



«Теоретическая и прикладная теплотехника», кафедра «Промышленная теплоэнергетика».

Справка № Сп-02.03/688 о сдаче кандидатских экзаменов выдана 12.12.2025 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Еремин Антон Владимирович – работает в должности проректора по научной работе, заведующего кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» и начальника молодёжной лаборатории «Тепловые процессы в химической технологии (ТЕРМОХИМ)» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки Российской Федерации.

### **1. Актуальность темы**

Считать тему диссертационной работы Брагина Дмитрия Михайловича актуальной в связи с тем, что она посвящена разработке методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, а также исследованию возможностей их применения в современных теплообменных устройствах.

Современное развитие энергетики, авиационно-космической техники, химической технологии и других высокотехнологичных отраслей промышленности сопровождается постоянным ростом требований к компактности и эффективности теплообменного оборудования. Одним из перспективных направлений повышения интенсивности процессов теплообмена является использование материалов и конструкций с развитой внутренней поверхностью, обеспечивающих увеличение площади контакта теплоносителя, турбулизацию потока.

В настоящее время все большее распространение получают материалы с упорядоченной макроструктурой структурой. Применение таких структур открывает новые возможности для создания компактного и энергоэффективного теплотехнического оборудования. Вместе с тем использование таких материалов требует достоверной информации об их теплофизических и гидродинамических свойствах, а также разработки инженерных методов расчета.

Особый интерес представляют структуры, сформированные на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS), применение которых стало возможным благодаря развитию аддитивных технологий. Однако вопросы определения их характеристик и оценки эффективности в составе теплообменного оборудования остаются недостаточно изученными.

В связи с этим разработана методика определения эффективных теплофизических свойств и гидродинамических характеристик материалов с TPMS-структурой, а также созданы расчетные зависимости и инженерные подходы к проектированию теплообменных устройств на их основе является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для развития современной теплотехники и энергетического машиностроения.

## **2. Степень научной ценности и новизны полученных результатов**

Научная ценность и новизна диссертации определяется тем, что в ней разработаны методы расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, отличающиеся совместным использованием результатов численного моделирования и натуральных экспериментов, методов гомогенизации, концепции репрезентативной элементарной ячейки и нормализации по основным теплофизическим параметрам материала каркаса. Предложенные подходы обеспечивают корректное обобщение экспериментальных и расчетных данных и расширяют возможности использования TPMS-структур различной топологии и масштаба.

Получены новые зависимости, связывающие эффективную теплопроводность материалов с геометрическими параметрами элементарной ячейки и теплофизическими свойствами материала каркаса. Показано, что использование безразмерных параметров позволяет описывать теплофизические характеристики различных типов TPMS-структур в рамках единого подхода.

Выполнено комплексное численное и экспериментальное исследование гидродинамических процессов в пористых материалах с упорядоченной макроструктурой. Установлено влияние топологии TPMS-структур на формирование полей скорости, давления и температуры, а также на локальные зоны интенсивного теплообмена и области повышенного гидравлического сопротивления.

Предложено модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчета гидравлических потерь в пористых материалах с упорядоченной структурой,

учитывающее геометрические особенности TPMS-структур и обеспечивающее более высокую точность расчета по сравнению с известными зависимостями.

Разработаны новые конструкции теплообменных и теплоиспользующих устройств на основе TPMS-структур. Получены новые результаты по исследованию процессов теплообмена в теплообменных устройствах на основе TPMS-структур. Установлено влияние топологии TPMS-структур на формирование полей скорости, давления и температуры, а также на локальные зоны интенсивного теплообмена и области повышенного гидравлического сопротивления.

### **3. Личное участие автора в получении научных результатов**

В работах [1-6, 9-12, 16, 17] диссертанту принадлежат разработка методологии исследования, проведение исследования, обработка и анализ результатов, валидация полученных данных, выполнение основного объема вычислений, оформление визуальных материалов, написание исходных текстов научных публикаций и их научное редактирование, формулировка выводов.

В работах [7, 8, 13-15, 18-20] отдельные этапы исследования, включая проведение экспериментов, анализ результатов и подготовку графических материалов, выполнялись диссертантом совместно с соавторами. В работе [15] диссертанту принадлежит подготовка и проведение натурного эксперимента.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

#### **В научных изданиях из перечня ВАК:**

[1] Брагин, Д.М., Еремин А.В. Исследование эффективной теплопроводности материалов, основанных на трижды периодических минимальных поверхностях типа Diamond, Gyroid, Fisher-Koch S// Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2025. – № 1. – С. 31-47.

[2] Брагин, Д.М., Мустафин Р.М., Попов, А.И., Зинина, С.А., Еремин, А.В. Исследование аэродинамических процессов в пористых материалах на основе трижды периодических минимальных поверхностей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26. – №. 5. – С. 66-78:

[3] Брагин Д.М., Еремин, А.В., Попов, А.И., Шульга А.С. Метод определения коэффициента эффективной теплопроводности пористого материала на основе минимальной поверхности типа Schoen's I-WP(R) // Вестник

Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – № 2. – С. 61-68.

[4] Брагин, Д.М., Мустафин Р.М., Зинина, С.А., Попов, А.И., Еремин, А.В. Численное исследование характеристик теплопередачи теплообменника на основе трижды периодической минимальной поверхности Primitive // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2025. – № 6. – С. 57-78.

[5] Брагин, Д.М., Еремин А.В. Исследование тепловых свойств пористых полимерных материалов на основе минимальных поверхностей Шварца // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 9(105). – С. 619-634.

[6] Брагин, Д.М., Попкова А.С., Еремин А.В. Исследование теплофизических свойств пористой пластины, основанной на топологии трижды периодической минимальной поверхности Schwarz' CLP // Известия Российской академии наук. Энергетика – 2026. – № 3. – С. 52–67.

[7] Попов, А.И., Брагин, Д.М., Зинина, С.А., Еремин, А.В. Определение теплопроводности материала с упорядоченной структурой, основанной на трижды периодической минимальной поверхности Шварца Р, с учётом конвекции // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 39-45.

[8] Еремин А.В., Зинина С.А., Брагин, Д.М., Попов А.И. Об одном методе исследования процессов теплопереноса в пористых средах с упорядоченной макроструктурой // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2026. – Т. 26, – №.2. – С. 211–224

#### **В научных изданиях, индексируемых в Scopus:**

[9] Bragin, D.M., Popov, A.I., Eremin, A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 231. – P. 125863.

[10] Bragin, D.M., Popov, A.I., Eremin, A.V. Thermal conductivity of porous materials with Schoen's I-WP(R) TPMS structure // International Journal of Thermal Sciences. – 2025. – Vol. 218. – P. 110138.

[11] Bragin, D.M., Karpilov, I.D., Pashchenko D. Flow dynamics through cellular material based on a structure with triply periodic minimal surface // Chemical Engineering Science. – 2024. – Vol. 298. – P. 120291.

[12] Bragin, D.M., Popov, A.I., Karpilov I.D., Zinina S.A., Popkova A.S., Eremin, A.V. Experimental and Numerical Investigation of the Thermophysical

Properties of Lattices Based on Triply Periodic Minimal Surfaces// International Journal of Thermal Sciences. – 2026. . – Vol. 228. – P. 110979

[13] Popov, A.I. Bragin, D.M. Eremin, A.V. Heat and mass transfer in TPMS-based porous media: Two-medium approach // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 253. – P. 127553.

[14] Popov, A.I., Eremin, A.V., Bragin, D.M. Modeling and Measurement of Effective Thermal Conductivity of Materials Reinforced with Bars / A. Popov, A. Eremin, D. Bragin // International Journal of Thermophysics. – 2023. – Vol. 44, No. 2. – P. 17.

[15] Eremin, A.V., Frolov, M.A., Krutov, A.F., Smolkov, M.I., Shulga, A.S., Bragin, D.M., Popov, A.I. & Blatov, V.A. (2024). Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces //Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2024. – Т. 31. – №. 29. – С. 11320-11336.

#### **В других изданиях:**

[16] Брагин, Д.М., Еремин, А.В. Зинина С.А. Study of temperature distribution and effective thermal conductivity in TPMS structure // Third Asian Conference on Thermal Sciences 3 rd ACTS June 23-27, 2024, Shanghai, China – 2024. – С. 760-761.

[17] Брагин, Д.М. Анализ толщины неэффективной изоляции труб // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 7(247). – С. 56-59.

#### **Список программ для ЭВМ, зарегистрированных в Роспатенте:**

[18] Попов А.И., Брагин Д.М., Еремин А.В., Зинина С.А., Олатуйи О.Д., Мустафин Р.М., Карпилов И.Д. Определение коэффициента эффективной теплопроводности пористых материалов с упорядоченной структурой на основе экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615531 от 04.04.2023г.

[19] Шадымов Н.А., Шадымова А.О., Еремин А.В., Брагин Д.М., Зинина С.А. Программа, реализующая алгоритм решения TPMS структур на основе трехмерной координатной сетки Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684779 от 21.10.2024

[20] Зинина С.А., Попов А.И., Еремин А.В., Брагин Д.М., Мустафин Р.М., Кечин Н.Н. Приближенно-аналитический метод решения задачи теплопроводности в пористой пластине, структура которой основана на трижды

периодических поверхностях минимальной энергии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684550 от 16.11.2023

Основные научные результаты диссертационного исследования получены соискателем лично.

#### **4. Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, являются обоснованными и достоверными.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов численного моделирования, применением апробированных вычислительных алгоритмов, а также непротиворечивостью полученных выводов классическим физическим законам и современным представлениям о механизмах переноса тепла и массы. Результаты численных исследований подтверждены данными натурных экспериментов и согласуются с результатами, представленными в работах других исследователей. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях.

#### **5. Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы заключается в разработке методов расчета и прогнозирования теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе TPMS. Полученные обобщённые зависимости эффективной теплопроводности и гидравлического сопротивления позволяют выполнять инженерные расчёты и проектировать материалы с заранее заданными свойствами.

Разработанные в диссертации модели, методы и расчётные зависимости могут быть использованы при создании пористых материалов, оребренных поверхностей и компактных теплообменных устройств для интенсификации процессов тепло- и массообмена, а также при проектировании систем теплообмена и терморегулирования.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также в

расчётно-проектной деятельности предприятий ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО».

#### **6. Рекомендации по использованию полученных результатов**

Рекомендуется использовать результатов диссертационной работы Брагина Д.М. при разработке, проектировании и совершенствовании теплообменного оборудования, систем теплообмена и терморегулирования, а также при создании пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS) с заданными теплофизическими и гидродинамическими характеристиками.

#### **7. Рекомендации по защите диссертационной работы**

Диссертационная работа Брагина Дмитрия Михайловича «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе требованиям, предъявляемым к самостоятельности выполнения исследования и корректности использования заимствованных материалов и результатов.

Тема диссертационной работы «Разработка методов математического моделирования процессов тепломассопереноса в материалах с упорядоченной макроструктурой» и ее содержание полностью соответствуют паспорту специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника, в частности следующим пунктам:

п.1. Теплофизические свойства чистых веществ и их смесей; методы расчета термодинамических и переносных свойств; связи между строением веществ и их феноменологическими свойствами;

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 технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров теплотехнического оборудования.

Научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в достаточном количестве научных трудов, включая статьи в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях, индексируемых в международных базах данных и входящих в перечень ВАК Российской Федерации.

Соискатель обладает глубокими профессиональными знаниями, имеет научные достижения по тематике диссертационного исследования.

Законченная диссертационная работа «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой» Брагина Дмитрия Михайловича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

Заключение принято на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «СамГТУ», протокол № 8 от 13.04. 2026 г.

Заместитель заведующего кафедрой  
«Промышленная теплоэнергетика»,  
к.т.н., доцент



А.С. Горшенин

Дата 13.04.2026 г.