое, нежели в первом. Кроме того, площадь поверхности во втором случае меньше площади в первом, т.е. $S_2 < S_1$, что означает экономию материала ТЭ и расходуемой электрической энергии.

На рис. 3 представлены графики изменения предельных длин ТЭБ в зависимости от коэффициента заполнения, т.е. тех длин, при которых температуры жидкостей на выходе из теплообменника равны между собой. Как следует из представленных данных, чем больше разница температур теплоносителей на входе в теплообменник, тем больше длина ТЭБ, необходимая для удержания режима интенсификации. График и носят монотонно убывающий характер в зависимости от коэффициента заполнения. Чем больше разница температур теплоносителей на входе, тем резче убывают функции $L = L(\xi)$ при постоянном токе питания $I = 5 \text{ А}$.

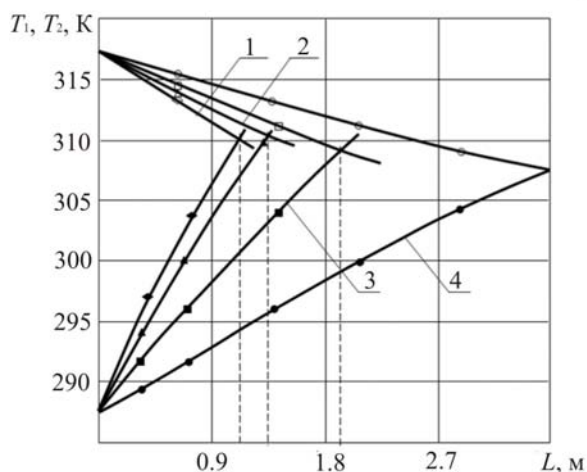


Рис. 2. Изменения температур жидкостей на выходе из теплообменника в зависимости от длины при различных коэффициентах заполнения (1 – $\xi = 1$; 2 – $\xi = 0.8$; 3 – $\xi = 0.5$; 4 – $\xi = 0.2$; $I = 10$ А)

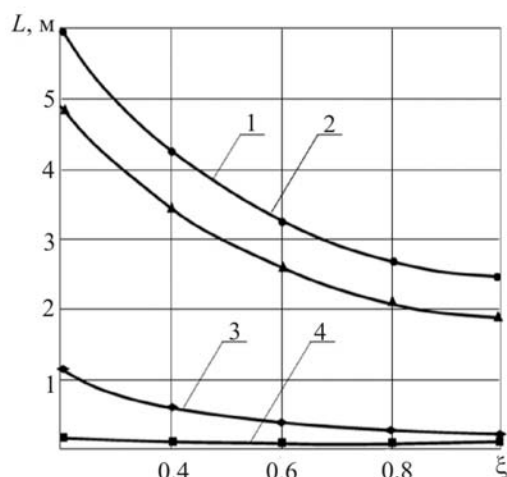


Рис. 3. Зависимости предельных длин ТЭБ в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных температурах (1 – $T^H = 327$ К; 2 – $T^H = 318$ К; 3 – $T^H = 297$ К; 4 – $T^H = 293$ К; $T^H_2 = 287$ К; $I = 5$ А).

На рис. 4 приведены графики зависимости предельных длин ТЭБ в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных токах питания и постоянной разности температур теплоносителей на входе в теплообменник. Функции $L = L(\xi)$ также носят монотонно убывающий характер. При этом, чем больше значение тока питания, тем меньше длина ТЭБ для удержания режима интенсификации.

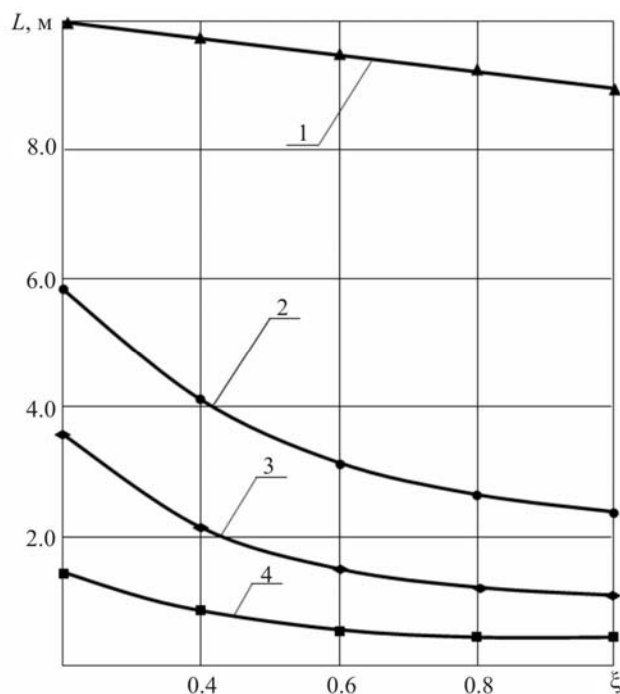


Рис. 4. Зависимости предельных длин ТЭБ в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных токах питания (1 – $I = 1$ А; 2 – $I = 5$ А; 3 – $I = 10$ А; 4 – $I = 20$ А; $T^H_1 = 318$ К; $T^H_2 = 287$ К).

Анализ результатов расчета показывает, что величина тока, при котором еще возможна работа теплообменника в режиме интенсификатора, существенно зависит от разности температур теплоносителей на входе в теплообменник. Чем выше эта разность, тем больше

величина тока режима интенсификатора при прочих равных параметрах.

Приведены результаты расчета холодильного коэффициента $\varepsilon(v)$, коэффициента преобразования $\mu(v)$ и температур теплоносителей на выходе из теплообменников в 1 м и 0.5 м, $T_{1ex} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{2ex} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$, где T_{1ex} , T_{2ex} – температуры охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей на входе. Согласно этим данным, чем больше коэффициент заполнения, тем меньше область изменения тока для режима интенсификации. Более глубокого охлаждения можно добиться в режиме интенсификации меньшими токами, но при больших значениях коэффициента заполнения ξ . А 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 . Сравнение холодильных коэффициентов или коэффициентов преобразования показывает, что при прочих равных условиях эти коэффициенты выше у теплообменника с меньшей длиной. Если рассматривается один и тот же теплообменник с разными значениями ξ , то они выше для меньших значений ξ .

Приведены результаты расчетов $\varepsilon(v)$, $\mu(v)$ и температур теплоносителей на выходе из теплообменника при длине ТЭБ 0.24 м, $T_{1ex} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{2ex} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$. в этом случае области значений токов, при которых соблюдается режим интенсификации, для различных значений коэффициента заполнения, близки друг другу. Причем убывание этих областей более медленное, чем для случая более высоких разниц температур теплоносителей на входе в теплообменник. А температуры на выходе из теплообменника для предельных значений токов в режиме интенсификации отличаются друг от друга не более, чем на один градус.

Экспериментальные исследования теплообменного аппарата.

Для проведения натурных исследований теплообменного аппарата был разработан экспериментальный стенд, принципиальная схема которого приведена на рис. 5.

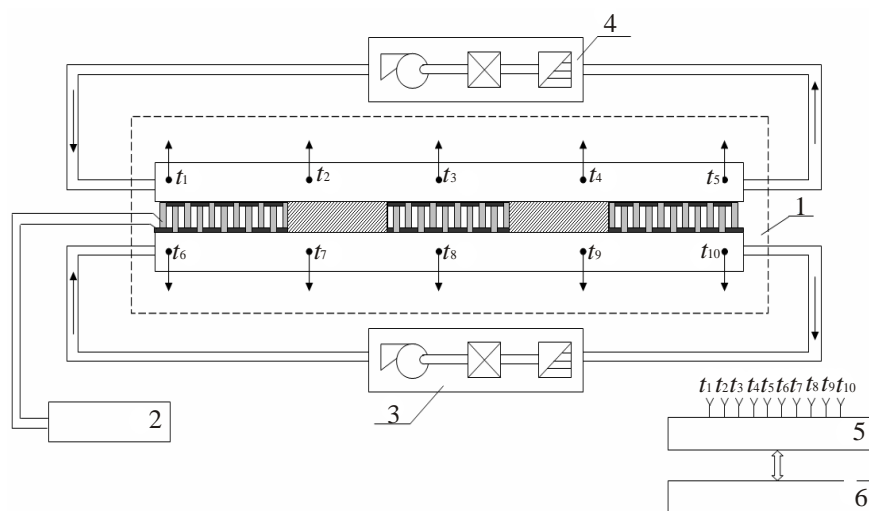


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментального стенда.

Теплообменный аппарат 1 подключен к контурам циркуляции хладо- и теплоносителя, в качестве которых используется вода, а также к регулируемому источнику постоянного тока 2. Ультратермостаты 3 и 4 поддерживают заданные температуры хладо- и теплоносителей на входах теплообменного аппарата с точностью $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и обеспечивают их циркуляцию. Расходы

по контурам хладо- и теплоносителей регулируются вентилями, расположенными на соответствующих ультратермостатах.

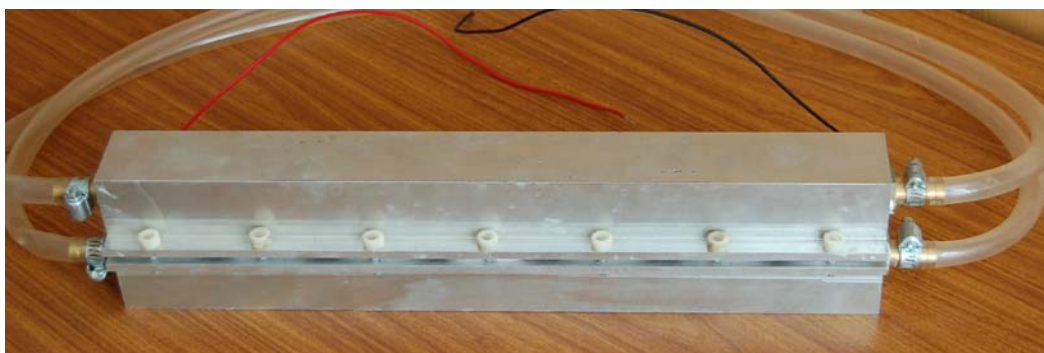


Рис. 6. Внешний вид термоэлектрического теплообменного аппарата с тепловыми мостиками.

Регистрация текущих значений температур осуществляется измерительным комплексом ИРТМ 2402/М3 5, который подключается к ПЭВМ 6 и предусматривает возможность одновременного подсоединения до 24 датчиков температуры.

Объектом экспериментальных исследований являлся термоэлектрический теплообменный аппарат проточного типа (рис. 6), состоящий из двух стальных труб с внутренним диаметром 7 мм и длиной 250 мм. Внешняя поверхность труб отшлифована в виде четырехгранника 20×20 мм. В качестве ТЭБ использованы унифицированные термоэлектрические модули (ТЭМ) типа БПТМ и ТЭМ, разработанные в лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств Дагестанского государственного технического университета.

Электрически последовательно подключенные между собой ТЭМ и тепловые мостики через теплопроводную пасту КПП зажаты между двумя трубами.

Для исключения теплообмена с внешней средой, вся конструкция помещена в пенопластовый кожух. На боковых гранях, по длине труб установлены медь-константановые термопары $t_1 - t_{10}$, опорные спаи которых термостабилизированы при 0 °С в сосуде Дьюара.

Экспериментальные кривые распределения температуры по длине были получены путем измерения температур в различных точках теплообменного аппарата:

- при разных коэффициентах заполнения полупроводниковыми модулями,
- при разных токах, протекающих через ТЭ,
- для разных материалов тепловых мостиков.

Все эксперименты проводились при заданных постоянных температурах и расходах хладо- и теплоносителей на входах конструкции. Для этого в теплообменный аппарат сначала устанавливались только полупроводниковые ТЭМ в количестве 10 шт. (100% заполнение ТЭМ, коэффициент заполнения $\xi = 1$).

С помощью ультратермостатов поддерживались заданные расходы и температуры хладо- и теплоносителей на входах. После стабилизации режима ультратермостатов (через 15 – 20 минут) на измерительном комплексе запускалась программа циклического опроса термопар с последующим выводом значений температуры на ПЭВМ. Одновременно теплообменный аппарат подключался к источнику постоянного тока, по измерительному прибору которого устанавливалась необходимая величина тока питания.

Изменение коэффициента заполнения осуществлялось следующим образом: после сборки устройства отключалась часть ТЭМ, оставшиеся модули раздвигались и распределялись по длине трубы равномерно, между ТЭМ устанавливались тепловые мостики, изготовленные из соответствующего материала (медь, алюминий, сталь), суммарная площадь которых равнялась суммарной площади удаленных модулей. Для этого были изготовлены разные типоразмеры тепловых мостиков. Так, например, для получения 80% заполнения ($\xi = 0.8$), из 10 ТЭМ удалялись два модуля, вместо которых устанавливали 2 тепловых мостика, каждый из которых был равен 1/4 части площади модуля.

На основе экспериментального стенда был проведен ряд опытов, позволяющих судить о приемлемости разработанной математической модели термоэлектрического теплообменного аппарата с тепловыми мостиками на практике.

Основной задачей при проведении экспериментальных исследований опытного образца теплообменного аппарата являлось определение зависимости температуры в контрольных точках, указанных выше, от величины тока питания ТЭ, коэффициента заполнения, материала тепловых мостиков.

На рис. 7 представлены результаты экспериментальных исследований (точки) теплообменного аппарата в стационарных режимах работы при различных коэффициентах заполнения ТЭМ и для сравнения результаты теоретических расчетов (сплошная линия). При расчетах использованы паспортные данные на теплофизические свойства полупроводникового вещества и характеристики ТЭМ, использованных в конструкции, геометрические параметры ветвей, величины контактных электрических и тепловых сопротивлений. Теплоемкости труб в расчетах не учитывались. Сопоставление показало, что результаты расчетов и экспериментальные данные соответствуют друг другу. Максимальные количественные расхождения теоретических расчетов с экспериментальными результатами, не превышающие 12%, наблюдались на начальном участке трубопроводов, что можно считать удовлетворительным. Как следует из рисунка, с увеличением коэффициента заполнения кривые распределения температур изменяются более круто, т.е. теплообменный аппарат работает более эффективно.

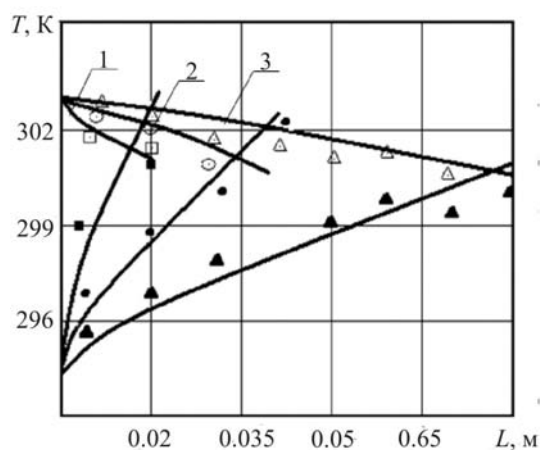


Рис. 7. Экспериментальные и теоретические зависимости температур теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата от длины при различных коэффициентах заполнения (1 – $\xi = 1.0$; 2 – $\xi = 0.5$; 3 – $\xi = 0.2$; ток питания ТЭМ 1.8 А).

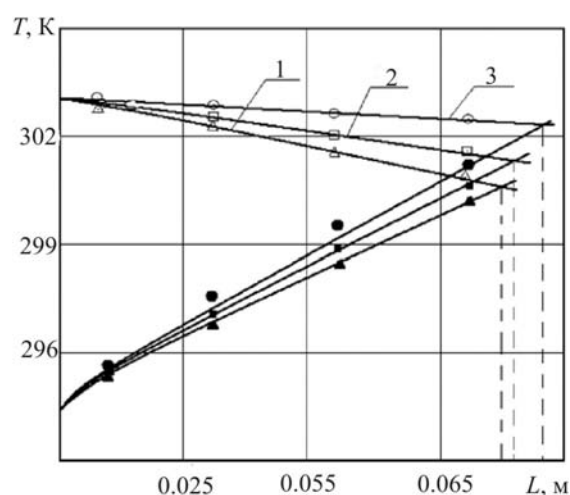


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические зависимости температур теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата от длины для тепловых мостиков из различных материалов (1 – медь, 2 – алюминий, 3 – сталь; ток питания ТЭМ 1.8 А).

На рис. 8 приведены кривые распределения температуры по длине теплообменного аппарата при коэффициенте заполнения, равном $\xi = 0.2$, для тепловых мостиков, изготовленных из различных материалов: меди, алюминия и стали. Из представленных данных следует, что эффективность работы теплообменного аппарата не существенно зависит от материала тепловых мостиков, что подтверждается и результатами численного эксперимента. Однако все-таки более эффективным является использование медных тепловых мостиков, что связано с более высоким значением коэффициента теплопроводности этого материала.

На рис. 9 приведена зависимость длины ТЭБ при работе устройства в режиме интенсификации от тока питания при коэффициенте заполнения $\xi = 0.5$ для тепловых мостиков, изготовленных из меди. Как видно, увеличение тока питания уменьшает участок теплообменника, где ТЭБ работает в режиме интенсификации теплообмена. Например, при повышении тока на 0.5 А для данных условий указанная длина уменьшается на 1.8 см.

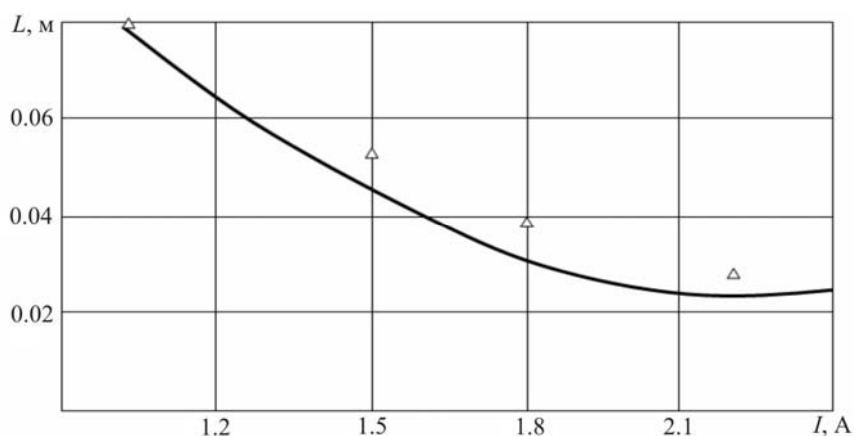


Рис. 9. Зависимость предельной длины ТЭБ в теплообменном аппарате от тока питания ($\xi = 0.5$, материал теплового мостика – медь).

На рис. 10 приведены экспериментальные зависимости изменения температуры в точке на расстоянии 1.5 см от начала входа в теплообменный аппарат от времени. Как следует из представленных данных, стабилизация наступает примерно через 27 мин. После включения ТЭБ.

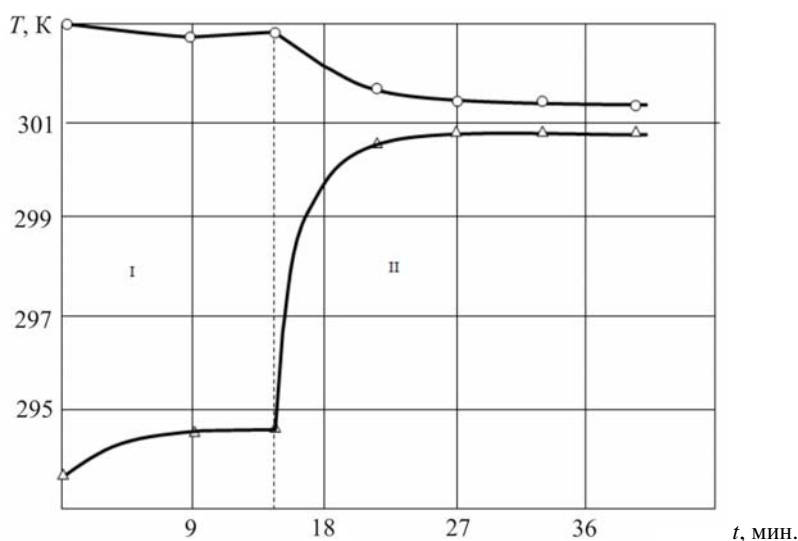


Рис. 10. Зависимость температур теплоносителей от времени без (область I) и с включенной (область II) ТЭБ ($\xi = 0.8$, $L = 0.015$ м; $I = 1.8$ А, материал теплового мостика – медь).

В целом результаты экспериментальных исследований подтверждают правомочность разработанной математической модели.

Выводы

1. На основе результатов проведенного обзора методов интенсификации теплообмена, а также конструкций теплообменных аппаратов показано, что для интенсификации теплообмена между двумя потоками теплоносителей целесообразно применение термоэлектрических преобразователей энергии.
2. Предложен принцип построения термоэлектрических теплообменных аппаратов рекуперативного типа, заключающийся в совмещении возможностей теплопередачи через высокотеплопроводный материал (тепловой мостик) и интенсификации теплообмена при использовании ТЭБ.
3. Разработана математическая модель для расчета теплового режима термоэлектрических теплообменных аппаратов рекуперативного типа, выполненных совместно с тепловыми мостиками различной конфигурации.
4. Осуществлен расчет основных характеристик термоэлектрического теплообменного аппарата с тепловыми мостиками, в том числе изменение температуры теплоносителей в зависимости от коэффициента заполнения, величины тока питания ТЭБ, а также длины теплообменного аппарата.
5. Доказана адекватность разработанной математической модели экспериментальным путем; сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что их расхождение не превысило допустимых значений.

Литература

1. Каримов К.Ф. Оценка эффективности теплообменных аппаратов холодильных машин // Вестник МАХ. – 2006. – №4. – С.14 – 16.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев-Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
3. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.

Поступила в редакцию 15.06.15.