

Гидравлические характеристики пространственно-решетчатых каналов в системах охлаждения теплонагруженных элементов бортового радиоэлектронного оборудования

Рассматриваются гидравлические характеристики каналов с пространственными решетчатыми структурами, полученными методом лазерного селективного спекания металлического порошка. Исследуются проблемы охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования в условиях нарастающего тепловыделения современной элементной базы. Проводится анализ пористых теплообменных элементов и их применение с высокотехнологичными пространственными решетчатыми структурами. Рассматривается применение пространственных решетчатых структур в качестве теплообменных элементов для оптимизации теплоотдачи и обеспечения высоких прочностных характеристик конструкций. Получены результаты исследования, подтверждающие перспективность применения радиаторов на основе пространственных решетчатых структур в системах охлаждения и термостабилизации с обеспечением оптимального сочетания гидравлических и теплообменных характеристик.

А.А. ЛОПАТИН,
канд. техн. наук,
Р.А. ГАБДУЛЛИНА,
канд. техн. наук,
А.А. САЕТГАРАЕВ,
аспирант,
Е.Д. КУРШЕВ,
студент
(КНИТУ-КАИ, Казань)
rozzy94@mail.ru

Системы охлаждения, решетчатые структуры, коэффициент гидравлического сопротивления, радиатор с пространственно-решетчатыми структурами, интенсификация теплоотдачи

Актуальность проблемы охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования обусловлена развитием микроэлектроники, что, в свою очередь, привело к значительному росту тепловыделения современной элементной базы. В связи с этим особенно важно исследование надежности радиоэлектронных систем с учетом влияния тепловых режимов на этапе проектирования, что было отмечено в работе [1], где проводилась оценка показателей надежности радиоэлектронной системы при неопределенных данных об интенсивности отказов ее компонентов в результате разрушительного воздействия температуры и перегрева.

Для увеличения вычислительных возможностей необходимо было решить проблему оптимизации архитектуры процессоров. Метод оптимизации заключался в увеличении количества транзисторов в каждом слое электронного компонента и, как следствие, в постоянной миниатюризации, что привело к перманентному росту тепловыделения. Необходимо отметить, что для повышения эффективности радиаторов современных систем охлаждения и термостабилизации применяются различного рода интенсификаторы теплоотдачи, а также совершенствуются формы теплоотводящих поверхностей.

Перспективным видом теплоотводящих поверхностей являются пористые теплообменные элементы. Одна из разновидностей пористых теплообменных элементов с упорядоченной структурой – пространственные решетчатые структуры, которые все чаще применяются в теплоэнергетическом оборудовании [2–4]. Преимущество упорядоченной решетчатой структуры заключается в значительной площади в едином объеме с отсутствием замкнутых и тупиковых пор-объемов, что позволяет потенциально обеспечить максимальное и многократное перемешивание потока теплоносителя при значительно меньших, чем при неупорядоченной пористости, гидравлических сопротивлениях.

Проанализировав тематические литературные источники, можно выделить основные направления прикладного развития решетчатых структур. Во-первых, пространственных структуры активно используются для проектирования сложных конструктивных элементов и позволяют за счет предварительной топологической оптимизации основных элементов в значительной степени уменьшить массу готового изделия или элемента при сохранении основных механических свойств готового изделия [5]. Кроме того, благодаря применению решетчатых пространственных структур можно спроектировать элементы кон-

струкций с заданной анизотропией как в продольном, так и в поперечном направлениях. Такой подход фактически позволяет создавать новый дизайн существующих элементов конструкций и даже целых изделий. При этом благодаря использованию новых цифровых технологий при проектировании в конечном итоге снижаются будущие эксплуатационные издержки. Во-вторых, пространственные решетчатые структуры обеспечивают высокие прочностные характеристики готовых изделий. В некоторых случаях такие конструкции могут частично осуществлять несущую функцию, обеспечивая тем самым оптимизацию использования материала. В-третьих, при достаточно малых объемах решетчатые радиаторы имеют значительную полезную площадь, что обеспечивает наиболее полное взаимодействие рабочей поверхности с теплоносителем. Применение различных по форме структур в зависимости от свойств и агрегатного состояния теплоносителя позволяет оптимизировать гидравлические характеристики при одновременной максимизации теплоотдачи. При этом, учитывая результаты современных исследований [4, 6–9], можно утверждать, что пространственные решетчатые структуры успешно применяются для интенсификации теплоотдачи как при конвективном теплообмене, так и при условии кипения теплоносителя.

Радиаторы на основе решетчатых структур в условиях вынужденной конвекции широко применяются в различных системах, обеспечивающих охлаждение и термостабилизацию теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования [10–14].

В данной работе рассмотрены вопросы гидравлических характеристик каналов с вставками в виде решетчатых упорядоченных структур.

Пространственные решетчатые структуры получены методом лазерного селективного спекания. Средний размер пор – 1,2 мм (± 25 мкм). Для изготовления трехмерных рабочих участков использовалась система лазерного селективного спекания EOSINT M270 для производства прототипов и готовых изделий из порошков металлов. В процессе работы установки порошок наносится на поверхность рабочей платформы или на предыдущий слой с помощью специального подающего агрегата. Одновременно с нанесением материала слой выравнивается. Толщина слоя зависит от конкретной установки и используемого материала (0,015...0,15 мм). Затем лазером на слое спекаются зоны, являющиеся частью детали. Спекаясь, данные зоны соединяются с предыдущим слоем. После очередной процедуры спекания платформа опускается на толщину слоя, наносится новый слой порошка, и процесс повторяется снова. Увеличенная структура пространственной решетки рабочего участка № 3 с различной степенью увеличения представлена на рис. 1: *a* – 0,5 мм; *b* – 0,2 мм; *в* – 0,1 мм.

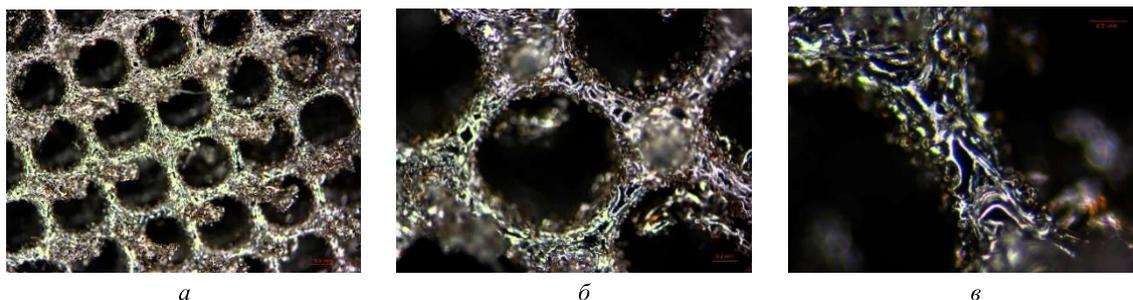


Рис. 1

Потери давления, Па, через исследуемую решетчатую «вставку» в канале определяются следующим образом:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} \quad (1)$$

Для определения гидравлического сопротивления на практике принято использовать безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления ξ , который определяется по формуле [15]

$$\xi = \frac{\Delta P 2 d_{\text{п}} \Pi}{\rho w^2 L} \quad (2)$$

где d_n – диаметр поры, м, принимается в качестве характерных размеров, описанных в большинстве литературных источников для определения числа Рейнольдса и числа Нуссельта [16]; Π – пористость решетчатой вставки, определяется отношением объема пустот к полному объему пористого тела; ρ – плотность воздушного потока на входе в решетчатую часть канала, кг/м³; L – длина решетчатой структуры, м; w – скорость воздушного потока на входе в решетчатую часть канала, м/с.

Благодаря численному моделированию возможно максимально эффективно исследовать гидравлическую и тепловую эффективность решетчатых структур. В современной тематической литературе представлены практические исследования различных характеристик пространственных решетчатых конструкций, основанные на применении современных численных методов анализа [17–21].

В настоящей работе математическое моделирование реализовывалось с помощью пакета ANSYS Fluent на основе решения уравнений Навье – Стокса. Замыкание системы уравнений осуществлялось при помощи стандартной модели турбулентности k – ϵ . Расчетная сетка содержала в среднем 2,9 млн гексагональных ячеек с минимальным ортогональным качеством 0,05.

В расчетную модель канала с решетчатым радиатором, кроме расчетной сетки, входили граничные условия, модели турбулентности, настройки решателя. Граничные условия на входе в расчетную область (в начале канала): массовый расход, статическое давление на входе в канал, изменение скорости давления и температуры. Давление на входе задавалось согласно данным натурных испытаний.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, представляющем собой разомкнутый воздушный расходный контур, оснащенный средствами измерениями статического и полного давления, а также температуры рабочего тела на входе в участок.

Рабочая схема экспериментального стенда представлена на рис. 2. Здесь: 1 – место установки решетчатого элемента; 2 – входной конфузор; 3 – отборники статического и полного давления.

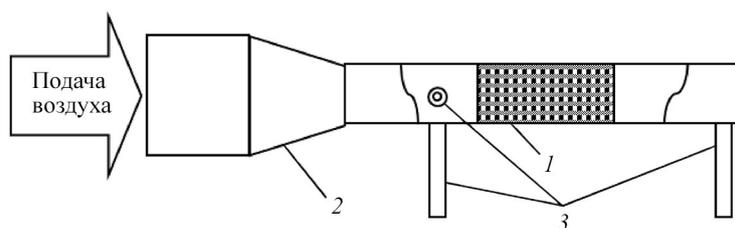


Рис. 2

Давление измерялось с помощью манометров с погрешностью $\pm 0,5$ % от полной шкалы. Рабочий участок крепился внутри выходного патрубка стенда и фиксировался стопорным болтом, тем самым обеспечивалась его неподвижность и точная координация. В качестве рабочего тела использовался окружающий воздух без предварительной очистки. Температура окружающего воздуха измерялась термометром с погрешностью $\pm 0,2$ °С. Скорость набегающего потока воздуха варьировалась в диапазоне 5...60 м/с.

Исследование гидравлических характеристик проводилось на трех рабочих участках.

Схема продольного среза двух рабочих участков представлена на рис. 3: *а* – продольный срез канала № 1 с крупными порами; *б* – продольный срез канала № 2 со средними порами.

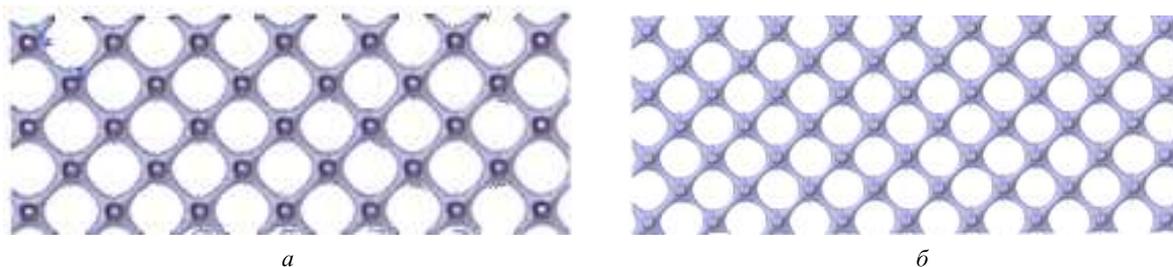


Рис. 3

Два участка представляли собой прямоугольные каналы (ширина – 20×20 мм, длина – 50 мм), заполненные пористыми теплообменными элементами с различной плотностью размещения. Степень пористости участка № 1 составляла 0,9, участка № 2 – 0,89. Степень пористости канала увеличивалась за счет увеличения количества слоев. Одновременно происходило уменьшение размера пор. Третий участок представлял собой полый (гладкий) канал длиной 50 мм и шириной 20×20 мм. Этот рабочий участок служил базой для тестирования, а также для сравнения гидравлических параметров каналов, заполненных решетчатыми структурами.

Геометрические параметры пор двух рабочих участках приведены на рис. 4: *а* – канал № 1 с «крупными» порами; *б* – канал № 2 со «средними» порами.

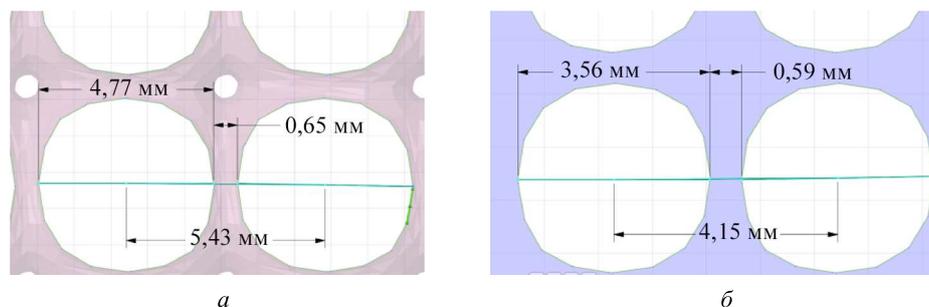


Рис. 4

Тестовое численное моделирование гидравлических процессов в канале с решетчатыми радиаторами проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent, требуемая сходимость была достигнута на 800-й итерации. В результате решения системы уравнений Навье – Стокса для данной расчетной модели получены подробные поля давлений и скоростей по всей области решения. Полное давление на входе и выходе отличается от экспериментального в среднем на 4–10 %.

Пример расчетной сетки представлен на рис. 5. Процесс расчета продолжался до тех пор, пока точность безразмерных невязок по энергии не достигала значений 10^{-6} .

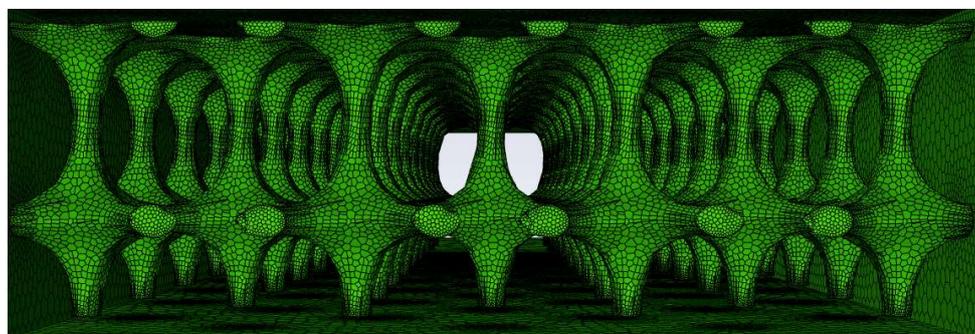


Рис. 5

На рис. 6 показан пример модели распределения давления на рабочем участке.

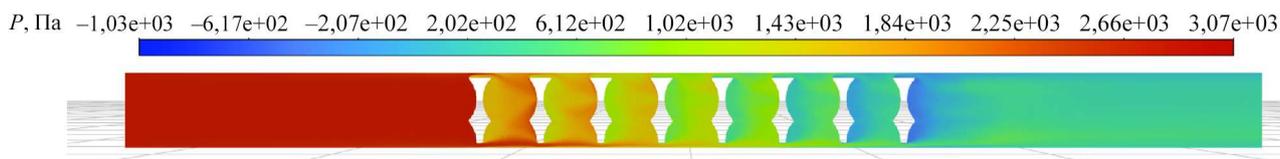


Рис. 6

Приведем основные результаты экспериментальных исследований, проведенных на трех рабочих участках (два – с пространственной решетчатой конструкцией и различной плотностью размещения, третий – гладкий).

На рис. 7 представлена зависимость скорости потока перед участком от перепада давления в канале с решетчатым радиатором.

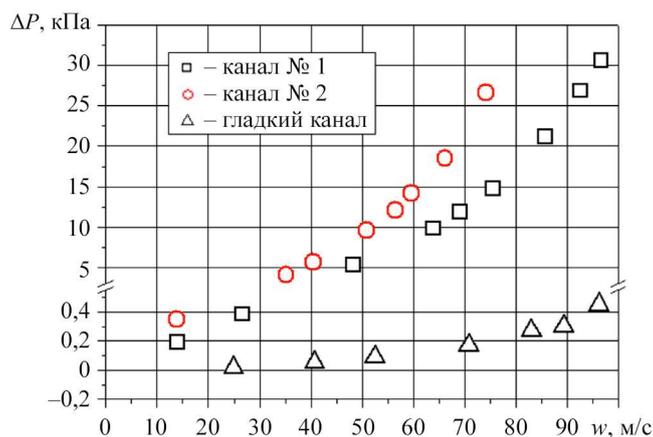


Рис. 7

При невысоких скоростях течения теплоносителя (примерно 12–13 м/с) получены очень близкие значения перепада давления на рабочих участках № 1, 2 (см. рис. 7). С дальнейшим ростом начальной скорости потока наблюдается существенный рост перепада давления, обусловленный естественными потерями в трехмерных решетчатых структурах. При этом канале № 2 с большой плотностью размещения внутренних элементов величина перепада давления увеличивается, в отличие от значений, полученных в случае канала № 1. Так, при скоростях потока примерно 47–53 м/с значения перепада давления составили около 4,5 кПа, при 64–66 м/с – 8 кПа, при 75 м/с – уже практически 12 кПа. Таким образом, при скоростях потока, больших 40 м/с, наблюдается значительное расхождение в перепадах давления на рабочих участках.

Значения перепада давления в гладком канале во всем диапазоне начальных скоростей теплоносителя аналогичны зависимостям в случае каналов с пространственными решетчатыми конструкциями.

Зависимости гидравлического сопротивления от режимного параметра – числа Рейнольдса (рис. 8) – аналогичны результатам, полученным в работах [21, 22].

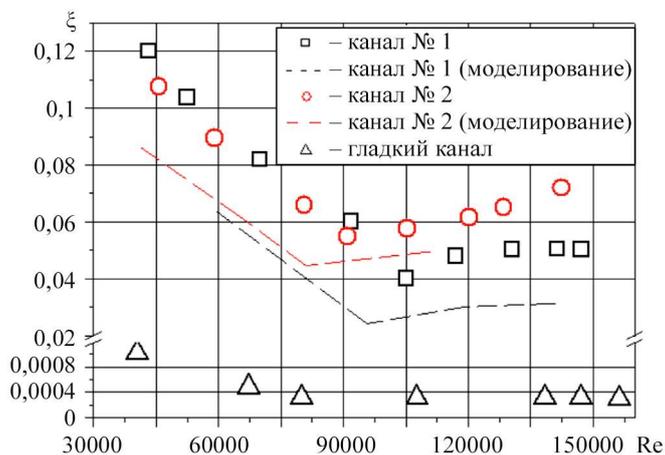


Рис. 8

Как следует из представленной зависимости (см. рис. 8), при $Re > 90000$ наблюдается существенное расслоение участков № 1, 2 по параметру «гидравлическое сопротивление». Это объясняется опережающим воздействием стесненности канала при увеличении чисел Рейнольдса.

С целью оптимизации дальнейших исследований гидравлических характеристик каналов с пространственными решетчатыми конструкциями было проведено численное исследование в пакете ANSYS Fluent. Результаты моделирования также представлены на рис. 8. Полученные результаты соответствуют

данным [23, 24]. Расчетные зависимости для обоих каналов, как следует из графика (см. рис. 8), схожи с результатами физического моделирования. Согласно графическим зависимостям (см. рис. 8) данные, полученные методом моделирования для обоих участков, во всем диапазоне режимных параметров систематически занижены. Так, для участка № 1 при $Re = 42000$ до $Re \approx 95000 \div 100000$ разница между результатами эксперимента и моделирования в среднем составляет 42 %, а при $Re > 105000$ уже 34 %. Аналогичные результаты получены в случае участка № 2: при $Re = 45000$ до $Re = 85000 \div 90000$ разница между результатами эксперимента и моделирования составляет 25 %, а с ростом числа Рейнольдса (более 90000) различие сокращается до 15 %. В данном случае при моделировании наблюдается упрощение описания решетчатой поверхности, из-за чего недостаточно полно учитывается комплексность процесса сплавления и возникают неоднородности и шероховатости реальных поверхностей. Например, возможен недостаточный учет хаотично расположенных шероховатостей или оплавление «лишних» крупиц порошка в процессе аддитивного производства.

Когда внутреннее пространство каналов равномерно заполнено упорядоченной трехмерной структурой с достаточно высокой поверхностной шероховатостью (см. рис. 1), реальные гидравлические потери находятся в диапазоне полученных экспериментальных данных с учетом неопределенности, фиксированной в результате исследований. Для улучшения точности моделирования подобных процессов в ANSYS Fluent необходимо использовать более сложные модели турбулентности, а также совершенствовать методы и специальные граничные условия, способствующие корректному учету факторов, характерных для реального процесса сплавления.

Таким образом, согласно результатам проведенного физического и математического моделирования зависимости гидравлического сопротивления от режимного параметра соответствуют данным других работ, где исследуются пространственные решетчатые структуры. Определено, что во всем диапазоне чисел Рейнольдса значения, полученные при помощи моделирования, находятся ниже экспериментальных значений. Полученные в статье результаты также могут быть основой численного моделирования гидравлических параметров и оптимизации проектирования новых теплообменных устройств с использованием пространственных решетчатых структур. В связи с этим возможно создание более эффективных и инновационных решений в области теплообмена и охлаждения теплонагруженных элементов энергетического и радиоэлектронного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко А.В. и др. Оценка показателей надежности радиоэлектронной системы при неопределенных данных об интенсивности отказов ее компонент в результате деструктивного влияния температуры // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 3. С. 225–232.
2. Leary M. et al. Inconel 625 Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting (SLM): Mechanical Properties, Deformation and Failure Modes // Materials & Design. 2018. Vol. 157. P. 179–199.
3. Bajaj P. et al. Steels in Additive Manufacturing: A Review of Their Microstructure and Properties // Materials Science and Engineering A. 2020. Vol. 772. Article № 138633.
4. Sarabhai S. et al. Understanding the Flow and Thermal Characteristics of Non-Stochastic Strut-Based and Surface-Based Lattice Structures // Materials & Design. 2023. Vol. 227. Article № 111787.
5. Liu F. et al. Functionally Graded Porous Scaffolds in Multiple Patterns: New Design Method, Physical and Mechanical Properties // Materials & Design. 2018. Vol. 160. P. 849–860.
6. Ke H. et al. Thermal-Hydraulic Performance and Optimization of Attack Angle of Delta Winglets in Plain and Wavy Finned-Tube Heat Exchangers // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 150. P. 1054–1065.
7. Zhang Y., Kong D., Liu S. Experimental Study of Forced Convection Heat Transfer of Graded Metal Honeycomb Fabricated by Additive Manufacturing // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 98. P. 67–73.
8. Liu X.C. et al. Solving Steady and Transient Radiative Transfer Problems with Strong Inhomogeneity via a Lattice Boltzmann Method // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 155. Article № 119714.
9. Hamidi E. et al. Lattice Boltzmann Method Simulation of Flow and Forced Convective Heat Transfer on 3D Micro X-Ray Tomography of Metal Foam Heat Sink // International Journal of Thermal Sciences. 2022. Vol. 172. Article № 107240.
10. Poureslami P. et al. Pore-Scale Convection-Conduction Heat Transfer and Fluid Flow in Open-Cell Metal Foams: A Three-Dimensional Multiple-Relaxation Time Lattice Boltzmann (MRT-LBM) Solution // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 126. Article № 105465.

11. Yun S. et al. Performance Improvement of Hot Stamping Die for Patchwork Blank Using Mixed Cooling Channel Designs with Straight and Conformal Channels // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 165. Article № 114562.
12. Коновалов Д.А. и др. Разработка методов интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем термостабилизации // Вестник ВГТУ. 2016. № 3. С. 21–30.
13. Xiao Z. et al. Evaluation of Topology-Optimized Lattice Structures Manufactured via Selective Laser Melting // Materials & Design. 2018. Vol. 143. P. 27–37.
14. Sing S.L., Wiria F.E., Yeong W.Y. Selective Laser Melting of Lattice Structures: A Statistical Approach to Manufacturability and Mechanical Behavior // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2018. Vol. 49. P. 170–180.
15. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 240 с.
16. Жижкин А.М. Гидравлические потери в элементах из материала МР // Вестник СГАУ. 2006. № 2-2 (10). С. 173–176.
17. Wang Xiang et al. Numerical Investigation on Hydraulic and Thermal Characteristics of Micro Latticed Pin Fin in the Heat Sink // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 149. Article № 119157.
18. Kim T., Hodson H.P., Lu T.J. Fluid-Flow and Endwall Heat-Transfer Characteristics of an Ultralight Lattice-Frame Material // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47. Iss. 6–7. P. 1129–1140.
19. Kim T. et al. Convective Heat Dissipation with Lattice-Frame Materials // Mechanics of Materials. 2004. Vol. 36. Iss. 8. P. 767–780.
20. Wei K. et al. Fabrication and Heat Transfer Characteristics of C/SiC Pyramidal Core Lattice Sandwich Panel // Applied Thermal Engineering. 2015. Iss. 81. P. 10–17.
21. Лопатин А.А. и др. Численное моделирование конвективного теплообмена при вынужденном движении теплоносителя в системах охлаждения с разрезным оребрением // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 3. P. 157–163.
22. Saghir M.Z. et al. Study of the Thermal and Hydraulic Performance of Porous Block versus Gyroid Structure: Experimental and Numerical Approaches // Energies. 2024. Vol. 17. № 4. Article № 861.
23. Kuang X., Sansalone J., Ying G., Ranieri V. Pore-Structure Models of Hydraulic Conductivity for Permeable Pavement // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 399. Iss. 3-4. P. 148–157.
24. Лопатин А.А. и др. Теплоотдача радиатора с пространственной решетчатой упорядоченной структурой в условиях свободной конвекции // Вестник Международной академии холода. 2023. № 4. С. 33–43.

Поступила в редакцию 29.01.25

После доработки 7.03.25

Принята к публикации 10.03.25

Hydraulic Characteristics of Spatially Lattice Channels in Cooling Systems of Heat-Loaded Elements of Airborne Radio-Electronic Equipment

A.A. LOPATIN, R.A. GABDULLINA, A.A. SAETGARAEV, AND E.D. KURSHEV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

Hydraulic characteristics of channels with spatial lattice structures obtained by laser selective sintering of metal powder are considered. The problems of cooling and thermal stabilization of heat-loaded elements of radio-electronic and electric power equipment under conditions of increasing heat generation of modern element base are investigated. Porous heat-exchange elements and their application with high-tech spatial lattice structures are analyzed. Application of spatial lattice structures as heat-exchange elements for optimization of heat transfer and ensuring high strength characteristics of structures is considered. The results of the research confirming the promising application of radiators based on spatial lattice structures in cooling and thermal stabilization systems with the provision of an optimal combination of hydraulic and heat exchange characteristics are obtained.

Cooling systems, lattice structures, hydraulic resistance coefficient, radiator with spatial lattice structures, heat transfer intensification