

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Брагина Дмитрия Михайловича на тему «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Актуальность темы. В настоящее время в связи с развитием аддитивных технологий и повышением требований к компактности и эффективности теплообменного оборудования критически важным становится точное определение теплофизических и гидродинамических характеристик новых классов материалов. Особого внимания заслуживают упорядоченные пористые структуры, полученные методами аддитивного производства, геометрия которых базируется на трижды периодических минимальных поверхностях (TPMS), которые обладают уникальным сочетанием высокой удельной площади поверхности, механической прочности и непрерывности каналов.

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение таких материалов в теплотехническую практику сдерживается отсутствием надежных и простых в инженерном использовании методов расчета и прогнозирования их переносных свойств (эффективной теплопроводности, гидравлического сопротивления, коэффициентов теплоотдачи). Большинство традиционных теплотехнических моделей и методов расчета переносных свойств ориентированы на пористые среды с случайным, хаотичным расположением пор. Однако существует явный недостаток надежных инженерных методов и обобщенных расчетных зависимостей, способных адекватно прогнозировать теплофизические и гидродинамические свойства упорядоченных TPMS-структур с учетом их сложной пространственной топологии. В связи с этим цель работы, связанная с разработкой научно обоснованных методов расчета и прогнозирования теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, является актуальной и своевременной.

Научная новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны новые подходы к определению теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов на основе TPMS материалов с использованием гомогенизации, методов репрезентативной элементарной ячейки, нормализации теплофизических характеристик по свойствам материала каркаса.
2. Впервые получены обобщенные зависимости эффективных теплофизических свойств материалов TPMS от геометрических параметров ячейки и свойств исходного материала.
3. Разработана модифицированная модель расчета гидравлического сопротивления (на основе уравнения Хагена-Пуазейля) для каналов со сложной геометрией TPMS, учитывающая извилистость потока и локальные сужения каналов, что позволяет с высокой точностью прогнозировать потери давления потока проходящего через вставку TPMS.
4. Разработаны новые конструкции теплообменных устройств и оребрения на основе топологий TPMS. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований установлено влияние топологии структуры на распределение скоростей, давления и температуры потока в структурах TPMS.

Новизна каждого из указанных пунктов, а также полученных результатов и выводов является обоснованной.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника», а именно: п.1) Теплофизические свойства чистых веществ и их смесей; связи между строением веществ и их феноменологическими свойствами; методы расчета термодинамических и переносных свойств в различных агрегатных состояниях; п.5) Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства,

преобразования, передачи и потребления теплоты; п.8) Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и техникоэкономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность содержащихся в работе научных положений и выводов подтверждается их непротиворечивостью фундаментальным законам термодинамики и теории тепломассопереноса, а также сопоставлением результатов численного моделирования (САЕ-анализа) с данными собственных натурных экспериментов, выполненных на сертифицированном оборудовании (приборы ИТП-МГ4 «100» и ИТП-МГ4 «250»), и результатами исследований других авторов.

Значимость для науки и производства полученных автором результатов. Научная значимость полученных автором результатов определяется новыми разработанными методами расчета переносных свойств, которые, по сравнению с известными, позволяют учитывать особенности топологии TPMS-материалов. Практическая значимость работы заключается в определении зависимостей теплофизических и гидродинамических свойств материалов от геометрических характеристик, что может найти применение при проектировании компактных теплообменников, оребренных поверхностей. Это может существенно сократить материальные и временные затраты проектирование новых теплопередающих устройств с новыми конструкциями без использования численного моделирования. Также в работе рассмотрены новые теплообменные устройства на основе TPMS-структур. Разработанные подходы внедрены в научно-исследовательскую практику и расчетные методики ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО» (г. Самара), а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулирована научная новизна, цели и задачи диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, информация о публикациях в рамках работы над диссертацией, практическая значимость работы, информация о внедрении результатов работы, апробация работы и информация о грантах, при частичной поддержке которых выполнено диссертационное исследование.

В первой главе диссертации выполнен подробный литературный обзор по теме исследования теплофизических и гидродинамических свойств пористых материалов. Проведен анализ существующих методов моделирования тепломассопереноса в пористых средах, показаны ограничения известных моделей и существующих подходов применительно к упорядоченным TPMS-структурам.

Во второй главе представлены результаты разработки метода расчета эффективной теплопроводности упорядоченных пористых TPMS-структур методом гомогенизации, численного моделирования, метода репрезентативной элементарной ячейки (RUC). Получены зависимости для определения тензоров теплопроводности структур CLP, Schoen I-WP(R) и др. Выполнена верификация результатов и полученных зависимостей теплофизических свойств от геометрических особенностей и свойств материала по результатам собственных экспериментов на приборах серии ИТП-МГ4 и многочисленных сторонних экспериментов с различными материалами.

В третьей главе изложены результаты исследования гидродинамических свойств и перепада давления в TPMS-структурах. Описана модификация уравнения Хагена-Пуазейля для каналов сложной формы (TPMS), проведено сопоставление расчетных данных по гидравлическому сопротивлению с результатами численного моделирования в ANSYS и натурного эксперимента. Исследованы по средствам компьютерного моделирования поля скоростей и давлений потока в пористых вставках TPMS.

В четвертой главе представлены новые конструкции теплообменных устройств и ребрения на основе TPMS-структур. Выполнено численное и экспериментальное исследование процессов тепломассопереноса для различных топологий, а также

выполнено сравнение с другими теплообменными устройствами, как классическими, так и новыми разрабатываемыми теплообменными устройствами на основе TPMS других исследователей.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы могут быть успешно использованы на предприятиях теплоэнергетического комплекса, авиационно-космической отрасли и автомобилестроения, занимающихся проектированием и изготовлением компактного теплообменного оборудования (включая ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО» г. Самара). Кроме того, по мнению оппонента, результаты могут быть востребованы в учебном процессе технических вузов при подготовке специалистов в области теплоэнергетики и теплотехники.

Замечания к диссертации.

1. В главе 2 при определении эффективной теплопроводности упорядоченных структур методом гомогенизации (п. 2.6) влияние естественной конвекции и теплопроводности воздуха в межпоровом пространстве не учитывалось, а определялись свойства исключительно твердого каркаса. В работе следовало бы более четко определить границы применимости полученных зависимостей для условий, когда пористое пространство заполнено реальной теплопроводной средой.

2. При сопоставлении численных и экспериментальных данных (для образцов на основе РНР-топологии) наблюдается расхождение результатов в диапазоне 7–13%. Автор связывает это с технологическими погрешностями 3D-печати и остатками полимера в порах. Однако в работе не приведено рекомендаций по учету данных технологических факторов непосредственно на стадии проектирования.

3. В главе 2 диссертации утверждается, что полученные обобщенные зависимости применимы для материалов каркаса с теплопроводностью в диапазоне от 1 до 400 Вт/(м·К). Однако в работе не обосновано, почему нижняя граница ограничена именно 1 Вт/(м·К), учитывая, что используемые автором в экспериментах фотополимеры (РНР) имеют собственную теплопроводность значительно ниже (около 0,2 Вт/(м·°C)).

4. Семейство TPMS -структур чрезвычайно обширно. В диссертационной работе детально исследованы только определенные структуры, однако почему отобраны именно эти структуры для подробного анализа в тексте работы обосновано недостаточно четко.

5. В работе встречаются единичные неточности в формулировках и опечатки, которые не влияют на суть изложения, а также на основные результаты и положения диссертации.

Общая характеристика работы. Несмотря на отмеченные замечания, они не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, отличается внутренней логической завершенностью и содержит новые научные результаты, имеющие теоретическое и практическое значение в области исследования теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой. Основные положения и результаты исследования получили достаточную апробацию на международных и всероссийских научно-технических конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в перечень ВАК Российской Федерации и индексируемых в международной базе данных Scopus, включая журналы первого квартиля (Q1). Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Ввиду актуальности темы исследования, соответствия результатов поставленным целям, научной новизны и практической значимости работы, а также личного вклада автора, диссертация полностью соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Считаю, что автор диссертации «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой» Брагин Дмитрий Михайлович полностью заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с работой диссертационного совета.

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Колесник Сергей Александрович

«08» сентября 2026 г.



Докторская диссертация Колесника С. А. защищена по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (2016 г.).

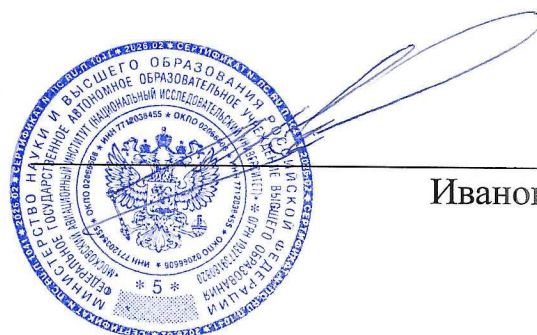
ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993; Тел.: 8-903 628 21 59

E-mail: ksa@mai.ru

Веб-сайт: <https://mai.ru/>

Подпись Колесник С. А. заверяю:

Зам. начальника отдела кадров



Иванов М.А.