

ОТЗЫВ

официального оппонента Бирюкова Алексея Борисовича 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.

Современный этап развития теплоэнергетики и систем терморегулирования неразрывно связан с необходимостью интенсификации процессов теплообмена и снижением массогабаритных характеристик теплотехнического оборудования. Одним из наиболее перспективных путей решения этой научно-технической задачи является переход от традиционных стохастических пористых систем к упорядоченным пористым материалам на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS). Благодаря строгому математическому описанию, высокой взаимосвязанной пористости, способности разделять пространство на взаимно непересекающиеся лабиринты, данные структуры открывают принципиально новые возможности для создания компактных рекуперативных теплообменников и высокоэффективных систем терморегулирования.

Диссертационная работа Д.М. Брагина направлена на преодоление существующих ограничений практического применения TPMS-материалов, вызванных отсутствием обобщенных аналитических зависимостей их теплофизических и гидродинамических характеристик от геометрических параметров. Проводимые автором исследования направлены на реализацию приоритетов научно-технического развития РФ, регламентированных указами Президента РФ от 28.02.2024 г. № 145 и от 18 июня 2024 г. № 529, в части создания новых материалов с заданными свойствами и повышения энергоэффективности. Это обуславливает высокую актуальность и своевременность темы исследования.

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 с упорядоченной макроструктурой на основе трижды периодических минимальных поверхностей. Отличительной особенностью предложенных подходов является совместное использование методов гомогенизации, концепции репрезентативной элементарной

ячейки, нормализации теплофизических характеристик по свойствам материала каркаса, а также результатов численного моделирования и натурных экспериментов. Это позволило получить единый подход к исследованию TPMS-структур различных топологий и геометрических параметров.

2. Впервые получены обобщенные зависимости эффективных теплофизических и гидродинамических характеристик пористых TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала каркаса. Предложенные зависимости основаны на решении обратных задач теплопроводности и гидродинамики и могут быть использованы для инженерного расчета материалов с заранее заданными переносными свойствами.

3. Разработаны и исследованы новые конструкции теплообменных и теплоиспользующих устройств на основе TPMS-структур. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований установлено влияние топологии структуры на распределение скоростей, давления и температуры, определены зоны наиболее интенсивного теплообмена и области повышенного гидравлического сопротивления, что позволило сформулировать рекомендации по выбору различных типов TPMS для конкретных теплотехнических приложений.

4. Предложено модифицированное уравнение Хагена–Пуазейля для определения гидравлических потерь давления в пористых материалах с упорядоченной макроструктурой. В отличие от классической модели разработанное уравнение учитывает геометрические параметры TPMS-структуры и характеристики течения, что обеспечивает более точное описание экспериментально наблюдаемого перепада давления в широком диапазоне пористостей.

Новизна приведенных научных результатов представляется обоснованной, подтверждается опубликованными научными трудами автора и соответствует современному уровню исследований в области теоретической и прикладной теплотехники.

Кроме того, 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 результатов работы обеспечивается использованием современных методов вычислительной гидродинамики и теплопроводности, применением специализированных программных комплексов при проведении численных исследований, постановкой и выполнением комплекса натурных экспериментов, а также удовлетворительным совпадением результатов расчетов с экспериментальными данными и результатами исследований других авторов.

Полученные выводы согласуются с фундаментальными законами теплопроводности, гидродинамики и механики сплошной среды, что свидетельствует об их физической обоснованности.

Значимость для науки и производства полученных автором результатов.

Научная значимость работы заключается в разработке методов и подходов определения эффективных теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой. Особую научную ценность представляет предложенная модификация уравнения Хагена–Пуазейля применительно к упорядоченным пористым материалам.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных зависимостей при проектировании компактных теплообменников, оребренных поверхностей, материалов с заранее заданными свойствами и другого оборудования, использующего TPMS-структуры. Предложенные инженерные зависимости позволяют существенно сократить объем дорогостоящего численного моделирования при проектировании новых изделий.

Следует положительно отметить внедрение результатов исследования в учебный процесс Самарского государственного технического университета, а также использование разработанных методов в инженерной практике предприятий ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО».

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа логично построена и отличается последовательностью изложения материала.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований, посвященных теплофизическим и гидродинамическим свойствам, пористым материалам, в том числе с упорядоченной структурой TPMS. Рассмотрены современные методы их моделирования и области практического применения. На основании анализа литературы сформулированы основные направления дальнейших исследований.

Во второй главе представлены разработанные методы построения CAD-моделей TPMS-структур, методика определения эффективной теплопроводности материалов с использованием методов гомогенизации, а также результаты численного моделирования процессов теплопереноса. Получены обобщенные зависимости эффективной теплопроводности от геометрических параметров структуры.

В третьей главе исследованы гидродинамические характеристики TPMS-материалов. Выполнены численные и экспериментальные исследования течения жидкости через пористые структуры различных топологий. Предложено модифицированное уравнение Хагена–Пуазейля для расчета гидравлических потерь давления.

В четвертой главе представлены результаты разработки новых конструкций теплообменных устройств и оребрения на основе TPMS-структур. Выполнено численное и экспериментальное исследование процессов теплообмена, проведено сравнение различных топологий.

Работа хорошо иллюстрирована, содержит достаточное количество графического материала, таблиц и результатов вычислительных экспериментов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы действительно могут быть использованы на предприятиях ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО» (г. Самара). Кроме того, по мнению оппонента, полученные результаты могут быть использованы: при проектировании компактных теплообменников нового поколения; при разработке теплопередающих поверхностей энергетического оборудования; в организациях, занимающихся аддитивными технологиями изготовления теплотехнических изделий; при проектировании систем охлаждения силовой электроники и аккумуляторных батарей; в научных организациях, выполняющих исследования процессов тепло- и массообмена в пористых средах; в образовательном процессе при подготовке специалистов по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника».

Замечания к диссертации.

1. При получении обобщенных зависимостей эффективной теплопроводности основное внимание уделено геометрическим характеристикам TPMS-структур. Вместе с тем было бы полезно более подробно обсудить границы применимости предложенных зависимостей при использовании материалов каркаса с существенно различающимися теплофизическими свойствами и при наличии контактных термических сопротивлений.
2. Для практического проектирования теплообменного оборудования было бы полезно дополнительно рассмотреть влияние технологических погрешностей аддитивного изготовления на переносные свойства исследуемых структур и привести оценку влияния межслойной анизотропии, характерной для FDM-печати.
3. Требуется уточнения вопрос, каким образом пористые материалы могут быть использованы в качестве разделительной стенки в теплообменнике (особенно с открытой пористостью).
4. Не ясно, как измерялась плотность теплового потока в эксперименте по определению эффективного коэффициента теплопроводности (рис.2.4.2).
5. Требуется пояснения вопрос, насколько данные по нормализованным коэффициентам теплопроводности для пластмасс могут быть перенесены на материалы с большими коэффициентами теплопроводности.
6. Для подтверждения эффективности пористых вставок целесообразно было бы выполнить сравнение коэффициентов теплоотдачи не только с гладкими трубами, но и с традиционным оребрением (ребристые трубы, игольчатые рекуператоры), причем также рассмотреть и величины потерь давления.

Общая характеристика работы.

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа выполнена на хорошем научно-техническом уровне и содержит новые научные результаты в области теоретической и прикладной теплотехники.

Результаты работы прошли апробацию на множестве конференций и были опубликованы в журналах из перечня ВАК и в изданиях, индексируемых в Scopus.

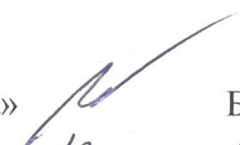
Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В виду 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, 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.

Даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с работой диссертационного совета 24.2.310.03.

Доктор технических наук 05.14.06,
профессор, проректор ДонНТУ;
заведующий кафедрой «Техническая теплофизика»


« 12 » 08 2026 г. Бирюков А.Б.

Докторская диссертация Бирюкова А.Б. защищена по специальности 05.14.06
"Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика" (2013 г.).

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ)
283001. Г. Донецк ул. Артема, 58
Email: birukov.donntu@mail.ru

Подпись Бирюков А.Б. заверяю:

