

УДК 536.24

# Теплоотдача радиатора с пространственной решетчатой упорядоченной структурой в условиях свободной конвекции

Канд. техн. наук А. А. ЛОПАТИН, канд. техн. наук Р. А. ГАБДУЛЛИНА,  
А. Р. БИКТАГИРОВА<sup>1</sup>, А. А. ТЕРЕНТЬЕВ

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ

<sup>1</sup>E-mail: arbiktagirova@kai.ru

*В работе представлены результаты физического и математического моделирования теплоотдачи радиаторов, выполненных на основе пространственных решетчатых конструкций, с помощью лазерного спекания в условиях свободной конвекции. Полученные данные свидетельствуют о том, что в широком диапазоне чисел  $Ra$  максимальные значения теплоотдачи соответствуют рабочему участку № 2. Вместе с тем, отмечено, что зависимость теплоотдачи от режимного параметра носит сложный нелинейный характер и подтверждается особенностями физических процессов, протекающих в решетчатых конструкциях. Выявлено влияние наличия стесняющего канала на теплоотдачу. Определено, что с ростом высоты поднятия кожуха влияние его на теплоотдачу вырождается. Максимальное значение  $Nu$  соответствует высоте  $h=5$  мм. На основе численного моделирования получена удовлетворительная сходимости расчетов, проведенных по модели  $k-\omega$ -SST, с данными, полученными в результате экспериментальных исследований. В диапазоне чисел Рэлея, превышающих 85 000, в экспериментальных данных, наблюдается незначительный монотонный рост теплоотдачи. При  $Ra$  более 100 000 наблюдалась незначительная, но устойчивая тенденция расхождения экспериментальных и расчетных данных. При этом полученные данные по росту теплоотдачи в области значительных тепловых нагрузок (более 10 Вт) соответствует физической картине исследуемых явлений. Однако, математическое описание в рамках использованной модели нуждается в доработке с целью учета особенностей теплоотдачи в пространственных решетчатых конструкциях в условиях свободной конвекции.*

**Ключевые слова:** интенсификация теплоотдачи, пространственные решетчатые структуры, топологическая оптимизация, системы охлаждения, тепловой поток, аддитивные технологии.

## Информация о статье:

Поступила в редакцию 03.07.2023, одобрена после рецензирования 28.07.2023, принята к печати 15.08.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-33-43

Язык статьи — русский

## Для цитирования:

Лопатин А. А., Габдуллина Р. А., Биктагирова А. Р., Терентьев А. А. Теплоотдача радиатора с пространственной решетчатой упорядоченной структурой в условиях свободной конвекции. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 4. С. 33–43. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-33-43

## Heat transfer of a radiator with spatial ordered lattice structures under conditions of free convection

Ph. D. A. A. LOPATIN, Ph. D. R. A. GABDULLINA,  
A. R. BIKTAGIROVA<sup>1</sup>, A. A. TERYTYEV

Kazan National Research Technical University named after V. I. A. N. Tupolev — KAI

<sup>1</sup>E-mail: arbiktagirova@kai.ru

*The paper presents the results of physical and mathematical modeling of heat transfer for radiators made on the basis of spatial lattice structures using laser sintering under conditions of free convection. The obtained data indicate that in a wide range of  $Ra$  numbers the maximum values of heat transfer correspond to the working section No. 2. At the same time, it is noted that the dependence of heat transfer on the mode parameter is of a complex nonlinear character and is confirmed by the peculiarities of physical processes occurring in lattice structures. The influence of the constraining channel on the heat transfer is revealed. It is determined that increasing height of the casing elevation decreases its influence on heat transfer. The maximum value of  $Nu$  corresponds to the height  $h=5$  mm. On the basis of numerical modeling, a satisfactory convergence of calculations carried out by the  $k-\omega$ -SST model with the data obtained as a result of experimental studies is obtained. In the range of Rayleigh numbers greater than 85 000, a slight monotonic increase of heat transfer was observed in the experimental data. At  $Ra$  of more than 100 000, a slight but steady tendency of discrepancy between experimental and*

*calculated data was observed. At the same time, the received data on the growth of heat transfer in the area of significant thermal loads (more than 10 W) corresponds to a physical picture of the investigated phenomena. However, the mathematical description in terms of the used model needs to be improved in order to take into account the peculiarities of heat transfer in spatial lattice structures under conditions of free convection.*

**Keywords:** heat transfer intensification, spatial lattice structures, topological optimization, cooling systems, heat flow, additive technologies.

#### Article info:

Received 03/07/2023, approved after reviewing 28/07/2023, accepted 15/08/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-33-43

Article in Russian

#### For citation:

Lopatin A. A., Gabdullina R. A., Biktagirova A. R., Terentyev A. A. Heat transfer of a radiator with spatial ordered lattice structures under conditions of free convection. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 4. p. 33–43.

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-33-43

### Введение

За последнее столетие развитие практически любых технологий приводило к значительному росту тепловыделения в рабочих механизмах и устройствах. В одних случаях, для поддержания стабильной работы, элементы конструкции необходимо обеспечивать теплозащитой (элементы авиационных и ракетных двигателей), а в других применять системы пассивного и активного охлаждения (контроллеры, микропроцессоры). Так в современной электронной промышленности переход на наноразмерные технологии изготовления компонентов естественным образом привел к развитию архитектуры устройств, связанной с миниатюризацией, и, как следствие, росту тепловыделения. Для обеспечения стабильной и прогнозируемой работы таких компонентов необходимо обеспечить соблюдение тепловых режимов, что, в свою очередь, требует применение адекватных способов охлаждения и термостабилизации.

### Теплоотдача радиаторов в условиях свободной конвекции

Планировать обеспечение рабочих тепловых режимов сложных компонентов необходимо уже и на этапе конструирования изделия. Например, при проектировании оптимальной формы каналов охлаждения в элементах конструкции ГТД или при формировании теплозащитного слоя диффузорной части соплового аппарата

возможно применение методов топологической оптимизации, позволяющей обеспечить наиболее благоприятные режимы работы, при минимальных затратах на охлаждение. Очевидно, что традиционными методами механообработки конструкции такого типа создать невозможно (рис. 1). В этой ситуации возможно применение аддитивных технологий, позволяющихкратно повысить сложность создаваемых элементов конструкций при одновременном развитии технологичности изделия [1, 2].

Отдельно необходимо остановиться на проблематике, связанной с охлаждением теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования. Активное развитие электроники в последние 10–15 лет привело к значительному росту тепловыделения с единицы площади компонента. В таких условиях использование традиционных радиаторов в пассивных или активных системах охлаждения зачастую уже не обеспечивает соответствующего теплоотвода и приводит к возникновению локального перегрева. При этом нарушение теплового режима эксплуатации является наиболее распространенной причиной выхода из строя электронных компонентов. Так Н. Кристиансен в своей работе [3] провел глубокий анализ основных причин, приводящих к отказу радиоэлектронного оборудования. Среди основных факторов, оказывающих максимальное деструктивное воздействие, оказывает повышенная температура элементов. Разумеется, представленные выводы отно-

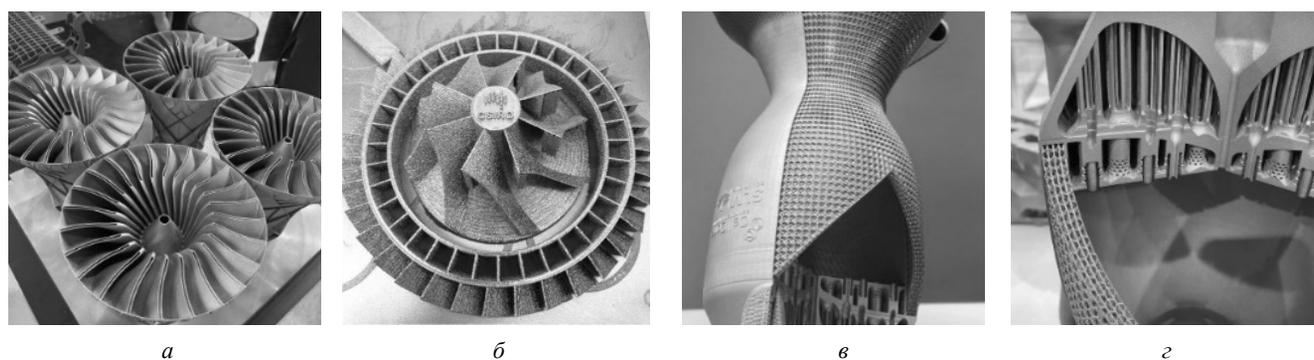


Рис. 1. Пример практического применения аддитивных технологий: а, б — элемент газотурбинного двигателя; в — камера сгорания и сопловой аппарат ракетного двигателя; г — блок форсунок элемента камеры сгорания ракетного двигателя

Fig. 1. Example of practical application of additive technologies: a, b — gas turbine engine element, c — combustion chamber and nozzle apparatus of a rocket engine, d — nozzle block of combustion chamber element for a rocket engine

сятся не только к микроэлектронным компонентам, но и ко всему спектру электро- и радиооборудования.

Создание высокоэффективных и конструктивно сложных элементов теплообменного и теплоотводящего оборудования также возможно с помощью применения современных цифровых производственных технологий. Во многом, применение аддитивных технологий обусловлено необходимостью создания оптимизированных теплоотдающих поверхностей, позволяющих при прочих равных условиях обеспечить значительную экономию материала, повысив теплоотдачу при одновременном снижении массогабаритных характеристик устройства [4]. Некоторые образцы таких систем показаны на рис. 2. При создании радиатора (рис. 2, а) и теплообменного аппарата (рис. 2, б) применялась идеология бионического (природоподобного) дизайна. Иными словами, при проектировании таких элементов за прототип использовались формы, представленные в живой природе. Это направление при проектировании оптимизированных теплообменных поверхностей и даже целых конструкций является одним из самых перспективных на сегодняшний день способов получения максимальной тепловой эффективности при минимальном гидравлическом сопротивлении. Кроме того, достаточно несложная топологическая оптимизация позволяет в одинаковом объеме, например, теплообменного аппарата, разместить значительно более сложные по геометрическим параметрам (прежде всего, площади) и теплогидравлическим характеристикам теплообменные поверхности (рис. 2 в). Такие высокоэффективные радиаторы нашли свое практическое применение в системах охлаждения слаботочных элементов питания, выпрямителях, контроллерах и микропроцессорах.

Наиболее простыми, с точки зрения технической реализации, являются системы охлаждения, работающие в условиях свободной конвекции газов, либо жидкостей. В таких устройствах, как правило, отсутствуют подвижные элементы, что положительно сказывается на работоспособности и ремонтпригодности системы в целом. Основным недостатком свободноконвективных систем является их незначительная эффективность, обусловленная низкими значениями теплоотдачи [5]. Так коэффициент теплоотдачи в условиях свободной газовой конвекции находится в диапазоне до  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а в усло-

виях жидкостной может достигнуть значений до  $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Тем не менее, применяемые в условиях свободной конвекции радиаторы, как правило выполняют из высокотеплопроводных материалов, таких как медь, алюминий, реже, различные стали. Увеличение эффективности работы этих систем связано, прежде всего, с развитием поверхности теплообмена и применением различных интенсификаторов теплоотдачи. При этом увеличение поверхности теплообмена объективно не всегда возможно, так как ведет к росту масса-габаритных характеристик прибора в целом. Использование же поверхностных интенсификаторов зачастую связано с техническими сложностями в части механической обработки или штамповки. В связи с этим практическое применение современных цифровых производственных технологий (лазерное селективное плавление) в системах охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования в условиях свободной конвекции позволяет получить значительно более развитую теплообменную поверхность в сочетании с высокоэффективными поверхностными интенсификаторами теплоотдачи.

### Теплоотдача радиаторов с пространственной решетчатой упорядоченной структурой

В последние несколько лет, прежде всего в зарубежной тематической научной литературе появилось достаточно большое количество работ, посвященных исследованиям возможности применения пространственных решетчатых структур (латтисов) в системах охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов в различных приборах и энергетических установках [5]. Необходимо отметить, что подобные конструкции в прикладной науке и технике известны достаточно давно и изначально нашли свое широкое практическое применение в различного рода силовых элементах, в том числе и в области авиационной и ракетно-космической техники, а также в строительстве. Логичным развитием этого направления стали топологически оптимизированные конструкции, позволяющие, в значительной степени, снизить масса-габаритные характеристики конструкции без потери прочностных параметров и функциональности (рис. 3, а, б). Тем не менее, со временем, как и многие

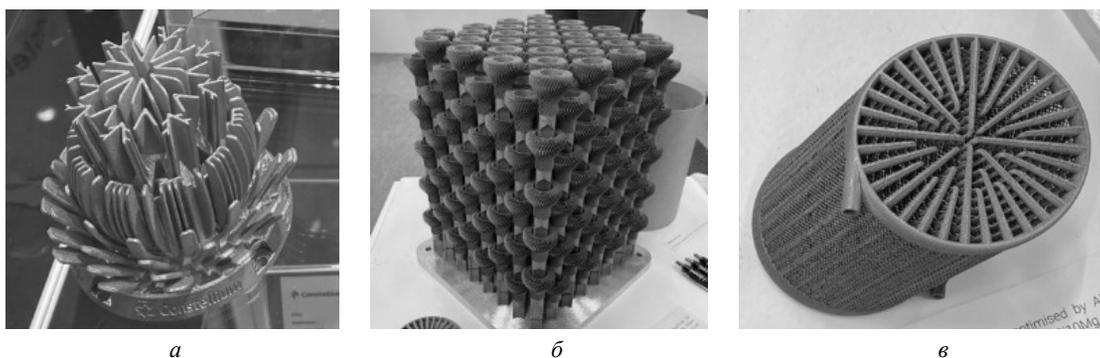


Рис. 2. Образцы применения аддитивных технологий в теплообменных системах: а — радиатор; б, в — теплообменные аппараты

Fig. 2. The samples of additive technologies' application in heat exchange systems: а — radiator; б, в — heat exchange apparatuses

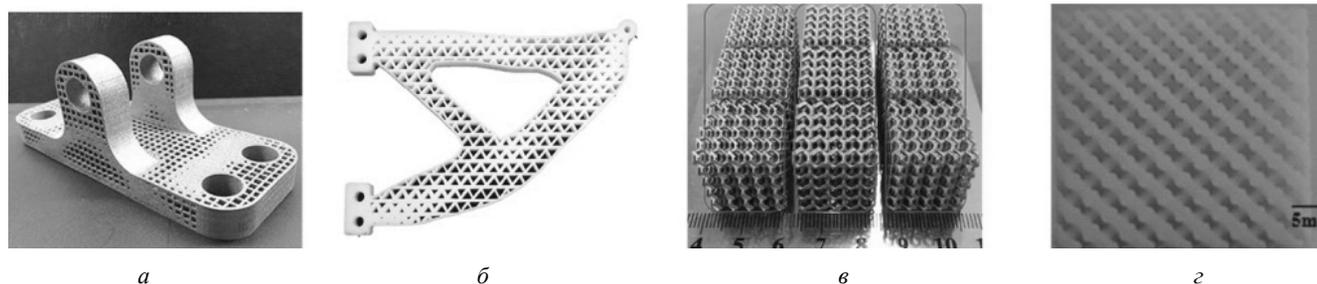


Рис. 3. Примеры использования пространственных решетчатых конструкций (латтисов):  
 а, б — дифференциальная ячеистая структура [6]; в — структура типа гироид [7]; з — алмазная структура [8]  
 Fig. 3. Examples of using spatial lattice structures (lattices):  
 а, б — differential cellular structure [6]; в — gyroid type structure [7]; з — diamond structure [8]

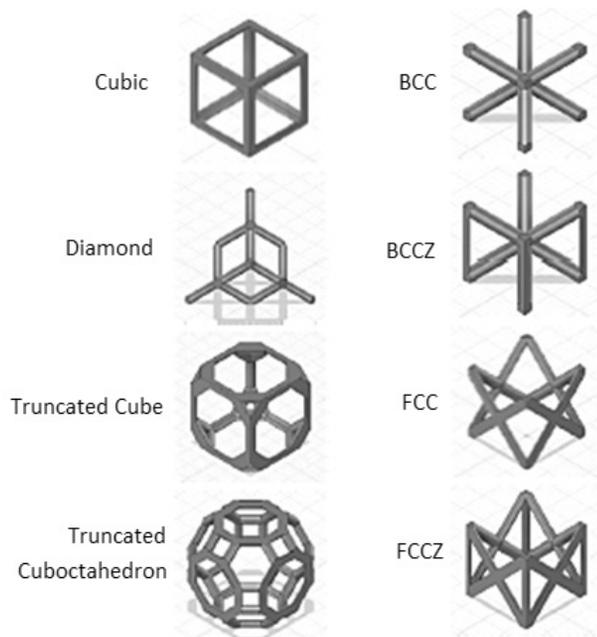


Рис. 4. Примеры основных видов элементарных ячеек пространственных решетчатых структур (латтисов) [9]  
 Fig. 4. Examples of basic types of elementary cells for spatial lattice structures (lattices) [9]

известные технические решения латтисы нашли свое новое применение в качестве радиатора, обеспечивающих отвод тепловых потоков высокой плотности (рис. 3, в, з).

Активное развитие аддитивных технологий в последние несколько лет позволило разработать несколько основных видов элементарных ячеек. Именно эти формы, представленные на рис. 4, в настоящее время широко используются.

На рис. 5 представлены некоторые образцы латтисов, используемых в качестве рабочих элементов в системах охлаждения различных устройств. Подобные радиаторы позволяют обеспечить оптимальные режимные параметры теплоотдачи в условиях свободной и вынужденной конвекции, а также кипения. Эффективность использования подобных радиаторов заключается в обеспечении максимального взаимодействия теплообменного элемента с потоками теплоносителя за счет чередования пространственных решетчатых элементов по форме и размеру. Также применение теплообменных элементов с пространственной решетчатой структурой способствует росту отводимых тепловых потоков за счет кратного увеличения площади теплообмена по сравнению с традиционным оребрением, а также смены условий теплоотдачи, связанной с более ранней реализацией ламинар-

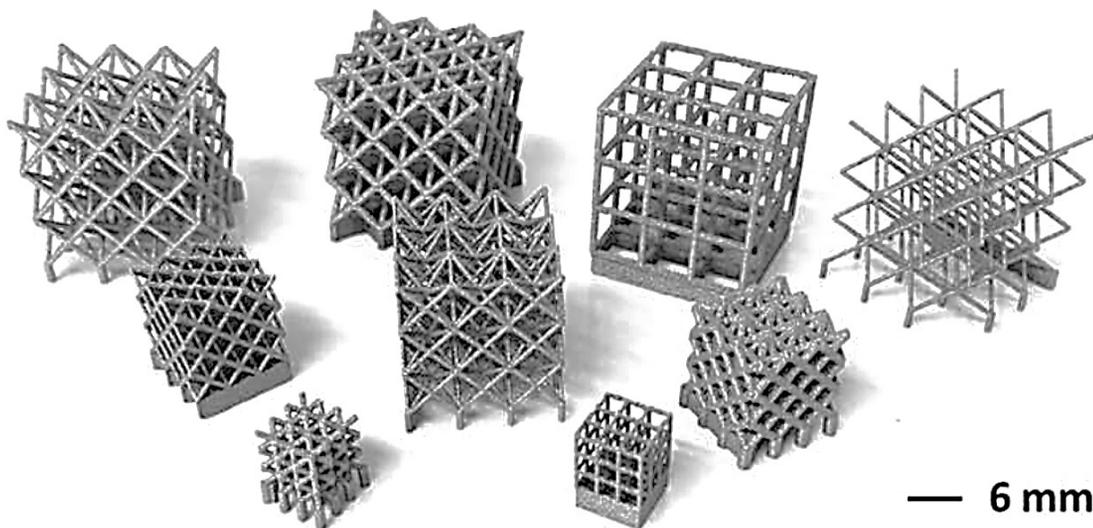


Рис. 5. Различные формы пространственных решетчатых структур (латтисов), используемых в качестве радиаторов [9]  
 Fig. 5. Different shapes of spatial lattice structures (lattices) used as radiators [9]

но-турбулентного перехода при вынужденной жидкостной и газовой конвекции. Оценивая пространственную конструкцию этих теплообменных элементов, можно сделать вывод о возможности производства таких элементов только с помощью современных цифровых технологий.

### Цели и задачи исследования

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффективности теплоотдачи радиатора с пространственной решетчатой упорядоченной структурой в условиях свободной конвекции. В процессе исследования были поставлены следующие задачи:

- разработка и создание радиаторов на основе пространственных решетчатых структур методом селективного лазерного плавления;
- создание экспериментального стенда для оценки теплоотдачи изготовленных радиаторов;
- проведение серии экспериментов с переменной мощностью подвода тепла;
- расчет и оценка термических сопротивлений систем охлаждения на основе радиаторов с пространственной решетчатой структурой;
- сравнительный анализ математического и физического моделирования процесса теплоотдачи в комплексе ANSYS.

Опираясь на анализ рассмотренных материалов, для проведения экспериментальных и расчетных иссле-

дований были разработаны и созданы два радиатора различной структуры. В соответствии с принятой классификацией (см. рис. 4), элементарные ячейки в представленных радиаторах можно отнести к объемно-центрированному кубическому типу (BCC, Cubik). Внешний вид теплообменных элементов (ТЭ) и их геометрические параметры представлены на рис. 6, 7.

ТЭ № 1 и № 2 (рис. 6, 7), полученные методом селективного лазерного плавления хромоникелевого порошка, представляют собой радиаторы прямоугольной формы с пространственной решетчатой структурой шириной  $15 \times 15$  мм и высотой — 20 мм. Пространственные решетки выполнены на металлизированной подложке со специальными элементами для крепления к экспериментальному стенду. В ходе обработки экспериментальных данных в качестве потерь учитывался тепловой поток, рассеиваемый торцевой поверхностью подложки, а также элементами крепления конструкции к стенду. Тепловые потери через обозначенные элементы не превышали 3 %.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, выполненном по методологии разомкнутого расходного контура. Принципиальная схема установки показана на рис. 8. Для имитации работы электронного компонента в части его тепловыделения был разработан и создан нагреватель типа «тепловой клин», обеспечивающий изотермичный нагрев на своей торцевой поверхности в диапазоне тепловых нагрузок от 0,5 Вт до 100 Вт

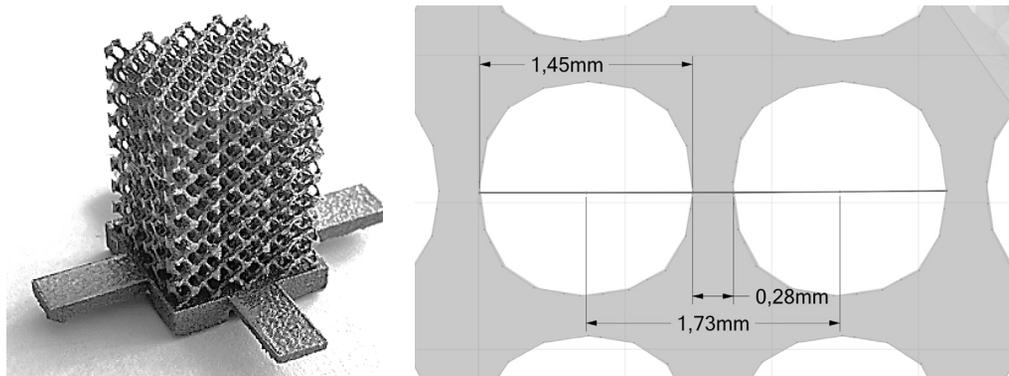


Рис. 6. Внешний вид ТЭ № 1. Степень пористости  $\Pi 1 = 0,12461$   
Fig. 6. Heat-exchange element № 1. Degree of porosity  $\Pi 1 = 0.12461$

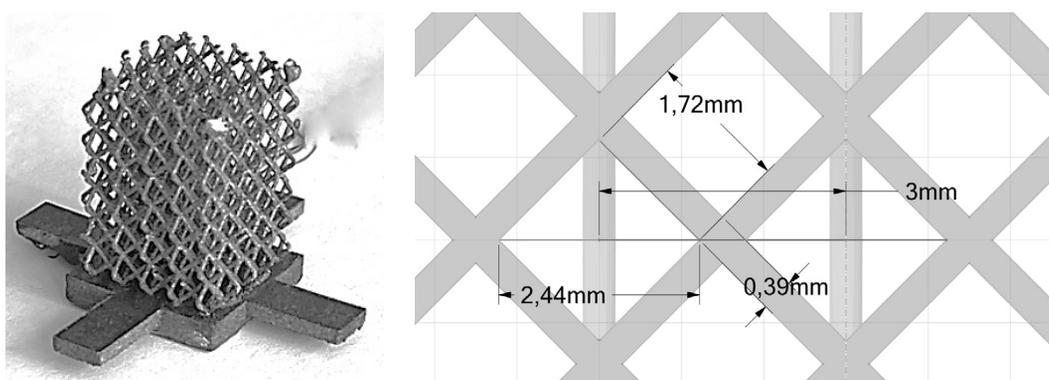


Рис. 7. Внешний вид ТЭ № 2. Степень пористости  $\Pi 2 = 0,0676$   
Fig. 7. Heat-exchange element № 2. Degree of porosity  $\Pi 2 = 0.0676$

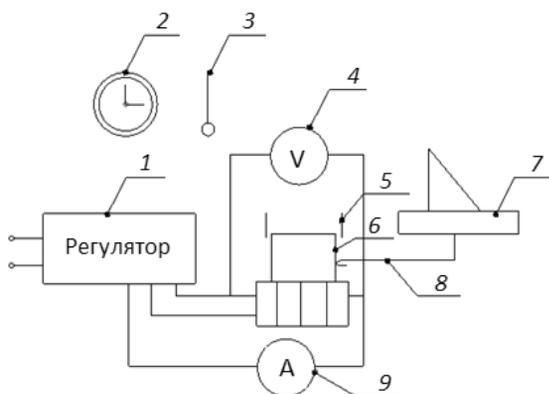


Рис. 8. Принципиальная схема стенда:

1 — регулируемый блок питания; 2 — секундомер; 3 — термометр лабораторный ртутный; 4 — вольтметр; 5 — кожух; 6 — рабочий участок; 7 — персональный компьютер; 8 — система из хромель-копелевых термопар; 9 — амперметр

Fig. 8. Scheme of the stand: 1 — adjustable power supply unit; 2 — stopwatch; 3 — laboratory mercury thermometer; 4 — voltmeter; 5 — casing; 6 — working area; 7 — personal computer; 8 — system of chromel-copel thermocouples; 9 — ammeter

(рис. 9). Тем самым обеспечивалось моделирование температурных режимов при работе реального процессора в широком диапазоне тепловых нагрузок. Изотермичность поверхности контролировалось с помощью 5 термопар, размещенных эквидистантно на поверхности нагревателя-имитатора.

### Анализ результатов физического и численного моделирования

Основные результаты экспериментальных исследований отражены на рис. 10–12. Сравнение различных методов охлаждения по параметру термического сопротивления  $R$  в теплотехнике является универсальным, и позволяет наглядно оценить качество процесса отвода тепла во всем диапазоне тепловых нагрузок. В работе приведено сравнение двух образцов пористых теплообменных элементов. Термическое сопротивление определялось по измеренным значениям температур и тепловых потоков:

— по всей системе в целом (отношение разности температур нагревателя и натекающего воздуха к тепловому потоку):

$$R_t = R_{T_3} + R_\alpha + R_{\text{конт}};$$

— в части решетчатого теплообменного элемента  $R_{T_3}$  (отношение разности температур основания теплообменного элемента и температуры на его верхней поверхности к подведенному тепловому потоку);

— в части контакта нагревателя и радиатора  $R_{\text{конт}}$  (отношение разности температуры нагревателя и температуры основания (подложки) радиатора к тепловому потоку).

В работе была проведена оценка каждой из указанных составляющих термического сопротивления при различной тепловой нагрузке. Интегральный результат оце-

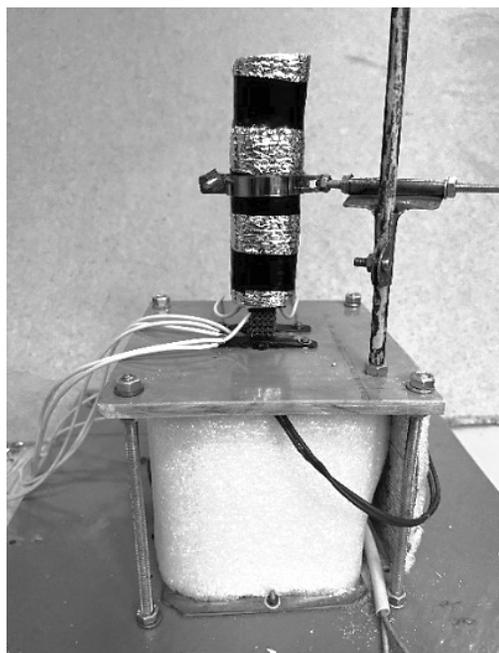


Рис. 9. Внешний вид нагревателя-имитатора с установленным радиатором и кожухом  
Fig. 9. Simulator heater with radiator and casing

нивался по эффективному сопротивлению теплоотдачи решетчатого радиатора  $R_\alpha$  (отношение разности температуры на верхней поверхности радиатора и температуры окружающего воздуха к тепловому потоку)

Значение  $R_{T_3}$ , определяющее термическое сопротивление между основанием рабочего участка и верхней торцевой поверхностью, имеет достаточно большие значения, не характерные для цельнометаллических элементов. Об этом свидетельствует значительный перепад температур. Такая ситуация обусловлена особенностями процесса изготовления самого решетчатого радиатора методом селективного лазерного плавления (SLM). В процессе SLM слои металлического порошка равномерно распределяются и каждый геометрический слой (срез) детали сплавляется лазером. При этом в процессе сплавления в структуре материала образуется микропористость, заполненная воздухом, которая отрицательно сказывается на теплопроводности, и, как следствие, ухудшается термическое сопротивление решетчатого теплообменного элемента [9]. На рис. 10 укрупненно представ-

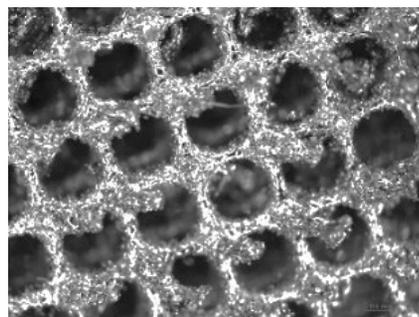


Рис. 10. Структура пространственных решеток с разрешением 0,5 мм

Fig. 10. Structure of spatial lattices with resolution of 0.5 mm

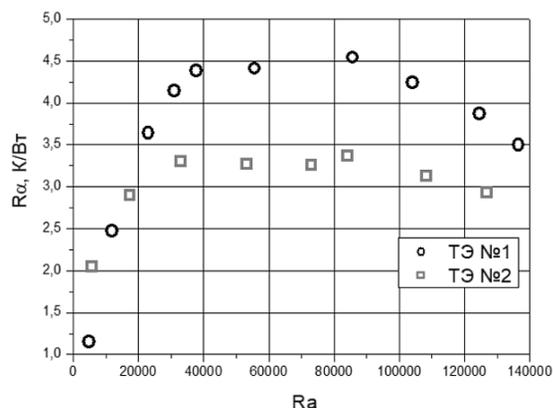


Рис. 11. Сравнение термического сопротивления для ТЭ1 и ТЭ2

Fig. 11. Comparison of thermal resistance for heat-exchange element 1 and heat-exchange element 2

лен внешний вид пространственной решетчатой конструкции. Как следует из фотографии, в структуре решетки присутствуют так называемые локальные непровары и истончения структуры, служащие причиной анизотропии теплофизических свойств, а именно, теплопроводности. С развитием аддитивных технологий совершенствуются и подходы к обеспечению минимизации анизотропии в изделиях, созданных, в том числе с помощью SLM-технологий. Тем самым, можно рассчитывать, что в ближайшие пару лет будет достигнут технологический уровень, позволяющий получать цельнометаллические изделия с полностью регулярной структурой и равномерностью свойств в объеме материала.

При рассмотрении  $R_{\text{конт}}$  была выявлена слабая зависимость этого параметра от нагрева. Можно предположить, что это обусловлено тем, что теплопроводность термопасты, используемой в качестве связующего между нагревателем-имитатором и радиатором имеет слабую зависимость от температуры в исследуемом диапазоне тепловых нагрузок, вследствие чего сопротивление контакта сохранялось практически постоянным при всех исследуемых режимах. Таким образом, в результате анализа основных влияющих факторов, было решено количественную оценку эффективности работы решетчатого радиатора провести по среднему эффективному сопротивлению теплоотдачи  $R_a$ .

Зависимость среднего эффективного сопротивления теплоотдачи  $R_a$  от мощности нагрева представлена на рис. 11. Как следует из зависимости, в диапазоне тепловых нагрузок до 4 Вт на обоих рабочих участках наблюдается идентичные значения  $R_a$ . При дальнейшем росте тепловой нагрузки, с 4 до 16 Вт, наблюдается значительное расслоение кривых эффективного сопротивления теплоотдачи с локальным экстремумом при тепловом потоке 6 Вт. Характер зависимостей после максимума меняется, и в диапазоне от 6 до 12 Вт наблюдается существенное снижение параметра  $R_a$ . В дальнейшем, при тепловых нагрузках более 12 Вт на графике отчетливо наблюдается некоторая область стабилизации, характеризующаяся автомоделностью параметра эффективного сопротивления теплоотдачи. Необходимо отметить, что в диапазоне тепловых потоков от 4 до 16 Вт

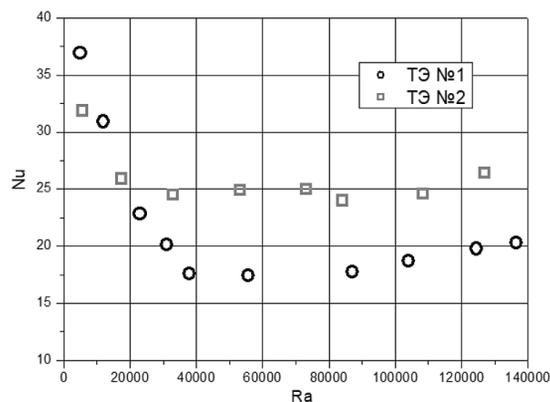


Рис. 12. Сравнение теплоотдачи для ТЭ1 и ТЭ2

Fig. 12. Comparison of heat transfer for heat-exchange element 1 and heat-exchange element 2

более низкие значения эффективного сопротивления теплоотдачи реализуются в тепловыделяющем элементе № 2.

Такая нетривиальная зависимость  $R_a$  свидетельствует о достаточно высокой степени сложности физических процессов, протекающих при теплоотдаче охлаждаемых пространственных решетчатых конструкций в условиях свободной конвекции. В подтверждение сказанного можно привести зависимость теплоотдачи от числа Ra, представленную на рис. 12. Она естественным образом является неким инверсивным отражением зависимости термического сопротивления от тепловой нагрузки (рис. 11). В условиях малых тепловых нагрузок, в диапазоне  $Ra < 20\,000$ , наблюдается близкие значения теплоотдачи для обоих рабочих участков. При этом характер зависимости — монотонное снижение теплоотдачи, свидетельствует о том, что в теплообменных процессах в заданном диапазоне режимных параметров участвуют, прежде всего внешние поверхности трехмерных решетчатых структур. Это обусловлено высокой плотностью размещения ячеек в конструкции латтисов.

При дальнейшем росте числа Релея наблюдается расслоение кривых, соответствующих теплообменным элементам № 1 и № 2. При этом на участке № 2 в диапазоне Ra от 20 000 до примерно 85 000 наблюдается некоторый участок автомоделности теплоотдачи, что может свидетельствовать о стабилизации теплообменных процессов, связанных с выравниванием температурных потоков внутри трехмерной структуры. Как следует из зависимости (рис. 12) теплоотдача на участке № 1 с ростом Ra от 20 000 до 40 000 продолжает падать и стабилизируется, выходя на некоторую автомоделность, при  $Ra > 40\,000$ . Схожесть характеров зависимостей (ТЭ № 1 и № 2) свидетельствует об аналогичности процессов, протекающих в трехмерных решетчатых структурах. При этом различия в режимных параметрах отражает разницу геометрической структуры самих латтисов. Как видно из рис. 6 и 7, структура ТЭ № 2 ( $\Pi_2 = 0,0676$ ) обладает практически в два раза меньшей степенью пористости, чем ТЭ № 1 ( $\Pi_1 = 0,12461$ ). Это, в сочетании с формой ячейки, разумеется, сказывается на теплоотдачу в усло-

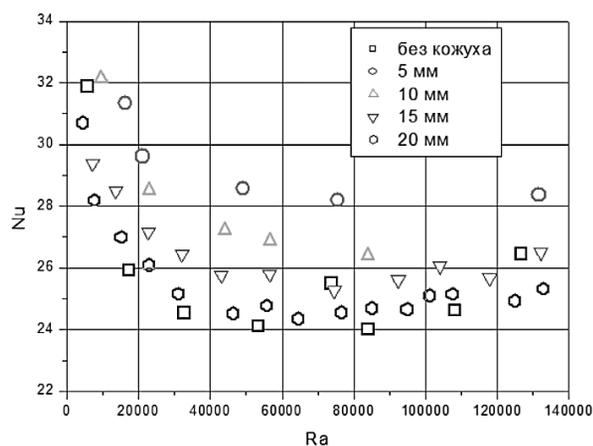


Рис. 13. Теплоотдача ТЭ № 2 при различных высотах поднятия кожуха

Fig. 13. Heat transfer for heat-exchange element 2 at various heights of the casing elevation

виях свободной конвекции. И именно по этой причине мы наблюдаем продолжающийся тренд на снижение теплоотдачи (ТЭ № 1) до  $Ra \approx 40\,000$ .

При дальнейшем росте числа Рейля, выше 85 000, на обоих рабочих участках отчетливо прослеживается некоторый рост теплоотдачи, что вполне объяснимо с точки зрения физических процессов, протекающих в замкнутых решетчатых структурах. Представленный диапазон чисел  $Ra$  соответствует тепловым нагрузкам, лежащим в диапазоне от 12 до 16 Вт. Учитывая площадь основания рабочих участков ( $2,25 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ ) речь идет о достаточно высоких плотностях тепловых потоков, лежащих в диапазоне от 47 кВт/м<sup>2</sup> до 71 кВт/м<sup>2</sup> соответственно. Фактически, на этом этапе экспериментальных исследований, с учетом стационарной постановки, элементы пространственной решетки имели температуру близкую к значениям температуры подложки. При этом обеспечивался значительный температурный градиент между поверхностью латтисов и окружающим воздухом. Таким образом, в соответствии с уравнением теплоотдачи, повышение тепловой нагрузки привело к росту теплоотдачи.

Одним из наиболее распространенным способом интенсификации теплоотдачи в условия свободной конвекции является подход, обеспечивающий эффект самотяги теплоносителя. Для этого радиатор помещается в кожух обеспечивающий, как правило, небольшой зазор между боковой поверхностью рабочего участка и внутренней поверхностью кожуха [11]. С целью определения возможности применения подобного способа интенсификации теплоотдачи были проведены серии экспериментальных исследований на ТЭ № 2 при различных высотах поднятия кожуха  $h$ . Основные результаты представлены на рис. 13. Характер кривых во многом схож с экспериментальными зависимостями, представленными на рис. 11, выполненными без внешнего кожуха. Результаты исследований свидетельствуют о наличии некоторой зависимости теплоотдачи от высоты поднятия кожуха (рис. 13). Как следует из графика, максимальная теплоотдача соответствует  $h = 5$  мм.

Максимальное значение интенсификации достигается при  $Ra > 20\,000$ . В общем это соответствует результатам, полученным в работах [12]. С ростом высоты поднятия кожуха влияние стесненности постепенно вырождается, интенсивность теплоотдачи падает. При  $h = 20$  мм, когда обечайка кожуха начинается на верхней торцевой поверхности радиатора, можно наблюдать значения теплоотдачи, практически не отличающейся от тех же значений, но без кожуха. Несмотря на наличие эффекта интенсификации при использовании кожуха, количественные показатели теплоотдачи отстают от аналогичных значений, полученных в работе [11, 12] для случая разрезного осевого оребрения. При этом базовые показатели эффективности, для условий теплоотдачи без стеснения, в радиаторах, выполненных на основе пространственных решетчатых конструкций, имеют более высокие значения. Такая ситуация свидетельствует о большой степени эффективности применения интенсификации, связанной с использованием кожуха в условиях естественной конвекции, в случае, например, осевого разрезного оребрения, а не пористых теплообменных материалов. Это связано, прежде всего с тем, что латтисы, как разновидности пористых структур, обладают достаточно большей плотностью размещения материалов в пределах рабочего участка, чем любое другое оребрение. Тем самым, в условиях свободной конвекции, при умеренных тепловых нагрузках, теплоноситель в большей степени взаимодействует с внешней частью радиатора, тогда как при использовании различного рода оребрения, рабочее тело имеет свободный доступ ко всей поверхности ребра. В результате, в латтисных структурах при прочих равных условиях образуются застойные зоны, снижающие эффективность теплоотдачи. Об этом выводе свидетельствуют и данные по термическому сопротивлению, представленные на рис. 11.

#### Анализ результатов численных исследований по теплоотдаче

Проведение экспериментальных исследований позволило качественно и количественно оценить тепловую эффективность пространственных решетчатых конструкций. При этом любой физический эксперимент несет в себе значительные временные и материальные затраты. Проведение математического моделирования позволяет значительно оптимизировать все виды затрат и достаточно быстро получить достоверные результаты.

В рамках представленной работы для верификации математической модели было проведено численное моделирование процесса теплоотдачи. Моделирование проводилось в несколько этапов. Геометрические параметры расчетной области соответствовали решетчатому ТЭ № 2.

Задача реализовывалась в стационарной постановке на основе решения модели уравнений Рейнольдса в стандартной формулировке [12]–[14]. Численное моделирование было выполнено в пакете Ansys Fluent.

На первом этапе проектировалась геометрия расчетной модели. Модель рабочей области была предварительно спроектирована в продукте Space Claim, построение конечно-элементной сетки, оптимизированной

под конкретную задачу, было осуществлено в программе Meshing. Диагностика проводилась в программе Design Modeler, где была выбрана ориентация поверхностей сборки. Здесь были обозначены: рабочий участок — «solid» и воздух вокруг него — «fluid». Расчетная сетка, в основе которой были тетрагексогональные ячейки, содержала в среднем от 1,3 до 1,5 млн ячеек.

При построении физической модели задавалось направление и величина ускорения свободного падения, свойства рабочих материалов: решетчатый ТЭ — сталь, окружающее пространство — воздух. В разделе «Boundary Conditions» задавались граничные условия 1 рода. Начальная температура нижней части рабочего участка задавалась в соответствии с экспериментально полученной температурой нагрева при соответствующем подводе тепла. Окружающая температура воздуха соответствовала замерам в ходе проведения экспериментов.

Для того, чтобы установить начальное состояние задачи была проведена ее инициализация. После этого определялось количество итераций в ходе решения задачи и происходил запуск программы. Полученные данные просматривались в постпроцессоре «CFD-Post». Процесс расчета продолжался до тех пор, пока точность безразмерных невязок по энергии не достигала значений  $10^{-6}$ .

### Анализ результатов численного моделирования

Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов численного моделирования включает в себя комплексное рассмотрение всех аспектов теплоотдачи, в том числе режимных и геометрических параметров. В связи с этим моделирование теплоотдачи проводилось при широком диапазоне тепловых нагрузок. На рис. 14 представлен график, иллюстрирующий сравнение физического и математического моделирования теплоотдачи.

Результаты численного моделирования с удовлетворительной точностью, в среднем  $\pm 4\%$ , описывают физические явления, представленные экспериментальными данными. Детально рассматривая результаты численного и физического моделирования, можно отметить, что при числах Рейля более 85 000, как уже отмечалось выше, в экспериментальных данных наблюдается незначительный монотонный рост теплоотдачи. Однако, принятая математическая модель в силу объективных особенностей не учитывает особенность роста теплоотдачи, обоснованную выше. В связи с этим, возможность математического описания физических процессов теплоотдачи, протекающих при свободноконвективном взаимодействии теплоносителя с радиатором, выполненном на основе пространственных решетчатых конструкций, ограничена режимными параметрами, связанными с тепловыми нагрузками, и нуждается в дальнейшем более глубоком осмыслении.

### Литература

1. He Li & Fei, Fan & Wang, Wenbo & Song Xuan. Layerless Additive Manufacturing of Metal Alloy Lattices Using Immiscible-Interface Assisted Direct Metal Drawing // *Procedia Manufacturing*. 2019. 34. 647–654.

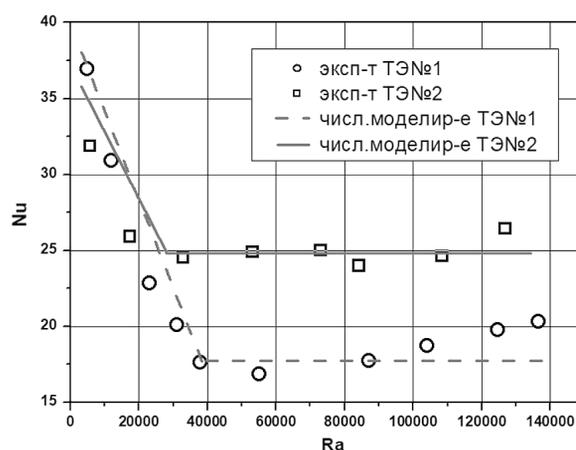


Рис. 14. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными

Fig. 14. Comparison of numerical calculation results with experimental data

### Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования процесса теплоотдачи радиатора, выполненного на основе пространственных решетчатых конструкций двух типов. Выявлена структура режимов теплоотдачи в части трех диапазонов чисел Ra: от 2000 до 20000 — падение теплоотдачи; от 20000 до 85000 — участок стабилизации; от 85000 до 130000 — участок роста теплоотдачи. Определено, что в диапазоне чисел Рейля от 20000 до 130000 максимальная теплоотдача соответствует ТЭ № 2. Полученные данные по термическому сопротивлению свидетельствуют, что в диапазоне чисел  $Ra > 20000$  максимальной эффективностью (т. е. минимальным средним эффективным сопротивлением теплоотдачи  $R_{\text{eff}}$ ) обладает ТЭ № 2. Выявлено интенсифицирующее влияние внешнего кожуха, обеспечивающего эффект самотяги, на теплоотдачу радиатора. При этом максимальное значение теплоотдачи соответствует высоте поднятия кожуха  $h = 5$  мм. С ростом высоты поднятия кожуха, его влияние на теплоотдачу вырождается.

В результате численного моделирования получена удовлетворительная сходимость расчетов, проведенных по модели  $k-\omega$ -SST, с данными, полученными в результате экспериментальных исследований. В диапазоне чисел Рейля, превышающих 85000, в экспериментальных данных, наблюдается незначительный монотонный рост теплоотдачи. Однако, результаты численного моделирования не поддерживают данную тенденцию. Дальнейшее детальное рассмотрение особенностей математической формулировки представленной задачи, позволит учесть все нюансы и специфику процесса теплоотдачи радиатора, выполненного на основе пространственных решетчатых конструкций.

### References

1. He Li & Fei, Fan & Wang, Wenbo & Song Xuan. Layerless Additive Manufacturing of Metal Alloy Lattices Using Immiscible-Interface Assisted Direct Metal Drawing. *Procedia Manufacturing*. 2019, 34. 647–654.

2. Deng Fanghang, Nguyen Quang-Kha, Zhang Pu. Multifunctional Liquid Metal Lattice Materials through Hybrid Design and Manufacturing // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 33. P. 101117. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101117.
3. Kristiansen H. Thermal Management in Electronics. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2001.
4. Li Hanling & Cao Bingyang. Topology optimization of the volume-to-point heat conduction problem at micro-and nano-scale // *Acta Physica Sinica — Chinese Edition*. 2019. Vol. 68. Issue 20.
5. Poureslami P., Siavashi M. 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. P. 105465. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.10545.
6. Cheng L., Bai J., To A. C. Functionally graded lattice structure topology optimization for the design of additive manufactured components with stress constraints // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2019. Vol. 344. P. 334–359.
7. Yang L., Mertens R., Ferrucci M., Yan C., Shi Y., Yang S. Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: design, manufacturing and mechanical properties // *Mater. Des.* 2019. Vol. 162. P. 394–404.
8. Afshar M., Pourkamali Anaraki A., Montazerian H. Compressive characteristics of radially graded porosity scaffolds architected with minimal surfaces // *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.* Nov 1 2018. Vol. 92. P. 254–267.
9. Bradley Hanks, Joseph Berthel, Mary Frecker, Timothy W. Simpson. Mechanical properties of additively manufactured metal lattice structures // *Data review and design interface Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 35. P. 101301.
10. Deng Xinghua, Piotrowski George, Williams J. J. Effect of porosity and tension — compression asymmetry on the Bauschinger effect in porous sintered steels // *International Journal of Fatigue — INT J FATIGUE*. 2005, 27. 1233–1243. 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.041.
11. Lopatin A. A., Israa S. Ahmed, Gabdullina R. A., Biktagirova A. R. Intensification of heat transfer in the cooling systems of radio electronic equipment under free and forced convection // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 765, 1st International Conference of Electromechanical Engineering and its Applications (ICEMEA-2020) 25–26 February 2020, Baghdad, Iraq, DOI: 10.1088/1757-899X/765/1/012043.
12. Clovis R. Maliska. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics // *The Finite Volume Method*, Springer International Publishing. 2023. p. 431.
13. Driss Zied, Necib Brahim, Zhang Hao-Chun. CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70945-1.
14. Bharti Ram, Gangawane Krunal. Recent Trends in Fluid Dynamics Research. 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-6928-6.

### Сведения об авторах

#### Лопатин Алексей Александрович

К. т. н., доцент, заведующий кафедрой реактивных двигателей и энергетических установок, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, alekseypopatin@yandex.ru

### Information about authors

#### Lopatin Aleksey A.

Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of Jet engines and power plants, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, 420111, Russia, Kazan, st. K. Marx, 10, alekseypopatin@yandex.ru

**Габдуллина Розалия Альбертовна**

К. т. н., ассистент кафедры Реактивных двигателей и энергетических установок, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, rozzy94@mail.ru

**Биктагирова Айгуль Рафисовна**

Инженер кафедры Реактивных двигателей и энергетических установок, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, arbiktagirova@kai.ru

**Терентьев Александр Андреевич**

Ассистент кафедры лазерных и аддитивных технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, aaterentev@kai.ru

**Gabdullina Rosalia A.**

Ph. D., Assistant of the Department of Jet engines and power plants, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, 420111, Russia, Kazan, K. Marx str., 10, rozzy94@mail.ru

**Biktagirova Aigul R.**

Engineer of the Department of Jet engines and power plants, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, 420111, Russia, Kazan, K. Marx st., 10, arbiktagirova@kai.ru

**Terentyev Alexander A.**

Assistant of the Department of Laser and additive technologies, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, 420111, Russia, Kazan, K. Marx str., 10, aaterentev@kai.ru



Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

31-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ, НАПИТКОВ И СЫРЬЯ ДЛЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

**ПРОД  
ЭКСПО** 5–9  
февраля  
2024

Москва, ЦВК «Экспоцентр» 18+



«Продэкспо» – крупнейшая международная выставка продуктов питания и напитков в России и Восточной Европе. На «Продэкспо» представлено продовольствие со всего мира: от базовых продуктов и напитков на каждый день до изысканных деликатесов, а также органическое, спортивное питание, для здорового образа жизни, халяль, кошер, экзотические продукты.

**ТЕМАТИКИ ВЫСТАВКИ:****❖ Продэкспо Food**

- ✓ Ингредиенты. Пищевые добавки. Сырье.
- ✓ Мясо и мясопродукты. Колбасные изделия. Птица, яйцо.
- ✓ Молочная продукция. Сыры.
- ✓ Мороженое.
- ✓ Бакалея. Зернопродукты.
- ✓ Макароны изделия. Приправы, специи.
- ✓ Растительные жиры.
- ✓ Соки, воды. Безалкогольные напитки.
- ✓ Замороженные продукты. Полуфабрикаты.
- ✓ Кондитерская продукция. Снэки.
- ✓ Орехи, сухофрукты.
- ✓ Мед и продукты пчеловодства.
- ✓ Чай. Кофе.
- ✓ Рыба и морепродукты.

- ✓ Гастрономия.
- ✓ Функциональное питание.
- ✓ Продукция «Халяль».
- ✓ Продукты для HORECA.
- ✓ Детское питание. Спортивное питание.
- ✓ Продукты для здорового образа жизни.
- ✓ Овощи, фрукты, грибы, дикоросы.
- ✓ Консервы. Соусы, кетчупы.
- ✓ Торговые дома, оптово-распределительные центры.
- ✓ Регионы России. Коллективные экспозиции – Мультипродукт.

**❖ Продэкспо Wine****❖ Продэкспо Organic****❖ Продэкспо Pack&Technology****Место проведения:**

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»,  
123100, г. Москва, Краснопресненская наб., 14

**Контакты:**

Дирекция выставок пищевой промышленности:  
Тел.: (499) 795–37–99, e-mail: info@expocentr.ru

[www.prod-expo.ru](http://www.prod-expo.ru)