 © Авторы статьи / Authors of the article

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА/THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105 EDN: HWYOXI

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПОДОБИЯ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОХЛАДИТЕЛЯ IGBT И MOSFET ТРАНЗИСТОРОВ

Научная статья

Башмаков Д.А.[1, *], Галиакбаров А.Т.[2], Глуховской А.С.[3], Баландин Л.Ю.[4], Суранович И.М.[5]
[1] ORCID : 0000-0001-6815-6253;
[2] ORCID : 0000-0002-2666-7124;
[1, 2, 3] Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережные Челны, Российская Федерация
[4, 5] ООО «Техно-Логика», Набережные Челны, Российская Федерация

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

Предложена: 09.04.2026; Принята: 23.07.2026; Опубликована: 17.08.2026

Аннотация

Статья посвящена проблеме разработки эффективных систем охлаждения мощных полупроводниковых IGBT и MOSFET транзисторов. Целью проведенных исследований является определение эффективности оребренных плоских теплообменных радиаторов со сложной геометрией для использования в условиях ограниченного пространства и принудительной конвекции. Представлена методика математического моделирования процесса теплоотдачи, основанная на применении критериальных уравнений подобия. Исходными данными для расчетов служат геометрические параметры радиатора, тепловая мощность и расход воздуха. Методология исследования базируется на сравнении экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде, с результатами численного моделирования. Для повышения точности расчетов в модель введен эмпирический коэффициент, учитывающий влияние технологических особенностей на теплопередачу. Эффективность радиаторов оценивалась по тепловой мощности, удельному термическому сопротивлению и энергетическим критериям. На основе разработанной модели выполнены расчеты, позволяющие по заданным условиям определять необходимую площадь теплообмена и максимальную отводимую мощность. Анализ полученных зависимостей подтвердил, что изменение формы ребер с плоской на ребристую позволяет снизить массогабаритные характеристики теплообменных секций при сохранении требуемого теплового потока. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем охлаждения силовой электроники, работающей в условиях повышенных требований к эксплуатации.

Ключевые слова: радиатор, температурное поле, математическое моделирование.

APPLICATION OF SIMILARITY CRITERIA EQUATIONS TO A MATHEMATICAL MODEL OF A COOLER FOR IGBT AND MOSFET TRANSISTORS

Research article

Bashmakov D.A.[1, *], Galiakbarov A.T.[2], Gluhovskoy A.S.[3], Balandin L.Y.[4], Suranovich I.M.[5]
[1] ORCID : 0000-0001-6815-6253;
[2] ORCID : 0000-0002-2666-7124;
[1, 2, 3] Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation
[4, 5] Technologika LLC, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

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

Suggested: 09.04.2026; Accepted: 23.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The article is devoted to the problem of developing effective cooling systems for high-power semiconductor IGBT and MOSFET transistors. The aim of the research is to determine the efficiency of finned flat heat exchangers with complex geometry for use in confined spaces and under forced convection conditions. A method for the mathematical modelling of the heat transfer process is presented, based on the application of similarity criteria equations. The input data for the calculations consist of the heater's geometric parameters, thermal power and air flow rate. The research methodology is based on a comparison of experimental data obtained on a laboratory test rig with the results of numerical modelling. To improve the accuracy of the calculations, an empirical coefficient was introduced into the model to account for the influence of design features on heat transfer. The efficiency of the radiators was evaluated in terms of thermal power, specific thermal resistance and energy criteria. Calculations were performed using the developed model, enabling the required heat exchange area and maximum dissipated power to be determined under specified conditions. Analysis of the resulting relationships confirmed that changing the fin shape from flat to finned allows for a reduction in the mass and dimensions of the heat exchange sections whilst maintaining the required heat flux. The results of this study can be used in the design of cooling systems for power electronics operating under demanding conditions.

Keywords: heater, temperature field, mathematical modelling.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Введение

Ключевой и действующей задачей силовой электроники в настоящий момент считается отвод тепла от основных компонентов, чтобы гарантировать стабильное и безотказное функционирование всей энергетической системы аппаратуры [3]. Преимущественно в роли основных элементов используют транзисторы IGBT и MOSFET. Нагрев данных компонентов столь значительный, что эффективное их охлаждение недостижимо без использования вспомогательных теплорассеивающих узлов или особых покрытий [7]. При проработке вопросов теплоотвода следует принимать во внимание такие характеристики, как плотность размещения силовых компонентов выпускаемого оборудования, а также режимы их использования и неравномерность в распределении тепла [8]. Первый аспект определяет размеры устройств и способность осуществления процесса охлаждения, а второй — доступные конструкторские решения.

Исходя из вышеизложенного, наиболее подходящими для применения в требуемых условиях эксплуатации представляются различные типы охлаждающих радиаторов, не использующих дополнительные рабочие жидкости, например, такие как радиаторы с плоскими ребрами. Традиционные конструкции радиаторов, имеющие открытую наружную поверхность, показывают низкую эффективность при работе в стесненных условиях и при наличии высокоскоростных потоков воздуха. Это, в свою очередь, требует усовершенствования конструкции таких устройств путем усложнения геометрии радиаторов и введения контактной пластины с обеих сторон оребрённой структуры. Внедрение подобного технического решения нивелирует проблему падения скорости воздушного потока, однако влечет за собой ограничение по максимальной высоте самих ребер. Благодаря предложенным решениям возникает потребность в создании ребер нестандартной, усложненной конфигурации. Любое из перечисленных направлений оптимизации повлечет за собой как изменение массогабаритных характеристик, так и корректировку требований к производительности вентилятора, отвечающего за теплоотвод от радиатора.

Цель исследования состоит в математическом моделировании, направленном на определение эффективности оребрённых плоских теплообменных радиаторов на основании известных экспериментальных данных [1].

Методы и принципы исследования

В статье [1] приведены типоразмеры охладителей и результаты лабораторных исследований. Дальнейшим шагом является математическое моделирование процесса теплоотдачи с учетом изменения теплофизических свойств охлаждающего воздуха от температуры.

Установить картину распределения температур внутри материалов [9] при известной теплопроводности можно двумя способами: экспериментально либо расчетно-теоретически [10]. Данная работа направлена на математическое моделирование процесса, опирающееся на экспериментальные данные [1], [11].

Для вычисления коэффициента эффективности ребер применялась теория подобия. Критериальные уравнения подобия выбирались по условиям течения воздуха в межреберном пространстве, по числу подобия Рейнольдса. Теплофизические параметры, входящие в критерии подобия выбирались из таблиц в зависимости от температур.

Для расчетов задавались исходные данные, включающие тепловую мощность, геометрические размеры радиаторов охлаждения (рис. 1) (размеры ребер, расстояние межреберного пространства, толщина основания радиатора и т.д.), температура воздуха, объемный расход воздуха через радиатор.

Рисунок 1 - Общий вид радиатора и оребрения
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.1

Основным условием расчетов являлся учет зависимости теплофизических параметров воздуха от температуры таких как: плотность ρ, теплоёмкость C_P, кинематическая вязкость υ, коэффициент объёмного расширения β, коэффициент теплопроводности λ_υ, коэффициент температуропроводности a, коэффициент теплопроводности материала радиатора (алюминия) λ_a.

В процессе изготовления радиаторов охлаждения полупроводников применяются различные технологии сварки алюминия и его сплавов. В данной работе оценивалось влияние дефектов, которые могли образоваться в теле

 © Авторы статьи / Authors of the article

радиатора при сварке путем введения экспериментального коэффициента, на основе ранее полученных экспериментальных данных, с целью увеличения точности расчётов применительно к конкретному типу радиатора.

Определяющей температурой задавалась температура основания ребра радиатора.

Так как теплофизические параметры меняются с течением времени процесса, пока он не придёт в установившийся режим, то соответственно рассчитывались в зависимости от температуры и определяющие числа подобия: число Прандтля Pr, Рейнольдса Re, Грасгофа Gr и т.д., входящие в критериальные уравнения, определяющие число Nu от температуры.

По данным измерений работы [1] взяты: площадь поперечного сечения ребра радиатора, средняя температура ребра, коэффициент облучённости, количество тепла излучения *Pl*, степень черноты радиатора *er* (неполированный алюминий при 26 °C), отдаваемое с рёбер радиатора конвекцией *Prk*, лучистый коэффициент теплообмена, площадь поверхности и коэффициент теплопередачи основания.

Общее количество отдаваемого тепла:

$$P(t, \nu) = Pl(t, \nu) + Prk(t, \nu)$$

При расчете числа Nu введен параметр, учитывающий геометрические размеры радиаторов, в виде коэффициента отношения длины канала *L* к ширине *b*.

$$\eta l(t, \nu)1(\mathrm{x}) = 1,5071 \cdot \mathrm{x}^{-0,106} \text{ при } \mathrm{Re} \leq 3500,$$
$$\eta l(t, \nu)2(\mathrm{x}) = 1,3373\mathrm{x}^{-0,073} \text{ при } \mathrm{Re} \leq 7500,$$
$$\eta l(t, \nu)3(\mathrm{x}) = 1,2748\mathrm{x}^{-0,062} \text{ при } \mathrm{Re} > 7500.$$

Для этого сравнивались экспериментальные данные [1] с расчётными в базовых точках посредством построения графиков данных с вычислением аппроксимации.

$$\mathrm{k.}_{\exp}(\mathrm{v}) = 0,023 \cdot \left(\frac{\nu \cdot \mathrm{s}}{m}\right)^2 - 0,32 \cdot \frac{\nu \cdot \mathrm{s}}{m} + 1,82,$$

где $\mathrm{k.}_{\exp}$ (v) — коэффициент, уточняющий влияние шероховатости и сварных швов, на основе сопоставления данных эксперимента на установке (рис. 2, 3) и расчёта (рис. 4), *v* — скорость потока воздуха, s — время, m — расстояние.

 © Авторы статьи / Authors of the article

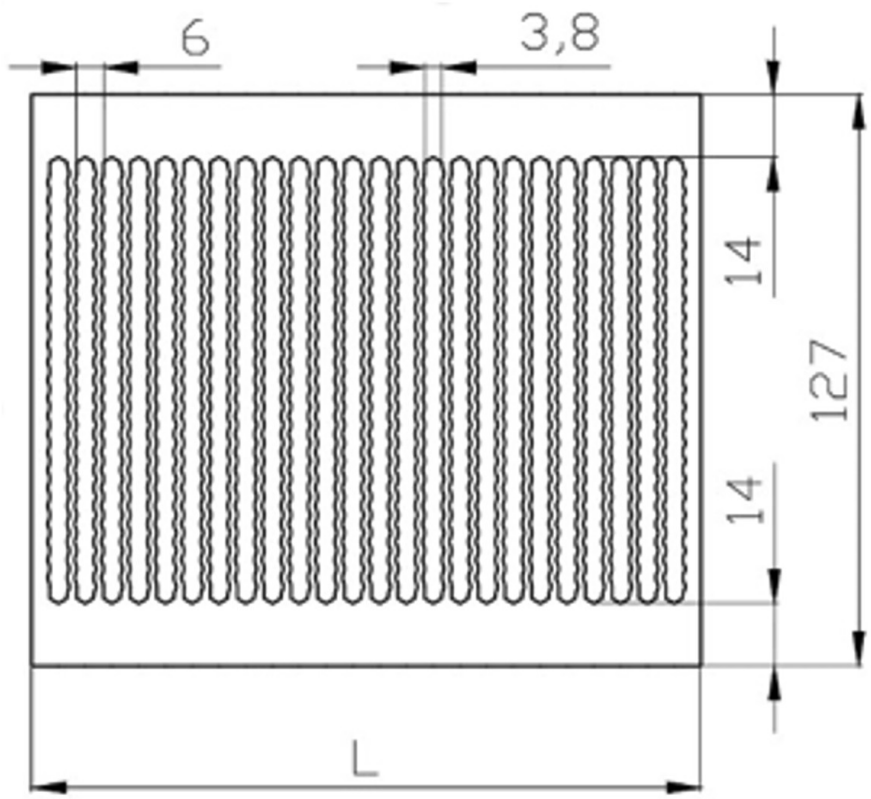

Рисунок 2 - Характерные размеры радиатора
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.2

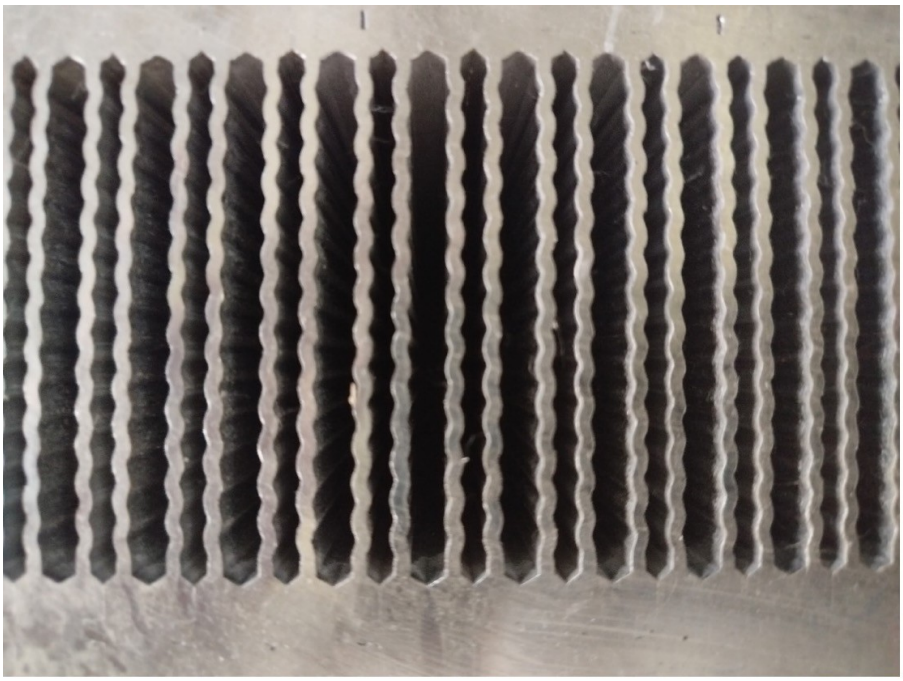

Рисунок 3 - Изображение экспериментального образца
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.3

 © Авторы статьи / Authors of the article

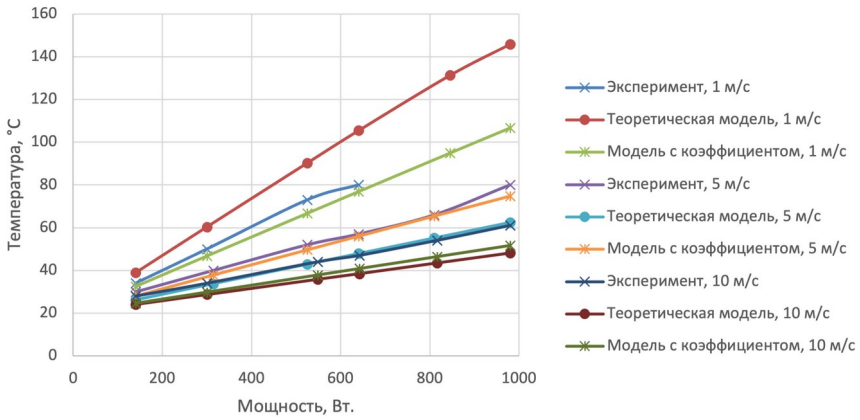

Рисунок 4 - График сравнения экспериментальных, расчётных и скорректированных данных

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.4

На основании представленных графических данных можно заключить, что использование предлагаемого коэффициента способствует повышению точности расчётов и снижению погрешности теоретических значений по сравнению с экспериментальными данными. При этом наблюдается тенденция к росту точности модели с увеличением скорости воздушного потока.

Суммарная площадь каналов радиатора — Sk ($м^2$).

Перегрев основания радиатора вычислялся по формуле:

$$\Delta tp(t) = t - t_c$$

где t — температура основания радиатора, t_c — температура воздуха.

Средняя температура:

$$tcp(t) = \frac{t+t_c}{2}$$

Температура расчёта критериев Nu и Re:

$$tnu(t,v) = t_c + \frac{P}{2 \cdot v \cdot Sk \cdot \rho(tcp(t)) \cdot Cp(tcp(t))}$$

$$Re(t,v) = \frac{v \cdot L}{\nu(tnu(t,v))}$$

$$C(t,v) = 0,55 \text{ для } Re \le 4000$$

$$Gr(t,v) = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (t - tnu(t,v))}{\nu(tnu(t,v))}$$

$$Nu(t,v) = C \cdot Pr(tnu(t,v))^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr(tnu(t,v))}{Pr(t)}\right)^{0,25} \cdot \eta l(t,v)$$

Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена:

$$\alpha_k(t,v) = \frac{Nu(t,v) \cdot \lambda(tnu(t,v))}{L}$$

Коэффициент, определяющий эффективность оребрения:

$$\varepsilon(t,v) = \left(\frac{2 \cdot \alpha_k(t,v)}{\lambda(t) \cdot \delta}\right)^{0,5}$$

Коэффициент, характеризующий термическое сопротивление оребрения.

$$Ep(t,v) = \frac{tanh \cdot (H \cdot \varepsilon(t,v))}{H \cdot \varepsilon(t,v)}$$

где H – высота ребра.

Приведены расчётные зависимости: площади радиатора (рис. 5), мощности (рис. 6) и коэффициента эффективности оребрения (рис. 7) от скорости потока охлаждающего воздуха.

Данное исследование сфокусировано на режимах с вынужденной конвекции при скоростях потока 1–10 м/с, где вклад естественной конвекции и ориентации рёбер пренебрежимо мал. Для выполнения работы и последующей валидации математической модели использованы экспериментальные данные, полученные и описанные в работе [1].

Для учёта влияния неравномерностей воздушного потока, приводящих к уменьшению тепловой эффективности радиатора [5], [6], производился расчёт среднего значения термического сопротивления при разных скоростях набегающего воздушного потока.

 © Авторы статьи / Authors of the article

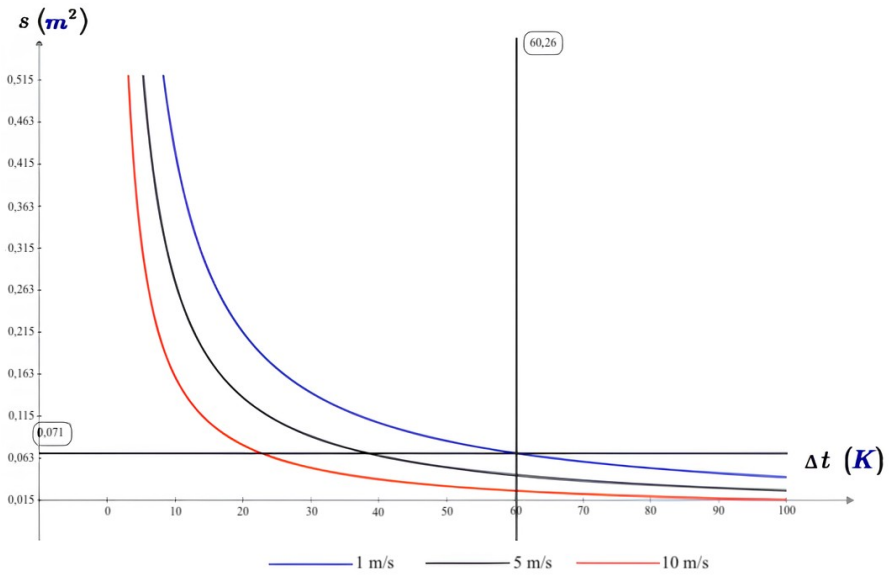

Рисунок 5 - Расчётные площади радиатора
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.5

Примечание: скорости потока набегающего воздуха 1, 5 и 10 м/с

График изменения рабочей площади поверхности от разности температур (рис. 2) представляет убывающую функцию по гиперболе, которая показывает, что при увеличении разницы температуры экспоненциально снижается требуемая площадь теплообмена. Влияние скорости набегающего потока воздуха, по мере увеличения, оказывает меньшее влияние на уменьшение площади теплообмена.

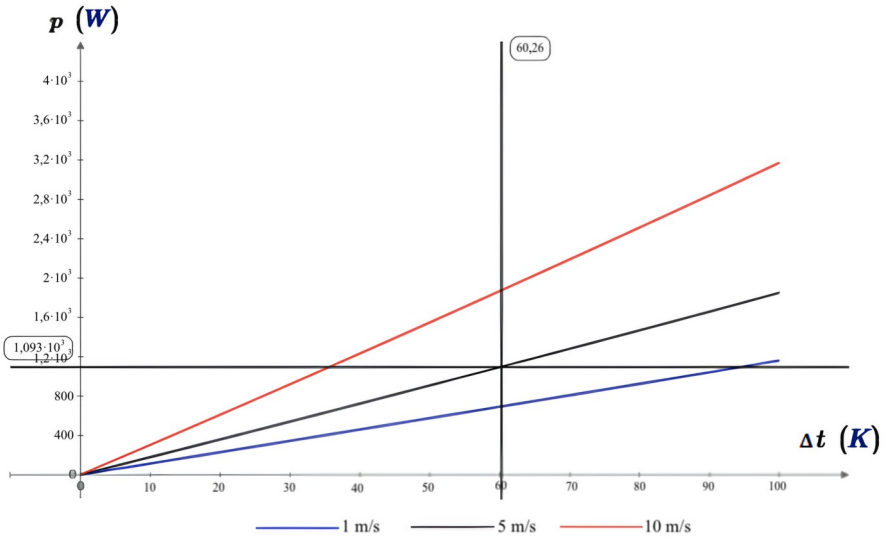

Рисунок 6 - Расчётные мощности
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.6

Примечание: скорости потока набегающего воздуха 1, 5 и 10 м/с

График зависимости мощности от разницы температур (рис. 3) отражает закономерный, схожий с линейной зависимостью, рост отводимой мощности при увеличении Δt. Влияние скорости набегающего потока воздуха аналогично растёт при росте Δt.

 © Авторы статьи / Authors of the article

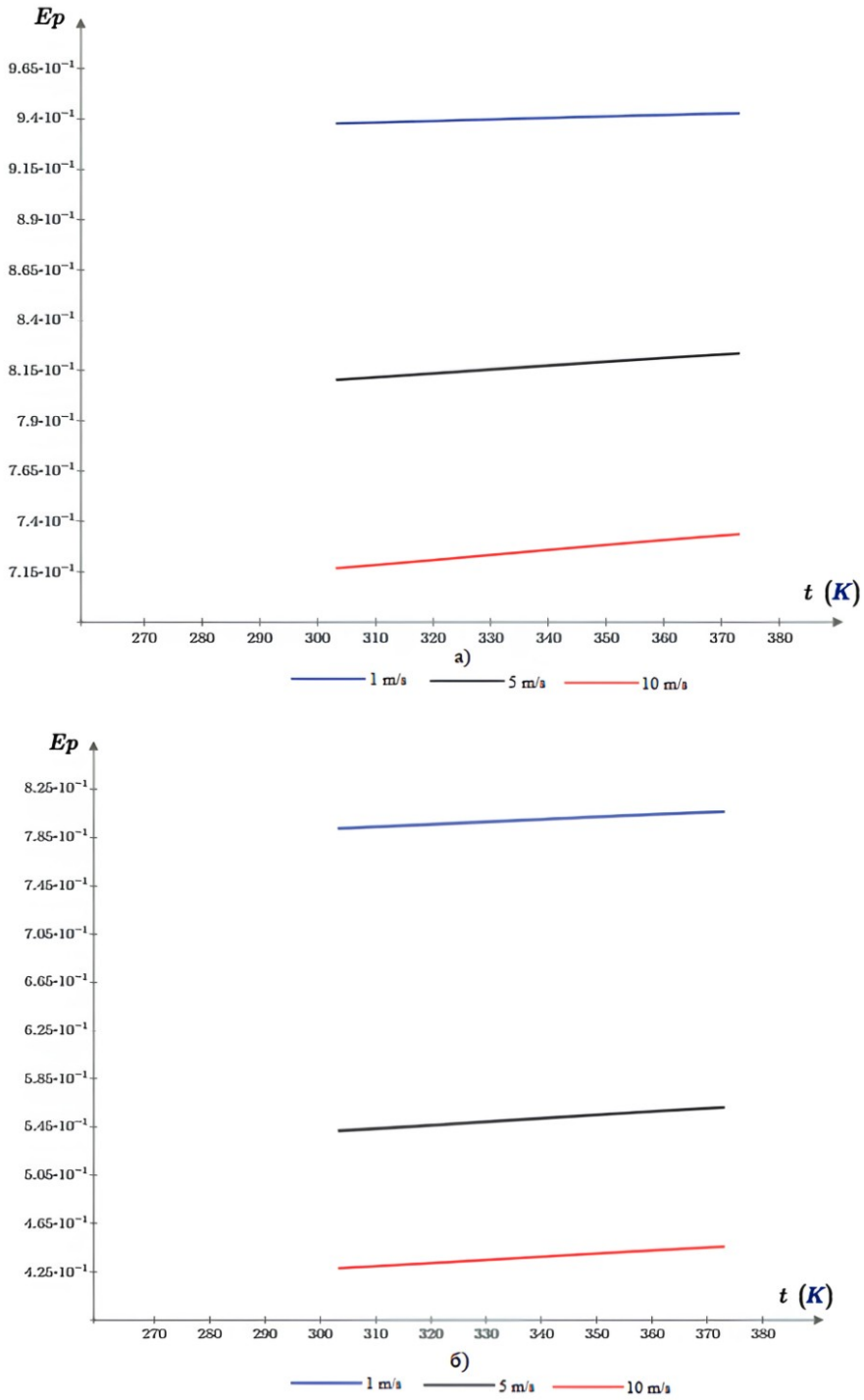

Рисунок 7 - Коэффициенты эффективности оребрения:
а) при стандартных условиях; *б)* изменены геометрические параметры высоты канала H в 2 раза
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.105.7

Примечание: скорости потока набегающего воздуха 1, 5 и 10 м/с

Безразмерный коэффициент эффективности оребрения указывает на схожую с линейной зависимостью от повышения температуры и скорости набегающего потока воздуха, достигая большего значения при меньшей скорости.

В основе разработки математической модели радиаторов с ребристыми стенками лежит анализ выявленных зависимостей, который согласуется с материалами других исследователей [2], [4]. В ходе моделирования получены значения коэффициента эффективности ребра при условии изменения температуры и скорости охлаждающего воздуха.

Заключение

На основании сравнения проведенных расчётов с экспериментальными данными, был введён коэффициент $k._{exp}$, учитывающий аппроксимацию экспериментальных данных и уточняющий дальнейшие расчёты. Отмечено, что коэффициент *Ep* повышается при том же материале и находится в прямой зависимости от скорости набегающего

 © Авторы статьи / Authors of the article

потока воздуха. Установлена зависимость величины *Ep* от геометрических параметров радиатора: рост при повышении длины канала *L* и падение при повышении высоты канала *H*.

Результаты работы позволяют обеспечить требуемую эффективность теплоотведения от радиатора в зависимости от параметра эффективности оребрения, который был получен в результате обработки экспериментальных данных $Ep(t, v)$ и определяется по $\alpha_k(t, v)$. При высоких скоростях потока воздуха применение коэффициента имеет большое значение для расчёта эффективности оребрения данных типов радиаторов.

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. Галиакбаров А.Т. Температурное поле в радиаторах охлаждения силовой электроники / А.Т. Галиакбаров, Д.А. Башмаков, А.Д. Самигуллин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 5 (143). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.44.

2. Зейнетдинов Р.А. Оценка эффективности радиаторов поршневых двигателей методом неравновесной термодинамики / Р.А. Зейнетдинов // АгроЭкоИнженерия. — 2025. — № 4 (125). — С. 74–86. — DOI: 10.24412/2713-2641-2025-4125-74-86. — EDN ELCXCR.

3. Марейченко И.В. Комплексный подход к моделированию замкнутой жидкостной системы охлаждения для силовых модулей частотного преобразователя / И.В. Марейченко, А.Н. Поважнюк, А.И. Дьяченко // Оригинальные исследования. — 2025. — Т. 15. — № 8. — С. 160–168. — EDN ZUTBLJ.

4. Liu H. Numerical Simulation of the Effect of Air Velocity on Fin Heat Dissipation / H. Liu // Bulletin of Science and Practice. — 2024. — Vol. 10. — № 6. — P. 384–389. — DOI: 10.33619/2414-2948/103/41. — EDN VJEZNS.

5. Умиров Н.Т. Влияние неравномерности воздушного потока по фронту радиатора системы охлаждения двигателей тракторов и автомобилей на его эффективность / Н.Т. Умиров, Ш.Х. Абдурохмонов, Э.М. Ганибоева // Моя профессиональная карьера. — 2021. — Т. 2. — № 20. — С. 129–133. — EDN JDDQDI.

6. Хольшев Н.В. Экспериментальное определение распределения скорости воздушного потока перед радиатором системы охлаждения автомобиля / Н.В. Хольшев, Д.Н. Коновалов, Ю.Е. Глазков // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2021. — № 3. — С. 81–90. — DOI: 10.25198/2077-7175-2021-3-81. — EDN SYAENQ.

7. Ren Y. Development and performance study of a radiation-enhanced heat pipe radiator for cooling high-power IGBT modules / Y. Ren, W. Luo, Z. He [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2025. — Vol. 262. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125307. — EDN RHROCU.

8. Li Q. A junction temperature model based on heat flow distribution in an IGBT module with solder layer voids / Q. Li, F. Zhang, Y. Chen [et al.] // Heliyon. — 2024. — Vol. 10. — № 13. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33625. — EDN LLJQHQ.

9. 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. — EDN OYSSYR.

10. Ройзен Л.И. Тепловой расчет оребренных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин. — Москва : Энергия, 1977. — 256 с.

11. 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. — EDN UTNLYC.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Galiakbarov A.T. Temperaturnoe pole v radiatorakh okhlazhdeniya silovoj ehlektroniki [Temperature field in power electronics cooling radiators] / A.T. Galiakbarov, D.A. Bashmakov, A.D. Samigullin [et al.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2024. — № 5 (143). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.44. [in Russian]

2. Zeinetdinov R.A. Ocenka ehffektivnosti radiatorov porshnevykh dvigatelej metodom neravnovesnoj termodinamiki [Assessment of radiator efficiency in piston engines by the method of non-equilibrium thermodynamicss] / R.A. Zeinetdinov // AgroEhkoInzheneriya [AgroEcoEngineering]. — 2025. — № 4 (125). — P. 74–86. — DOI: 10.24412/2713-2641-2025-4125-74-86. — EDN ELCXCR. [in Russian]

3. Mareichenko I.V. Kompleksnyj podkhod k modelirovaniyu zamknutoj zhidkostnoj sistemy okhlazhdeniya dlya silovykh modulej chastotnogo preobrazovatelya [Approach to modeling a closed-loop liquid cooling system for frequency converter power modules] / I.V. Mareichenko, A.N. Povazhnyuk, A.I. Dyachenko // Original'nye issledovaniya [Original Research]. — 2025. — Vol. 15. — № 8. — P. 160–168. — EDN ZUTBLJ. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

4. Liu H. Numerical Simulation of the Effect of Air Velocity on Fin Heat Dissipation / H. Liu // Bulletin of Science and Practice. — 2024. — Vol. 10. — № 6. — P. 384–389. — DOI: 10.33619/2414-2948/103/41. — EDN VJEZNS.

5. Umirov N.T. Vliyanie neravnomernosti vozdushnogo potoka po frontu radiatora sistemy okhlazhdeniya dvigatelej traktorov i avtomobilej na ego ehffektivnost' [The influence of the unevenness of the air flow along the front of the radiator of the cooling system of tractors and cars on its efficiency] / N.T. Umirov, Sh.Kh. Abdurokhmonov, E.M. Ganiboeva // Moya professional'naya kar'era [My Professional Career]. — 2021. — Vol. 2. — № 20. — P. 129–133. — EDN JDDQDI. [in Russian]

6. Kholshev N.V. Ehksperimental'noe opredelenie raspredeleniya skorosti vozdushnogo potoka pered radiatorom sistemy okhlazhdeniya avtomobilya [Experimental determination of the air flow velocity distribution in front of the radiator of a car cooling system] / N.V. Kholshev, D.N. Konovalov, Yu.E. Glazkov // Intellekt. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]. — 2021. — № 3. — P. 81–90. — DOI: 10.25198/2077-7175-2021-3-81. — EDN SYAENQ. [in Russian]

7. Ren Y. Development and performance study of a radiation-enhanced heat pipe radiator for cooling high-power IGBT modules / Y. Ren, W. Luo, Z. He [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2025. — Vol. 262. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125307. — EDN RHROCU.

8. Li Q. A junction temperature model based on heat flow distribution in an IGBT module with solder layer voids / Q. Li, F. Zhang, Y. Chen [et al.] // Heliyon. — 2024. — Vol. 10. — № 13. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33625. — EDN LLJQHQ.

9. Galiakbarov A.T. Sravnitel'naya kharakteristika teplofizicheskikh svojstv kompozitnykh i polimernykh materialov [Comparative characteristics of thermal physical properties of composite and polymer materials] / A.T. Galiakbarov, E.V. Leontiev // Social'no-ehkonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizaciya [Socio-Economic and Technical Systems: Research, Design, Optimization]. — 2023. — № 3 (95). — P. 50–60. — EDN OYSSYR. [in Russian]

10. Roizen L.I. Teplovoj raschet orehrennykh poverkhnostej [Thermal calculation of finned surfaces] / L.I. Roizen, I.N. Dulkin. — Moscow : Energiya, 1977. — 256 p. [in Russian]

11. Rozentsvaig A.K. Osobennosti paroobrazovaniya v kaple ehmul'sii pri "bol'shoj" raznice temperatur nasyshcheniya dispersnoj fazy i sploshnoj sredy [Characteristics of vaporization in the droplet emulsion when a "big" difference in temperature saturation of dispersed phase and continuous medium] / A.K. Rozentsvaig, Ch.S. Strashinsky, A.T. Galiakbarov [et al.] // Ehnergosberezhenie. Nauka i obrazovanie [Energy Saving. Science and Education] : collection of reports of the international conference. — Naberezhnye Chelny : Publishing and Printing Center of the Naberezhnye Chelny Institute of K(P)FU, 2017. — P. 368–376. — EDN UTNLYC. [in Russian]