

Для цитирования: Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96

For citation: Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. Development of prototype system for regulating thermal conditions of telecommunications equipment cabinets. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 87-96. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.317.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ШКАФА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рашидханов А.Т.², Юсуфов Ш.А.¹

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

¹e-mail: yshirali@yandex.ru, ²e-mail: rashidkhanov.arip@mail.ru

Резюме: *Цель.* Основной задачей исследования являлось обеспечение теплового режима и надежности работы электронной аппаратуры **Метод.** Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения с использованием тепловых труб был собран стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный опытный образец. Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий собой термоэлектрическую батарею, выполненную из стандартных унифицированных термоэлектрических материалов типа ICE-71. Решение задач исследования осуществлено методом приведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям (метод Канторовича) обеспечивает приемлемую для подобного класса задач точность. **Результат.** Предложена конструкция шкафа для телекоммуникационного оборудования с системой обеспечения теплового режима на основе использования тепловых труб и термоэлектрических охлаждающих модулей. Рассмотрена математическая модель для определения теплового поля в объеме шкафа, описан экспериментальный стенд для исследования опытного образца, приведены результаты экспериментальных исследований для различных мощностей источников тепловыделений. **Вывод.** Экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения шкафов с телекоммуникационным оборудованием; указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным принудительным или естественным; температуру в объеме блока и пиковые значения источников тепловыделений удалось существенно снизить; при мощностях рассеивания на одной плате в пределах 50 Вт не требуется применения специальных средств по съему тепла с горячих спаев термоэлектрической батареи

Ключевые слова: *тепловое поле, система обеспечения теплового режима, тепловая труба, термоэлектрический преобразователь, температура*

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

**DEVELOPMENT OF PROTOTYPE SYSTEM FOR REGULATING THERMAL
CONDITIONS OF TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT CABINETS**

*Arip T. Rashidkhanov*², *Shirali A. Yusufov*¹

Daghestan State Technical University,

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

¹e-mail: yshirali@yandex.ru, ²e-mail: rashidkhanov.arip@mail.ru

Abstract Objectives The main objective of the study was to regulate the thermal regime and ensure the reliability of electronic equipment **Methods** In order to conduct experimental studies of the thermoelectric cooling system using heat pipes, a stand was assembled on which the developed and manufactured prototype was studied. The object of the experimental studies was a prototype cooling system, consisting of a thermoelectric battery made of conventional unified thermoelectric materials of ICE-71 type. The solution of the research problems carried out by the method of reduction to ordinary differential equations (Kantorovich method) provides acceptable accuracy for such a class of problems. **Results** A design of a telecommunication equipment cabinet with a thermal management system based on the use of heat pipes and thermoelectric cooling units is proposed. A mathematical model for the determination of the thermal field in the cabinet volume is considered; an experimental stand for the prototype study is described; the results of experimental studies for various power sources of heat release are presented. **Conclusion** Experimental studies confirm the operability of the developed cooling system for cabinets with telecommunication equipment; this cooling method has advantages over conventional forced or natural cooling; the temperature in the block volume and the peak values of the heat sources are significantly reduced; at dissipation powers on one board within 50 W there is no need to use special means to remove heat from hot junctions of the thermoelectric battery

Keywords: thermal field, thermal regime support system, heat pipe, thermoelectric converter, temperature

Введение. Обеспечение теплового режима электронной аппаратуры является важной задачей, успешное решение которой является необходимой составляющей в обеспечении надежности оборудования [1-4].

Исследование и разработка устройств защиты радиоэлектронных систем от перегрева, создание отличительно новых конструкций термостабилизации, которые соответствуют нестандартным требованиям, оптимизация массогабаритных и энергетических характеристик - представляют собой набор ключевых задач, которые необходимо решать еще на стадии проектирования [11-13]. Температурный режим, связанный с отводом теплоты от радиоэлектронных устройств в замкнутом объеме является основополагающим фактором, отвечающим за надежность функционирования устройств, приборов и систем [14-16].

Постановка задачи. На практике широко используются шкафы для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), содержащие корпуса, воздухопроводы, теплообменники и блоки управления [5-10].

Однако в действующих шкафах нерационально используются объемы, занимаемые блоками вентиляторов и теплообменником; усложнены конструкции; отмечается недостаточная эффективность теплообменника; отсутствует возможность автоматического регулирования теплового режима.

Авторами предлагается конструктивный вариант с системой обеспечения теплового режима на основе использования тепловых труб и термоэлектрических охлаждающих батарей.

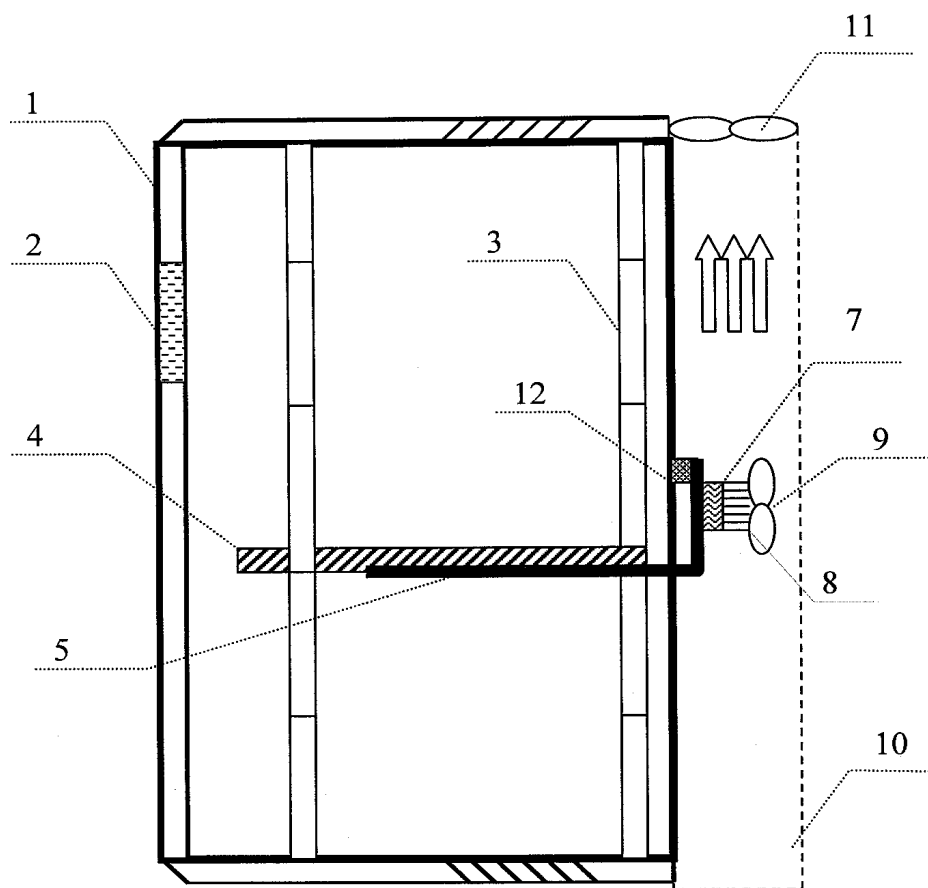


Рис.1. Общий вид шкафа
Fig.1. General view of the cabinet

Устройство состоит из плотно упакованного герметичного корпуса, изображенного на рис.1; герметичной дверцы – 1, с расположенным в ней индикатором – 2; подвижных стоек, которые можно передвигать в горизонтальном направлении и регулировать по высоте для установки аппаратуры – 3; теплопроводящей пластины, на которой устанавливается оборудование – 4 (количество пластин зависит от количества полок установленных шкафу, в нашем случае рассмотрена одна полка); тепловых труб – 5; термоэлектрических батарей – 6; тепловых мостиков – 7; радиатора для снятия тепла – 8 и вентилятора для обдува радиатора – 9; заднего кожуха, служащего, как для защиты, так и для создания канала обдува – 10 и вентилятора для обдува задней полости -11, теплоизоляционных креплений - 12 для жесткой фиксации к задней стенке шкафа; высокотеплопроводной пластины – 13 (для установки ТЭБ и тепловых мостиков).

На рисунке 1 не изображены датчики температуры, соединенные электрически с блоком управления, блоком питания, вентилятором и индикационным дисплеем.

Принцип действия. Установленная аппаратура в термоэлектрический шкаф при работе выделяет тепло, которое нам нужно выводить наружу для оптимальной его работы. Конструкция шкафа выполнена таким образом, чтобы в него не попадали пыль и влага, т.е. агрессивная среда, пагубно влияющая на аппаратуру и систему охлаждения.

Датчик, установленный в полости шкафа, следит за перепадами температуры; цифровые значения мы можем наблюдать на индикаторе – 2. При повышении температуры подается индикация на – 2 и сигнал на блок управления вентилятором – 11, который установлен в тыловой части шкафа над защитным кожухом – 10. Выделяемое аппаратурой тепло через теплопроводящую пластину – 4 попадает на зону испарения тепловых труб – 5. Количество труб может быть различно, в нашем случае установлено три.

Хладагент, используемый в тепловых трубах в нашем случае - вода (можно так же использовать спирт, ацетон и др.). Пары хладагента, попав в зону конденсации, переходят в жидкую фазу и стекают обратно в зону испарения, тем самым снимают тепло с теплопроводящих пластин. Зона конденсации тепловых труб находится в плотном контакте с высоко теплопроводящей пластиной – 13, на которую установлены в шахматном порядке тепловые мостики – 7 с ТЭБ – 6 (холодными спаями к тепловой трубе). Количество мостиков и ТЭБ различно, в зависимости необходимой мощности отвода.

Суть тепловых мостиков заключается в экономии электроэнергии, т.к. они через себя передают тепло на радиатор, которое снимается посредством или естественной конвекции или же принудительным обдувом вентилятора – 11. Тепловые мостики выполнены из медных прямоугольников размером с установленных ТЭБ.

Если интенсивность тепловыделения усиливается в шкафу, то подается сигнал с датчика температуры на блок управления для подачи питания на ТЭБ – 6 и вентилятор – 9. Тем самым эффективность работы тепловых труб повышается.

Отвод тепла с горячих слоев ТЭБ осуществляется при помощи установленного на него радиатора – 8 и вентилятора – 9. Кожух – 10 служит для защиты тыловой части шкафа, а установленный вентилятор – 11 для обдува тыловой полости, т.к. количество полок с аппаратурой может быть различно. Чтобы устранить обратные теплопритоки и жесткую фиксацию от высоко теплопроводящей пластины – 13 используются теплоизоляционные крепления – 12.

Преимуществом предлагаемой конструкции также является отсутствие значительных дополнительных энергозатрат для регулирования температурного режима радиоэлектронной аппаратуры в шкафу и использование тепловых мостиков. Очевидно, что в независимости от конкретных габаритных размеров, любой шкаф для телекоммуникационного оборудования можно рассматривать как условный параллелепипед, ограниченный плоскостями, в реальном приборе играющие роль боковых стенок.

В случае расположения внутри оборудования с плотной компоновкой, можно считать, что мощность тепловыделений равномерно распределена в объеме параллелепипеда. В таком случае переходят, в соответствии с рекомендациями [1], от рассмотрения системы множества тел с тепловыделениями к однородному параллелепипеду с внутренними равномерно распределенными в объеме источниками теплоты. При условии теплообмена с окружающей средой через грани параллелепипеда и использовании граничных условий первого рода (данная модель с относительно небольшими погрешностями может быть применена в большинстве практических случаев). Решение описывается системой уравнений [2], которая позволяет найти температуру в любой точке объема:

$$\frac{\lambda_x}{L_x^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\lambda_y}{L_y^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\lambda_z}{L_z^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{z}^2} - \alpha_v (\vartheta_\omega - \vartheta_f) = -q; \quad (1)$$

$$\vartheta_\omega = \vartheta_f + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial \vartheta_f}{\partial \bar{x}}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\Omega} = \frac{c_p \gamma V}{L_x \alpha_v}, \quad \vartheta_\omega = t_\omega - t_c, \quad \vartheta_f = t_f - t_c. \quad (3)$$

Уравнения (1) и (2) представляют собой замкнутую систему дифференциальных уравнений для определения ϑ_ω и ϑ_f , при граничных условиях:

$$\left[\frac{\partial \vartheta_\omega}{\partial \bar{j}} + 2\text{Bi}_j \vartheta_\omega \right]_{\bar{j}=1} = 0, \quad \left[\frac{\partial \vartheta_\omega}{\partial \bar{j}} - 2\text{Bi}_j \vartheta_\omega \right]_{\bar{j}=1} = 0, \quad (4)$$

$$Bi_j = \frac{\alpha_j L_j}{2\lambda_j}, \quad j = x, y, z; \quad \left[\mathcal{G}_f \right]_{\bar{x}=0} = 0 \quad (5)$$

В случае, когда внутренняя полость разделена полками (рис.2), то каждый из образовавшихся отсеков можно рассматривать как отдельный параллелепипед со своими граничными условиями.

При этом, необходимо отметить, что в нашем случае, полки, разделяющие внутренний объем на отсеки играют еще и роль теплостоков, так как они приведены в контакт с испарительной частью тепловых труб.

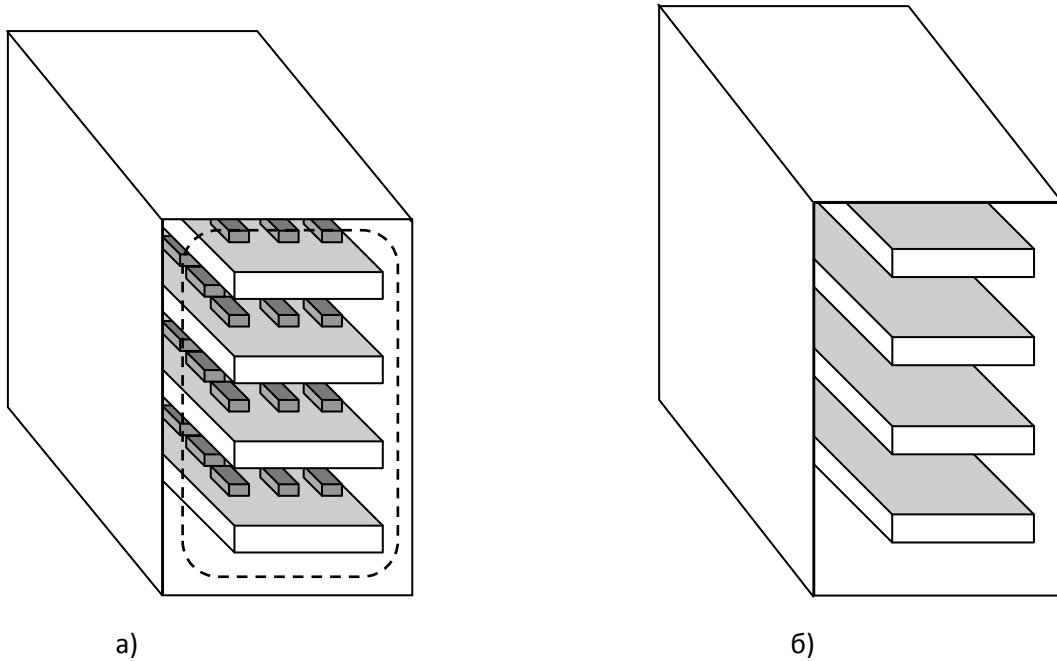


Рис. 2. Схема последовательного упрощения модели при разделении объема на отсеки:

а) исходная модель; б) переход к гладким плитам, разделяющим объем на отсеки;

Fig. 2 Scheme of sequential simplification of the model when dividing the volume into compartments:

a) the original model; b) transition to smooth slabs, dividing the volume into compartments;

В этом случае, возможен переход к системе анизотропных параллелепипедов, только источники теплоты будут располагаться уже на противоположных гранях (ось y), и в этом случае уравнения, описывающие тепловое поле будут иметь вид:

$$\frac{\lambda_x}{L_x^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\lambda_y}{L_y^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\lambda_z}{L_z^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{z}^2} - \alpha_V (\mathcal{G}_\omega - \mathcal{G}_f) = 0; \quad (6)$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial x} \pm \frac{\alpha_x}{\lambda_x} (t - t_c) \right]_{x=\pm l_x} = 0$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial z} \pm \frac{\alpha_z}{\lambda_z} (t - t_c) \right]_{z=\pm l_z} = 0$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial y} \pm \frac{\alpha_y}{\lambda_y} (t - t_c) \right]_{y=\pm l_y} = q_y$$

Задача решается приведением к обыкновенным дифференциальным уравнениям методом Канторовича и приближенное решение имеет вид:

$$N = \frac{[t(x, y, z) - t_c] \lambda_x}{q_y l_x} = 0,5 \frac{l_x}{l_y} \frac{g_1^2}{B_y \varepsilon_z^2} \frac{ch g_1 \frac{y}{l_y}}{ch g_1 + \frac{g_1}{B_y} sh g_1} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{ch g_2 \frac{x}{l_x}}{ch g_2 + \frac{g_2}{B_x} sh g_2} \right) \left(1 + \frac{2}{B_z} - \frac{z^2}{l_z^2} \right) \quad (7)$$

Необходимо отметить, что решение вышеуказанных задач методом приведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям (метод Канторовича) обеспечивает приемлемую для подобного класса задач точность. Ошибка, получаемая при использовании первого приближения соизмерима с точностью определения теплофизических параметров и ошибкой, связанной с переходом от реальной конструкции к эквивалентному однородному параллелепипеду.

Методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения с использованием тепловых труб был собран стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в опытный образец.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий собой ТЭБ, выполненную из стандартных унифицированных ТЭМ типа ICE-71. ТЭБ устанавливалась на радиатор, применяемый для съема тепла с горячих спаев ТЭБ. Для принудительного воздушного охлаждения радиатора использовались кулеры, с регулируемой частотой вращения для регулирования воздушного потока.



Рис.3. Экспериментальный стенд
Fig.3. Experimental stand

С холодными спаями термоэлектрических модулей приведены в тепловой контакт через промежуточную тепловыравнивающую пластину конденсационные части тепловых труб.

Испарительная часть тепловых труб располагается в объеме шкафа и приведена в тепловой контакт с внутренней тепловыравнивающей пластиной, которая также играет роль полки, на которой располагается телекоммуникационное оборудование.

В качестве имитаторов телекоммуникационного оборудования использовались плоские нихромовые нагреватели, подключенные к сети питания переменного тока через трансформатор и измерительные приборы. Фиксировались напряжение питания и ток нагревателей для

определения тепловой мощности, выделяемой в объеме шкафа. Каждый нагреватель имел отдельное питание для задания различных мощностей на разных полках.

Датчик температуры расположен в объеме шкафа и электрически соединен с блоком регулирования, электрически связанного с источником питания термоэлектрических батарей и включающего или отключающего питание в зависимости от достижения заданной температуры в объеме шкафа с заданной петлей температурного гистерезиса.

Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях нами замерялись следующие величины: напряжение и ток на термоэлектрических модулей;

температурное поле на спаях и тепловых трубках посредством тепловизора Testo 890; температуры в объеме шкафа, напряжение и ток на нагревателях, температуры воздуха на входе в блок.

Питание термоэлектрических модулей осуществлялось от регулируемого источника постоянного тока. Ток, проходящий через ТЭБ, и напряжение на ней контролировались встроенными в блок питания приборами.

Предварительно определялась величина тока и напряжения, соответствующая рассеиваемой мощности элементов в пределах от 50 до 200 Вт.

Обсуждение результатов. На приведенных ниже рисунках 4 - 8 представлены экспериментальные зависимости максимальной температуры на имитаторе электронной платы от отводимой ТЭБ, температурные поля шкафа.

Результаты представлены при различных мощностях нагревателей.

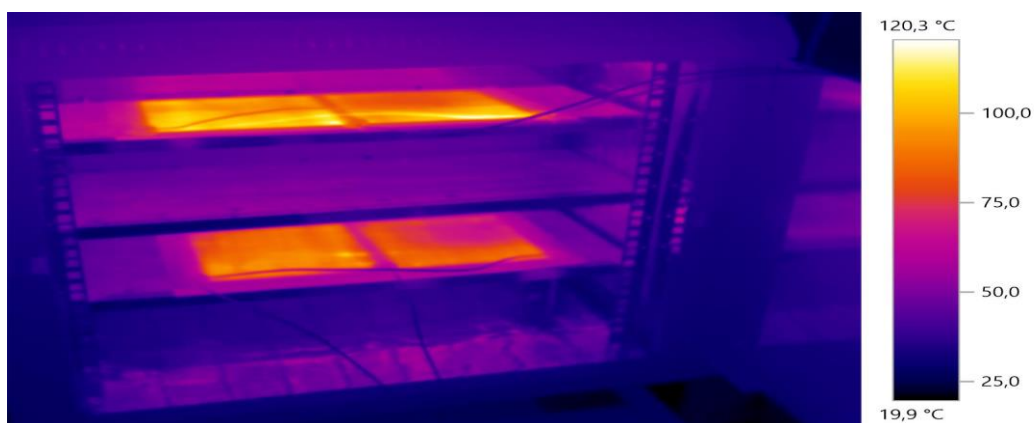


Рис.4. Тепловое поле в объеме шкафа при мощности нагрузки по 50 Вт на полке
Fig.4. Thermal field in the enclosure volume at a load power of 50 W on the shelf

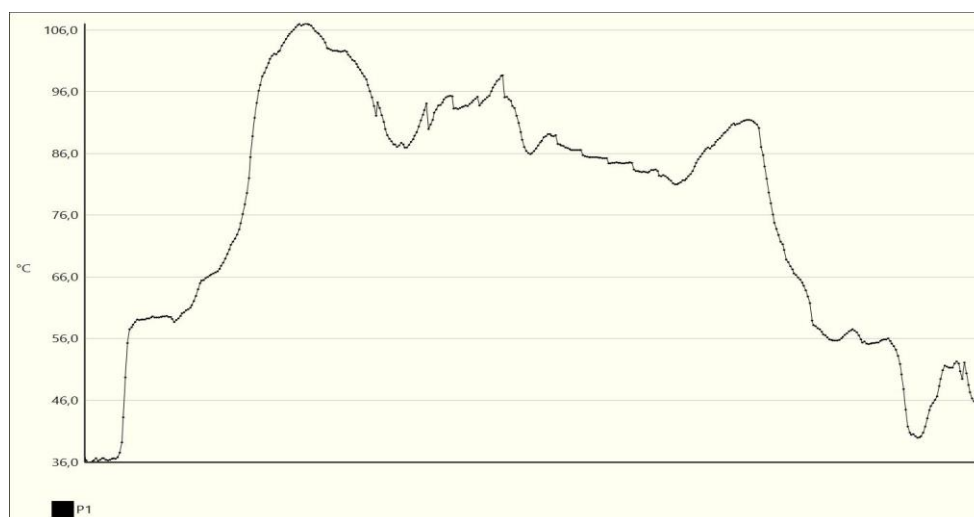


Рис.5. Распределение температуры вдоль верхней полки с нагревателями при мощности 50 Вт

Fig.5. Temperature distribution along the upper shelf with heaters at a power of 50 watts

Из сопоставления полученной термограммы видно, что пиковые значения температур приходятся на поверхность имитаторов тепловой нагрузки.

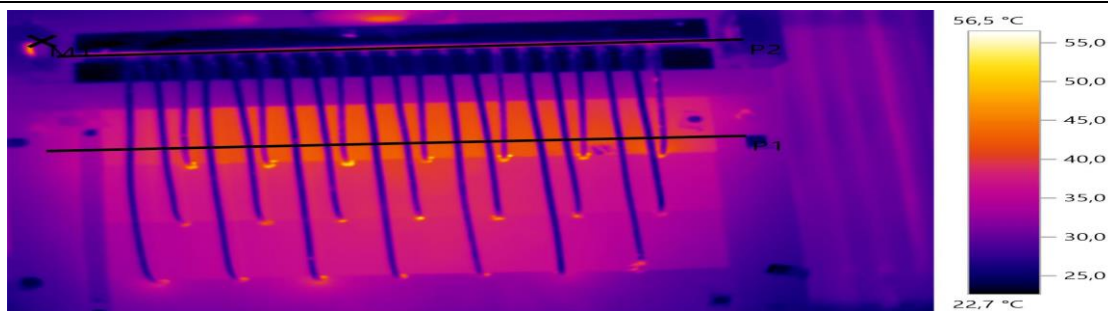


Рис.6. Температурное поле шкафа со стороны задней стенки
Fig.6. Temperature field of the cabinet from the rear wall side

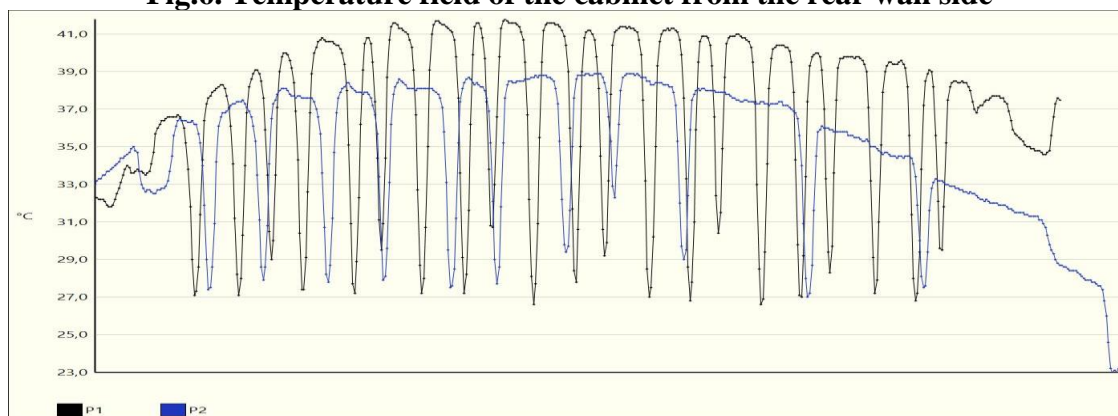


Рис.7. Распределение температуры вдоль полки с тепловой нагрузкой (P1) и тепловыравнивающей пластиной с конденсаторными частями тепловых труб (P2)
Fig.7. Temperature distribution along the shelf with heat load (P1) and heat equalizing plate with condenser parts of heat pipes (P2)

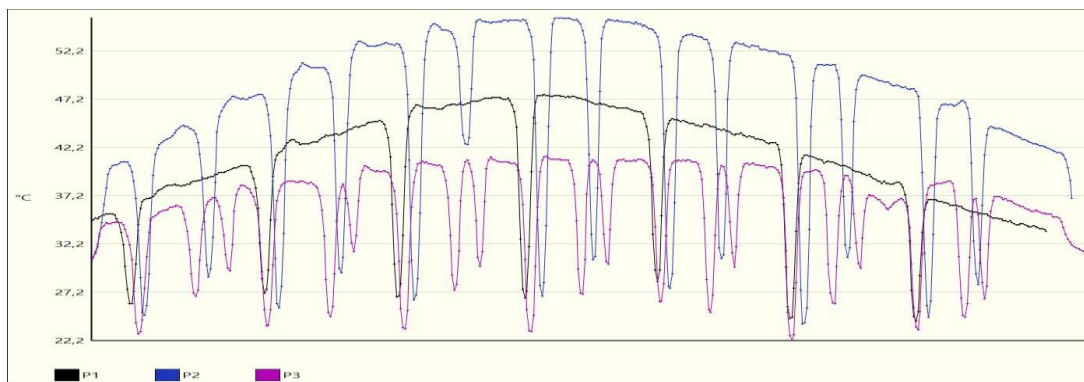


Рис.8. Распределение температуры по отсекам шкафа при работающей системе охлаждения

Fig.8. Temperature distribution in the compartment of the cabinet with the cooling system running

Мощность источников тепловыделений 150 Вт в каждом отсеке.

Вывод. Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения шкафов с телекоммуникационным оборудованием;
- указанный способ охлаждения имеет преимущество перед обычным, принудительным или естественным способами;
- согласно проведенным экспериментальным исследованиям температуру в объеме блока и пиковые значения источников тепловыделений удалось существенно снизить;
- при мощностях рассеивания на одной плате в пределах 50 Вт не требуется применения специальных средств по съему тепла с горячих спаев ТЭБ.

Предложена конструкция системы обеспечения теплового режима шкафа для телекоммуникационного оборудования, основанная на совместном использовании тепловых труб и термоэлектрических преобразователей. При работающей системе охлаждения удастся существенно снизить температуру в объеме шкафа и довести ее до приемлемой температуры (снижение пиковых значений с 110 °С до 53°С).

Библиографический список:

1. Белоусов О.А, Муромцев Д.Ю. Компьютерные технологии для расчёта тепловых режимов и механических воздействий г. Тамбов Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» 2012 стр. 5-6
2. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г. Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Наука, 1990.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
5. Патент РФ №369860. Устройство охлаждения аппаратуры / Воронин Г.И., Антонов Ю.В., Федоров В.Н., Чижиков Ю.В., Дрынтьев В.П.
6. Патент РФ №1755398 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Сидорин В.И.
7. Патент РФ №1287699 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Абросимов А.И.
8. Патент РФ №1595321 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Калишин Н.А., Колесников А.А., Максимова М.А., Ульянов Н.А.
9. Ханов, Г. В. Альтернативный способ охлаждения процессоров в компьютере / Г. В. Ханов, Е. Б. Белкина // Экология и жизнь : сб. ст. XVIII междунар. науч.-практ. конф., апрель 2010 г. / Приволжский Дом знаний [и др.]. – Пенза, 2010. – С. 137–139.
10. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов // Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
11. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах [Текст]: монография / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов // М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 532 с.
12. Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфилов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. – № 3. – С. 41-43.
13. Effect of nanoparticle on heat transfer in mini double pipe heat exchangers in turbulent flow [Text] / Aghayari Reza [and oth.] // Heat Mass Transfer, 2015. – № 51. – P. 301-306.
14. Kuchinskiy P.I., Zograf F.G. M754 Molodezh' i nauka: v 3 t.: materialy konf. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2014. pp.149-154.
15. Staliulionis Z., Zhang Z., Pittini R., Andersen M.A.E., Tarvydas P., Noreika A. Elektronika ir Elektrotechnika. 2014. Vol. 20. №1. pp. 49-54.
16. Li Bin, Byon Chan. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 89. pp. 159-164.

References:

1. Belousov O.A, Muromtsev D.Yu. Komp'yuternye tekhnologii dlya rascheta teplovykh rezhimov i mekhanicheskikh vozdeystviy. Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU»; 2012. P. 5-6. [Belousov O.A, Muromtsev D.Yu. Computer technologies for the calculation of heat modes and mechanical impacts. Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU»; 2012. P. 5-6. (in Russ.)]
2. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. Metody rascheta teplovogo rezhima priborov. M.: Nauka; 1990. [Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. Calculation methods of devices' heat mode. Moscow: Nauka; 1990. (in Russ.)]
3. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Okhlazhdenie radioelektronnykh sistem: uchebnoe posobie. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. The cooling of radioelectronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. (in Russ.)]

4. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Thermal stabilisation of microelectronic apparatus by means of semiconductor thermoelectric devices. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 p. (in Russ.)]
5. Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Dryn' V.P. Ustroystvo okhlazhdeniya apparatury. Patent RF №369860. [Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Dryn' V.P. Device for apparatus cooling. Patent RF №369860. (in Russ.)]
6. Sidorin V.I. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. Patent RF №1755398. [Sidorin V.I. Device for heat-emitting apparatus cooling. Patent RF №1755398. (in Russ.)]
7. Abrosimov A.I. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. Patent RF №1287699. [Abrosimov A.I. Device for heat-emitting apparatus cooling. Patent RF №1287699. (in Russ.)]
8. Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. Patent RF №1595321. [Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A. Device for heat-emitting apparatus cooling. Patent RF №1595321. (in Russ.)]
9. Khanov G.V., Belkina E.B. Al'ternativnyy sposob okhlazhdeniya protsessorov v komp'yutere. Sbornik statey XVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekologiya i zhizn". Penza; 2010. P. 137–139. [Khanov G.V., Belkina E.B. An alternative method of cooling CPU. Proceedings of XVIII International scientific-practical conference "Ecology and Life". Penza; 2010. P. 137–139. (in Russ.)]
10. Konovalov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. Razrabotka i modelirovaniye mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya. Voronezh: VGTU; 2013. 222 s. [Konovalov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. The development and modeling of micro-channel cooling systems. Voronezh: VGTU; 2013. 222 p. (in Russ.)]
11. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leont'ev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensifikatsiya teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nanomasshtabakh. M.: FGUP «TsNIIATOMINFORM»; 2008. 532 s. [Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leont'ev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensification of heat and mass-exchange in macro-, micro-, and nanoscales. Moscow: FGUP «TsNIIATOMINFORM»; 2008. 532 p. (in Russ.)]
12. Panfilov S.A., Kalikanov V.M., Fomin Yu.A., Savanin A.S. Proektirovaniye i ispytaniya okhladiteley silovyykh poluprovodnikovyykh priborov. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2008;3:41-43. [Panfilov S.A., Kalikanov V.M., Fomin Yu.A., Savanin A.S. Design and testing of cooling power semiconductor devices. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2008;3:41-43. (in Russ.)]
13. Aghayari R., Maddah H., Ashori F., Hakiminejad A., Aghili M. Effect of nanoparticles on heat transfer in mini double pipe heat exchangers in turbulent flow. Heat Mass Transfer. 2015;51(301-306).
14. Kuchinskiy P.I., Zograf F.G. M754 Molodezh' i nauka: v 3 t.: materialy konf. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2014. P.149-154.
15. Staliulionis Z., Zhang Z., Pittini R., Andersen M.A.E., Tarvydas P., Noreika A. Investigation of heat sink efficiency for electronic component cooling applications. Elektronika ir Elektrotechnika. 2014;20(1):49-54.
16. Li B., Byon C. Investigation of natural convection heat transfer around a radial heat sink with a concentric ring. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 89. pp. 159-164.

Сведения об авторах:

Рашидханов Арип Таймасханович - старший преподаватель кафедры электроэнергетики и возобновляемых источников энергии.

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

Arip T. Rashidkhanov - Senior Lecturer, Department of Electricity and Renewable Energy.

Shirali A. Yusufov- Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 03.06.2017.

Received 03.06.2017.

Принята в печать 20.06.2017.

Accepted for publication 20.06.2017.