

EDN: TVIVNX

УДК 537.32

## Modeling of Heat Transfer in the Heat Supply Device of the Thermoelectric Cooling Unit

**Evgeniy N. Vasil'ev\***

*Institute of Computational Modelling SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 26.10.2022, received in revised form 10.11.2022, accepted 21.12.2022

**Abstract.** The heat transfer process in the heat supply device of the thermoelectric cooling unit is considered. From the numerical solution of two-dimensional problems of heat conduction, the values of thermal resistances of the heat distributor and air heat exchanger are obtained. The dependence of the cooling capacity of thermoelectric modules on the current strength is calculated for two characteristic values of the total thermal resistance of the heat supply device. The analysis of the operating modes of thermoelectric modules and the choice of power supply parameters to eliminate the thermal imbalance caused by the difference in thermal resistance of the parts of the air heat exchanger was carried out.

**Keywords:** heat transfer, air heat exchanger, thermal resistance, cooling capacity, thermoelectric cooling unit.

Citation: Vasil'ev, E. N. Modeling of heat transfer in the heat supply device of the thermoelectric cooling unit. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(1), 82–91. EDN: TVIVNX



## Моделирование теплопередачи в устройстве подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения

**Е. Н. Васильев**

*Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Рассмотрен процесс теплопередачи в устройстве подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения. Из численного решения двумерных задач теплопроводности получены значения термических сопротивлений теплораспределителя и воздушного теплообменника. Выполнен расчет зависимости холодопроизводительности от силы тока для двух характерных значений суммарного термического сопротивления устройства подвода теплоты. Проведен анализ режимов работы термоэлектрических модулей и выбор параметров электропитания для устранения теплового дисбаланса, вызванного различием термических сопротивлений частей воздушного теплообменника.

**Ключевые слова:** теплопередача, воздушный теплообменник, термическое сопротивление, холодопроизводительность, термоэлектрический блок охлаждения.

Цитирование: Васильев Е. Н. Моделирование теплопередачи в устройстве подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения / Е. Н. Васильев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(1). С. 82–91. EDN: TVIVNX

### Введение

Термоэлектрические системы охлаждения обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными компрессорными устройствами, а именно компактностью, надежностью, экологичностью и бесшумностью, основной их недостаток – сравнительно низкий холодильный коэффициент. Одними из направлений повышения эффективности охлаждения являются совершенствование конструкции термоэлектрических систем и выбор оптимальных режимов работы. В большинстве работ по термоэлектрическому охлаждению проводится исследование характеристик термоэлектрических модулей (ТЭМ), но при этом не уделяется должного внимания проблемам подвода теплоты к холодным спаям ТЭМ и охлаждения их горячих спаев, а также анализу влияния этих факторов на характеристики системы охлаждения в целом [1–3]. В то же время результаты моделирования режимов работы термоэлектрической системы охлаждения показали значительное влияние термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты на такие характеристики, как холодильный коэффициент и холодопроизводительность [4].

Снижение величины термических сопротивлений может быть обеспечено за счет применения высокоэффективных теплообменников. В работах [5, 6] представлена оригинальная конструкция термоэлектрического блока холодильной установки для охлаждения продовольственных камер большого объема. В конструкции данного блока использован ряд технических решений, направленных на повышение эффективности охлаждения за счет снижения температурных перепадов на термических сопротивлениях устройств подвода и отвода теплоты. В устройстве подвода теплоты применены термосифоны, обеспечивающие теплопередачу от ребер воздушного радиатора к холодному спаю ТЭМ и предотвращающие возникновение обратного потока тепло-

ты при выключенном электропитании блока. Термосифоны позволяют эффективно передавать теплоту от сравнительно небольшой поверхности холодной стороны ТЭМ к воздушному радиатору, имеющему значительно более развитую поверхность теплообмена. В экспериментальном исследовании [7] было показано, что использование термосифона в устройстве подвода теплоты улучшило термическое сопротивление между холодной стороной ТЭМ и охлаждаемой средой на 37 %, а холодильный коэффициент повысился на 32 %.

Анализ влияния термических сопротивлений на эффективность работы термоэлектрического блока был проведен в работе [8]. В ней было установлено, что наибольшее влияние на холодопроизводительность и холодильный коэффициент оказывает устройство подвода теплоты, поэтому минимизации его термического сопротивления следует уделять основное внимание при разработке и оптимизации конструкции блока.

В настоящей работе выполнен расчет термического сопротивления воздушного радиатора и теплораспределителя устройства подвода теплоты, а также проведен анализ их влияния на эффективность термоэлектрического блока.

### 1. Описание конструкции термоэлектрического блока охлаждения

Конструкция блока охлаждения содержит в себе расположенных в два ряда 8 термоэлектрических модулей 1, к которым присоединены устройства подвода и отвода теплоты (рис. 1). Устройство подвода теплоты осуществляет теплопередачу из охлаждаемого объема продовольственной камеры к холодной стороне ТЭМ и состоит из воздушного пластинчатого радиатора 5, термосифонов 2 и теплораспределителя 3, обеспечивающего теплопередачу от термосифонов к холодной стороне ТЭМ. От горячей стороны ТЭМ теплопередача осуществляется с помощью устройства отвода теплоты, выполненного в виде жидкостного теплообменника 4.

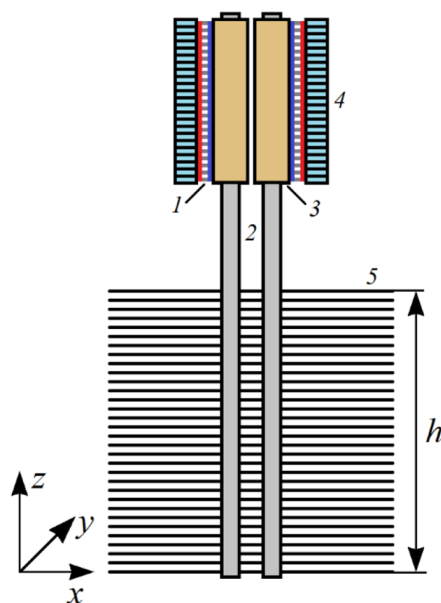


Рис. 1. Схема конструкции термоэлектрического блока

Fig.1. Design diagram of the thermoelectric unit

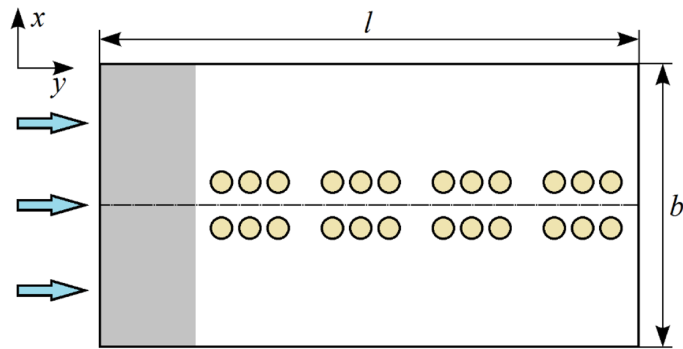


Рис. 2. Схема ребра и расположения отверстий для термосифонов, стрелками указано направление потока воздуха

Fig. 2. The diagram of the rib and the location of the holes for thermosiphons, the arrows indicate the direction of air flow

К каждому ТЭМ присоединены по три термосифона, ребра теплообменника выполнены в виде прямоугольных пластин и нанизаны на все 24 термосифона термоэлектрического блока (рис. 2).

Суммарное термическое сопротивление устройства подвода теплоты складывается из термических сопротивлений теплораспределителя, термосифонов, воздушного радиатора и тепловых контактов. Величину термических сопротивлений теплораспределителя и воздушного радиатора будем определять на основе температурных распределений и тепловых потоков, полученных из численного решения задачи теплопроводности.

## 2. Термическое сопротивление теплораспределителя

Теплораспределитель представляет собой медный параллелепипед 3, имеющий три сквозных отверстия для установки термосифонов 2 (рис. 3). Одна из боковых поверхностей теплораспределителя присоединена к холодной стороне ТЭМ 1.

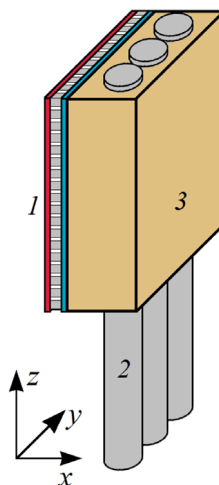


Рис. 3. Схема конструкции теплораспределителя

Fig. 3. Design diagram of the heat distributor

Расчет температурного поля в теплораспределителе проводился на основе решения стационарной двумерной задачи теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Расчетная область задачи представляет собой поперечное сечение теплораспределителя в плоскости координат  $x, y$ . На границах расчетной области, контактирующей с холодной стороной ТЭМ, заданы граничные условия третьего рода

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_k T \right]_{x=0} = \alpha_k T_0 |_{x=0}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T_0$  – температура холодной стороны ТЭМ. На других границах расчетной области теплообмен отсутствует. Величина коэффициента теплопередачи  $\alpha_k$  зависит от параметров теплового контакта «теплораспределитель–ТЭМ», для снижения термического сопротивления контакта обычно используют теплопроводную пасту или припой. Для решения уравнений (1) и (2) применялся метод суммарной аппроксимации с расщеплением задачи по пространственным координатам [9, 10].

Расчет температурного поля в теплораспределителе проведен для геометрических размеров  $16 \times 40 \times 40$  мм<sup>3</sup> в направлениях  $x, y$  и  $z$  соответственно. Диаметр отверстий для термосифонов составляет 10 мм. Значение коэффициента теплопередачи  $\alpha_k = \lambda_k / \delta_k = 80$  кВт/К соответствует толщине слоя  $\delta_k = 0,2$  мм припоя ПОСВ-50 с  $\lambda_k = 16$  Вт/(м·К). Распределение  $T(x, y)$ , приведенное на рис. 4, получено при  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 10^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 400$  Вт/(м·К), шаг между изолиниями равен  $0,5^\circ\text{C}$ .

По результатам расчета температурного поля интегрированием величины  $\alpha_k(T(0, y) - T_0)$  вычислялась суммарная тепловая мощность, передаваемая через боковую поверхность теплораспределителя на холодную сторону ТЭМ. Термическое сопротивление теплораспределителя определялось как отношение температурного перепада  $T_i - T_0$  к этой суммарной тепловой мощности. При заданных параметрах задачи из расчета получено значение термического сопротивления  $1,5 \times 10^{-2}$  К/Вт, в него входят составляющие, относящиеся как к самому теплораспределителю, так и к тепловому контакту, заполненному припоем. Значения этих составля-

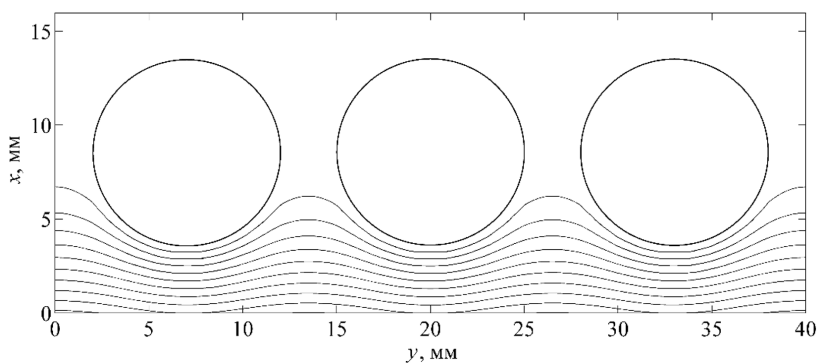


Рис. 4. Температурное поле теплораспределителя

Fig. 4. Temperature field of the heat distributor

ющих термического сопротивления равны  $7,2 \times 10^{-3}$  и  $7,8 \times 10^{-3}$  К/Вт соответственно. Следует отметить, что величины термического сопротивления не зависят от заданных значений  $T_0$  и  $T_i$ , а полностью определяются геометрическими размерами, коэффициентом теплопроводности материала и величиной коэффициента теплопередачи. Доля теплового контакта может быть существенно выше, так, при использовании стандартной терморасты КРТ-8 с коэффициентом теплопроводности  $0,85$  Вт/(м·К) величина термического сопротивления теплового контакта составит  $0,14$  К/Вт.

### 3. Термическое сопротивление воздушного радиатора

Анализ процесса теплопередачи в воздушном пластинчато-ребристом теплообменнике термоэлектрического блока охлаждения ранее был проведен в [8], где рассматривалась конструкция ребра, симметричная относительно расположения термосифонов. Однако в такой конструкции воздушного радиатора не были учтены особенности эксплуатации в объеме холодильной камеры. В процессе работы на ребрах воздушного радиатора, имеющих отрицательную температуру, влага, содержащаяся в объеме холодильной камеры, оседает в виде инея. Наиболее интенсивно осаждение инея происходит на поверхности ребер вблизи входного сечения. Слой инея является дополнительным термическим сопротивлением, которое снижает эффективность радиатора. В работе [11] было установлено, что удлинение ребер в сторону набегающего потока воздуха позволяет за счет более однородного осаждения инея на их поверхности значительно повысить длительность непрерывной работы со стабильной теплопередачей и увеличить временной интервал между периодическими оттаиваниями теплообменника. Схема такого ребра приведена на рис. 2, затемнением выделена выступающая навстречу потоку воздуха часть ребра, за счет которой обеспечивается удлинение. Несимметричность расположения термосифонов по площади ребра приводит к перераспределению тепловых потоков, поступающих от радиатора к термосифонам разных ТЭМ. В ходе моделирования рассчитывается температурное поле ребра, тепловые потоки, передаваемые термосифонам, и определяется влияние выступающей части ребра на термические сопротивления подвода теплоты к холодной стороне каждого ТЭМ.

Расчетная область задавалась равной половине площади ребра, ось симметрии показана на рис. 2. Расчет температурного поля в ребре проводился на основе решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{2\alpha_r(T-T_1)}{\delta\lambda_r} = 0,$$

где  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи поверхности ребра,  $T_1$  – температура воздуха. На внутренней границе расчетной области (штриховая линия) задано условие симметрии, на внешней границе (сплошная линия) – торцевой теплообмен с воздухом. На площади термосифонов задавалась фиксированная температура  $T_i$ . Размеры воздушного радиатора определяются габаритами блока, в данном случае расчеты проведены для размеров ребра  $b = 110$  мм и  $l = 180$  мм, высота радиатора  $h = 200$  мм (рис. 1).

Расчет температурного поля проведен при значении  $\alpha_r = 19,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), которое соответствует данным [8] для межреберного расстояния 4 мм. На рис. 5 приведен результат расчета при  $T_1 = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 0^\circ\text{C}$ , и  $\delta = 0,4$  мм, шаг между изолиниями равен  $0,2^\circ\text{C}$ . Минимум темпера-

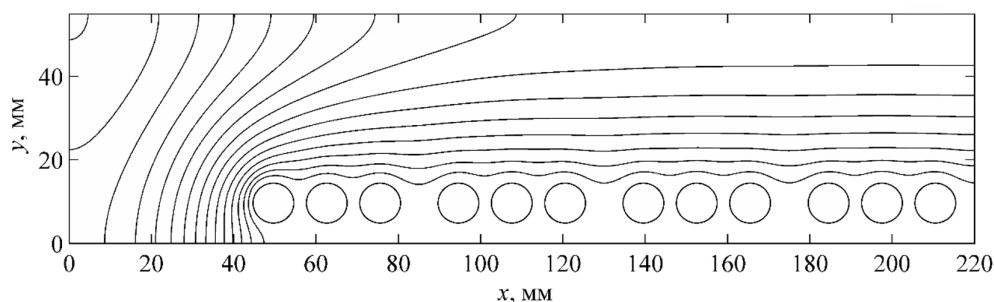


Рис. 5. Температурное поле ребра воздушного теплообменника

Fig. 5. Temperature field of the fin of the air heat exchanger

туры соответствует термосифонам, при удалении от термосифонов к краю ребра температура увеличивается, ее максимальное значение находится на выступающей части ребра, наиболее удаленной от термосифонов. В ходе моделирования рассчитывалась величина теплового потока, передаваемого ребру от каждой тройки термосифонов. Далее с учетом количества ребер при заданной высоте теплообменника  $h$  определялось термическое сопротивление его части, относящейся к одному ТЭМ. Значения термических сопротивлений зависят от расположения и имеют величину 0,171, 0,277, 0,285 и 0,287 К/Вт (в направлении потока воздуха). Из сравнения термических сопротивлений следует, что выступающая часть ребра оказывает влияние в основном на термическое сопротивление теплоподвода ближайшего к ней первого ТЭМ. На противоположной стороне ребра выступ практически не оказывает влияния, термическое сопротивление теплоподвода наиболее удаленного четвертого ТЭМ близко к значению симметричной конструкции ребра без выступа (0,293 К/Вт).

#### 4. Влияние величины термического сопротивления на холодопроизводительность и выбор рабочего тока ТЭМ

Холодопроизводительность каждого ТЭМ блока охлаждения зависит от суммарного термического сопротивления устройства подвода теплоты, которое складывается из сопротивлений радиатора, термосифонов и теплораспределителя. Термические сопротивления радиатора и теплораспределителя были рассчитаны выше. Термосифон представляет собой распределенную теплопередающую систему, параметры которой зависят от конструкции, рабочей жидкости, режима работы (значений температур в зонах испарения и конденсации), а также от пространственной ориентации (угла наклона). Наиболее достоверно теплопередающая способность термосифонов может быть определена из экспериментальных данных. Термическое сопротивление трех термосифонов, полученное в экспериментах [6], составляло 0,1–0,2 К/Вт в зависимости от температуры и передаваемой тепловой мощности, для данного расчета использовано среднее значение 0,15 К/Вт. В итоге суммарное термическое сопротивление устройства подвода теплоты  $R_T$  примерно составляет 0,35 К/Вт для первого ТЭМ и 0,45 К/Вт для остальных.

Определение холодопроизводительности  $Q$  отдельного ТЭМ проводилось на основе соотношения, связывающего общий температурный перепад с перепадами температур на отдельных элементах блока охлаждения [4, 12]

$$T_1 - T_2 = R_T Q - \Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q) + R_s(Q + U(I, Q)I). \quad (3)$$

Здесь  $T_2$  – температура воды, подаваемой в устройство отвода теплоты,  $U, I$  – напряжение и сила тока электропитания ТЭМ. Первое слагаемое в правой части уравнения (3) описывает температурный перепад в устройстве подвода теплоты. Второе слагаемое  $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$  является отрицательным температурным перепадом, произведенным ТЭМ за счет эффекта Пельтье. Третье слагаемое соответствует перепаду температуры в устройстве отвода теплоты, которое имеет термическое сопротивление  $R_s$  и отводит суммарную тепловую мощность, равную холодопроизводительности и собственному Джоулеву тепловыделению ТЭМ. Зависимости  $U(I, Q)$  и  $\Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q)$ , используемые в (3), определяются с помощью интерполяционных многочленов по рабочим характеристикам термоэлектрического модуля  $Q(\Delta T_{\text{ТЭМ}})$  и  $U(\Delta T_{\text{ТЭМ}})$  [13]. Величина холодопроизводительности  $Q$  рассчитывалась из решения нелинейной алгебраической системы уравнений для заданных значений  $R_s, R_T, T_1, T_2$  и  $I$ .

Расчеты проведены для серийного термоэлектрического модуля «S-199–14–11» с максимальными значениями температурного перепада  $\Delta T_{\text{ТЭМ}} = 72,5^\circ\text{C}$  и холодопроизводительности  $Q = 124,2 \text{ W}$  при максимальной силе тока  $I_{\text{max}} = 7,9 \text{ A}$ . Расчет  $Q(I)$  проведен для  $T_1 = -18^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 20^\circ\text{C}$ . Зависимости  $Q(I)$ , отображенные на рис. 6, рассчитаны для  $R_T = 0,35 \text{ K/W}$  (линия 1) и  $0,45 \text{ K/W}$  (линия 2). Термоэлектрические модули в зависимости от заданных условий могут работать в различных режимах: максимальной холодопроизводительности, максимального холодильного коэффициента, а также в промежуточных [14]. Режим максимальной холодопроизводительности обеспечивается при значении силы тока 7 А, зависимости  $Q(I)$  имеют максимумы 26,1 Вт (линия 1) и 23,7 Вт (линия 2), которые отличаются друг от друга примерно на 10 %.

Очевидно, что при питании всех ТЭМ одинаковой силой тока обусловит дисбаланс мощностей охлаждения различных участков ребер. Выступающая часть ребер за счет большей холодопроизводительности ближайшего ТЭМ будет охлаждаться сильнее, что приведет к более быстрому инеобразованием вблизи входного сечения и аннулированию положительного эф-

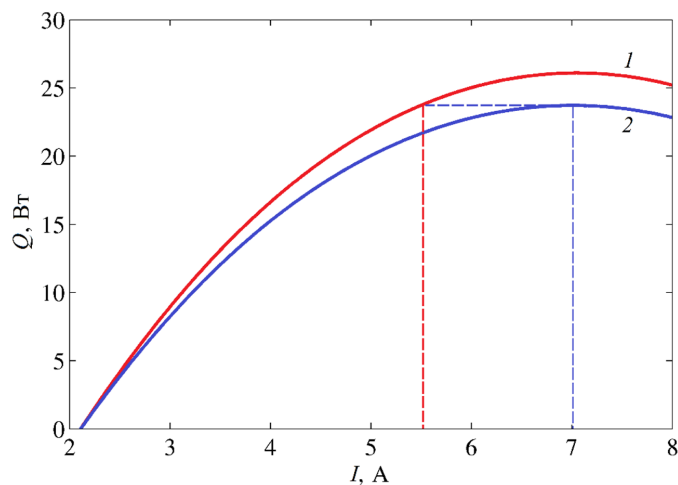


Рис. 6. Зависимости  $Q(I)$  для  $R_T = 0,35 \text{ K/W}$  (1) и  $0,45 \text{ K/W}$  (2)

Fig. 6. Dependencies  $Q(I)$  for  $R_T = 0.35 \text{ K/W}$  (1) and  $0.45 \text{ K/W}$  (2)



фекта от удлинения ребра. Простое графическое построение с помощью штриховых линий на рис. 6 показывает, что для обеспечения одинаковой холодопроизводительности ТЭМ необходимо снизить силу тока питания первого ТЭМ до примерно 5,5 А.

Режим максимального холодильного коэффициента обеспечивается при значении силы тока 3,7 А, при этом величина холодильного коэффициента достигает 0,3 и 0,28 при холодопроизводительности 14,7 и 13,5 Вт соответственно для значений  $R_T = 0,35$  и  $0,45$  К/Вт. В данном случае снижение холодопроизводительности первого ТЭМ до значения 13,5 Вт произойдет при силе тока 3,55 А. Аналогично с помощью рис. 6 могут быть получены значения силы тока питания первого и остальных ТЭМ в промежуточных режимах.

### Заключение

Таким образом, в работе рассчитаны характеристики воздушного теплообменника и теплораспределителя, входящие в устройство подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения. Проведен анализ влияния термического сопротивления устройства подвода теплоты на холодопроизводительность и выбор рабочего тока ТЭМ с учетом теплового дисбаланса, вызванного асимметрией ребер воздушного теплообменника.

### Список литературы / References

- [1] Анатычук Л.И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства*. Киев, Наукова думка, 1979. 765 с. [Anatyshuk L.I. *Thermal elements and thermoelectric devices*. Kiev, Naukova dumka, 1979. 765 p. (In Rus.)]
- [2] Каганов М.А., Привин М.Р. *Термоэлектрические тепловые насосы (теоретические основы расчета)*. Л., Энергия, 1970. 176 с. [Kaganov M. A., Pryvin M. P. *Thermoelectric Heat Pumps (Theoretical Calculation Basics)*, (Leningrad, Energiya, 1970. 176 p. (In Rus.)]
- [3] Булат Л.П. *Термоэлектрическое охлаждение*. СПб., СПбГУНиПТ, 2002. 147 с. [Bulat L. P. *Thermoelectric cooling*, St. Petersburg, 2002. 147 p. (In Rus.)]
- [4] Васильев Е.Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения, *Журнал технической физики*. 2021, 91(5), 743–747 [Vasil'ev E. N. The Effect of Thermal Resistances on the Coefficient of Performance of a Thermoelectric Cooling System, *Technical Physics*, 2021, 66(6), 815–819]
- [5] Патент 2511922 (РФ) от 10.04.14 г, МПК F25B 21/02. Термоэлектрический блок охлаждения. Деревянко В.А., Гладушенко В.Н., Гейнц Э.Р., Коков Е.Г., Васильев Е.Н., Руссков В.В. [Patent 2511922 (RF), dated 10.04.14, МПК F25B 21/02. Thermoelectric cooling unit. Derevjanko V. A., Gladushchenko V. N., Gejnts E. R., Kokov E. G., Vasil'ev E. N., Russkov V. V. (In Rus.)]
- [6] Васильев Е.Н., Гейнц Э.Р., Деревянко В.А., Коков Е.Г., Кукушкин С.В. Термоэлектрический блок охлаждения. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2019, 12(2), 146–152 [Vasil'ev E. N., Gejnts E. R., Derevyanko V. A., Kokov E. G., Kukushkin S. V. Thermoelectric cooling block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(2), 146–152 (In Rus.)]
- [7] Vián J. G., Astrain D. Development of a heat exchanger for the cold side of a thermoelectric module. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28, 1514–1521.
- [8] Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения. *Теплофизика и аэромеханика*, 2022, 29(3), 419–429 [Vasil'ev E. N. Calculation and

optimization of heat exchangers for thermoelectric cooling unit. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2022, 29(3), 401–410]

[9] Самарский А. А. Теория разностных схем. М., Наука, 1989. 616 с. [Samarskii A. A. The theory of difference schemes. Moscow, Nauka, 1989. 616 p. (In Rus.)]

[10] Васильев Е. Н., Деревянко В. В. Математическая модель процессов теплообмена в сотовой панели с тепловыми трубами. *Вестник СибГАУ*, 2010, (2), 4–7 [Vasil'ev E. N., Derevyanko V. V. Mathematical model of heat exchange processes in honeycomb panels with heat pipes. *Vestnik SibGAU*, 2010, (2), 4–7 (In Rus.)]

[11] Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А. Экспериментальное исследование инеобразования в пластинчатом теплообменнике. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2022, 15(1), 24–34 [Vasil'ev E. N., Emel'yanov D. P., Nesterov D. A. Experimental Study of Frost Formation in a Plate Heat Exchanger, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2022, 15(5), 24–34 (In Rus.)]

[12] Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов. *Вестник СибГАУ*, 2013, (4), 9–13 [Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A. Analysis of thermoelectric modules efficiency in cooling systems. *Vestnik SibGAU*, 2013, (4), 9–13 (In Rus.)]

[13] Васильев Е. Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов. *Журнал технической физики*, 2017, 87(1), 80–86 [Vasil'ev E. N. Calculation and Optimization of Thermoelectric Cooling Modes of Thermally Loaded Elements. *Technical Physics*, 2017, 62(1), 90–96]

[14] Васильев Е. Н. Регулирование режима охлаждения термоэлектрического блока. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(4), 416–423 [Vasil'ev E. N. Regulation of Cooling Mode of Thermoelectric Bloc, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2021, 14(4), 416–423 (In Rus.)]