

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ РЕШЕТЧАТЫМИ СТРУКТУРАМИ

А.А. Лопатин
Р.А. Габдуллина
А.А. Саетгараев
А.Р. Биктагирова

aalopatin@kai.ru
rozzy94@mail.ru
askar.sayetgarayev88@mail.ru
arbiktagirova@kai.ru

КНИТУ–КАИ, Казань, Российская Федерация

Аннотация

Целью работы является экспериментальное определение гидравлических характеристик и получение обобщенной эмпирической зависимости вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления для каналов с пространственными решетчатыми структурами. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки эффективных систем охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов энергетического и радиоэлектронного оборудования, которые работают в условиях высоких тепловых потоков и требуют оптимальных гидравлических характеристик для обеспечения надежной эксплуатации. Представлены результаты физического моделирования, направленного на определение гидравлических характеристик каналов с пространственными решетчатыми структурами в диапазонах значений пористости 0,143–0,749 и числа Рейнольдса 2700–150 000. Экспериментальные данные показали, что в исследованных каналах с увеличением степени пористости потери давления рабочей среды возрастают, что необходимо учитывать при проектировании подобных систем. На основе полученных эмпирических зависимостей определены значения вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления, которые являются ключевыми параметрами для моделирования и прогнозирования потоков рабочего тела в системах с пористыми структурами. Результаты исследования позволили установить диапазон изменения гидравлических характеристик при варьировании степени пористости. Это позволит разработчикам создавать более эффективные и надежные системы

Ключевые слова

Решетчатая структура, коэффициент гидравлического сопротивления, гидравлическое сопротивление, канал с пространственной решетчатой структурой, вязкостный коэффициент сопротивления, инерционный коэффициент сопротивления

охлаждения и термостабилизации, обеспечивая оптимальное сочетание гидравлических и теплообменных характеристик. Такие системы являются ключевыми для энергетических устройств и радиоэлектронного оборудования, где высокие тепловые нагрузки и ограниченные пространства требуют высокоэффективных систем для отвода теплоты

Поступила 07.06.2024

Принята 23.10.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. Одной из проблем, сдерживающих развитие современного энергетического и радиоэлектронного оборудования, являются вопросы, связанные с охлаждением и термостабилизацией критически важных элементов конструкций и приборов. Если температура полупроводникового радиоэлектронного прибора превышает его расчетное допустимое значение всего на 10 °С, то надежность такого прибора снижается в 2 раза [1]. В настоящее время для обеспечения штатной работы некоторых современных полупроводниковых электронных компонентов применяют не только традиционные пассивные и активные конвективные системы, но и испарительное и иммерсионное охлаждение, обеспечивающее отвод тепловых потоков высокой плотности. Следует отметить, что потенциал трансформации конвективных систем еще далеко не исчерпан и заключается в применении различных поверхностных интенсификаторов, обеспечивающих увеличение теплоотдачи [2].

В современной тематической научной литературе, посвященной увеличению тепловой эффективности, уделяется достаточно большое внимание такому перспективному направлению как использование пористых металлических материалов для создания радиаторов и теплоотводящих элементов конструкций [3–5]. Повышение продуктивности охлаждения электронных элементов с использованием пористых радиаторов с открытыми порами в основном определяется его размерами, а именно диаметром пор и толщиной [6].

Один из видов пористых металлических конструкций, обладающих упорядоченной геометрией, — пространственные решетчатые структуры. В последние годы наблюдается стремительный рост интереса реального сектора экономики к практическому применению пространственных решетчатых структур, о чем свидетельствует множество публикаций, например, [7–10]. Радиаторы на основе решетчатых структур в условиях вынужденной жидкостной и газовой конвекции нашли широкое применение в различных системах, обеспечивающих охлаждение и термостабилизацию теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования [11–13].

Конструктивная и технологическая сложность разработки и создания, а также высокая цена, являются главными препятствиями для широкого применения решетчатых структур. Однако развитие современного аддитивного производства, например, селективного лазерного плавления (SLM) металлических порошков, делает возможным производство сложных структур, а перманентное развитие таких технологий обеспечивает снижение стоимости создания готовых образцов. Это открывает новые возможности для применения решетчатых структур [14, 15].

Использование пространственных решетчатых структур в качестве интенсификаторов теплоотдачи является перспективным способом повышения эффективности отвода тепловых потоков высокой плотности. Результат достигается и за счет интенсивного перемешивания потока теплоносителя в реагирующем слое, повышения коэффициента теплоотдачи вследствие выравнивания скорости и температуры теплоносителя в пористом материале, увеличения площади теплообмена. Однако установка пористых материалов в теплопередающие каналы приводит, как правило, к существенному увеличению гидравлического сопротивления, определяемого вязкостными и инерционными коэффициентами [16]. Эти параметры влияют и на эффективность теплопроводности рабочей среды в пористом материале. Важной задачей также является правильное определение значений вязкостного и инерционного коэффициентов, которые характеризуют гидродинамические и теплофизические характеристики пористых материалов. Как правило, указанные коэффициенты находят с помощью зависимостей, полученных на основе обработки множества массивов экспериментальных данных. Градиент давления зависит от параметров движения рабочей среды и особенностей пористой структуры, которые определяются производственными технологиями [17]. Использование вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления при расчетах перепада давления в гидравлических системах позволяет исключить погрешности определения размеров пор и, следовательно, недооценку или переоценку коэффициента гидравлического сопротивления. Для практического использования можно найти эмпирические зависимости этих коэффициентов от степени пористости в диапазоне значений $0,15 < \Pi < 0,67$ [18–21]. Применение материалов с высокой степенью пористости ($> 0,7$), обеспечивающих максимальный прирост теплоотдачи, также вызывает существенное увеличение сопротивления и потерю давления. Таким образом, исследование, в том числе и гидравлических характеристик высокопористых материалов, является актуальной и востребованной со стороны реального сектора экономики

задачей, способствующей расширению базы знаний в области повышения теплогидравлической эффективности радиаторов и теплообменных систем.

Методы исследований. Физическое моделирование проводили на установке, представляющей собой разомкнутый воздушный расходный контур, который оснащен приборами для измерения статического и полного давления, а также температуры рабочего вещества перед рабочими участками. Контроль температуры воздуха осуществляли с использованием выносной термопары с погрешностью $\pm 0,2$ °С. Измерение давления рабочей среды проводили манометром (стандартная погрешность в пределах ± 1 %). Внешний вид экспериментального стенда приведен на рис. 1, а. Рабочий участок с пространственной решетчатой структурой размещали внутри выходного трубопровода установки и крепили для обеспечения его неподвижности и точной координации стопорным болтом (рис. 1, б и в). Рабочее вещество — неочищенный окружающий воздух. Скорость поступающего потока воздуха перед рабочими участками изменялась в диапазоне значений 5...100 м/с.

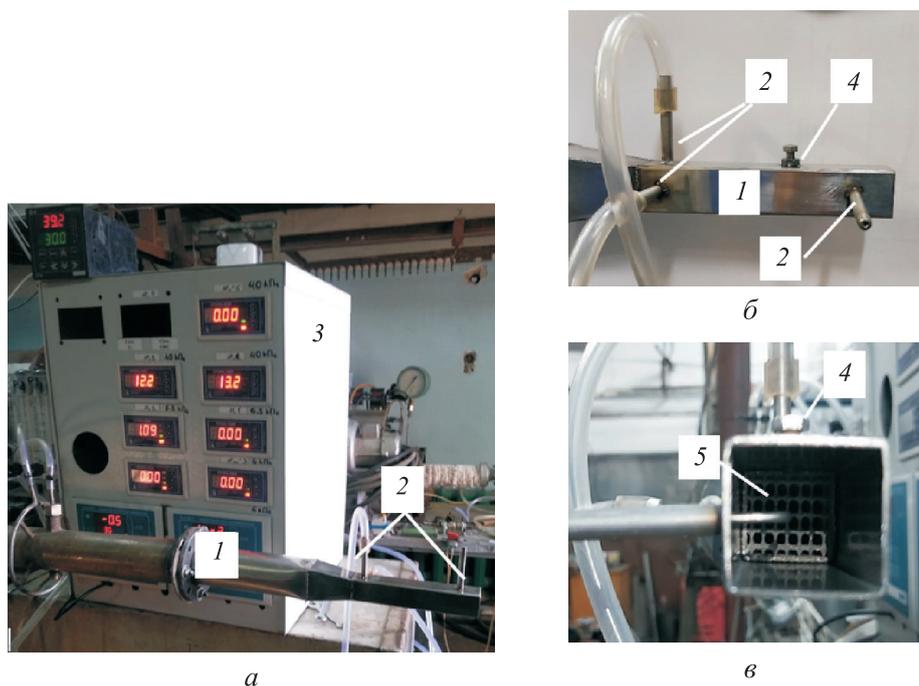


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда (а), выходной трубопровод установки (б) и закрепленный рабочий участок с пространственными решетчатыми структурами (в):

1 — выходной трубопровод; 2 — отборники давления; 3 — многофункциональный измеритель давления; 4 — стопорный болт; 5 — место установки рабочего участка

Исследование гидравлических характеристик проводили в канале с тремя различными рабочими участками, внешний вид которых и структура с размерами показаны на рис. 2. Участки представляли собой решетчатые прямоугольные теплообменные элементы шириной 20×20 мм и длиной 50 мм. Степень пористости участка № 1 составляла $\Pi = 0,143$, участка № 2 — $\Pi = 0,491$, участка № 3 — $\Pi = 0,749$; степень пористости определяли по методике, описанной в [21]. Кроме того, для подтверждения релевантности основных измеряемых параметров проведены тестовые экспериментальные исследования в гладком прямоугольном канале с геометрическими параметрами, соответствующими внешним размерам исследуемых каналов (ширина 20×20 мм, длина 50 мм).

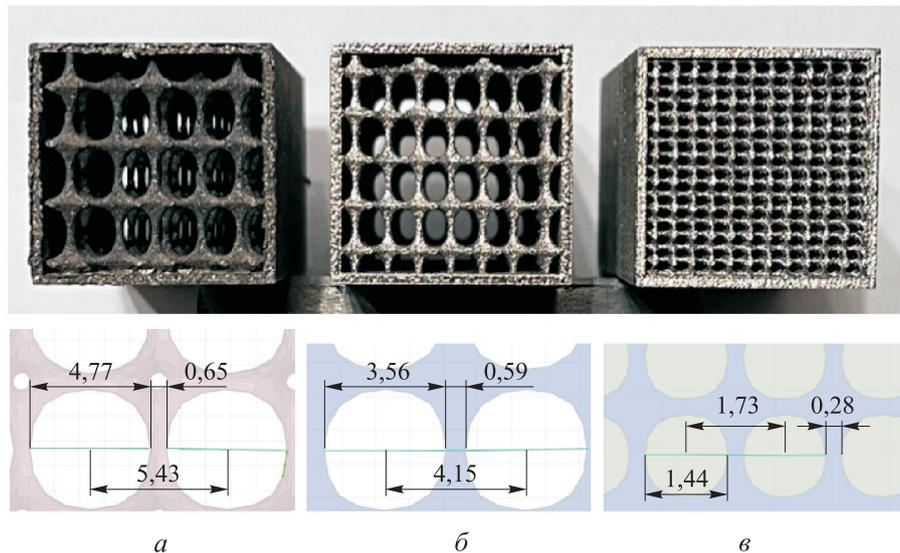


Рис. 2. Внешний вид и геометрические параметры пор рабочих участков №№ 1 (а), 2 (б) и 3 (в) с пространственными решетчатыми структурами

Результаты физического моделирования гидравлических характеристик. Тестовые исследования в гладком канале. Тестовые исследования проведены для подтверждения релевантности измеряемых параметров. Результаты физического моделирования в гладком прямоугольном канале по сравнению с зависимостями Блазиуса и Никурадзе приведены на рис. 3. Как следует из графической зависимости, экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению во всем исследованном диапазоне Re с удовлетворительной точностью, в среднем 8 %, соответствуют расчетным значениям. Таким образом, полученные в результате физического моделирования данные можно использовать для оценки гидравлических характеристик исследуемых каналов.

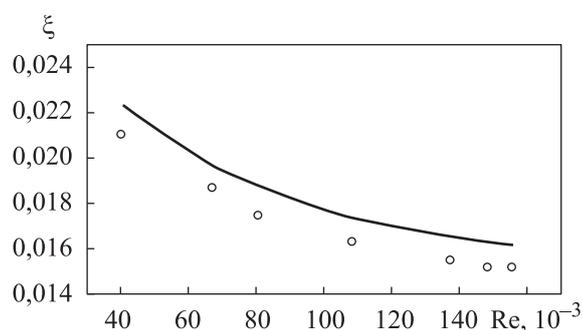


Рис. 3. Сравнение результатов тестовых исследований в гладком канале (°) с расчетными зависимостями (—) Блазиуса ($Re < 10^5$) и Никурадзе ($Re > 10^5$)

Исследование вязкостной и инерционной составляющих гидравлического сопротивления. Гидродинамика потока рабочей среды в пористых материалах определяется гидравлическим сопротивлением, характеризующим потери давления, которое в общем случае представляется в виде суперпозиции вязкостной и инерционной составляющих [22]. Вязкостный коэффициент сопротивления α [м^{-2}] в пористых телах зависит от диаметра пор. Чем больше поры и более сложная у них структура, тем выше вязкостное сопротивление. Высокие значения вязкостного коэффициента в пористых телах могут указывать на значительные потери энергии вследствие трения в порах материала, что может замедлить движение рабочего тела через пористую среду. Инерционный коэффициент сопротивления β [м^{-1}] в пористых телах зависит от их геометрии, плотности и степени пористости. Высокая плотность материала или более сложная геометрия пор может привести к увеличению инерционного сопротивления.

Следует отметить, что для пористых порошковых материалов важную роль играют размер и форма частиц исходного порошка, технология изготовления образца. Коэффициенты α , β являются индивидуальными характеристиками пористой матрицы (таблица).

Расчетные значения вязкостных и инерционных коэффициентов сопротивления исследуемых каналов с пространственными решетчатыми структурами ($d_4 = 30$ мкм)

Коэффициент	Рабочий участок		
	№ 1, $\Pi = 0,143$	№ 2, $\Pi = 0,491$	№ 3, $\Pi = 0,79$
$\alpha, \text{м}^{-2}$	$47 \cdot 10^{12}$	$41 \cdot 10^{10}$	$28 \cdot 10^9$
$\beta, \text{м}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$

В таком случае особым параметром является степень пористости, количественное влияние которой на коэффициенты α , β первично оценено по формулам [19]:

$$\alpha = 171(1 - \Pi^2) \Pi^{-3} d_{\text{ч}}^{-2}; \quad (1)$$

$$\beta = 0,635(1 - \Pi^2) \Pi^{-4,72} d_{\text{ч}}^{-1}, \quad (2)$$

где $d_{\text{ч}}$ — средний диаметр частиц порошка, из которого изготовлены рабочие участки.

Формулы (1), (2) позволяют оценить предельные минимально возможные значения коэффициентов сопротивления. Однако для более качественной оценки коэффициента гидравлического сопротивления необходимо опираться только на экспериментальные исследования. Так, более точные значения коэффициентов α , β могут быть установлены только экспериментально по методике, предложенной Ю.В. Ильиным [17, 23].

Вследствие сложной структуры пористых материалов модифицированное уравнение Дарси или уравнение Рейнольдса — Форшгеймера имеет вид [21, 22, 24]:

$$-dp/dZ = \alpha \mu u + \beta \rho u^2, \quad (3)$$

где p — давление рабочей среды; Z — координата; μ — динамический коэффициент вязкости; u — скорость фильтрации.

Для определения коэффициентов α , β экспериментальная зависимость перепада давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ на пористой пластине толщиной δ от удельного расхода G несжимаемого потока в соответствии с уравнением (3) приводится к линейному виду:

$$(p_1 - p_2) \rho / (\mu \delta G) = \alpha + \beta G / \mu. \quad (4)$$

Отношение β/α имеет размерность длины и может быть использовано в качестве характерного размера пористой структуры, что позволяет записать (3) в безразмерном виде:

$$C_f = 2 / \text{Re} + 2, \quad (5)$$

где $C_f = [2\rho(p_1 - p_2)] / (\delta\beta G^2)$ — коэффициент сопротивления.

Число Рейнольдса потока в пористом материале получено как отношение инерционной составляющей сопротивления к вязкостной:

$$\text{Re} = [G(\beta/\alpha)] / \mu. \quad (6)$$

На основе полученных значений из (3)–(6) с использованием метода анализа экспериментальных данных найдены эмпирические зависимости вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления исследуемых образцов от пористости и шага пористости t . Для исследуемого материала, имеющего упорядоченную структуру, в качестве определяющего параметра целесообразней использовать шаг между порами. Поскольку пористость зависит от диаметра пор и шага между ними, а параметр t содержит обе эти составляющие, можно заключить, что основным влияющим фактором является шаг t [25]. Полученные обобщающие зависимости для α , β при $\Pi = 0,14 \dots 0,50$ и $t = 4,0 \dots 5,5$ мм имеют вид:

$$\alpha = 13,2 \cdot 10^6 \Pi^{0,21} t^{0,023}; \quad (7)$$

$$\beta = 7,2 \cdot 10^8 \Pi^{0,3} t^{-0,12}, \quad (8)$$

при $\Pi > 0,50$ и $t = 1,7 \dots 4,0$ мм —

$$\alpha = 10^3 \Pi^{2,66} t^{-0,17}; \quad (9)$$

$$\beta = 66 \cdot 10^3 \Pi^{2,66} t^{-0,2}. \quad (10)$$

Эмпирические зависимости (7)–(10) описывают полученные экспериментальные данные со средними отклонениями 4 и 5 % для вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления и применимы в диапазоне значений степени пористости $\Pi = 0,143–0,749$, шага пористости $t = 1,7 \dots 5,5$ мм и числа Рейнольдса 2700–50 000.

Исследование гидравлического сопротивления каналов с пространственными решетчатыми вставками. Перепад давления через исследуемую решетчатую «вставку» в канале: $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$.

Для определения гидравлического сопротивления на практике принято использовать безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления [22]: $\xi = (\Delta p \cdot 2d_{\text{п}}\Pi) / (\rho w^2 L)$, где $d_{\text{п}}$ — диаметр поры; Π — пористость решетчатой вставки, определяемая отношением объема пустот к полному объему пористого тела; ρ — плотность воздушного потока на входе в решетчатую часть канала; w — скорость воздушного потока на входе в решетчатую часть канала; L — длина решетчатой структуры.

Обсуждение. Основные результаты экспериментальных исследований, проведенных на трех рабочих участках, приведены на рис. 4. При относительно малой скорости течения теплоносителя ($\sim 12 \dots 13$ м/с) на рабочих участках № 1 и 2 реализуется очень близкий по значениям перепад давления (рис. 4, а). В отличие от участков № 1 и 2 на участке № 3 на начальных режимах течения наблюдается более существенный перепад

давления. Это обусловлено различиями геометрий участков — степенью пористости, так как именно плотность размещения элементов пространственной решетчатой конструкции оказывает доминирующее влияние на гидравлические потери [22, 24]. Далее с ростом скорости потока наблюдается существенное увеличение перепада давления. Таким образом, при скорости потока более 25 м/с наблюдается значительное рассогласование экспериментальных данных трех исследованных рабочих участков по перепаду давления. Отдельно необходимо рассмотреть характеристики течения на участке № 3. Согласно зависимости на рис. 4, а, при скорости потока примерно 38 м/с наблюдается так называемый эффект запираания потока, характеризующийся продолжающимся увеличением перепада давления на рабочем участке. Такая особенность может быть обусловлена локальным переходом в область сверхзвукового течения внутри канала. Эта особенность отражена на рис. 4, б.

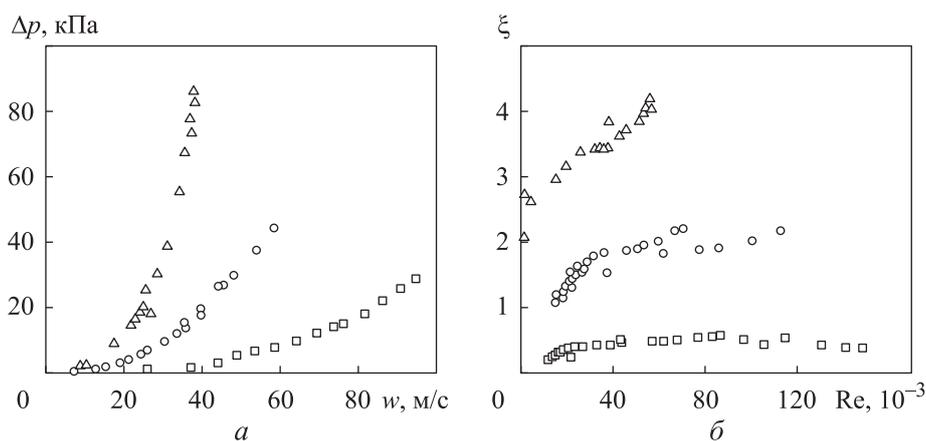
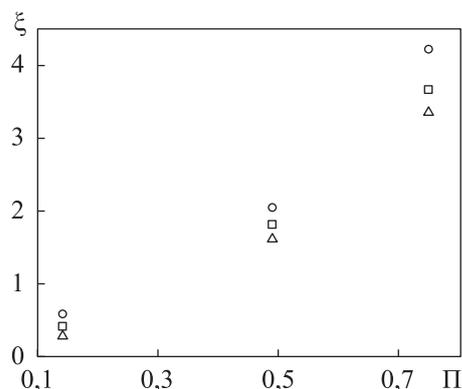


Рис. 4. Зависимости перепада давления от скорости потока (а) и коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса (б) для участков №№ 1 (□), 2 (○) и 3 (△)

Картина зависимостей гидравлического сопротивления от Re (см. рис. 4, б) качественно повторяет аналогичные результаты, представленные в [25–29]. При $Re > 2000$ значения коэффициентов гидравлического сопротивления участков № 1–3 существенно отличаются. При этом на участке № 3 при $Re \approx 55\,000$ прослеживается эффект «запираания потока» с продолжающимся ростом коэффициента гидравлического сопротивления. Рассмотрев зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от степени пористости канала (рис. 5), можно сделать вывод о существенном влиянии плотности заполнения рабочих участков пространственными решетчатыми структурами.

Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от степени пористости канала при $w = 16$ (\circ), 23 (\square) и 38 м/с (\triangle)



Данные, представленные на рис. 5, подтверждают предположение о существенном росте гидравлического сопротивления с увеличением скорости течения теплоносителя. Как уже было отмечено, при скорости 38 м/с в момент «запирания потока» фиксируется максимальное значение коэффициента гидравлического сопротивления. Таким образом, максимальный прирост гидравлического сопротивления во всем диапазоне значений начальных параметров течения теплоносителя обеспечивается на рабочем участке № 3.

Заключение. Представлены данные по физическому моделированию гидравлических характеристик в рабочих каналах, выполненных на основе пространственных решетчатых конструкций.

Определена зависимость скорости течения теплоносителя от перепада давления для трех исследованных каналов. Выявлено, что при скорости 38 м/с на рабочем участке № 3 наблюдается эффект «запирания потока», связанный с достижением в локальном сечении канала местной скорости звука. Полученные выводы подтверждаются зависимостью коэффициента гидравлического сопротивления от режимного параметра.

Установлено, что увеличение степени пористости пространственных решетчатых структур в рабочих каналах приводит к существенному возрастанию гидравлического сопротивления и увеличению потерь давления рабочей среды. При этом степень пористости более 0,49 приводит к опережающему росту потерь, что обусловлено увеличением плотности наполнения рабочего канала трехмерными структурами.

Перспективой дальнейших исследований является проведение физического моделирования тепловых характеристик в динамических режимах. Это позволит получить более полную картину течений и расчетные зависимости для определения характеристик теплогидравлической эффективности применения решетчатых пространственных конструкций в качестве одного из перспективных методов интенсификации теплоотдачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Скрипкин А.А. Новый тип радиатора для охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных электровакуумных приборов. *Старт в науке. XVIII Международ. конкурс науч.-исслед. и творческих работ учащихся*. URL: <https://school-science.ru/18/11/53207?ysclid=mcubss1kup124810873>
- [2] Тупотилова А.В., Гареев Э.И., Беляев А.В. и др. Повышение эффективности теплообменных устройств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 4 (115), с. 63–76. EDN: WYSOWH
- [3] Saghir M.Z., Kerme E.D., Hajjalibabei M., et al. Study of the thermal and hydraulic performance of porous block versus gyroid structure: experimental and numerical approaches. *Energies*, 2024, vol. 17, iss. 4, art. 861. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17040861>
- [4] Рыдалина Н.В., Аксенов Б.Г., Степанов О.А. и др. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2020, т. 22, № 3, с. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13>
- [5] Брагин Д.М., Еремин А.В. Исследование тепловых свойств пористых полимерных материалов на основе минимальных поверхностей Шварца. *Инженерный вестник Дона*, 2023, № 9, с. 619–634. EDN: CFTSYP
- [6] Тригорлый С.В. Моделирование тепловых режимов охлаждения полупроводниковых микроэлектронных компонентов. *Вопросы электротехнологии*, 2022, № 4, с. 48–52. EDN: SRQSUV
- [7] Leary M., Mazur M., Williams H., et al. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): mechanical properties, deformation and failure modes. *Mater. Des.*, 2018, vol. 157, pp. 179–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.010>
- [8] Bajaj P., Hariharan A., Kini A., et al. Steels in additive manufacturing: a review of their microstructure and properties. *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 772, art. 138633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138633>
- [9] Sarabhai S., Letov N., Kibsey M., et al. Understanding the flow and thermal characteristics of non-stochastic strut-based and surface-based lattice structures. *Mater. Des.*, 2023, vol. 227, art. 111787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111787>
- [10] Леонтьев А.И., Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В. и др., ред. *Научные основы технологий 21 века*. М., Энергомаш, 2000.
- [11] Liu X.C., Huang Y., Wang C.-H., et al. Solving steady and transient radiative transfer problems with strong inhomogeneity via a lattice Boltzmann method. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2020, vol. 155, art. 119714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119714>
- [12] Hamidi E., Ganesan P., Muniandy S.V., et al. Lattice Boltzmann method simulation of flow and forced convective heat transfer on 3D micro X-ray tomography of metal foam heat sink. *Int. J. Therm. Sci.*, 2022, vol. 172-A, art. 107240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107240>

- [13] Mohamed E.Z., Zhao J., Li W.J., 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. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 126, art. 105465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105465>
- [14] Xiao Z., Yang Y., Xiao R., et al. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Mater. Des.*, 2018, vol. 143, pp. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.023>
- [15] Sing S.L., Wiria F.E., Yeong W.Y. Selective laser melting of lattice structures: a statistical approach to manufacturability and mechanical behavior. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2018, vol. 49, pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.006>
- [16] Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1988.
- [17] Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. М., Машиностроение, 1981.
- [18] Соловьева О.В., Соловьев С.А., Яфизов Р.Р. и др. Исследование гидродинамики в пористых средах различной геометрии. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2020, № 1, с. 132–134. EDN: HPZYFW
- [19] Белов С.В. Вязкостный и инерционный коэффициенты насадок и пористых металлов из сферических частиц. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1976, № 10, с. 87–90.
- [20] Карпович Э.В. Расчет коэффициентов сопротивления пористых вставок для сжимаемой среды. *Агротехника и энергообеспечение*, 2014, № 1, с. 55–61. EDN: TDWQOP
- [21] Попов И.А. Интенсификация теплообмена. Казань, Центр инновационных технологий, 2007.
- [22] Башарина Т.А., Левина А.В. Исследование процессов гидродинамики в системах охлаждения жидкостных ракетных двигателей с аддитивными пористыми структурами. *Труды МАИ*, 2024, № 136. EDN: CJPRPS
- [23] Бурков А.С., Рыцарев А.М., Товстоног В.А. и др. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик высокотемпературных теплоизоляционных материалов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 2 (89), с. 99–116. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-2-99-116>
- [24] Bejan A. *Convection heat transfer*. Wiley, 2013.
- [25] Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е. К вопросу о подвижности частиц и молекул в пористых средах. *Научное приборостроение*, 2015, т. 25, № 4, с. 43–55. EDN: UXLFPF
- [26] Толпаев В.А., Ахмедов К.С., Гоголева С.А. Нелинейные законы фильтрации однокомпонентных флюидов при больших скоростях потоков. *Известия вузов. Нефть и газ*, 2015, № 5, с. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-5-83-89>

[27] Пелевин Ф.В. Гидравлическое сопротивление пористых металлов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 2, с. 42–52. EDN: VKQDNL

[28] Демидова А.М., Абрамов А.А., Тарасова Н.П. и др. Гидравлическое сопротивление пористых материалов. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2022, № 12, с. 104–107. EDN: DHVZMH

[29] Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical investigation of thermal-hydraulic performance of circular and non-circular tubes in cross-flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 2 (95), pp. 102–117. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2021-2-102-117>

Лопатин Алексей Александрович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ–КАИ (Российская Федерация, 420000, Россия, Казань, ул. К. Маркса, д. 10).

Габдуллина Розалия Альбертовна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ–КАИ (Российская Федерация, 420000, Россия, Казань, ул. К. Маркса, д. 10).

Саётгараев Аскар Алмазович — аспирант кафедры реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ–КАИ (Российская Федерация, 420000, Россия, Казань, ул. К. Маркса, д. 10).

Биктагирова Айгуль Рафисовна — инженер кафедры реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ–КАИ (Российская Федерация, 420000, Россия, Казань, ул. К. Маркса, д. 10).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лопатин А.А., Габдуллина Р.А., Саётгараев А.А., и др. Физическое моделирование гидравлических характеристик каналов с пространственными решетчатыми структурами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 4 (121), с. 96–112. EDN: RPLILT

PHYSICAL SIMULATION OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF CHANNELS WITH SPATIAL LATTICE STRUCTURES

A.A. Lopatin

aalopatin@kai.ru

R.A. Gabdullina

rozzy94@mail.ru

A.A. Sayetgarayev

askar.sayetgarayev88@mail.ru

A.R. Biktagirova

arbiktagirova@kai.ru

KNRTU–KAI, Kazan, Russian Federation

Abstract

The purpose of the article is to experimentally determine the hydraulic characteristics and generalized empirical dependence of viscous and inertial drag coefficients for channels with spatial lattice structures. The relevance of the work is due to the need to develop efficient cooling and thermal stabilization systems for heat-loaded elements of power and electronic equipment that operate in conditions of high heat flows and require optimal hydraulic characteristics to ensure reliable operation. The results of physical modeling aimed at determining the hydraulic characteristics of channels with spatial lattice structures in the ranges of porosity 0.143–0.749 and Reynolds number 2700–150 000 are presented. Experimental data have shown that in the studied channels, with increasing porosity, the pressure loss of the working medium increases, which must be taken into account when designing such systems. Based on the empirical dependences obtained, the values of the viscous and inertial drag coefficients are determined, which are key parameters for modeling and predicting fluid flows in systems with porous structures. The results of the study allowed us to establish a range of changes in hydraulic characteristics with varying degrees of porosity. This will allow developers to create more efficient and reliable cooling and thermal stabilization systems, ensuring an optimal combination of hydraulic and heat exchange characteristics. Such systems are key for energy devices and electronic equipment, where high thermal loads and limited spaces require highly efficient heat removal solutions

Keywords

Lattice structure, hydraulic resistance coefficient, hydraulic resistance, channel with a spatial lattice structure, viscous resistance coefficient, inertial resistance coefficient

Received 07.06.2024

Accepted 23.10.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

[1] Skripkin A.A. [A new type of radiator for cooling semiconductor and microelectronic vacuum devices]. *Start v nauke. XVIII Mezhdunar. konkurs nauch.-issled. i tvorcheskikh rabot uchashchikhsya* [Start in Science. XVIII Int. Sci. Research Competition and Creative Works of Students] (in Russ.).

Available at: <https://school-science.ru/18/11/53207?ysclid=mcubss1kup124810873>

[2] Tupotilova A.V., Gareev E.I., Belyaev A.V., et al. Improving the heat exchanger efficiency at the phase transitions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 4 (115), pp. 63–76 (in Russ.). EDN: WYSOWH

- [3] Saghir M.Z., Kerme E.D., Hajjalibabei M., et al. Study of the thermal and hydraulic performance of porous block versus gyroid structure: experimental and numerical approaches. *Energies*, 2024, vol. 17, iss. 4, art. 861.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en17040861>
- [4] Rydalina N.V., Aksenov B.G., Stepanov O.A., et al. Application of porous materials in heat exchangers of heat supply system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power Engineering: Research, Equipment, Technology], 2020, vol. 22, no. 3, pp. 3–13 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13>
- [5] Bragin D.M., Eremin A.V. Study of thermal properties of porous polymeric materials based on minimal surfaces of Schwarz. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2023, no. 9, pp. 619–634 (in Russ.). EDN: CFTSYP
- [6] Trigorlyy S.V. Simulation of thermal cooling modes of semiconductor microelectronic components. *Voprosy elektrotekhnologii* [Journal of Electrotechnics], 2022, no. 4, pp. 48–52 (in Russ.). EDN: SRQSUV
- [7] Leary M., Mazur M., Williams H., et al. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): mechanical properties, deformation and failure modes. *Mater. Des.*, 2018, vol. 157, pp. 179–199.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.010>
- [8] Bajaj P., Hariharan A., Kini A., et al. Steels in additive manufacturing: a review of their microstructure and properties. *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 772, art. 138633.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138633>
- [9] Sarabhai S., Letov N., Kibsey M., et al. Understanding the flow and thermal characteristics of non-stochastic strut-based and surface-based lattice structures. *Mater. Des.*, 2023, vol. 227, art. 111787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111787>
- [10] Leontyev A.I., Pilyugin N.N., Polezhaev Yu.V., (eds). et al. *Nauchnye osnovy tekhnologii 21 veka* [Scientific foundations of 21st century technologies]. Moscow, Energomash Publ., 2000.
- [11] Liu X.C., Huang Y., Wang C.-H., et al. Solving steady and transient radiative transfer problems with strong inhomogeneity via a lattice Boltzmann method. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2020, vol. 155, art. 119714.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119714>
- [12] Hamidi E., Ganesan P., Muniandy S.V., et al. Lattice Boltzmann method simulation of flow and forced convective heat transfer on 3D micro X-ray tomography of metal foam heat sink. *Int. J. Therm. Sci.*, 2022, vol. 172-A, art. 107240.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107240>
- [13] Mohamed E.Z., Zhao J., Li W.J., 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. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 126, art. 105465.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105465>

- [14] Xiao Z., Yang Y., Xiao R., et al. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Mater. Des.*, 2018, vol. 143, pp. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.023>
- [15] Sing S.L., Wiria F.E., Yeong W.Y. Selective laser melting of lattice structures: a statistical approach to manufacturability and mechanical behavior. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2018, vol. 49, pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.006>
- [16] Polyaev V.M., Mayorov V.A., Vasilyev L.L. *Gidrodinamika i teploobmen v poristyykh elementakh konstruktsiy letatelnykh apparatov* [Hydrodynamics and heat transfer in porous elements of aircraft structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988.
- [17] Belov S.V. *Poristye metally v mashinostroenii* [Porous metals in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981.
- [18] Solovyeva O.V., Solovyev S.A., Yafizov R.R., et al. Investigation of fluid flow in porous media of various geometry. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2020, no. 1, pp. 132–134 (in Russ.). EDN: HPZYFW
- [19] Belov S.V. Viscosity and inertial coefficients of nozzles and porous metals made of spherical particles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 1976, no. 10, pp. 87–90 (in Russ.).
- [20] Karpovich E.V. Calculation of resistance coefficients of porous inserts for compressible environment. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2014, no. 1, pp. 55–61 (in Russ.). EDN: TDWQOP
- [21] Popov I.A. *Intensifikatsiya teploobmena* [Heat transfer intensification]. Kazan, Tsentri innovatsionnykh tekhnologiy Publ., 2007.
- [22] Basharina T.A., Levina A.V. Investigation of hydrodynamic processes in cooling systems of liquid-propellant rocket engines with additive porous structures. *Trudy MAI*, 2024, no. 136 (in Russ.). EDN: CJPRPS
- [23] Burkov A.S., Rytsarev A.M., Tovstonog V.A., et al. Experimental evaluation of thermophysical characteristics of high-temperature thermal insulation materials. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 2 (89), pp. 99–116 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-2-99-116>
- [24] Bejan A. *Convection heat transfer*. Wiley, 2013.
- [25] Sharfarets B.P., Kurochkin V.E. To the question of mobility of particles and molecules in porous media. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015, vol. 25, no. 4, pp. 43–55 (in Russ.). EDN: UXLFPF
- [26] Tolpaev V.A., Akhmedov K.S., Gogoleva S.A. Nonlinear filtration laws of one-component fluids at high flow rates. *Izvestiya vuzov. Neft i gaz* [Oil and Gas Studies], 2015, no. 5, pp. 83–89 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-5-83-89>
- [27] Pelevin F.V. Hydraulic resistance of porous metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2016, no. 2, pp. 42–52 (in Russ.). EDN: VKQDNL

[28] Demidova A.M., Abramov A.A., Tarasova N.P., et al. Hydraulic resistance of porous metals. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2022, no. 12, pp. 104–107 (in Russ.). EDN: DHVZMH

[29] Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical investigation of thermal-hydraulic performance of circular and non-circular tubes in cross-flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 2 (95), pp. 102–117 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2021-2-102-117>

Lopatin A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of Jet Engines and Power Plants, KNRTU–KAI (K. Marksa 10, Kazan, 420000 Russian Federation).

Gabdullina R.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Jet Engines and Power Plants, KNRTU–KAI (K. Marksa 10, Kazan, 420000 Russian Federation).

Sayetgarayev A.A. — Post-Graduate Student, Department of Jet Engines and Power Plants, KNRTU–KAI (K. Marksa 10, Kazan, 420000 Russian Federation).

Biktagirova A.R. — Engineer, Department of Jet Engines and Power Plants, KNRTU–KAI (K. Marksa 10, Kazan, 420000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Lopatin A.A., Gabdullina R.A., Sayetgarayev A.A., et al. Physical simulation of hydraulic characteristics of channels with spatial lattice structures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 4 (121), pp. 96–112 (in Russ.). EDN: RPLILT