
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА/THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44>**ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В РАДИАТОРАХ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Научная статья

Галиакбаров А.Т.¹, Башмаков Д.А.^{2,*}, Самигуллин А.Д.³, Баландин Л.Ю.⁴, Суранович И.М.⁵¹ORCID : 0000-0002-2666-7124;²ORCID : 0000-0001-6815-6253;³ORCID : 0000-0003-2288-2473;^{1,2,3} Казанский Федеральный университет, Набережные Челны, Российская Федерация^{4,5} ООО «Техно-Логика», Набережные Челны, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (bashmakovda[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье приводится исследование температурных полей в радиаторах, применяемых для охлаждения элементов силовой электроники. Радиаторы, изготовленные из сплава на основе алюминия, охлаждаются принудительно воздушными вентиляторами. Поток охлаждающего воздуха направлен вдоль ребер радиаторов. С целью определения температурного поля в ребрах был разработан специальный стенд. В радиаторе размещены термодпары для измерения распределения температур в основании и вдоль ребра. Тепло распространялось теплопроводностью. Дополнительно производилась тепловизионная съемка. В экспериментах проводились измерения температур при различных подводимой мощности и скорости охлаждающего воздуха. Обработка данных показала линейную зависимость изменения температур в разных точках при разной мощности.

Ключевые слова: радиатор, температурное поле, тепловизионная съемка.**TEMPERATURE FIELD IN POWER ELECTRONICS COOLING RADIATORS**

Research article

Galiakbarov A.T.¹, Bashmakov D.A.^{2,*}, Samigullin A.D.³, Balandin L.Y.⁴, Suranovich I.M.⁵¹ORCID : 0000-0002-2666-7124;²ORCID : 0000-0001-6815-6253;³ORCID : 0000-0003-2288-2473;^{1,2,3} Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation^{4,5} Technologika LLC, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

* Corresponding author (bashmakovda[at]yandex.ru)

Abstract

The article presents a study of temperature fields in radiators used for cooling of power electronics elements. Radiators made of aluminium-based alloy are cooled by forced air fans. The cooling air flow is directed along the radiator fins. In order to determine the temperature field in the fins, a special bench was developed. Thermocouples were placed in the radiator to measure the temperature distribution at the base and along the fin. Heat was propagated by thermal conduction. Additionally, thermal imaging was performed. In the experiments, temperature measurements were carried out at different power input and cooling air velocity. Data processing showed a linear dependence of temperature changes at different points at different power.

Keywords: radiator, temperature field, thermal imaging.**Введение**

Основной и актуальной проблемой силовой электроники на данное время является охлаждение мощных ключевых элементов, для обеспечения бесперебойной и надёжной работы всей энергетической системы оборудования [1]. Чаще всего в качестве ключевых элементов применяют IGBT и MOSFET транзисторы. Тепловыделение данных элементов настолько велико, что качественное их охлаждение невозможно без применения дополнительных теплоотводящих элементов. При решении задач охлаждения стоит учитывать такие параметры и плотность компоновки силовых элементов производимого оборудования, а также условиях их эксплуатации. Первый параметр ограничивает габариты и возможности технической реализации охлаждения, а второй на возможные технологические решения.

В целом распределение температур в материалах [2] при передаче теплоты теплопроводностью можно определить экспериментально или теоретически расчетными методами [3]. Анализ экспериментальных данных с применением теории подобия [4] является трудоемкой задачей.

В связи с вышесказанным, наиболее оптимальными решениями для жестких условий эксплуатации выглядят различные варианты радиаторов охлаждения без дополнительных теплоносителей, например радиаторов с плоскими ребрами. Однако классические варианты радиаторов с открытой внешней частью малоэффективны для ограниченных пространств и высоких скоростей потока холодного теплоносителя (воздуха), данный фактор приводит к решению данной задачи путём усложнения конструкции радиаторов и расположения плиты контакта с обеих сторон плоскорёберного радиатора. Такой подход убирает проблему снижения скорости потока воздуха, однако уменьшает максимально-возможную высоту ребер. Для компенсации описанного негативного эффекта требуется изготовить ребра

сложных форм. Все решения приведут как к изменению металлоёмкости, так и к изменению требований к мощности вентилятора, охлаждающего радиатор.

В статье [5] показано влияние геометрии ребер и их пространственное расположение по отношению к направлению охлаждающего потока на интенсивность теплообмена оребренной поверхности. При этом может быть достигнуто повышение эффективности ребристых поверхностей на 50%.

Цель проведённых исследований – определение эффективности оребренных плоских теплообменных радиаторов.

Методы и принципы исследования

Экспериментальные исследования проводились для 3 типов образцов радиаторов (рис. 1), отличающихся шагом и высотой ребер, шириной секции, высотой и количеством внутренних каналов. Материал изготовления образцов – сплав на основе алюминия [6].

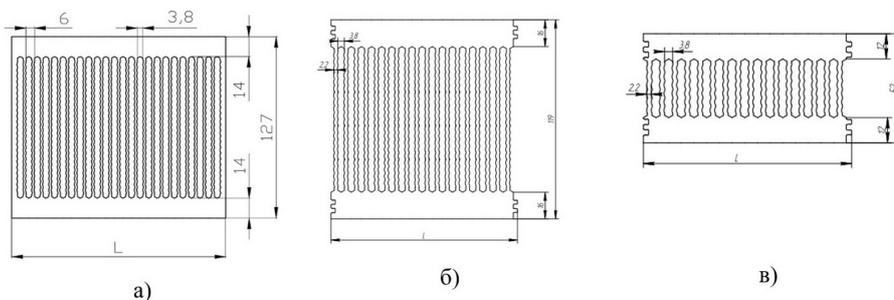


Рисунок 1 - Внешний вид радиаторов с расположением ребер:

а) ТП 050; б) ТП 070; в) ТП 071

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.1>

С целью установления экспериментальных значений эффективности ребра разработана установка, изображённая на рисунке 2.

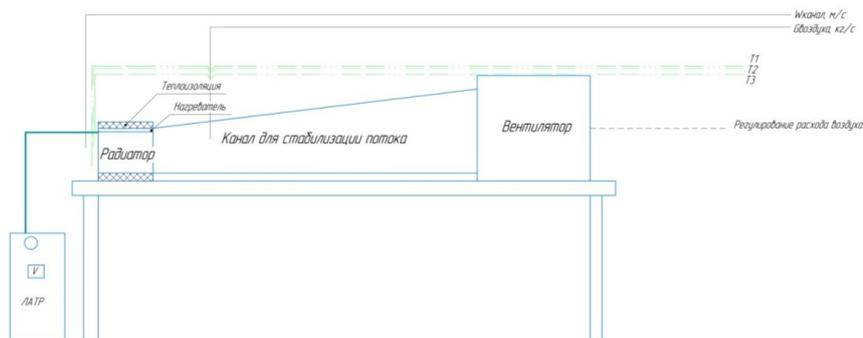


Рисунок 2 - Общий вид экспериментальной установки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.2>

Рабочий участок канала стабилизации потока представляет собой теплоизолированный короб с установленным на выходе из него образцом радиатора. Конструкция короба дает возможность обеспечить равномерный массовый расход воздуха по всей длине оребренной части образца секции. На рабочем участке было реализовано многоточечное измерение температуры потока воздуха, скорости течения и температуры как до, так и после исследуемого радиатора.

В ходе экспериментов производились замеры тока (применялся шунт 75 ШИП 1 10005 и мультиметр METEX M-3660 D) и напряжения (вольтметр 85L1-V2.5), подаваемого на нагревательный элемент, имитирующий IGBT транзистор. Для измерения расхода, скорости и температуры воздуха на входе и выходе из радиатора применялся анемометр АКТАКОМ АТЕ-9508 и термоанемометр АКТАКОМ АТТ-1004. Воздух в экспериментальную установку подавался вентилятором LD Didactic GmbH 373041, который имеет возможность регулировки расхода.

Электрическая мощность, подаваемая на нагреватель, регулировалась при помощи автотрансформатора ЛАТР ПЕСАНТА и изменялась в пределах от 100 Вт до 1000 Вт с шагом 100 Вт. Температуры в радиаторе под нагревательным элементом, у основания ребра и по длине ребра измерялись термопарами типа К, которые располагали в массиве материала радиатора. Основным измеряемым параметром, являлась температура основания радиатора под нагревательным элементом, которая не должна была превышать 85 °С (критическая температура работы полупроводниковых приборов) [7].

Основные результаты

Расход воздуха G_v , кг/с, находили по осредненной скорости потока воздуха v в канале рабочего участка до теплообменной секции в пяти сечениях по длине канала стабилизации потока секции [8]:

$$G_v = vF\rho,$$

где F – площадь поперечного сечения канала рабочего участка (теплоноситель – воздух), m^2 ; ρ – плотность воздуха, рассчитывается в сечении измерения скоростей по измеренным в эксперименте средним значениям давления и температуры потока воздуха, kg/m^3 .

Тепловую мощность, подводимую к исследуемому типу радиатора, находили исходя из измеренных силы тока и напряжения. Для определения выхода на стационарный режим работы, с целью обеспечения корректного съёма температур вдоль ребра радиатора, сравнивали отводимое тепло с подводимым

$$Q_{\text{т}} \approx Q_0 = G c_p \Delta t,$$

где c_p – теплоемкость теплоносителя, определяется по средней температуре потока до и после рабочего участка, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; G – расход теплоносителя, kg/c ; Δt – температурный напор, $^\circ C$.

Расхождение вычисленных значений, определяемое тепловыми потерями на рабочем участке, не превышало 5 %.

Удельное термическое сопротивление теплопередаче через плоскую стенку теплообменной секции без учета оребрения вычисляли по формуле:

$$R = 1/k,$$

где k – коэффициент теплопередачи.

$$k = Q/(F\Delta t),$$

где F – площадь теплообмена по внешней поверхности без учета оребрения, m^2 ; Δt – среднелогарифмический температурный напор в радиаторе.

Эффективность радиатора оценивалась на основе: тепловой мощности Q , тепловой эффективности ϵ , удельного термического сопротивления теплопередаче R , критериев энергетической эффективности М. В. Кирпичева и В. М. Антуфьева:

$$E_k = Q/N,$$

$$E_A = \alpha/N,$$

где N – удельная мощность на прокачку теплоносителя.

Для оценки эффективности теплоотвода вдоль рёбер проводилась тепловизионная съёмка. Результаты наиболее характерных режимов, отражающих общую ситуацию для всех типов рассматриваемых теплообменников представлены на рисунках 3 и 4.

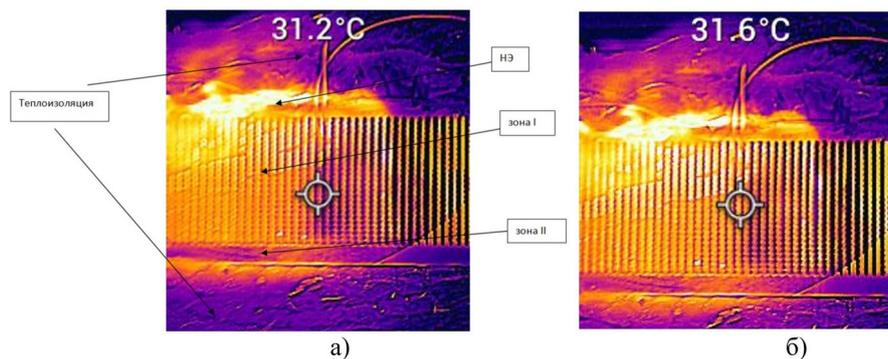


Рисунок 3 - Тепловизионная съёмка радиатора ТП 070:

а) при мощности 300 Вт и скорости потока 1 м/с; б) при мощности 400 Вт и скорости потока 5 м/с

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.3>

На рисунке 3 отражены температуры в центре радиатора. Синим цветом зоны с меньшими температурами, а ярко-красными и желтыми – с высокими температурами. Сверху и снизу радиаторов расположена теплоизоляция для уменьшения теплового отвода с поверхности радиатора. Это позволило более точно определить количество теплоты, отводимой непосредственно ребрами радиатора, которые обдуваются принудительно воздушным потоком от вентиляторов и достичь тепловых потерь не более 5%. Сверху радиатора установлен нагревательный элемент (НЭ), который крепился к радиатору через термопасту [9]. Под ним наблюдается высокотемпературная зона. В зоне I ребра хорошо отводят тепло. На это указывает тепловое излучение близкое к красному и желтому цвету. В зоне II радиатор имеет более низкую температуру и цвет ближе к синему или фиолетовому.

С увеличением мощности, подаваемой на НЭ, растет температура радиатора. В целом картина тепловых полей сильно не изменяется. Характерным является наличие определенной зоны теплового воздействия нагревательного элемента. Т.е. в радиальном, по отношению к оси ребер, направлении за пределами нагрева тепло распределяется не так эффективно как вдоль ребер.

Стоит отдельно отметить радиатор ТП 071, для него характерен нагрев ребер по всей длине и высоте с высокой скоростью роста температур (рис. 4).

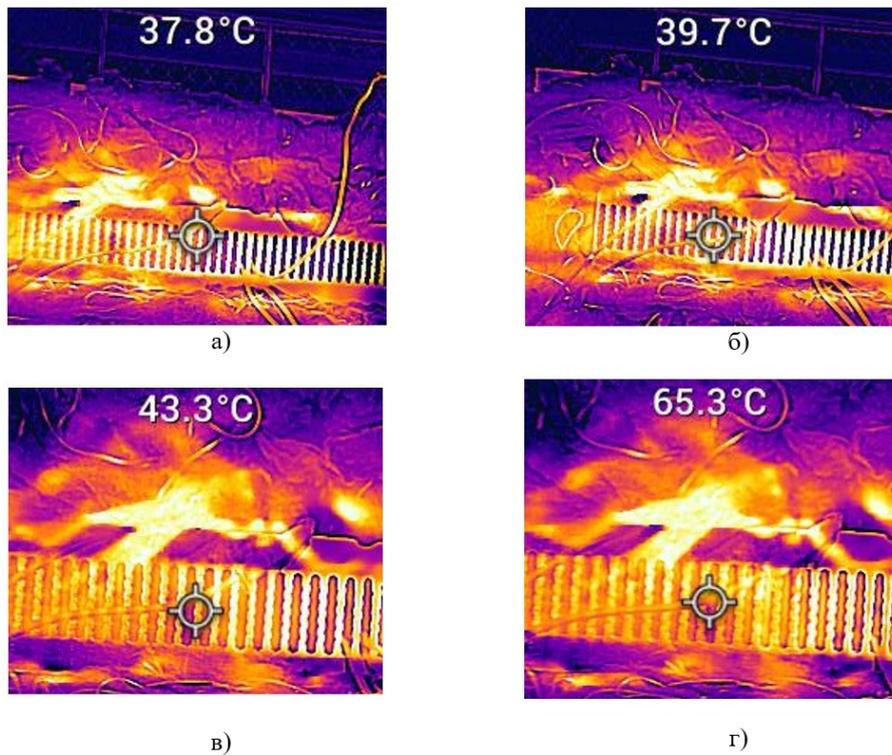


Рисунок 4 - Тепловизионная съёмка радиатора ТП 071 при скорости потока воздуха 5 м/с:
 а) 140 Вт; б) 300 Вт; в) 530 Вт; г) 814 Вт
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.4>

Обсуждение

Результаты измерения температур при различных подводимых тепловых мощностях и расходах набегающего потока воздуха приведены на рисунках 5-7.

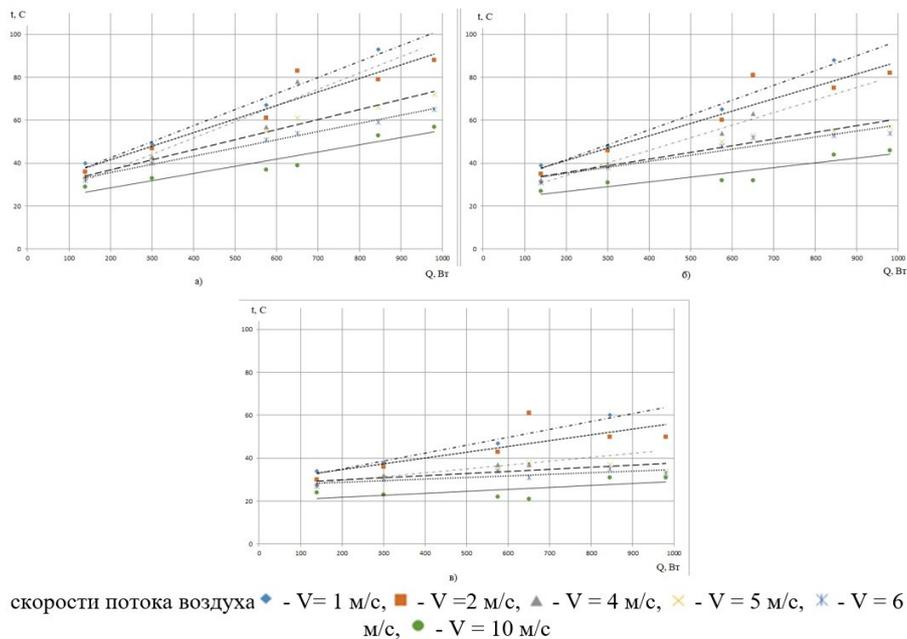


Рисунок 5 - Температуры радиатора типа ТП-050 в точках:
 а) под нагревательным элементом; б) у основания ребра; в) вершины ребра
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.5>

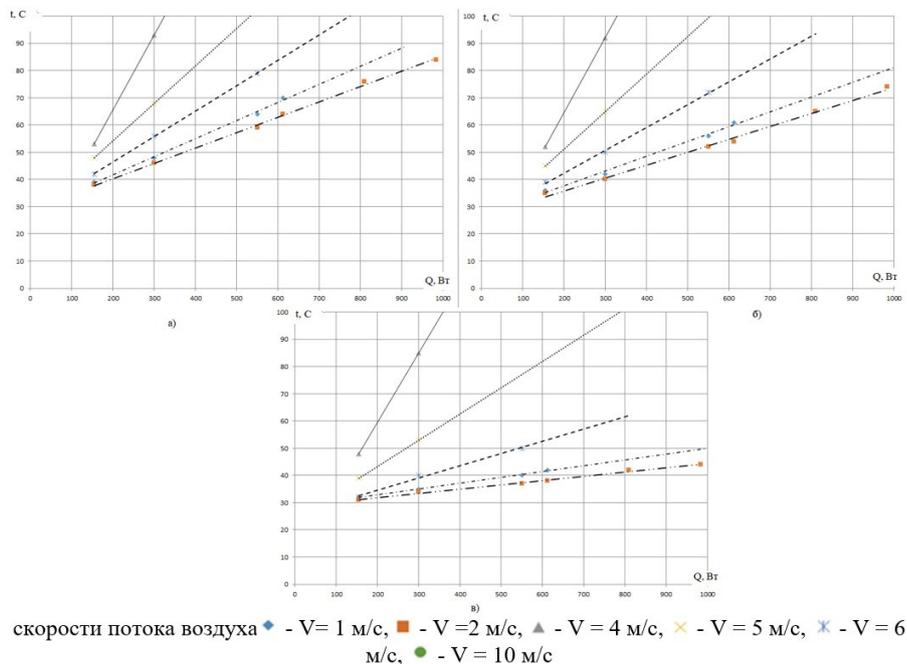


Рисунок 6 - Температуры радиатора типа ТП-070 в точках:
 а) под нагревательным элементом; б) у основания ребра; в) вершины ребра
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.6>

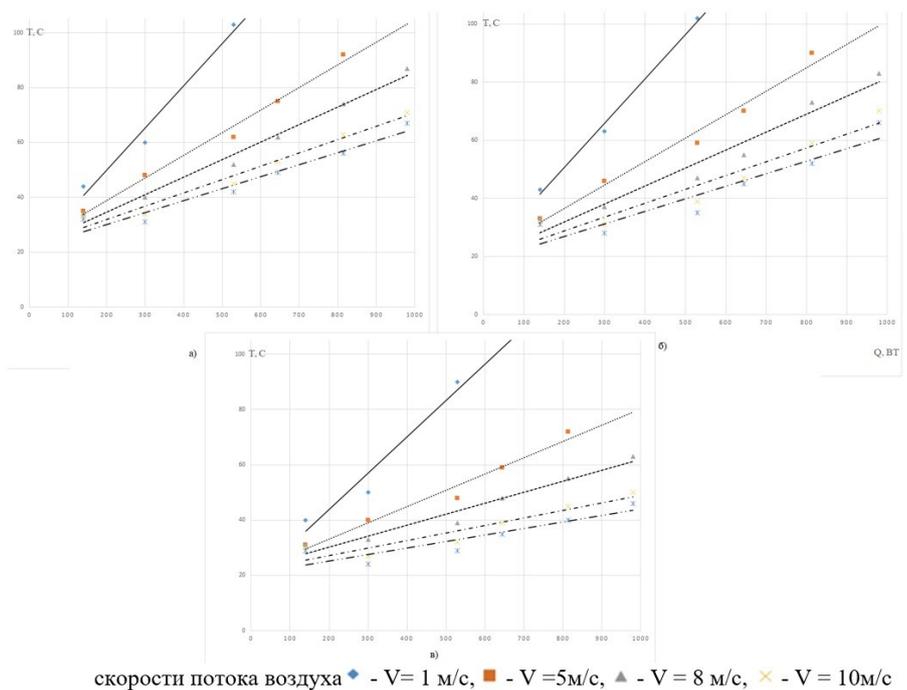


Рисунок 7 - Температуры радиатора типа ТП-071 в точках:
 а) под нагревательным элементом; б) у основания ребра; в) вершины ребра
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.44.7>

Как видно из графиков, изменения температур носят практически линейный характер. Это указывает, что при возрастании подводимой мощности, температура в данной точке радиатора, растет по линейному закону. Однако стоит отметить, что все графики имеют небольшое искривление, отражающее отклонение ребер радиаторов от плоской формы. Анализ полученных зависимостей положен в основу разработки математической модели радиаторов с ребристыми стенками. В дальнейшем может быть использована при тепловом проектировании систем электроники [10].

Заключение

На основании проведенных экспериментов с тремя различными образцами теплообменных секций установлена эффективность каждой секции по таким показателям, как: тепловая мощность, тепловая эффективность, удельное термическое сопротивление теплопередаче. Выявлено, что изменение ребер от плоской формы к ребристой, обеспечивает снижение массогабаритных характеристик теплообменной секции аппаратов воздушного охлаждения с сохранением требуемого теплового потока.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Маниленко И.Н. Оценка эффективности радиаторов воздушного охлаждения электроники / И.Н. Маниленко // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". — Пенза: Издательство ПГУ, 2011. — с. 188-189.
2. Галиакбаров А.Т. Сравнительная характеристика теплофизических свойств композитных и полимерных материалов. / А.Т. Галиакбаров, Е.В. Леонтьев // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. — 2023. — 3 (95). — С. 50-60.
3. Ройзен Л.И. Тепловой расчет оребренных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин. — Москва: Энергия, 1977. — 256 с.
4. Розенцвайг А.К. Особенности парообразования в капле эмульсии при "большой" разнице температур насыщения дисперсной фазы и сплошной среды / А.К. Розенцвайг, Ч.С. Страшинский, А.Т. Галиакбаров и др. // Энергосбережение. Наука и образование. Сборник докладов международной конференции. — Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2017. — с. 368-376.
5. Баранюк А.В. Экспериментальное исследование теплообмена плоских теплоотводящих поверхностей с пластинчатым оребрением / А.В. Баранюк, В.А. Рогачев, Ю.В. Жукова и др. // Инженерно-физический журнал. — 2020. — Т. 93. — №4. — с. 996-1007.
6. Дементьев Д.В. Исследование и оптимизация прототипа системы охлаждения модуля кремниевой трековой системы эксперимента BM@N. / Д.В. Дементьев, Т.З. Лыгденова, П.И. Харламов // Приборы и техника эксперимента. — 2021. — 1. — С. 47-55.
7. Вавилов В.Е. Метод расчёта площади поверхности радиаторов охлаждения силовой электроники / В.Е. Вавилов, Д.Р. Фаррахов, А.А. Меднов и др. // Молодежный вестник УГАТУ. — 2016. — 2 (15). — с. 32-37.
8. Тиунов С.В. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла / С.В. Тиунов, А.Н. Скрыпник, Г.С. Маршалова и др. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2020. — Т. 63. — №2. — с. 138-150.
9. Эсау Д. Теплопроводящая паста - это действительно важно!. / Д. Эсау, М. Штрубе, А. Колпаков // Компоненты и технологии. — 2010. — 6 (107). — С. 88-90.
10. Горячев Н.В. Концептуальная схема разработки систем охлаждения радиоэлементов в интегрированной среде проектирования электроники. / Н.В. Горячев, Н.К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. — 2009. — 2. — С. 66-70.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Manilenko I.N. Otsenka effektivnosti radiatorov vozdušnogo ohlazhdenija elektroniki [Evaluation of the efficiency of electronic air cooling radiators] / I.N. Manilenko // Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". — Penza: PGU Publishing, 2011. — p. 188-189. [in Russian]
2. Galiakbarov A.T. Sravnitel'naya xarakteristika teplofizicheskix svojstv kompozitny'x i polimerny'x materialov [Comparative characteristics of thermophysical properties of composite and polymer materials]. / A.T. Galiakbarov, E.V. Leont'ev // Socio-economic and technical systems: research, design, optimization. — 2023. — 3 (95). — P. 50-60. [in Russian]
3. Rojzen L.I. Teplovoj raschet orebrenny'x poverxnostej [Thermal calculation of finned surfaces] / L.I. Rojzen, I.N. Dul'kin. — Moscow: E'nergiya, 1977. — 256 p. [in Russian]
4. Rozentsvajg A.K. Osobennosti paroobrazovanija v kaple emul'sii pri "bol'shoj" raznitse temperatur nasyschenija dispersnoj fazy i sploshnoj sredy [Features of vaporization in an emulsion droplet with a "large" difference in saturation temperatures of the dispersed phase and the continuous medium] / A.K. Rozentsvajg, Ch.S. Strashinskij, A.T. Galiakbarov et al. // Energy saving. Science and education. Collection of reports of the international conference. — Naberezhnye Chelny: Publishing and Printing Center of Naberezhnye Chelny Institute of K(P)FU, 2017. — p. 368-376. [in Russian]
5. Baranjuk A.V. Eksperimental'noe issledovanie teploobmena ploskih teplootvodjaschih poverxnostej s plastinchatym orebreniem [Experimental study of heat transfer of flat heat-trapping surfaces with plate fins] / A.V. Baranjuk, V.A. Rogachev, Ju.V. Zhukova et al. // Engineering and Physics Journal. — 2020. — V. 93. — №4. — p. 996-1007. [in Russian]
6. Dement'ev D.V. Issledovanie i optimizaciya prototipa sistemy' oxlazhdeniya modulya kremnievoj trekovoj sistemy' e'ksperimenta BM@N [Research and optimization of the prototype of the cooling system of the silicon track system module of

the BM@N experiment]. / D.V. Dement'ev, T.Z. Ly'gdenova, P.I. Xarlamov // Instruments and experimental techniques. — 2021. — 1. — P. 47-55. [in Russian]

7. Vavilov V.E. Metod rascheta ploschadi poverhnosti radiatorov ohlazhdenija silovoj elektroniki [Method for calculating the surface area of power electronics cooling radiators] / V.E. Vavilov, D.R. Farrahov, A.A. Mednov et al. // UGATU Youth Bulletin. — 2016. — 2 (15). — p. 32-37. [in Russian]

8. Tiunov S.V. Eksperimental'noe issledovanie teplogidravlicheskih harakteristik orebrennyh ploskih trub apparata vozdushnogo ohlazhdenija masla [An experimental study of the thermohydraulic characteristics of finned flat tubes in an oil-air cooling system] / S.V. Tiunov, A.N. Skrypnik, G.S. Marshalova et al. // Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. — 2020. — V. 63. — №2. — p. 138-150. [in Russian]

9. E'sau D. Teploprovodyashhaya pasta - e'to dejstvitel'no vazhno! [Heat-conducting paste is really important!]. / D. E'sau, M. Shtrube, A. Kolpakov // Components and technologies. — 2010. — 6 (107). — P. 88-90. [in Russian]

10. Goryachev N.V. Konceptual'naya sxema razrabotki sistem oxlazhdeniya radioelementov v integrirovannoj srede proektirovaniya e'lektroniki [A conceptual scheme for the development of cooling systems for radio elements in an integrated electronics design environment]. / N.V. Goryachev, N.K. Yurkov // Design and technology of electronic means. — 2009. — 2. — P. 66-70. [in Russian]