

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи



Брагин Дмитрий Михайлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПЕРЕНОСНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С
УПОРЯДОЧЕННОЙ МАКРОСТРУКТУРОЙ**

2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
А.В. Еремин

Самара 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Обзор работ по направлению исследованию теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов	13
2. Определение теплофизических свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой.....	32
2.1. Формирование твердотельной модели материалов с упорядоченной структурой в среде САПР.....	34
2.2. Методы определения эффективной теплопроводности пористых материалов	41
2.3. Численное моделирование переноса тепловой энергии в пористых материалах на основе TPMS	45
2.4. Разработка лабораторного стенда по определению эффективной теплопроводности материалов.....	54
2.5. Экспериментальное исследование эффективной теплопроводности пористых материалов на основе TPMS.....	58
2.6. Определение зависимостей эффективной теплопроводности TPMS кубической симметрии	61
2.7. Определение зависимостей эффективной теплопроводности TPMS Schoen's I-WP(R), Schoen F-RD(R) и CLP	67
2.8. Эффективная теплопроводность TPMS материала с учетом теплопроводности воздуха в межпоровом пространстве	74
2.9. Тепловые потоки в пористых материалах, основанных на топологии трижды периодических минимальных поверхностей	78
2.10. Теплопроводность композиционного материала с решеткой на основе TPMS типа	83

2.11. Определение эффективной теплопроводности TPMS структуры Primitive посредством теоретического анализа.....	90
2.12. Теплопроводность конструкций на основе TPMS, полученных из цеолитных каркасов	94
3. Определение гидродинамических характеристик в конструкциях основанным на TPMS	97
3.1. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена	98
3.2. Формирование САПР оребрения и теплообменного оборудования на основе TPMS-структур	104
3.3. Векторное распределение потока при прохождении через структуру TPMS.....	107
3.4. Определение гидравлических потерь давления потока при прохождении через структуру TPMS путем численного моделирования	118
3.5. Определение гидравлических потерь давления потока при прохождении через структуру TPMS путем натурального эксперимента	122
3.6. Модифицированное уравнение определения потерь давление Hagen-Poiseuille	125
3.7. Определение температурных полей в канале с оребрением TPMS	131
3.8. Исследование теплопередачи в канале с оребрением TPMS	138
4. Теплообменное устройство на основе TPMS.....	145
4.1. Исследование характеристик теплопередачи теплообменника на основе TPMS типа Primitive	145
4.2. Экспериментальное исследование теплопередачи в теплообменнике структуры I-WP	158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	169

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	199
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	205
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	207
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	209

Введение

Актуальность работы.

. Согласно указам Президента Российской Федерации от 28.02.2024 г. № 145 и от 18 июня 2024 г. № 529, к приоритетам и перспективам научно-технического развития, а также к важнейшим наукоёмким технологиям относится повышение эффективности использования энергетических ресурсов, разработка высокотехнологичной продукции, создание новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками. Разработка материалов с заданными свойствами открывает возможности для проектирования и создания новой высокотехнологичной продукции.

Современное развитие энергетики, теплотехнологий и систем терморегулирования характеризуется возрастающими требованиями к эффективности процессов передачи, преобразования и использования теплоты. В этой связи ключевое значение приобретают задачи интенсификации процессов тепло- и массообмена, а также совершенствования методов расчёта и оптимизации параметров теплотехнического оборудования.

Одним из перспективных направлений решения указанных задач является использование материалов с управляемыми теплофизическими и гидродинамическими характеристиками, позволяющих целенаправленно воздействовать на интенсивность теплообмена и структуру течения.

Разработка методов определения эффективных свойств таких материалов и получение зависимостей, связывающих структуру и характеристики переноса, являются актуальными научными задачами теплотехники.

В настоящее время активно развиваются подходы к созданию материалов с заранее заданными свойствами: механическими, электрическими, гидродинамическими и теплофизическими. При этом особое внимание привлекают материалы, основанные на трижды периодических минимальных поверхностях (TPMS, от англ. Triply periodic minimal surface). Свойства материала, основанного на упорядоченной структуре TPMS, можно изменять, модифицируя топологию или геометрические размеры элементарной ячейки. Заранее заданные свойства материалов на основе TPMS уже открывают новые возможности в области медицины для тканевой инженерии, в химической отрасли и др.

Особого внимания заслуживает внедрение структур TPMS в теплообменное оборудование. Экспериментальные данные демонстрируют повышение эффективности теплообменников TPMS по сравнению с термодинамически эквивалентными противоточными теплообменниками. Кроме того, исследование теплопроводящих свойств материалов на основе TPMS подчеркивает их практический потенциал для улучшения теплопроводности материалов с фазовым переходом в системах хранения тепловой энергии и системах терморегулирования.

В настоящей диссертации предложены подходы определения теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной структурой, а также получения обобщённых зависимостей свойств TPMS-материалов от их геометрических параметров. Разработанные зависимости позволяют инженерам и конструкторам проектировать материалы с заранее заданными свойствами в соответствии с требованиями конкретных прикладных задач. Это способствует сокращению времени между получением новых научных результатов и созданием технологий и

высокотехнологичной продукции, что соответствует положениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Цель работы: разработка методов определения теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе анализа и обобщения результатов имитационного моделирования и натуральных экспериментов.

Задачи исследования:

1. Разработать методы генерации и обработки твердотельных CAD-моделей пористых материалов с упорядоченной макроструктурой. Реализовать алгоритмы формирования геометрических моделей пористых материалов на основе TPMS для последующего численного и экспериментального исследования.

2. Исследовать теплофизические свойства и гидродинамические характеристики пористых материалов на основе TPMS путем численных и натуральных экспериментов процессов переноса.

3. Обобщить зависимости теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала каркаса, представив результаты в форме, удобной для инженерных расчётов и практического применения.

4. Разработать новые конструкции оребрения и рекуперативных теплообменных устройств на основе TPMS-материалов. Выполнить численное и натурное исследование процессов тепло- и массообмена в указанных теплообменных устройствах.

5. Провести комплекс натуральных экспериментов по исследованию тепло- и гидродинамических характеристик TPMS материалов с целью верификации результатов, полученных численными методами.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника»:

п.1) Теплофизические свойства чистых веществ и их смесей, включая флюидонасыщенные горные породы, в широкой области параметров состояния; 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.

Научная новизна:

1. Разработаны новые подходы определения теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе TPMS, 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 расчётных данных и расширяют возможности использования TPMS-структур различной топологии и масштаба.

2. Впервые получены обобщённые зависимости эффективных теплофизических и гидродинамических свойств пористых TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала

каркаса на основе решения обратных задач теплопроводности и гидродинамики. Полученные зависимости формируют научные основы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты при использовании TPMS-материалов.

3. Разработаны и исследованы новые конструкции теплообменных и теплоиспользующих устройств 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, что позволило определить области применения различных TPMS-топологий в теплообменном оборудовании.

4. Предложено и обосновано модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчёта гидравлических потерь давления в пористых материалах на основе упорядоченных структур, учитывающее параметры потока и геометрические характеристики структуры. В отличие от классических подходов, предложенное уравнение позволяет адекватно описывать экспериментально наблюдаемое падение давления в TPMS структурах.

Положения, выносимые на защиту:

1 Подходы определения теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, основанной на совместном анализе и обобщении результатов численного моделирования и натурных экспериментов. Подходы включают метод гомогенизации, концепцию репрезентативной элементарной ячейки и нормализацию теплофизических характеристик по теплопроводности материала каркаса.

2. Обобщенные зависимости эффективной теплопроводности TPMS-структур от геометрических параметров элементарной ячейки и теплофизических свойств материала каркаса. Зависимости позволяют создавать TPMS-материалы с заданной эффективной теплопроводностью.

3. Результаты экспериментального и численного исследования полей скорости и давления в TPMS-структурах, показавшие определяющее влияние топологии элементарной ячейки на локальные ускорения потока, формирование вихревых зон и гидравлического сопротивления.

4. Модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчёта гидравлических потерь давления в пористых материалах на основе TPMS, учитывающее параметры потока и геометрические характеристики структуры. Уравнение описывает перепад давления в широком диапазоне пористостей и верифицировано результатами численных и натурных экспериментов.

5. Алгоритм формирования оребрения и теплообменных устройств на основе TPMS-структур, для интенсификации теплопереноса за счёт увеличения удельной поверхности теплообмена и формирования сложных трёхмерных полей скорости. Безразмерные комплексные коэффициенты теплопередачи и потерь давления в различных TPMS-структурах.

Достоверность результатов работы исследования подтверждается сопоставлением полученных данных с реальными теплофизическими процессами; сравнением численных решений, полученных в диссертации, с экспериментальными данными и результатами, опубликованными другими исследователями; непротиворечивостью полученных выводов классическим физическим законам и современным представлениям о механизмах переноса тепла и массы.

Практическая значимость работы заключается в разработке подходов к проектированию оребренных поверхностей и компактных теплообменных устройств на основе пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, обеспечивающих интенсификацию процессов тепло- и массообмена за счёт увеличения удельной поверхности теплообмена и формирования сложной пространственной структуры течения теплоносителя. Полученные в работе обобщённые зависимости эффективной теплопроводности и гидравлического

сопротивления TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и свойств материала каркаса представлены в форме, удобной для инженерного применения, что позволяет создавать материалы с заранее заданными свойствами, что соответствует перечню важнейших наукоемких технологий (указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529, п. 23), сокращает время между получением новых знаний и внедрением технологий и продукции, а также способствует обеспечению неразрывной взаимосвязи между научно-технологическим и промышленным потенциалом страны, согласно стратегии НТР (п. 16.а, п. 27.а).

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы частично используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета в лекционных курсах для студентов бакалавриата направления подготовки 13.03.01. «Теплоэнергетика и теплотехника», а также в расчетно-проектной практике предприятий ООО «Котел Маркет» и ООО «РОСКО».

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: Международная конференция «The 3rd Asian Conference on Thermal Sciences» г. Шанхай, 2024 г; международная конференция «International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency» г. Липецк, 2021, 2022, 2023, 2025 г.; международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», г. Сочи, 2022 г.;

Также результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Самарского государственного технического университета в 2022-2026 гг.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10044 и №21-79-00047);

министерства науки и образования (стипендия Президента Российской Федерации для аспирантов 2023-2026 гг.; конкурс денежных выплат молодым ученым и конструкторам, работающим в Самарской области 2023-2026 гг.); тема № FSSE-2025-0006 в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета (создание новых молодежных лабораторий); ФГБОУ ВО СамГТУ (грант аспиранта 2023-2026 гг.)

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 6 статей в журналах, входящих в Scopus (квартиль 1); 8 статей в журналах, индексируемые ВАК, из которых 5 по научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»; 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Полный список трудов в рамках диссертации составляет 50 работ.

Личный вклад автора. В работах [225-227, 230-234, 236, 237, 240, 241] диссертанту принадлежат разработка методологии исследования, проведение исследования, обработка и анализ результатов, валидация полученных данных, выполнение основного объема вычислений, оформлении визуальных материалов, написании исходных текстов научных публикаций и их научном редактировании, формулировка выводов.

В работах [228,235,238-239] ряд этапов работы, включая проведение исследования, анализ результатов и подготовку визуальных материалов, выполнялся диссертантом в равной степени совместно с соавторами. В работе [229] диссертанту принадлежит подготовка и проведение натурного исследования.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, приложений; изложена на 198 страницах основного машинописного текста и

6 страницах приложений, содержит 76 рисунков. Список использованной литературы включает 241 наименование.

1. Обзор работ по направлению исследованию теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов

Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и техникоэкономическими характеристиками, является одним из основных направлений уменьшения энергетических потерь. В первую очередь это связано с ростом затрат на энергоснабжение и необходимостью внедрения энергосберегающих мероприятий и энергетически эффективных решений, направленных на снижение затрат на энергоресурсы и сокращение выбросов загрязняющих веществ, что является приоритетом НТР (п.21.б). Внедрение инновационных теплопередающих устройств способствует созданию устойчивых, экологически чистых энергетических систем, что важно для развития энергетической инфраструктуры. Существует необходимость поиска и разработки более эффективных методов производства и использования тепловой энергии, интеграции различных систем и технологий.

Во многих областях, таких как машиностроение, химия, энергетика, обмен тепловой энергией происходит в теплообменниках. В настоящее время совместно с увеличением эффективности переноса тепла в теплообменных устройствах требуется сокращение массогабаритных характеристик [1]. Переход к компактным теплообменным аппаратам наиболее актуален в условиях ограниченного пространства и массы оборудования [2]. Повышение интенсивности переноса тепла осуществляется за счет повышения площади контакта теплообмена; турбулизации потока греющей и/или нагреваемой среды; снижения термического сопротивления теплопередающей стенки и др. [3]. Снижение термического сопротивления достигается путем уменьшения толщины теплопередающей стенки, а также повышением коэффициента теплоотдачи, в том числе за счет турбулизации потока среды. Повышение

площади теплообменной поверхности и турбулизация потока достигаются за счет использования оребрения теплопередающей стенки.

Несмотря на развитие традиционного теплообменного оборудования, достижение оптимальных массогабаритных характеристик, низкого гидравлического сопротивления при высокой мощности ограничено их конструктивными особенностями [4]. В этой связи активно разрабатываются новые подходы к конструированию высокопроизводительных теплообменных устройств за счет изменения геометрии оребрения и формы теплообменного тракта для интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты [5], исследуются процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты.

Одним из подходов к разработке нового теплообменного оборудования является использование пористых материалов в процессах тепло- и массообмена. Внедрение пористых материалов также находит применение в производстве фильтров [6], поскольку они имеют большую площадь поверхности. Легкие и прочные механические компоненты, используемые в аэрокосмической промышленности [7], изготавливаются из пористых материалов. Их использование широко распространено в производстве аккумуляторов [8], сельском хозяйстве [9] и химической промышленности [10], энергетическом секторе [11] и т.д. Пористые материалы могут быть применены в теплообменном оборудовании, в частности, для интенсификации теплообмена, в качестве теплопередающей стенки, в качестве оребрения и т.д.

Среди пористых материалов различают неупорядоченные (стохастические) пористые материалы – губки, пены, спеченные порошки. Для них характерно случайное распределение пор по размерам и форме, что приводит к анизотропии свойств и сложности прогнозирования поведения под нагрузкой; упорядоченные решетчатые структуры – это материалы с структурированным распределением пор, ребер и других геометрических элементов.

До недавнего времени основное внимание было направлено на создание и исследование пористых материалов со стохастической (неупорядоченной структурой) [12]. Это было обосновано относительной простотой изготовления. Однако пористые материалы с стохастическим распределением пор имеют целый ряд недостатков, таких как низкий или средний коэффициент пористости, что снижает термическое сопротивление теплоизоляционных материалов и повышает гидродинамическое сопротивление; межпоровое пространство легко засоряется, что приводит к снижению проницаемости, и как следствие, объемного расхода жидкости; анизотропия свойств таких материалов требует статистической оценки [13]; определение свойств не экспериментальными методами требует сложных долговременных вычислений, что ограничивает их прикладное применение.

С развитием аддитивных технологий, позволяющих производить различные объекты сложной формы, интерес к исследованию и применению пористых материалов с упорядоченными структурами значительно увеличился. Большинство пористых материалов с упорядоченной структурой превосходят традиционные материалы по таким параметрам, как прочность [14], пропускная способность [15], высокая пористость [16], большая площадь поверхности [17]. Более того, свойства пористых материалов с упорядоченной структурой зачастую квазиизотропны [18] и могут быть спрогнозированы на основе геометрических и теплофизических свойств каркаса. Это открывает возможности настраивать свойства материалов, точно воссоздавать численные модели процессов.

Среди пористых материалов с упорядоченной структурой на данный момент наиболее исследованными и, соответственно, наиболее используемыми являются материалы с ячеистой или сотовой структурой. Однако применение таких материалов чаще всего ограничивается проектированием конструкций, где требуется достичь максимальной прочности при минимальной массе [19].

В случае применения пористых материалов в других целях, например, в каталитических вставках или теплообменных устройствах, также необходимы высокая пропускная способность, большая площадь поверхности [20] и т.д. Достижение этого возможно при использовании пористых материалов с более развитой системой пор, таких как наноканальные и микроканальные материалы, мультислойные материалы, материалы со сложной геометрией пор и др.

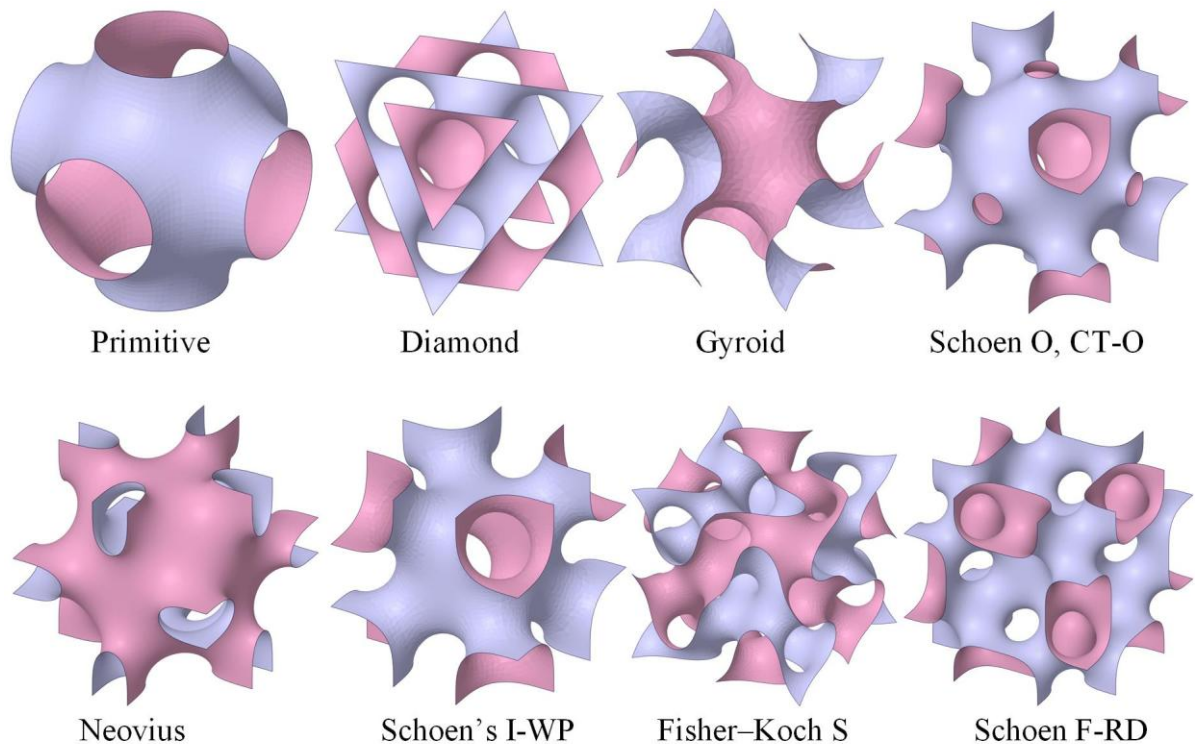


Рисунок 1.1. TPMS поверхности нулевой толщины

К числу таких материалов относятся пористые материалы со структурой, основанной на трижды периодических минимальных поверхностях (далее – TPMS материалы). Часть TPMS представлено на рисунке 1.1. Исследования в этом направлении начинал Карл Шварц в 1880-х годах, однако широкого распространения TPMS материалы не получили из-за очевидных сложностей при изготовлении, а также при описании математических моделей переноса. Развитие технологий компьютерного моделирования значительно сократило время на описание математических моделей переноса, однако формирования геометрии TPMS материалов в среде

САПР ограничено без дополнительных программных продуктов. В связи с этим были разработаны программные комплексы, позволяющие сформировать геометрию для компьютерного моделирования и аддитивного изготовления TPMS материалов.

TPMS можно описать и сгенерировать определенными математическими функциями [21-23]. Существует несколько методов генерации решетчатых TPMS: параметрические, неявные и граничные методы [24]. В параметрическом методе TPMS может быть сгенерирована с использованием параметризации Вейерштрасса-Эннепера [25, 26]. В соответствии с неявным методом TPMS аппроксимируется с помощью однозначной функции поверхности уровня $f(x,y,z)=c$ [27, 28], где f – набор различных тригонометрических функций. Описание геометрии набором строгих математических поверхностей уровня, позволяет точно прогнозировать эффективные свойства и описывать процессы, протекающие в таких пористых TPMS материалах на основе методов математического анализа. Часть нулевых поверхностей уровня TPMS представлена в таблице 1.1

Область, ограниченная уравнениями поверхности уровня, представленными в таблице 1.1, формирует решетку TPMS по неявному методу. Вся решетка может быть разбита на повторяющиеся элементы – элементарные ячейки с длиной " a " равной периоду поверхности уровня. Толщина решетки " δ " равна разности параметров смещения двух уравнений поверхности уровня $f(x,y,z,a)$. Ряд программ, основанных на неявном методе, генерируют поверхности и создают требуемую решетку TPMS в формате .stl. "TPMS Designer"[30] – это инструмент, основанный на программном обеспечении MATLAB, который позволяет быстро создавать, визуализировать и анализировать неявно определенные структуры с использованием строгих математических уравнений. Программное обеспечение позволяет параметрически корректировать размер, соотношение

сторон, поворот и разрешение структуры, хотя количество доступных поверхностей не превышает десяти. "Minisurf" [29, 31] обеспечивает визуализацию поверхности и создание файлов моделирования САД на основе их поверхностных аппроксимаций, определяемых уравнением. Программа использовалась в различных исследованиях для численного изучения механических свойств TPMS [32, 33] и подходов к изготовлению решеток TPMS [34].

Таблица 1.1 Уравнения уровня трижды периодических минимальных поверхностей [29]

Название	Сокращение	Поверхности уровня TPMS
Primitive	P	$\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) = 0$
Diamond	D	$\sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi z}{a}\right) = 0$
Gyroid	G	$\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) = 0$
Schoen O, CT-O	O,CT-O	$0.6\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\right] - 0.4\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\right] = -0.25$
Neovius	N	$3\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\right] + 4\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) = 0$
Schoen I-WP	I-WP	$2\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\right] - \left[\cos\left(\frac{4\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi z}{a}\right)\right] = 0$

Fisher-Koch S	FKS	$\cos\left(\frac{4\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{4\pi y}{a}\right)\sin\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{4\pi z}{a}\right) = 0$
Schoen F-RD	F-RD	$4\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) - \left[\cos\left(\frac{4\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{4\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{4\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{4\pi z}{a}\right)\right] = 0$

Другим заметным программным продуктом для проектирования решеток TPMS является Surface Evolver [35, 36]. Он основан на методе Плато, который требует описания границы поверхности, как правило, в форме многоугольника в R3. Затем поверхность итеративно уточняется для минимизации площади полигональной сетки, которая окружает границу, с учетом ограничений. Эти ограничения могут включать геометрические положения вершин или интегрированные величины.

Полигональное уточнение используется для создания более точной триангуляции. Поверхность уточняется до тех пор, пока ни одна вершина триангуляции не может быть перемещена дальше для уменьшения ее площади. В настоящее время Surface Evolver предлагает более 50 различных поверхностей. Программный продукт использовался в многочисленных исследованиях свойств TPMS. Исследование Ли [37] было сосредоточено на изучении упругих свойств архитектурных пен на основе TPMS, включая одноосное и сдвиговое напряжение, индекс анизотропии, коэффициент Пуассона и предел текучести. Далак [38] исследовал механические свойства 3D-печатных композитных материалов с взаимопроникающей фазой с архитектурой TPMS. Ма [39] в ходе исследования механических свойств структур, полученных из Surface Evolver, также выявил, что эти TPMS конструкции превосходят упругоизотропные решетки при равной относительной плотности.

Благодаря биоморфному дизайну, а также высокой взаимосвязанной пористости и прочности, сравнимой с костными структурами человека,

материалы на основе TPMS могут стать высокотехнологичным материалом для несущих костных имплантатов. Внутри костной ткани происходит постоянный поток крови и костного мозга [40]. Для эффективного использования TPMS в качестве костных имплантатов необходимо дальнейшее изучение проницаемости и гидродинамических процессов, а также влияния напряжения сдвига стенки на поток.

По типу топологии материалы на основе TPMS относятся к бесстержневым. Твердое тело в этих пористых материалах представляет собой непрерывную изогнутую поверхность (или объем, ограниченный такой поверхностью). Это исключает концентраторы напряжений в узлах что является одной из причин их высокой прочности.

Большая площадь контакта и проницаемости позволяет использовать TPMS материалы для увеличения производительности систем адсорбционного опреснения/охлаждения [20,41]. Большая площадь поверхности структур TPMS может быть использована в качестве основания для нанесения поверхностных катализаторов. Покрытая поверхность катализатора используется в каталитических реакторах с неподвижным слоем. Среди основных параметров такого насадочного слоя – перепад давления и площадь контакта [42]. Крайне важно изучить перепад давления и динамику потока для использования геометрии насадочного слоя на основе TPMS в химических реакциях.

Также TPMS материалы нашли применение в качестве электромагнитных поглотителей. Благодаря конструкции многослойного массива и структуры полости материалы достигают хорошего согласования импеданса и широкополосного ЭМ поглощения [43].

Структуры на основе TPMS могут использоваться в качестве усилителей теплопроводности для композитов с материалами с фазовым переходом (PCM, от англ. «Phase Change Material») [44]. Материалы TPMS с фазовым переходом демонстрируют значительный потенциал в системе терморегулирования аккумуляторов [45], поскольку они улучшает характеристики теплопередачи

и снижает температуру аккумулятора. Металлическая пена-PCM на основе структуры Primitive имеет самую высокую скорость накопления тепловой энергии [46]. При пористости более 0,8 эффективная теплопроводность листовых Primitive выше, чем у объемно-центрированных кубических структур, достигая 68 % от максимального теоретического значения [47]. Однако для дальнейшего развития систем регулирования температур необходимо определение зависимостей эффективной теплопроводности материалов на основе TPMS от геометрических параметров структуры.

Активное внедрение пористых материалов TPMS обосновано рядом преимуществ по сравнению с другими пористыми материалами. Структуры TPMS описываются строгими математическими уравнениями, что позволяет регулировать теплопередающие свойства, изменяя геометрические параметры структуры, включая размер конструкций, период поверхности уровня, толщину стенки, пористость, площадь поверхности. Кривизна TPMS равна нулю, что исключает резкие изменения направлений потока внутри структуры и соответственно снижает потери давления. Высокая пористость TPMS материалов может быть использована для повышения термического сопротивления теплоизоляции и, соответственно, повышения энергоэффективности. Такие конструкции, характеризующиеся высокой пористостью, высокими прочностными характеристиками и управляемыми тепловыми свойствами, могут найти применение и в других инженерных проектах. Структуры TPMS по определению относятся к полностью открытым пористым материалам с нулевой долей закрытых пор. Если быть точнее, они образуют особый подкласс биконтинуальных открытых пор. В структуре TPMS обе фазы – и твёрдое тело, и пора – являются непрерывными, взаимопроникающими лабиринтами. Твёрдая фаза не состоит из отдельных балок; она сама образует поверхность, разделяющую два одинаково непрерывных канала. Следовательно, поровое пространство не имеет тупиков или закрытых законченных пространств оно представляет собой один бесконечный канал, закрученный вокруг второго такого же канала внутри

твёрдого тела. Таким образом, по морфологии пор структуры TPMS относятся к биконтинуальным – т.е. две фазы образуют непрерывные, нигде не прерывающиеся лабиринты. Особенность TPMS делить пространство на два и более непересекающихся объема/лабиринта позволяет использовать такую структуру в рекуперативных теплообменниках с большой площадью теплообмена. Этот тип теплообменников пока не используется в промышленности, поскольку характеристики потока и перепада давления не были тщательно изучены.

Несмотря на многочисленные исследования потенциал TPMS материалов в области теплоэнергетики еще не раскрыт в полной мере, что ограничивает повышение эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках. Эти ограничения вызваны отсутствием зависимостей теплофизических свойств от геометрических параметров и свойств каркаса для таких структур. Модели Максвелла-Эйкена, Хашина-Штрикмана и Эшби неприменимы к таким материалам, поскольку они не учитывают геометрические особенности структур, что приводит к существенным расхождениям между расчётными и экспериментальными данными.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость перехода от универсальных эмпирических зависимостей к методам, учитывающим геометрию элементарной ячейки и позволяющим получать эффективные коэффициенты переноса на основе репрезентативных структурных моделей. Эффективная теплопроводность материала TPMS зависит от пористости [18,48], размера ячеек [49], формы пор [50] и материала, заполняющего межклеточное пространство [51]. Однако, большая часть исследований сосредоточена на частных случаях переноса тепла. Рассматриваются модели переноса тепла в пористых TPMS материалов, каркас которых изготовлен из конкретных материалов (TiAlV, CoCr, AlSi) или при конкретных геометрических параметрах (пористость, размер ячеек). Для прикладного применения, а в частности внедрения TPMS материалов в качестве оребрения

в теплообменном оборудовании для интенсификации теплообмена, необходимы доступные обобщенные зависимости, позволяющие инженерам и конструкторам проектировать материалы с заранее задаваемыми свойствами исходя из их уникальной задачи. Это значительно сократит время между получением новых знаний и созданием технологий и продукции, что соответствует Стратегии научно-технологического развития РФ (п.16а).

В связи с этим необходимо разработать методику по оценке теплофизических свойств таких материалов с учетом геометрических параметров и свойств исходного безпористого материала.

Расширение области применения пористых TPMS материалов в технических системах также затруднено без определения гидродинамических характеристик.

Пирес и др. численно и экспериментально исследовали процессы переноса массы в различные геометрии TPMS для инженерии костной ткани [52]. Были рассмотрены три геометрии TPMS: D, Gyroid и Primitive. Каждая геометрия использовалась дважды для создания двух структур с пористостью 60 % и 70 %. Авторы получили степенную зависимость перепада давления от объемного расхода и определили, что более высокая пористость не всегда приводит к более высокой проницаемости.

Сингх и др. изучали динамику потока в цилиндрической колонне, заполненной насадочным слоем на основе TPMS [53]. Колонна предназначена для улавливания углерода на мокрой поверхности. Для создания насадочного слоя используется структура D. Проведено численное и экспериментальное исследование перепада давления, режима течения в колонне при различных скоростях потока газа и жидкости, угла контакта, свойств растворителя и площади поверхности раздела. Авторы получили полуэмпирическую зависимость перепада давления от высоты колонны и газовой нагрузки. Также при высоких скоростях с высоким расходом газа наблюдался нестабильный мокрый поток и измерялся его перепад давления.

Айер и др. численно исследовали тепловые и потоковые характеристики 7 геометрий теплообменников TPMS и PNS [54]. Расчеты проводились для структуры, содержащей четыре последовательные ячейки из одного элемента и режим ламинарного течения. Авторы получили корреляции коэффициента трения для потока в каждой геометрии для диапазона чисел Рейнольдса 10-300.

Связь между гидравлическими параметрами, коэффициентом теплопередачи и прочностью конструкции была исследована Ченгом [55]. Авторы рассмотрели несколько топологий: тип W, тип P, тип D и тип G. Зависимость падения давления на единицу длины от низкого числа Рейнольдса (10-150) была рассчитана для одного ряда с восемью пористыми ячейками. Линии тока в геометрии типа P показывают зоны с очень медленной скоростью, перпендикулярной основному потоку. В своих последующих исследованиях [56] авторы определили, что структура TPMS была лучше простой кубической с точки зрения отношения падения давления к коэффициенту теплопередачи и прочности конструкции.

Толщина материала ячейки также оказывает значительное влияние на тепловые и гидравлические характеристики. Поток газа внутри структуры Schwarz D с переменной толщиной ячейки был исследован Аттарзаде [57]. Размеры ячеек составляли 10x10x10 мм и были помещены в трубку как кубическая структура 4x4x4. Численный анализ показал, что падение давления имеет квадратичную зависимость от толщины ячейки, особенно для меньшей пористости. Изменение пористости с 59 % до 88 % привело к увеличению падения давления более чем в пять раз. Кроме того, наблюдалось нелинейное снижение проницаемости при линейном уменьшении пористости TPMS.

Однако аналогично теплофизическим свойствам на данный момент отсутствует единая доступная методология описания процессов переноса массы в пористых материалах, что ограничивает прикладное применение этих материалов в высокотехнологической продукции и энергосберегающих

мероприятиях, в том числе образование в теплообменном оборудовании, каталитических вставках и костной инженерии.

Наряду с биомедицинскими и химическими приложениями, особый интерес представляет использование TPMS-структур в теплотехническом оборудовании. Как уже говорилось ранее, одной из принципиальных особенностей трижды периодических минимальных поверхностей является их способность разделять пространство на два взаимно непересекающихся, но при этом непрерывных объёма, каждый из которых обладает развитой связной структурой. Данное свойство принципиально отличает TPMS от традиционных пористых материалов и открывает новые возможности для их применения в рекуперативных теплообменных устройствах, где требуется эффективное разделение потоков теплоносителей при минимальной толщине теплопередающей стенки.

Соответственно, такие конструкции могут быть рассмотрены как новые, альтернативы традиционным теплообменным устройствам. Новые подходы к моделированию и созданию теплопередающей стенки, большая площадь, потенциально могут решить проблемы. В связи с этим исследователями активно рассматривается вопрос о разработке теплообменных устройств на основе TPMS. Так для исследования тепломассопереноса были изготовлены прототипы рекуперативных теплообменных устройств.

Теплообменники на основе TPMS изготовленные посредством аддитивных технологий [58,59] являются одними из наиболее перспективных. При заданной мощности насоса структуры TPMS обеспечивают более высокий коэффициент теплопередачи, чем РСНЕ, на 16-120 % [60]. Тиша и др. создали компактный теплообменник жидкость-жидкость с решеткой гироида с помощью аддитивного производства. Теплообменник был легким и компактным с пористостью 80 %, толщиной стенки ячейки 0,3 мм и отношением поверхности к объёму $670 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Авторы экспериментально определили коэффициент теплопередачи и число Рейнольдса и численно рассчитали распределение давления. Предложенная геометрия

теплообменника показала увеличение эффективности на 55 % по сравнению с термодинамически эквивалентным противоточным теплообменником. Более того, предлагаемый теплообменник на основе TPMS был в десять раз меньше противоточного. Общее падение давления было незначительным для одного размера ячейки структуры 4,6x4,6x4,6 мм, но не было исследовано для всей структуры.

По сравнению с традиционными конструкциями структуры TPMS демонстрируют превосходные характеристики с точки зрения сопротивления течению [56], площади поверхности [61], коэффициентов теплопередачи [62] и структурной прочности [63].

Наиболее перспективными среди, исследованных на данный момент, структур TPMS в качестве теплопередающей конструкции являются поверхности Primitive (P), Diamond (D), Gyroid (G) и Fischer Koch S (FKS).

Структура Primitive (P) демонстрирует самое низкое сопротивление потоку [56] и самую высокую эффективную теплопроводность среди структур "D" и "G" [64]. Использование структуры P в системе управления температурой аккумулятора с жидкостным охлаждением интенсифицирует теплопередачу на 25,2 %, по сравнению с однородными листовыми конструкциями [65].

Спроектированный теплообменник на основе Gyroid(G) обеспечил повышение эффективности на 55 % [66] и увеличение коэффициента теплопередачи более чем в два раза [67] по сравнению с термодинамически эквивалентным противоточным теплообменником. Непрерывное изменение направления потока, спиральные течения [68] и его перемешивание [56] с турбулизацией даже при низких скоростях потока [69] способствуют увеличению теплопередачи на 23-40 % типа по сравнению с "P" [70].

Гидравлические и теплопередающие свойства теплообменников со структурами TPMS Schoen-G и теплообменника PCHE (от англ. printed circuit heat exchanger) были сравнены Ли. Теплопередача в структуре "G" оказалась лучше, чем в "D" при числе Рейнольдса выше 16 000 [71]. Среднее падение

давления TPMS "G" при той же пористости на 43,2 % и на 38,86 % ниже, чем у "P" и "D" [72]. Линии тока в теплообменнике TPMS Schoen-G значительно более гладкие вниз по потоку, хотя более высокая скорость появляется в областях с большей кривизной. Линии тока около стенки захватываются в каждом углу в РСНЕ, и наблюдаются спиральные модели потока, что приводит к значительным гидравлическим потерям, но улучшению теплопередачи. Новый теплообменник TPMS Schoen-G показал более высокие теплопередающие свойства, чем РСНЕ, для заданной температуры на входе и граничных условий давления.

Халил и др. численно исследовали тепловые и гидравлические свойства радиатора со структурами TPMS Diamond-D и Gyroid-G [73]. Теплообменники имели пористые элементы с постоянным размером ячеек 10 мм и пористостью 80 %. Авторы сообщили, что в обеих геометриях зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса была линейной, а коэффициент трения Diamond-D был в четыре раза ниже, чем у Gyroid-G. Геометрия Gyroid-G была более эффективной, поскольку падение давления на единицу длины было на 20 % ниже, чем у Diamond-D. Однако тепловые характеристики были лучше для геометрии Diamond-D, поскольку коэффициент теплопередачи был на 26 % выше, чем у структуры Gyroid-G.

Структура Diamond(D) демонстрирует самый высокий коэффициент конвективной теплопередачи среди конструкций "G", Schoen I-WP(IWP) , "P"[54,74]. Конструкция на основе "D" демонстрирует увеличение коэффициента теплопередачи на 30 % по сравнению с "G" [72] при одной и той же пористости и выше на 85-207 %, чем у классической Fins-structure [75,76], или традиционной трубчатой [77,78]. Падение давления конструкции типа "D" больше, чем у конструкции типа "IWP", однако показатель PEC при одинаковой пористости конструкций у "D" больше, чем у "IWP", на 11,8 % [79] и больше, чем у "G", на 7 % [80].

Структура Fischer Koch S(FKS) обладает наибольшей удельной площадью поверхности среди других описанных выше TPMS [81].

Конвективная теплопередача в "FKS" больше чем в "D", "IWP", "G", и "P" и Fins на 73, 78, 81, 96 и 140 %, соответственно. Однако падение давления FKS является максимальным среди предложенных TPMS [82]. На рисунке 1.2 представлены площади поверхности для различных TPMS в 1 м^3 .

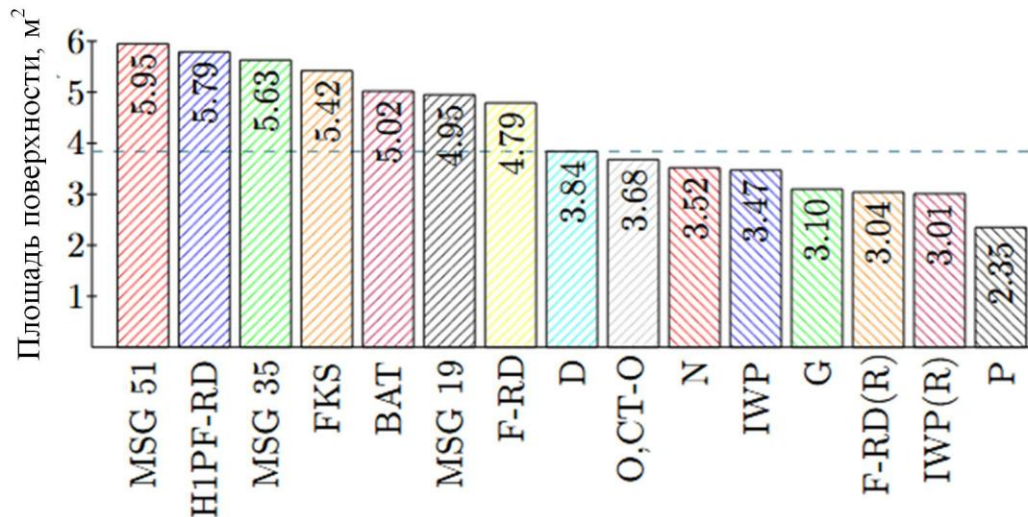


Рисунок 1.2. Площадь поверхности различных TPMS в 1 м^3

Безразмерный общий коэффициент теплопередачи, представленный коэффициентом j/f , показывает, что структура "FKS" превосходит структуры "P", "IWP", "G" и традиционные теплообменники [83,84], при одной и той же пористости на 245.1 %, 166 %, 64.8 %, 358.4 % соответственно.

Предыдущие исследования демонстрируют значительное увеличение эффективности при сокращении массы и объема теплообменного оборудования. Однако основное внимание направлено на CFD моделирование конкретных деталей теплообменника, а не всего теплообменника [81], или оптимизацию моделирования части теплообменника [59]. Количество работ посвященных экспериментальному исследованию теплообменных устройств с TPMS в качестве теплообменной поверхности сильно ограничено, о чем говорится в работах [85,86]. Реальные потери давления теплообменника TPMS выше на 10-70 % чем при CFD из-за шероховатости поверхности [87].

У теплообменных TPMS устройств отсутствовали коллекторы. В работе по изучению производительности модели сосудистого канала выявлено, что

это может приводить к неравномерному распределению потока [88]. Очевидно, это может оказывать влияние на падение давления, реальную площадь теплообмена и другие параметры при проектировании TPMS теплообменных устройств.

Более того, модели разных TPMS теплообменников часто сравниваются при одинаковой пористости [72,79,83,89], но различных толщинах теплопередающей стенки. Тепловые характеристики теплообменников на основе структур TPMS чувствительны к толщине стенок [57], диаметру пор [61], и периодической длине [5, 89, 90]. Так, уменьшение толщины стенки структуры значительно повышает характеристики теплообменника и уменьшает влияние обратных течений [57], а уменьшение размера периода Level Surface Equation приводит к более равномерному распределению температуры [91]. Изменение толщин стенки неизменно приводит к изменениям термического сопротивления, потерь давления, эксплуатационных ограничений и других соответствующих аспектов [61]. Исходя из этого важно сравнивать различные виды TPMS при одинаковой толщине теплопередающей стенки и одинаковом периоде Level Surface Equation.

В то же время геометрические особенности TPMS теплообменников приводят к существенному усложнению течения жидкости и распределения температурных полей, что делает применение классических гидродинамических и теплопроводных моделей затруднительным и требует разработки специализированных методов расчёта.

Исходя из вышесказанного, структуры TPMS могут быть внедрены в энергетическую, машиностроительную и другие отрасли. На данный момент существует несколько сдерживающих факторов для прикладного применения пористых материалов, основанных на TPMS. В частности, для использования TPMS материалов в качестве оребрения, разделяющей теплопередающей стенки в рекуперативном теплообменном оборудовании, новых устройств передачи или хранения тепла с фазовым переходом, необходимо оценить

теплофизические свойства таких пористых материалов. Несмотря на значительный объём работ, посвящённых тепло- и массообмену в пористых средах, существующие теоретические модели и экспериментальные данные в основном ориентированы на материалы со случайной или квазислучайной поровой структурой. Применение классических моделей теплопроводности и гидродинамики (Максвелла, Брюггемана, Козени-Кармана, Эргуна и др.) к пористым материалам с упорядоченной макроструктурой, в частности на основе трижды периодических минимальных поверхностей, не обеспечивает требуемой точности и универсальности.

В большинстве опубликованных работ расчёт теплофизических и гидродинамических характеристик TPMS-материалов выполняется для отдельных геометрий и частных случаев, без формирования обобщённой методологии, связывающей параметры структуры с эффективными коэффициентами переноса. Экспериментальные исследования, как правило, носят фрагментарный характер и затрудняют сопоставление результатов, полученных различными авторами.

Для внедрения TPMS материалов в качестве оребрения не менее важную роль, чем теплопроводность, играет определение зон термического напряжения, площади поверхности оребрения, векторных полей скорости, локальных скоростей внутри оребрения, формы, потерь давления потока теплоносителя, а также застойных областей.

Широкая область возможного применения структур TPMS стимулирует исследовательский интерес в этой области. Научные основы тепломассопереноса в моделях TPMS могут позволить разработать новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования.

Учитывая изложенное, в рамках настоящей диссертационной работы основное внимание уделяется разработке комплексного подхода определения теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой на основе трижды периодических

минимальных поверхностей, определению обобщённых зависимостей теплофизических и гидродинамических характеристик от их геометрических параметров и свойств материала каркаса, определению влияния геометрических параметров структуры на процессы тепло- и массопереноса пористых материалов на основе TPMS

2. Определение теплофизических свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой

В главе 2 диссертации описаны методы генерации трижды периодических минимальных поверхностей и подходы формирования геометрических моделей с упорядоченной структурой в системах САПР. Также определены теплофизические свойства пористых материалов с упорядоченной макроструктурой.

В п.2.1 описаны различные методологии создания трижды периодической поверхности в системах САПР с последующим формированием твердотельной модели для проведения как численных, так и экспериментальных исследований. В параграфе также представлены все основные геометрические (характерные) размеры, используемые при описании процессов переноса в рамках текущей диссертационной работы.

П.2.2 посвящен описанию классических методологий определения теплофизических свойств пористых материалов. Представлено краткое описание предлагаемых подходов определения теплофизических свойств материалов с упорядоченной структурой.

В п.2.3 представлены подходы численного моделирования процесса переноса тепловой энергии в пористых материалах на основе TPMS. Рассмотрены 7 различных структур TPMS, изготовленных из различных материалов. Подходы основаны на объединении нескольких известных методов определения свойств пористых материалов, в частности метода репрезентативного элементарного объема, гомогенизации среды и нормализации по теплопроводности материала. Совмещение перечисленных методов позволяет определить коэффициенты переноса на основе обобщения результатов численного и натурального эксперимента.

П.2.4 посвящен разработке лабораторного стенда по определению эффективной теплопроводности для натурной верификации результатов численного моделирования.

В параграфе 2.5 представлены результаты натурального эксперимента по определению теплопроводящих свойств на различных лабораторных установках, в том числе на разработанном стенде, на сертифицированных экспериментальных установках ИТП-МГ4 «100», ИТП-МГ4 «250».

В параграфе 2.6 представлены обобщенные зависимости определения эффективной теплопроводности для 16 TPMS структур в зависимости от геометрических параметров, направления распределения теплового потока, свойств исходного безпористого материала. В п.2.6 рассматривается исключительно твердотельный каркас пористого материала без включения второго компонента в межпоровое пространство.

В параграфе 2.7 определены зависимости эффективной теплопроводности для материалов с ортотропными теплофизическими свойствами. Выполнено сравнение трех структур TPMS по теплопроводящим свойствам в том числе Schoen F-RD(R), Schoen I-WP(R) и CLP.

В параграфе 2.8 рассмотрено влияние воздуха в межпоровом пространстве на теплопроводящие свойства материалов на основе TPMS. Определены материалы, в которых исключение влияния воздуха в межпоровом пространстве не приводит к существенным погрешностям.

В п.2.9 представлено распределение тепловых потоков в пористых материалах на основе TPMS. Определены области с максимальным и минимальными тепловыми потоками и значительными температурными напряжениями, которые важно учитывать при разработке ребрения тепломассообменного оборудования.

П.2.10 посвящен рассмотрению композиционного материала с решеткой на основе TPMS. В качестве композита рассматривается структура из металла и керамики.

П.2.11 посвящен определению эффективной теплопроводности TPMS структуры Primitive посредством теоретического анализа. Результаты верифицировались с девятью сторонними моделями, что обеспечивает полноценную верификацию результатов теоретического анализа.

В параграфе 2.12 рассмотрены теплофизические свойства двух новых TPMS структур, полученных на основе генерации трехкратно периодических поверхностей, при помощи кристаллических структур химических соединений. По разработанной методике определены зависимости эффективной теплопроводности от характерных размеров структуры и свойств исходного беспористого материала.

2.1. Формирование твердотельной модели материалов с упорядоченной структурой в среде САПР

Существует большое количество разнообразных материалов с упорядоченной макроструктурой. Большинство САПР комплексов имеет модули для формирования таких макроструктур в автоматическом режиме, однако новые материалы, основанные на TPMS не добавлены в библиотеки таких САПР комплексов и требуют отдельного уникального подхода для их создания. Преимущества TPMS материалов над классическими материалами с упорядоченной структурой подробно рассмотрены в первой главе текущей диссертационной работы. В связи с этим в рамках текущей работы рассматриваются несколько основных подходов формирования твердотельной модели основанные на неявном методе и примеры их использования для исследований свойств материалов.

Ряд программ, основанных на программном обеспечении MATLAB, были созданы для генерации решеток TPMS в формате .stl. Например, TPMS Designer [30] – это инструмент, основанный на программном обеспечении MATLAB, который позволяет быстро создавать, визуализировать и анализировать неявно определенные структуры с использованием строгих математических уравнений. Программное обеспечение позволяет

параметрически корректировать размер, соотношение сторон, поворот и разрешение структуры, хотя количество доступных поверхностей не превышает десяти.

Джонс [92] использовал модель, созданную в TPMS Designer, для изучения механических свойств материалов на основе TPMS, и автор определил объемную долю в качестве ключевого параметра. Рамирес [93] сгенерировал конструкции градиентной плотности с помощью TPMS Designer и в результате предложил общую методологию для проектирования материалов на основе TPMS.

Другой модуль проектирования TPMS на основе MATLAB "MSLattice" был разработан Аль-Кетаном и Абу Аль-Рубом [94]. MSLattice используется для создания различных топологий TPMS с заданными геометрическими параметрами, более того, возможна гибридизация нескольких структур TPMS. Это программное обеспечение использовалось Хашими [95] для изучения механических свойств TPMS для приложений инженерии костной ткани. MSLattice также использовался Вебером [96] для дальнейшего изучения использования пористых материалов TPMS в качестве легких структур для поглощения энергии. Существуют и другие программные продукты для создания решеток TPMS на основе MATLAB, включая FLatt Pack [97] и Lattice Karak [98].

В дополнение к различным модулям на базе MATLAB для генерации структур TPMS, существует также несколько независимых программ. Одной из таких программ является "ASLI", разработанная Пересом-Бозремой [99] для создания ячеистых твердых структур. Она была специально создана для проектирования решетчатых структур в инженерии скелетных тканей и позволяет выбирать подходящие типы TPMS и геометрические размеры ячеек.

Программа RegionTPMS [100], разработанная Karakoç, реализует алгоритм для генерации решетки TPMS. Она использует точные значения пористости и явно заданные поверхностные функции в качестве входных

параметров. Структура твердого тела определяется в диапазоне локальных минимумов и максимумов TPMS.

Аналогичная функциональность имеется в программном обеспечении, разработанном Iamsamang [101], которое позволяет контролировать геометрические параметры, пористость и соотношение площади поверхности TPMS. Однако полученные модели требуют дополнительной обработки для целей моделирования CFD.

Другим заметным программным продуктом для проектирования решеток TPMS является Surface Evolver [35,36]. Он основан на методе Плато, который требует описания границы поверхности, как правило, в форме многоугольника в R3. Затем поверхность итеративно уточняется для минимизации площади полигональной сетки, которая окружает границу, с учетом ограничений. Эти ограничения могут включать геометрические положения вершин или интегрированные величины. Полигональное уточнение используется для создания более точной триангуляции. Поверхность уточняется до тех пор, пока ни одна вершина триангуляции не может быть перемещена дальше для уменьшения ее площади. Для улучшения эволюционного процесса Surface Evolver включает несколько операций, в том числе структуризацию и усреднение вершин, что увеличивает стабильность CAE моделирования. Эти методы в совокупности способствуют общему уточнению и оптимизации эволюционирующей поверхности. В настоящее время Surface Evolver предлагает более 50 различных поверхностей.

Как уже отмечалось ранее программный продукт Surface Evolver использовался для формирования геометрии в различных направлениях исследований свойств и процессов переноса в материалах TPMS. Пуреслами [102] исследовал поток жидкости и теплопередачу в геометрии TPMS, созданной Surface Evolver. Браун [103] использовал Surface Evolver для эволюции структуры цеолитов в TPMS. Автор успешно установил связь между цеолит-шаблонированными углеродами и шварцитами, которые являются материалами на основе углерода с отрицательной гауссовой кривизной.

Преобразование кубической решетки в Surface Evolver позволяет создать основу для тканевой инженерии. Раджагопалан [24] связал клеточную теорию Шванна (1838) с открытием Шварца в 1865 году. В результате он получил развитую жизнеспособную морфологию, которая глубоко повлияла на миграцию клеток и репликацию роста тканей на макроуровне. Применение Surface Evolver представляет собой важный шаг на пути к созданию оптимальных аналогов биоморфных тканей. Впоследствии Колкен [103] продолжил работу в этом направлении, также используя Surface Evolver для поиска материалов с превосходными механическими свойствами.

Вольгемут [21] был первым, кто предложил методологию создания поверхностей уровня, которые аппроксимируют трехпериодические поверхности с постоянной средней кривизной. Используя этот разработанный подход и аппроксимируя геометрические модели, полученные с помощью Surface Evolver, авторы вывели уравнения для описания TPMS. Впоследствии эти уравнения послужили основой для других модулей генерации TPMS.

В этом исследовании Surface Evolver был выбран для генерации TPMS из-за его обширного набора инструментов обработки моделей. Широкий набор уравнений TPMS, полученных из Surface Evolver, и множество доступных TPMS делают Surface Evolver универсальным инструментом для создания топологических структур. Кроме того, программный пакет зарекомендовал себя для исследования TPMS, поскольку он позволяет создавать TPMS с точностью, необходимой для моделирования CAE. Весь процесс формирования твердотельной структуры схематично представлен на рисунке 2.1.

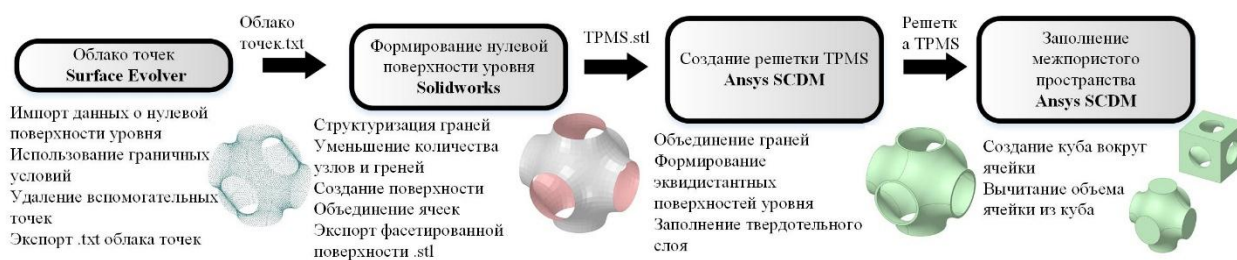


Рисунок. 2.1.1. Схема создания геометрии TPMS в системах САПР

Процесс получения модели поверхности САПР начался с загрузки входных данных из библиотеки программного обеспечения с открытым исходным кодом Кена Брейка [35,36]. С помощью встроенных функций был построен кубический каркас из одной элементарной ячейки. Построенный каркас подвергся итеративной эволюции для достижения поверхности с минимальной площадью и минимальной средней кривизной. Полученная модель нулевой поверхности уровня была экспортирована из программного обеспечения в виде облака точек. Облако точек импортируется в Blender для создания поверхности с минимальным количеством полигонов. Количество вершинных точек было уменьшено для упрощения геометрии при сохранении целостности топологии TPMS. Уменьшение количества граней было достигнуто путем реорганизации и упорядочения точек для дальнейшей триангуляции. Обработанная модель импортируется в SpaceClaim для создания вычислительной геометрии.

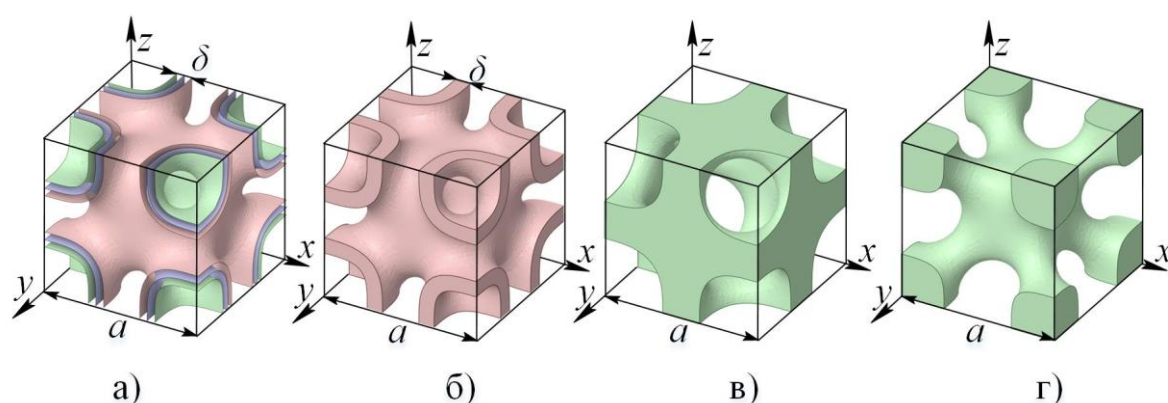


Рисунок. 2.1.2. Формирование геометрии по поверхностям уровня: а) нулевая и две эквидистантные поверхности уровня; б) решетка TPMS, ограниченная двумя эквидистантными поверхностями уровня; в) внутреннее межпоровое пространство; г) внешнее межпоровое пространство

На рисунке 2.1.2 представлена нулевая поверхность уровня Schoen IWP, и две поверхности уровня отдаленные от нулевой на равное расстояние $\frac{\delta}{2}$. В таком случае эквидистантные поверхности описываются уравнением:

$$2 \left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right] - \left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) \right] = \pm \frac{\delta}{2} \quad (2.1.1)$$

Пространство, ограниченное двумя эквидистантными поверхностями уровня, образует твердотельную толщину решетки. Стенка разделяет пространство на два непересекаемых объема/лабиринта.

$$f(x, y, z, a) = \begin{cases} f > \delta/2 \forall f \in \Omega_1 \\ |f| \leq \delta/2 \forall f \in \Omega_2, \\ f < \delta/2 \forall f \in \Omega_3 \end{cases} \quad (2.1.2)$$

где, Ω_1, Ω_3 - межпоровое пространство. Для удобства построения и обработки моделей используется элементарная ячейка с периодом поверхности уровня a . Вся топология состоит из таких повторяющихся ячеек, а при построении пористой среды элементарные ячейки соединяются ортогонально во всех трех направлениях.

Таким образом для описания процессов переноса и прогнозирования свойств двумя характерными размерами является период поверхности уровня (a) и параметра смещения двух уравнений поверхности уровня (δ). Объединение этих параметров возможно с использованием безразмерной относительной толщины:

$$\chi = \frac{\delta}{a} \quad (2.1.3)$$

Относительная толщина остается постоянной при простом масштабировании структуры и может быть использована для изучения тепло- и массопереноса в структурах TPMS.

Пористость является фундаментальной переменной при сравнении и определении аналитических зависимостей свойств пористых материалов. Пористость представляет собой долю пустот в общем объеме материала.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_c}{V_{\text{Куб}}}, \quad (2.1.4)$$

где V_c – объем решетки, м³; $V_{\text{куб}} = a^3$ - объем куба в который вписана ячейка. При пористости, приближающейся к нулю, материал становится сплошным и однородным без каких-либо пустот или включений в его объеме.

Для различных решеток TPMS пористость можно представить в виде уравнения:

$$\varepsilon = 1 - k_i \chi, \quad (2.1.5)$$

где k_i – коэффициент учитывающий особенности геометрии каждого вида TPMS. Коэффициенты k_i для различных TPMS представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 Коэффициенты k_i для определения пористости от χ

Название TPMS	k_i
Primitive (P)	2.3
Schoen's Hybrid-1 P,F-RD (H1PF-RD)	2.73
Gyroid (G)	2.81
Schoen's I-WP(R) (I-WP(R))	2.95
Neovius; Schoen's I-WP (I-WP)	3.4
Diamond (D)	4.04
Fischer-Koch S Surface (FKS)	4.56
Schoen's Manta Surface of Genus 19 (MSG 19)	4.58
Schoen's Batwing Surface	4.89

2.2. Методы определения эффективной теплопроводности пористых материалов

Теплопроводность пористых материалов зависит от двух основных факторов: теплопроводности материала, из которого состоит основная структура, и теплопроводности порового заполнителя (воздуха или другого газа/жидкости). Теплопроводность пористого материала можно оценить с помощью эффективной модели среды, которая учитывает пористость каждого из материалов и их соответствующие теплопроводности.

В простейшем случае, когда пористый материал и конструкционный материал параллельны, теплопроводность пористого материала можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_m(1 - \varepsilon) + \lambda_2 \varepsilon, \quad (2.2.1)$$

где, λ_m, λ_2 – теплопроводности жидкости и твердого материала соответственно, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$; ε – пористость.

Параллельная модель демонстрирует теоретически максимальные значения возможной эффективной теплопроводности материалов при определенной пористости. Существуют более точные модели, такие как модель Максвелла-Эйкена [104,105]:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_m \frac{2\lambda_m + \lambda_2 - 2\varepsilon(\lambda_m - \lambda_2)}{2\lambda_m + \lambda_2 + \varepsilon(\lambda_m - \lambda_2)} \quad (2.2.2)$$

И модель Эшби [106]:

$$\lambda_{эфф} = \frac{\lambda_m}{3} (1 - \varepsilon + 2(1 - \varepsilon)^{\frac{3}{2}}) + \lambda_2 \varepsilon \quad (2.2.3)$$

Однако эти модели не учитывают распределение и размеры пор. На основе моделей Максвелла-Эйкена была разработана модель Нана [107,108], которая учитывает распределение размеров пор или частиц и межфазные тепловые сопротивления. Модели Максвелла-Эйкена, Эшби и Нана справедливы для сферических пор. В общем случае для теплопередачи в структурах TPMS эти уравнения неприменимы, поскольку форма пор

существенно отличается от сфер, и не учитываются другие геометрические особенности материалов. Однако в частном случае, а именно для теплопередачи в структурах Primitive, уравнения могут быть использованы для проверки результатов, поскольку материалы на основе Primitive имеют схожие сферические поры.

Модель Хашина–Штрикмана обозначает нижний и верхний предел теплопроводности материала для любых геометрий пористых материалов, в том числе материалов на основе TPMS [109,110]:

$$\begin{aligned}\lambda_{эфф,макс} &= \lambda_m \left[\frac{2\lambda_m + \lambda_2 - 2(\lambda_m - \lambda_2)\varepsilon}{2\lambda_m + \lambda_2 + (\lambda_m - \lambda_2)\varepsilon} \right] \\ \lambda_{эфф,мин} &= \lambda_2 \left[\frac{2\lambda_2 + \lambda_m - 2(\lambda_2 - \lambda_m)(1-\varepsilon)}{2\lambda_2 + \lambda_m + (\lambda_2 - \lambda_m)(1-\varepsilon)} \right]\end{aligned}\quad (2.2.4)$$

Все предложенные модели позволяют определять теплопроводность изотропных материалов, в то время как некоторые TPMS материалы имеют ортотропные свойства, и требуется определение теплопроводности в различных направлениях. В связи с этим ставится вопрос о разработке нового подхода определения теплопроводности материалов с упорядоченной структурой, в частности материалов на основе TPMS.

Для некоторых материалов с упорядоченными структурами возможен другой подход определения эффективной теплопроводности материала от геометрических характеристик и свойств исходного материала. Уравнение теплопроводности в твердых материалах согласно закону Фурье описывается следующим уравнением:

$$\bar{q} = -\lambda_m \nabla T, \quad (2.2.5)$$

где \bar{q} – вектор теплового потока $\frac{Вт}{м^2}$; λ_m – симметричный тензор теплопроводности второго ранга, $\frac{Вт}{м^{\circ}C}$; ∇T – градиент температурного поля.

Принимая во внимание закон сохранения энергии, дифференциальное уравнение теплопроводности [111] можно выразить следующим образом:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \wedge \text{grad} T \pm \rho F(x, y, z, t) \quad (2.2.6)$$

При решении дифференциального уравнения (2.2.7) аналитическим методом [238, 239] возникает ряд трудностей. Развитие технологий позволяет получать численные решения задач теплофизики с требуемой точностью за сравнительно короткое время [112]. При создании численных математических моделей хорошо зарекомендовало себя большое количество разнообразных программных комплексов, таких как ANSYS [113-115], OpenFoam [116], Comsol [117,118].

Для изучения свойств композитных и пористых структур в рамках компьютерного моделирования нередко используется понятие представительной элементарной ячейки (RUC, от английского «Representative Unit Cell»). Это означает, что свойства определенного элементарного объема, в данном случае элементарной ячейки, показанной на рисунке 2.2.1, полностью сохраняются во всей структуре. Этот метод с элементарной ячейкой TPMS в качестве минимальной ячейки/объема использовался и при решении других задач термодинамики [119, 120]. Метод также использовался в исследованиях в других областях, таких как электротехника [121] и механика [122].

Совместно с численными методами, и методом RUC используются методы усреднения теплофизических характеристик по ортогональным сечениям элементарной ячейки. В рамках исследования применение гомогенизации обосновано изотропными и ортотропными свойствами материалов на основе TPMS.

Тепловой поток через площадь поверхности на грани ячейки будет определяться соотношением:

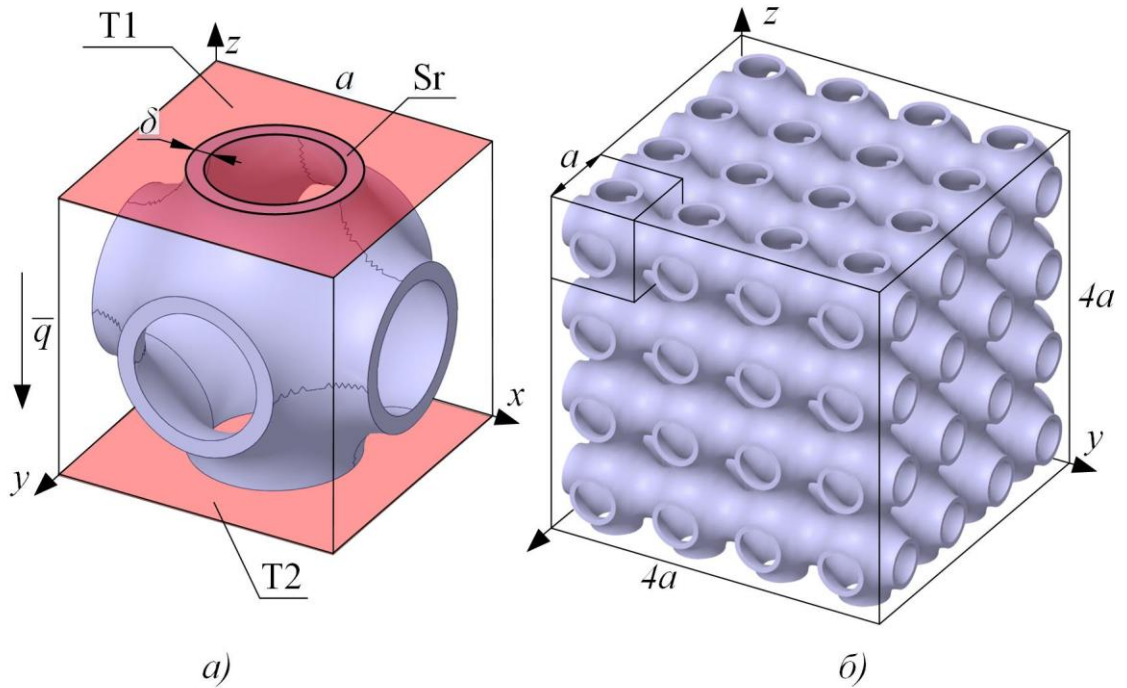


Рисунок 2.2.1. А) граничные условия на примере ячейки типа Primitive; б) решетка из ячеек типа Primitive

$$Q_r = q_r S_r, \quad (2.2.7)$$

где q_r – удельный тепловой поток, проходящий через сечение ячейки S_r , Вт m^{-2} (рис. 2.2.1 а); S_r – площадь поверхности на грани ячейки через которую проходит тепловой поток. Для исследования тепловых свойств пористого материала ячейка TPMS была заменена кубом с длинами ребер, равными a и эквивалентными теплофизическими свойствами. В этом случае тепловой поток через сечение TPMS площадью S_r будет равен потоку в том же направлении через куб с длиной ребра a . Коэффициент эффективной теплопроводности пористых материалов согласно гомогенизированной модели стационарного режима переноса тепла при граничных условиях первого рода по закону Фурье описывается уравнением:

$$\lambda_{эфф} = \frac{-q_r S_r}{a \Delta T}, \quad (2.2.8)$$

где ΔT – разность температур между противоположными гранями ячейки в направлении переноса энергии, °C; a – размер периода поверхности уровня, м. Тепловой поток q_r и площадь поверхности S_r для различных

геометрий и материалов определяется при компьютерном моделировании процесса переноса энергии в программном комплексе ANSYS. Остальные грани и поверхности структуры в рамках моделирования считаются адиабатными, конвекция и радиация и теплопроводность второго компонента в структуре в такой постановке задачи не учитывается. Численное моделирование позволяет оценивать теплопроводность пористых структур для различных материалов, однако особое внимание уделено материалам, используемым в аддитивных технологиях, поскольку на данный момент изготовление материалов с такой упорядоченной структурой возможно посредством 3D печати. Теплопроводность материалов, из которых изготовлена пористая структура принималась постоянной, независимой от температуры.

2.3. Численное моделирование переноса тепловой энергии в пористых материалах на основе TPMS

Целью параграфа 2.3 является определение теплопроводящих свойств в конструкциях на основе топологии TPMS от свойств материала и геометрических характеристик решетки.

В пористых материалах на основе TPMS можно выделить три основные плоскости симметрии: S_x , S_y и S_z (рис. 2.3.1)

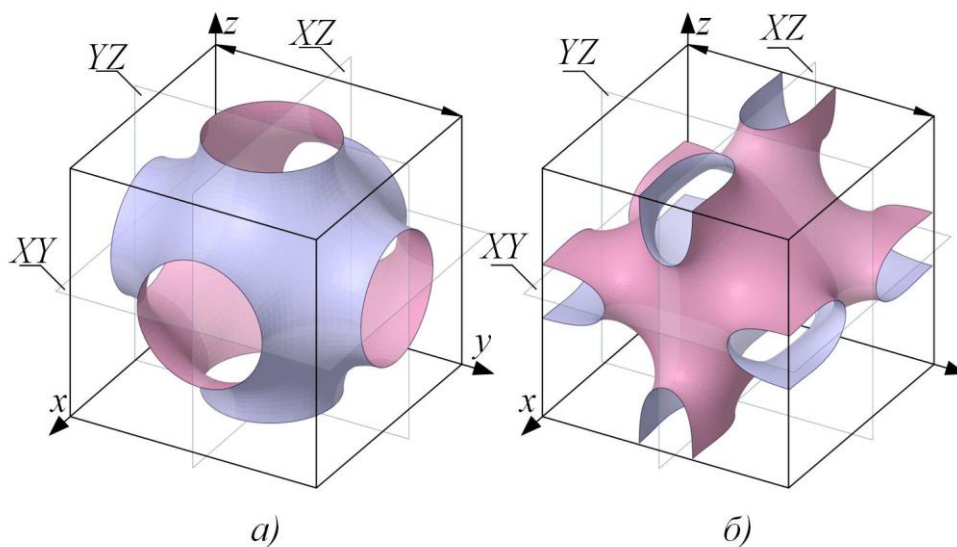


Рисунок 2.3.1. Плоскости симметрии TPMS: а) поверхность типа Primitive б) поверхность типа Schoen's I-WP(R)

Для большинства TPMS материалов плоскости симметрии S_x , S_y и S_z идентичны, так как при повороте этих геометрии на 90 градусов вокруг оси, расположенной на пересечении плоскостей S_x , S_y и S_z , происходит полное совпадение всех точек геометрии. Для материалов, основанных на TPMS с тремя идентичными плоскостями, в частности материал на основе поверхность типа Primitive (см. рис. 2.3.1 а), достаточно рассмотреть процесс переноса в одном из направлений симметрии, поскольку изменение направления будет приводить к решению той же задачи. Однако некоторые TPMS материалы обладают несколькими отличающимися плоскостями симметрии. Так на рисунке 2.3.1 б представлена поверхность Schoen's I-WP(R), для которой плоскости S_y и S_z идентичны и отличаются от плоскости S_x . Таким образом, можно сказать, что свойства материала на основе Schoen I-WP(R) является ортотропными, а главные компоненты тензора теплопроводности равны, т. е. $\lambda_y = \lambda_z$ но отличаются от λ_x . В таком случае необходимо аналогичное исследование для определения других элементов тензора теплопроводности в главной диагонали, что подробнее будет рассмотрено в параграфе 2.7.

Уравнение переноса тепла в конструкции TPMS в общем виде в декартовой системе координат может быть записано как:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (2.3.1)$$

где, T – температура, °C; ρ – плотность материала, кг м⁻³; c – удельная теплоёмкость материала, Дж кг⁻¹ °C⁻¹; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт м⁻¹ °C⁻¹; Q – объемная плотность тепловых источников, Вт м⁻³.

В случае, если свойства материала приняты постоянными и независимыми от температуры, а источники тепла отсутствуют, уравнение (2.3.1) может быть записано:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.3.2)$$

При решении уравнения 2.3.2 для переноса тепла внутри TPMS конструкций традиционными аналитическими методами [123-126] возникает ряд трудностей. Развитие технологий компьютерного моделирования позволяет получать численные решения задач теплофизики с требуемой точностью за сравнительно короткое время. По этой причине для дальнейшего исследования теплофизических свойств были выбраны численные методы конечных элементов, реализованные в программном комплексе ANSYS.

Таблица 2.7.1 Граничные условия

Задача a (OX)	Температура	Тепловой поток
Верх	$T_B = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} = -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
Низ	$T_H = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} = -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
Поверхность ячейки	$T_{ст} = T(x,y,z)$	$q_{\perp cm} = 0$
Задача b (OY/OZ)	Температура	Тепловой поток
Верх	$T_B = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
Низ	$T_H = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
Поверхность ячейки	$T_{ст} = T(x,y,z)$	$q_{\perp cm} = 0$

Геометрическая модель TPMS структур экспортировалась в модуль "Steady-State Thermal" для формирования расчетной сетки и задания граничных условий (см. рис. 2.3.2, б) согласно таблице 2.7.1. Разница температур на двух противоположных сторонах RUC объема составляет 24°C . В текущем параграфе были рассмотрены элементарные ячейки поверхностей Primitive (P), Neovius (N) и Schoen's I-WP (IWP), Fisher-Koch S (FKS), Diamond (D), Gyroid (G).

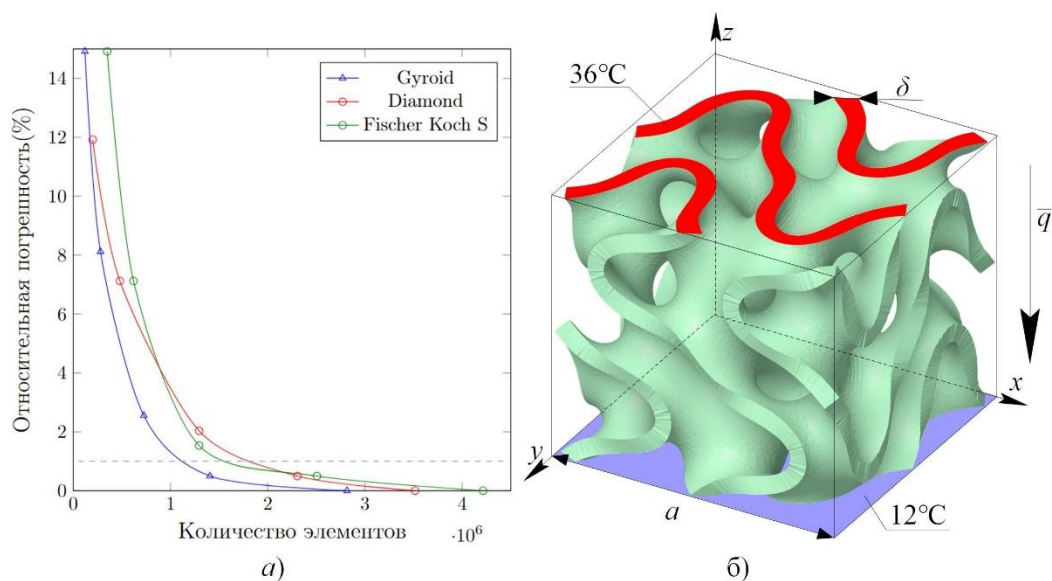


Рисунок 2.3.2. САЕ моделирование: а) анализ чувствительности сетки; б) модель FKS с заданными граничными условиями

Анализ чувствительности сетки проводился для измерения точности моделирования в отношении количества ячеек сетки. Были приняты и сравнены пять размеров элементов сетки для каждой геометрии TPMS. Результат эффективной теплопроводности полученный на самой мелкой сетке, сравнивался с результатами, полученными на других сетках, и оценивалась процентная разница. Относительная погрешность рассматриваемого параметра рассчитывается с использованием формулы 2.3.3, использованной для оценки независимости сетки в аналогичном исследовании [51].

$$\theta = \frac{|\lambda_{fine} - \lambda_i|}{\lambda_{fine}} \quad (2.3.3)$$

Результаты исследования независимости сетки представлены на рисунке 2.3.2а. Таким образом, для расчета использовались модели, процентное расхождение тепловых потоков которых было меньше 1 % для экономии вычислительного времени и сохранения точности расчета.

В данном параграфе рассмотрены пористые структуры, состоящие из четырёх видов пластика (PETG, ABS, PLA, PHP). Эти пластики наиболее распространены в аддитивных технологиях. Теплопроводность PETG, ABS,

PLA, PHP составляет 0.2, 0.15, 0.12, 0.375, соответственно. В работе предполагается, что свойства материала не зависят от температуры и считаются постоянными.

Результаты численного моделирования переноса тепла в конструкциях Primitive (P), Neovius (N) и Schoen's I-WP (IWP) для материалов с теплопроводностью сплошного тела от 1 до 400 Вт/(м·°С) при переменных геометрических параметрах сведены в таблицы опубликованные на портале Mendeley (<https://data.mendeley.com/datasets/v8yy56w3m2/2>). В таблице 2.3.1 представлены результаты моделирования переноса тепла в конструкциях, изготовленных из пластиков, используемых в аддитивных технологиях.

Таблица 2.3.1 Результаты численного моделирования переноса тепла в конструкциях P, N, IWP, FKS, D, G.

Теплопроводность ·10³, Вт м⁻¹ °С⁻¹

Вид TPMS		Primitive (P)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал	Толщина δ, мм	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
	0.1	4.71	5.862	6.125	14.43	3.724	4.612	4.23	11.32	2.607	3.216	4.23	7.81
	0.2	9.57	12.02	12.71	29.96	7.632	9.512	8.95	23.75	5.399	6.72	8.95	16.65
	0.3	14.44	18.05	19.26	45.49	11.54	14.46	13.64	36.17	8.191	10.22	13.64	25.52
	0.4	19.39	24.24	25.82	61.02	15.45	19.35	18.33	48.60	10.98	13.77	18.33	34.4
	0.5	24.25	30.35	32.37	76.55	19.36	24.24	23.01	61.02	13.77	17.26	23.01	43.27
	0.6	29.20	36.46	38.92	92.08	23.27	29.13	27.69	73.44	16.57	20.75	27.69	52.15
	0.7	34.95	42.57	45.48	107.6	27.18	34.02	32.37	85.87	19.36	24.24	32.37	60.9

Вид TPMS		Neovius (N)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал	Толщина δ, мм	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
	0.1	7.20	9.30	12.30	22.60	6.00	7.50	9.70	17.90	4.00	5.20	6.70	13.00
	0.2	14.80	18.20	24.80	45.70	11.80	14.80	19.20	36.00	8.30	10.40	13.70	26.80
	0.3	21.70	27.90	37.00	69.20	17.64	22.05	29.40	55.13	12.50	15.60	20.50	38.80
	0.4	29.60	36.50	48.50	92.00	23.10	29.00	39.50	72.90	17.10	21.20	27.40	52.30
	0.5	36.60	45.50	61.40	114.8	29.50	37.20	49.70	91.20	21.40	26.50	34.40	66.30
	0.6	43.80	54.60	73.40	137.1	35.28	44.10	58.80	110.3	25.30	30.90	42.20	78.20
	0.7	51.70	63.90	85.80	161.2	41.30	51.45	68.60	128.8	29.20	36.40	48.60	91.70

Теплопроводность $\cdot 10^3$, Вт $\text{м}^{-1} \text{°C}^{-1}$

Вид TPMS		Schoen's I-WP (I-WP)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал		PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
Толщина δ , мм	0.1	7.10	8.90	12.30	22.80	5.90	7.00	9.80	18.10	4.00	5.00	6.80	12.50
	0.2	14.30	18.00	24.10	45.10	11.80	14.10	19.30	35.50	8.20	10.10	13.50	25.30
	0.3	21.50	27.10	36.00	68.30	17.28	21.60	28.80	54.00	12.10	15.30	20.20	38.40
	0.4	29.10	35.80	48.40	91.10	23.40	29.00	38.30	71.00	16.70	20.30	27.00	51.90
	0.5	36.20	44.50	59.50	111.5	28.70	36.50	47.90	88.90	20.40	25.30	34.40	63.80
	0.6	43.20	54.10	72.30	134.8	34.56	43.20	57.60	35.50	24.60	30.80	41.70	76.50
	0.7	50.50	62.50	83.90	158.6	40.00	50.20	67.70	127.3	28.90	35.60	48.50	89.80

Вид TPMS		Fisher-Koch S (FKS)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал		PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
Толщина δ , мм	0.1	11.50	14.40	19.40	35.60	9.10	11.20	15.40	28.80	6.50	8.10	10.80	20.40
	0.2	22.80	28.70	38.40	71.00	18.30	22.60	30.70	58.20	13.00	16.10	21.50	39.70
	0.3	33.90	42.80	57.00	106.5	27.30	34.30	45.70	85.70	19.50	24.20	33.20	62.60
	0.4	46.00	56.40	75.80	141.7	36.90	46.60	60.40	111.9	26.00	32.30	43.40	82.30
	0.5	56.60	70.70	94.20	177.4	45.50	56.20	76.20	140.7	32.80	41.30	53.70	101.7
	0.6	69.40	85.10	115.7	215.1	54.80	67.70	92.30	171.6	39.10	48.70	65.00	123.0
	0.7	80.70	99.00	132.3	248.2	63.70	80.40	107.3	198.7	45.60	57.50	75.80	142.8

Теплопроводность $\cdot 10^3$, Вт $\text{м}^{-1} \text{°C}^{-1}$

Вид TPMS		Diamond (D)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал	Толщина δ , мм	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
	0.1	8.20	10.10	13.80	25.70	6.50	8.30	10.90	20.70	4.70	5.90	7.90	15.10
	0.2	16.60	20.70	27.30	51.20	13.10	16.60	22.00	40.70	9.40	11.70	15.80	29.60
	0.3	24.60	30.70	41.20	76.30	19.40	24.60	33.10	61.90	14.30	17.50	23.80	43.70
	0.4	32.20	40.70	54.00	102.9	26.30	33.00	44.20	81.10	18.90	23.30	31.40	59.30
	0.5	41.40	51.40	68.50	126.9	32.50	40.80	54.60	104.0	23.60	29.50	39.10	73.40
	0.6	49.00	61.20	81.50	155.8	39.60	49.10	65.50	123.2	27.90	35.40	47.20	87.30
	0.7	57.50	71.20	95.60	178.9	46.70	56.80	76.30	147.4	32.60	40.90	55.10	105.1

Вид TPMS		Gyroid (G)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал	Толщина δ , мм	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
	0.1	5.90	7.20	9.70	18.50	4.70	5.80	7.70	14.60	3.30	4.20	5.50	10.30
	0.2	11.60	14.60	19.60	36.60	9.40	11.80	15.70	29.30	6.60	8.20	11.20	21.00
	0.3	17.10	21.80	28.80	53.10	14.00	17.60	23.40	43.30	10.00	12.30	16.90	31.20
	0.4	23.70	29.10	38.70	73.70	18.50	22.90	31.20	58.30	13.20	16.70	22.10	41.30
	0.5	29.00	36.00	49.00	91.30	23.30	29.00	38.30	72.50	16.70	20.60	28.00	51.90
	0.6	34.80	44.20	58.00	108.2	28.20	35.10	46.30	86.60	19.80	25.50	33.10	61.70
	0.7	41.00	50.50	66.90	127.5	32.60	41.40	53.70	100.4	23.10	29.10	39.70	72.70

Теплопроводность $\cdot 10^3$, Вт $\text{м}^{-1} \text{°C}^{-1}$

Diamond (D)

Вид TPMS		Diamond (D)											
Размер ячейки		4 мм				5 мм				7 мм			
Материал		PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP	PLA	ABS	PETG	PHP
Толщина δ , мм													
0.1		7.80	9.75	13.00	24.38	6.24	9.75	10.40	19.50	4.46	5.57	7.43	13.93
0.2		15.60	19.50	26.00	48.75	12.48	15.60	20.80	39.00	8.91	11.14	14.86	27.86
0.3		23.40	29.25	39.00	73.13	18.72	23.40	31.20	58.50	13.37	16.71	22.29	41.79
0.4		31.20	39.00	52.00	97.50	24.96	31.20	41.60	78.00	17.83	22.29	29.71	55.71
0.5		39.00	48.75	65.00	121.88	31.20	39.00	52.00	97.50	22.29	27.86	37.14	69.64
0.6		46.80	58.50	78.00	146.25	37.44	46.80	62.40	117.00	26.74	33.43	44.57	83.57
0.7		54.60	68.25	91.00	170.63	43.68	54.60	72.80	136.50	31.20	39.00	52.00	97.50

2.4. Разработка лабораторного стенда по определению эффективной теплопроводности материалов

Целью параграфа 2.4 является разработка лабораторной установки по определению эффективной теплопроводности материалов с использованием образцов размерами до 50×50×40 мм.

Изготовление материалов со сложной структурой до недавнего времени было практически невозможным, но эта проблема решается с помощью стремительно развивающейся технологии 3D-печати. С развитием технологий аддитивного производства, появилась возможность создавать образцы для различных исследовательских целей с необходимой точностью. Так, например, Аль-Кетан [129] изготовил образцы структур TPMS и исследовал их прочностные характеристики при сжатии. Соро [130] в своей работе исследовал и испытал квазистатические свойства на растяжение и циклическую усталость при растяжении решетчатой структуры Ti-6Al-4V на основе гироидной, алмазной и примитивной элементарной ячейки TPMS. Развитие программного обеспечения численного моделирования позволяет исследовать материалы со сложной структурой, однако результаты численного моделирования требуют экспериментальной верификации.

Высокая стоимость материалов 3D-печати и ограничения по рабочим размерам принтеров накладывают ограничения на проведение исследований, что требует разработки новых установок по определению эффективной теплопроводности материалов, опытные образцы которых не превышают размеры 50×50×40 мм. В данном параграфе будет представлен разработанный лабораторный стенд для определения эффективной теплопроводности материалов на основе TPMS.

В разрабатываемой установке используется управляемый нагревательный элемент. Температура может изменяться в пределах от 50 до 90 °С. Заданная температура поддерживается на всем протяжении проводимого эксперимента. В установке размещены 6 датчиков/термопар (по

три на горячий и холодный источник). Контакт термопар с теплопередающими пластинами был улучшен за счет использования термопасты. Датчики припаяны к выходам разъема TRS. По каналам связи разъема TRS информация подается на спаянную микросхему. Важно отметить, что в микросхеме также впаяны световые индикаторы нагрева и передачи информации на ПК в режиме реального времени. С изготовленной микросхемы сигнал подается посредством кабеля USB-USB Mini к компьютеру посредством виртуального COM-port. Управление установкой осуществляется макросами с ПК. Взаимодействие с устройством осуществляется посредством отправки 4-х разрядного кодированного значения. Для этого удобно пользоваться макросами, представленными в таблице 2.4.1. Данные, направляемые от устройства, имеют кодировку ASCII и DEC систему счисления.

Таблица 2.4.1 Геометрические размеры RVE объема Schoen's GW

1-й разряд	2-й разряд	3-й разряд	4-й разряд
Преамбула	Пуск/Запрос/Стоп	Установка температуры	Не используется
5	1 – Пуск	1 – 50 °C	1
		2 – 55 °C	
		3 – 60 °C	
	5 – Запрос	4 – 65 °C	
		5 – 70 °C	
		6 – 75 °C	
	9 – Стоп	7 – 80 °C	
		8 – 85 °C	
		9 – 90 °C	
		5 – 70 °C	
		6 – 75 °C	
		7 – 80 °C	
9 – Стоп	8 – 85 °C		
	9 – 90 °C		
	9 – 90 °C		

Показания устройства, сопротивление датчика и температура с термопар были сведены в удобные для использования зависимости. Таким образом, с помощью кусочно-линейной аппроксимации получена зависимость показаний устройства, передаваемых на компьютер, от температуры. Аналогичным образом получены зависимости для напряжения и силы тока подаваемых на

нагревательный элемент. Показания датчика также передаются на ПК для анализа данных.

Для проверки работоспособности установки было выполнено 6 экспериментов при температуре окружающей среды. Образец помещался в установку при известной комнатной температуре. Максимальные отклонения датчиков при этом составили не более 2-х процентов.

Дальнейшая проверка работоспособности нагревательных элементов и адекватности показаний датчиков при температурах выше окружающей среды проводилась при температурах нагревательного элемента 60 и 70 °С, а также вынужденном конвективном охлаждении радиатора (холодного источника). Выход процесса теплопроводности на стационарный режим при этом в среднем занимает 3000-3500 с. (в зависимости от комнатной температуры и температуры на нагревателе). На рисунке 2.4.1 представлен результат измерений одной из термопар за 30 минут. По графику видно, что колебания температуры затухают (выходят на стационар) в течение 2000 с.

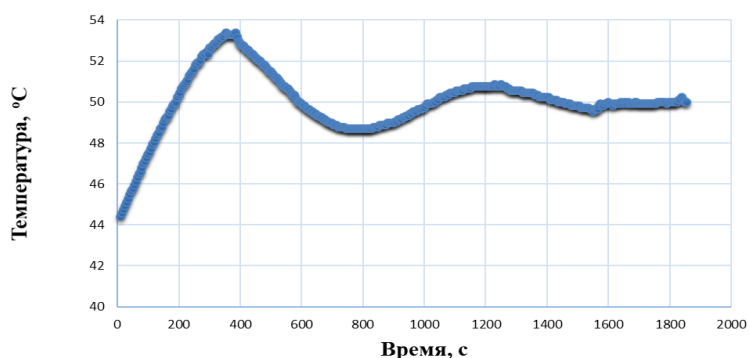


Рисунок 2.4.1. График изменения температуры во времени

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.4.2. Опытный образец помещается в установку, где температура на горячей границе образца поддерживается на уровне 70 °С. Для минимизации влияния воздуха на теплопроводность пористого материала часть воздуха откачивается через отверстие №11. Измеряя температуры на медных пластинах №3 и №5 с разных сторон образца, а также тепловой поток, проходящий через конструкцию, определяется эффективная теплопроводность образца по закону

Фурье. Управление установкой и сбор данных осуществляются с помощью блока управления и ПК №12.

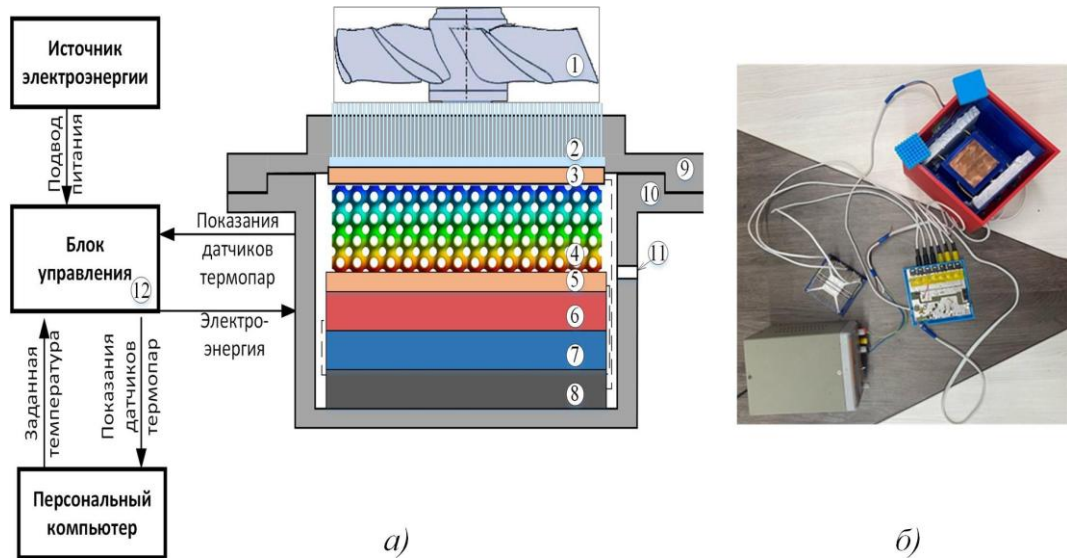


Рисунок 2.4.2. а) схема экспериментальной установки: 1 – Кулер охлаждения; 2 – Охлаждающий радиатор; 3,5 – Медные пластины с термопарами; 4 – Образец; 6 – Нагревательный элемент; 7 – Теплоизоляция; 8 – Блок управления; 9,10 – Корпус установки; 11 – Отверстие для откачки воздуха; 12 – внешний блок управления; б) фото установки

Отвод тепловой энергии осуществляется через радиатор №2 и кулер охлаждения №1. Теплоизоляция №7 защищает блок управления от температурного воздействия и добавляет дополнительное тепловое сопротивление тепловому потоку, противоположному образцу. В результате большая часть тепловой энергии проходит через образец к охлаждающему радиатору. Определение теплопроводности выполняется в стационарном режиме.

Экспериментальные данные согласуются с результатами численного моделирования, что будет показано в параграфе 2.6 для структур TPMS из рассматриваемых материалов. Теплопроводность пористых образцов несколько выше, чем при численном моделировании. Эти расхождения обусловлены наличием воздуха в экспериментальной камере, что не учитывалось при моделировании.

2.5. Экспериментальное исследование эффективной теплопроводности пористых материалов на основе TPMS

Целью параграфа 2.5 является определение теплопроводности опытных образцов пористых материалов, изготовленных посредством аддитивных технологий. Основное внимание уделено исследованию теплопроводности материалов со структурой TPMS.

Для проверки результатов численного моделирования было проведено экспериментальное исследование теплопроводности материалов на основе структуры TPMS. CAD-модели экспериментальных образцов были созданы по методике, аналогичной численному моделированию. Геометрические модели экспериментальных образцов были экспортированы в 3D-слайсер «CHITUBOX Basic». В качестве материалов для образцов был выбран материал Phrozen Aqua Ivory 4K, PETG, ABS, PLA, PHP. Важно отметить, что для определения свойств материала были изготовлены сплошные безпористые пластины из этих материалов. В программе слайсера параметры печати были настроены в соответствии с рекомендациями производителей этих материалов. Образцы были изготовлены на 3D-принтерах Phrozen Sonic Mighty 4K, Anycubic Photon M3 Max с технологией LCD (Liquid Crystal Display), обеспечивающей высокую точность изготовления. А также принтер AnyForm L250-G3 с технологией FDM печати. После изготовления образцы прошли тщательную постобработку для удаления поддержек и излишков материала. Несмотря на использование высокоточного оборудования для 3D-печати и постобработки, фактическая пористость экспериментального образца может отличаться от пористости CAD-модели. Фактическая пористость определялась с помощью лабораторных весов как разница в массе сплошной пластины и измеренного образца, нормированная на массу сплошной пластины.

Послойное изготовление экспериментальных образцов, даже при использовании высокоточного оборудования, может внести дополнительное

тепловое сопротивление и привести к увеличению погрешности измерений [131]. В данном исследовании направление печати для всех образцов было выровнено по самому длинному общему измерению. При такой ориентации печати влияние наслоения в аддитивном производстве на теплопередачу может быть снижено по сравнению с печатью образца в направлении измерения его теплопроводности. Изучение влияния направления построения и толщины слоя на теплопроводность материалов с упорядоченной структурой может стать предметом будущих исследований.

Экспериментальное исследование теплопроводности проводилось на различных сертифицированных экспериментальных установках ИТП-МГ4 «100», ИТП-МГ4 «250» и разработанном лабораторном стенде (рисунок 2.5.1.)



Рисунок 2.5.1. а) ИТП-МГ4 «250»; б) ИТП-МГ4 «100»; в) разработанный лабораторный стенд.

Основными элементами всех представленных установок являются нагревательный элемент, система охлаждения, теплоизолированный бокс и контроллер. Экспериментальный образец располагается в теплоизолированном боксе. К одной стороне образца подводится тепловая энергия, в то время как с противоположной расположен холодный источник. В установках ИТП-МГ4 «250» и ИТП-МГ4 «100» с греющей стороны поддерживалась температура 36 °С, а с охлаждающей 12 °С. Максимальная погрешность определения коэффициента теплопроводности в стационарном

режиме в экспериментальных установках ИТП-МГ4 «250» и ИТП-МГ4 «100» составляет 5 % по данным производителя. В межпоровом пространстве пористых образцов находился воздух, что не учитывалось в части численных моделей, что может приводить к расхождениям между результатами натуральных и численных экспериментов. Тепловое контактное сопротивление между образцом и нагревающей/охлаждающей сторонами снижается с использованием термопасты. Разработанный лабораторный стенд предназначен для измерения теплопроводности опытных образцов с габаритными размерами, не превышающими 50 мм для экономии ресурсов.

Для исследований использовались пористые образцы с размерами ячеек от 5 мм и толщиной ячейки от 0,1 мм. Часть опытных образцов представлена на рисунке 2.5.2.

Результаты экспериментальных данных представлены в дальнейших разделах в сравнении с численным моделированием процессов переноса тепловой энергии.



Рисунок 2.5.2. Опытные образцы

2.6. Определение зависимостей эффективной теплопроводности TPMS кубической симметрии

Целью параграфа 2.6 является определение теплопроводящих свойств в конструкциях на основе топологии TPMS с кубической симметрией в виде эмпирических зависимостей эффективной теплопроводности от свойств материала и геометрических характеристик решетки.

Как уже отмечалось ранее, некоторые TPMS обладают кубической симметрией. Это означает, что такие структуры обладают высокой симметрией, включая три оси вращения 4-го порядка, четыре оси 3-го порядка и шесть осей 2-го порядка, а также дополнительные зеркальные плоскости и симметрию инверсии. Таким образом, свойства геометрий с кубической симметрией можно считать квазиизотропными, поскольку они будут иметь одинаковые значения в направлении любой оси и достаточно рассмотреть перенос в одном из направлений.

Следует отметить, что дополнительные процессы теплопередачи, такие как конвекция внутри пор или излучение, могут влиять на общую теплопроводность пористого материала. Однако в данном параграфе полностью исключено влияние воздуха внутри пор. Это связано с важностью определения теплопроводности самой структуры/решетки материала TPMS. Детальное исследование и определение зависимостей теплопроводности решетки материала TPMS позволяют выявить направления с наибольшей и наименьшей теплопроводностью, что дает основу для дальнейших исследований. Это может быть полезно для дальнейшего изучения влияния различных газов, заполняющих поры, на теплопроводность материала. Более того, существуют условия, при которых газ в межпоровом пространстве может отсутствовать, а теплопроводность решетки материала TPMS будет определять общую теплопроводность материала.

На рисунке 2.6.1 представлена зависимость эффективной теплопроводности структур Diamond, Gyroid, Fisher-Koch S от размера и

толщины ячейки изготовленных из материала РНР. Из графиков следует, что разность параметра смещения двух уравнений поверхности уровня $f(x,y,z,a)$, и периода поверхности уровня TPMS, оказывает значительное влияние на тепловые характеристики конструкций решетки, что согласуется с анализом потока внутри TPMS [57].

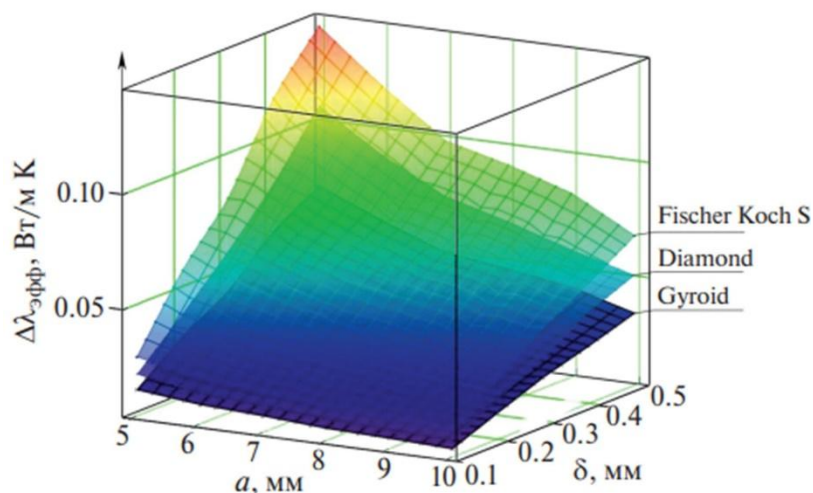


Рисунок 2.6.1. Распределение эффективной теплопроводности конструкций Diamond, Gyroid, Fisher-Koch S из материала РНР

При постоянном размере ячейки a зависимость эффективной теплопроводности ($\lambda_{эфф}$) от толщины δ линейна. Уменьшение размера ячейки при постоянной толщине оказывает нелинейное влияние на теплопроводящие свойства конструкции, что может быть объяснено пропорциональным уменьшением пористости материала [225]. Для структур, основанных на других типах TPMS наблюдаются аналогичные зависимости, по этой причине они не включены на рисунок 2.6.1. Также для различных материалов в диапазоне теплопроводности 1 до 400 Вт/(м °С) наблюдается сохранение указанных зависимостей. По этой причине результаты обрабатывались для получения обобщенной зависимости эффективной теплопроводности от геометрических параметров и свойств исходного материала [226]. Из рисунка 2.6.1 также следует, что одинаковые значения теплопроводности могут быть получены при различных комбинациях толщины и длины ячейки.

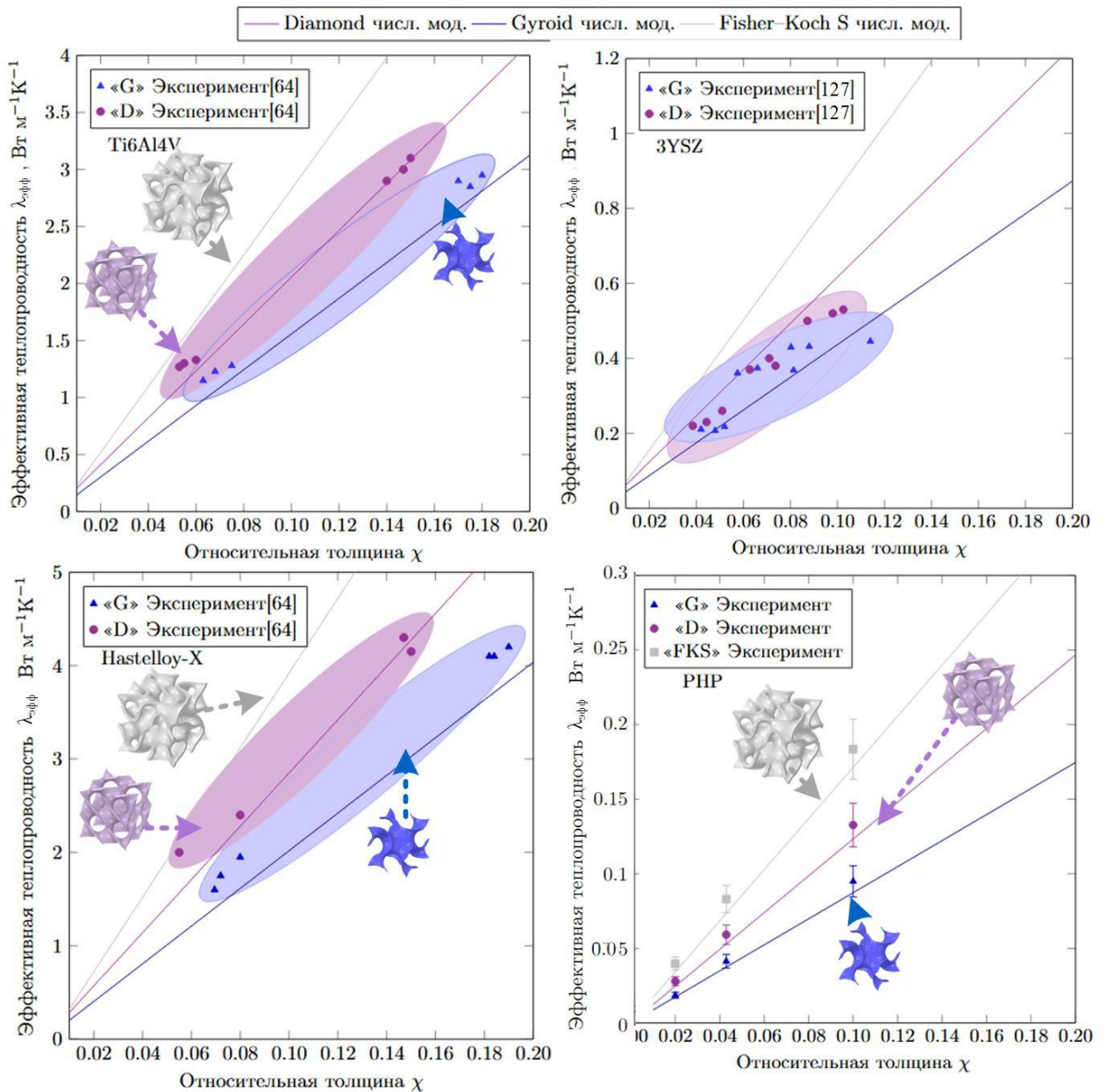


Рисунок 2.6.2. Эффективная теплопроводность конструкций на основе TPMS из материалов PHP, Hastelloy-X [64], Ti6Al4V [64], 3YSZ [127] полученная в ходе CFD моделирования и натурального эксперимента

Для верификации результатов с помощью независимого эксперимента были проведены дополнительные исследования теплопереноса в конструкциях TPMS изготовленных из материала Hastelloy-X [64], Ti6Al4V [64], 3YSZ [127]. Используя введенный ранее параметр относительной толщины χ , результаты численного моделирования предыдущего параграфа и дополнительного моделирования можно обобщить в виде графиков,

представленных на рис. 2.6.2. Результаты численного моделирования согласуются с результатами собственного [231], а также независимого [64,127] эксперимента. Наибольшее расхождение результатов CAE моделирования теплопереноса и эксперимента наблюдается для TPMS конструкций из материалов PHP.

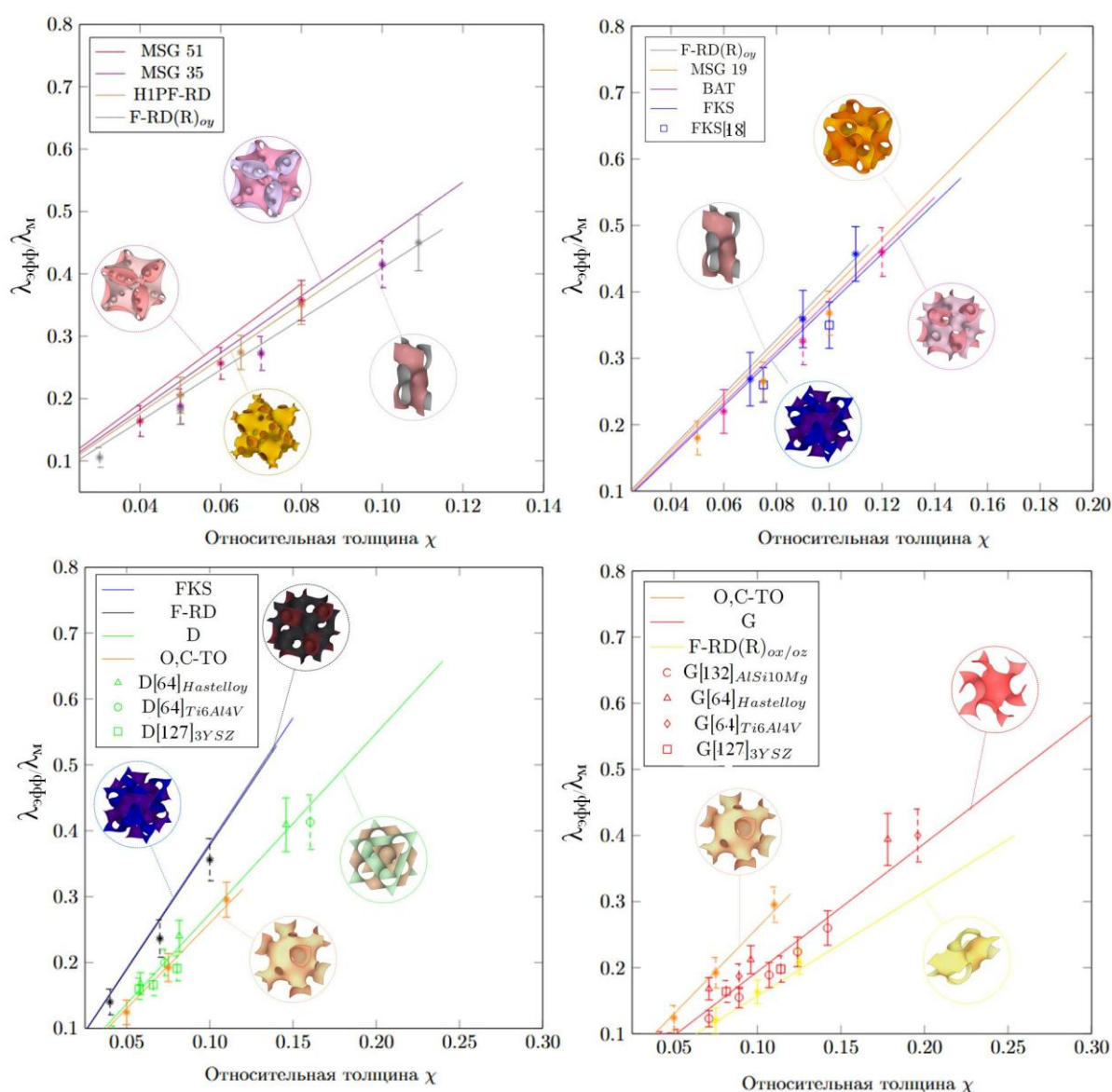


Рисунок 2.6.3. Зависимость нормализованной по теплопроводности исходного материала эффективной теплопроводности $\lambda_{эфф}$ от относительной толщины и направления: моделирование CAE и эксперимент (фотополимерная смола, AlSi10Mg [132], Hastelloy, Ti6Al4V [64] и 3YSZ [127] для изготовления решетки TPMS.

Для конструкций из РНР результаты, полученные в ходе натурального эксперимента переноса тепла, демонстрируют значения больше на 7-13%, по сравнению с CAE моделированием. Это объясняется большей теплопроводностью материалов Hastelloy-X, Ti6Al4V, 3YSZ по сравнению с РНР, что уменьшает влияния теплопроводности и конвекции воздуха в межпоровом пространстве [128]. Это было отмечено и для других топологий TPMS-материалов рассмотренных ранее [52].

Графики, представленные на рисунке 2.6.2 имеют схожий вид и могут быть нормализованы по теплопроводности исходного материала. На рисунке 2.6.3 представлены нормализованные зависимости эффективной теплопроводности от относительной толщины для различных типов TPMS, полученные при численном моделировании, а также результаты натурального эксперимента, для верификации численного моделирования.

Как видно на рисунке, структура MSG 51 демонстрирует самую высокую эффективную теплопроводность при равных значениях относительной толщины. В сочетании с наибольшей удельной поверхностью и наивысшей эффективной теплопроводностью, эта структура представляется перспективным кандидатом для применения в системах терморегулирования на основе фазоизменяющихся материалов [74,137,175]. Важно отметить, что эти выводы основаны на анализе эффективной теплопроводности и удельной поверхности. Для практического применения в системах терморегулирования на основе фазоизменяющихся материалов необходимы дополнительные исследования термofизических и гидродинамических свойств структур TPMS, включая MSG 51 и другие. Большая часть экспериментальных данных демонстрирует удовлетворительное соответствие с результатами моделирования по мере увеличения относительной толщины. Наибольшие расхождения наблюдаются для MSG 35 с наибольшей разницей в 17,84%, а наименьшие – для F-RD(R) со средними значениями погрешности 2,91%. Для других структур средняя погрешность составляла около 8,7%, что находится в

допустимом диапазоне. Независимые экспериментальные результаты демонстрируют хорошее соответствие с численными предсказаниями в более широком диапазоне, включая низкие значения относительной толщины χ от 0,05 до 0,10. Структуры H1PF-RD и MSG 35, которые также обладают большими площадями поверхности, демонстрируют высокую эффективную теплопроводность при той же относительной толщине по сравнению с другими TPMS, рассмотренными в этом исследовании.

В таком случае эффективная теплопроводность TPMS конструкции может быть описана в следующем уравнении:

$$\lambda_{эфф} = \beta \lambda_s \chi, \quad (2.6.1)$$

где β – константа, учитывающая форму пор и их расположение в структуре TPMS. " β " для конструкций TPMS представлена на рисунке 2.6.4.

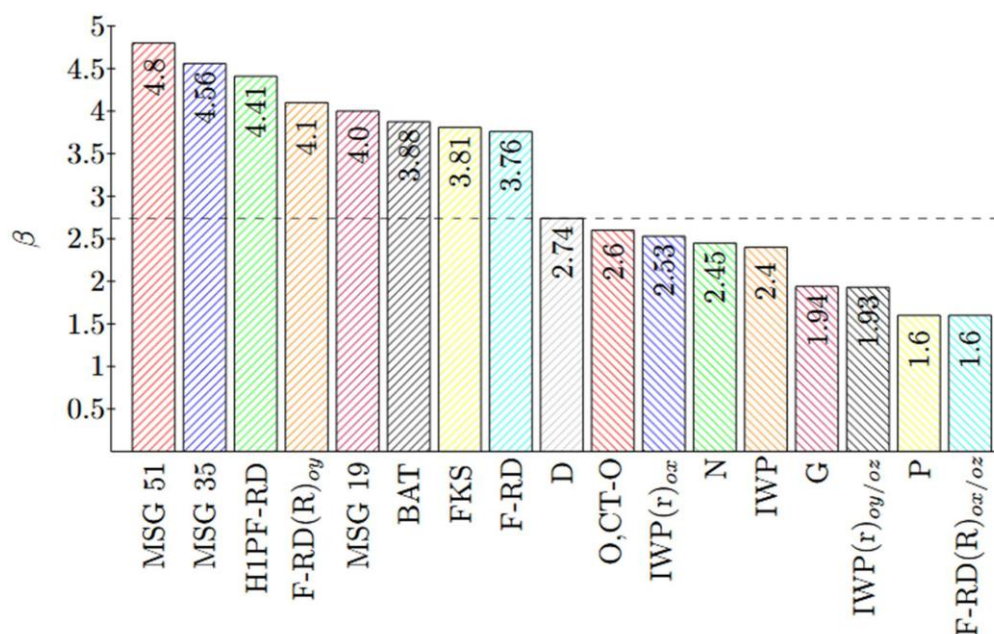


Рисунок 2.6.4. Константа, учитывающая форму пор и их пространственное расположение в структуре TPMS при определении эффективной теплопроводности.

Используя выражение 2.6.1, возможно прогнозирование теплофизических свойств с учетом теплопроводности исходного материала и относительной толщины структуры. На рисунке 2.6.3 представлен график с нормализованной эффективной теплопроводностью для остальных TPMS,

рассмотренных в рамках диссертационной работы, а также результаты натурального эксперимента, описанного в разделе 2.5.

Результаты исследования могут стать основой для будущей разработки оребрения на основе TPMS в теплообменном оборудовании. Структура Fisher-Koch S может быть рассмотрена в качестве оребрения теплообменного оборудования, поскольку конструкция FKS демонстрирует максимальную среди рассмотренных TPMS площадь поверхности, эффективную теплопроводность и минимальные застойные области [233]. Для увеличения теплопроводности, а соответственно и энергии, передаваемой за счет оребрения, рекомендуется уменьшать период поверхности уровня TPMS, что приведет к росту потерь давления [227].

2.7. Определение зависимостей эффективной теплопроводности TPMS Schoen's I-WP(R), Schoen F-RD(R) и CLP

Целью параграфа 2.7 является определение эмпирической зависимости эффективной теплопроводности пористых материалов на основе TPMS с некубической симметрией от геометрических параметров и свойств исходного материала.

Большинство исследований посвящено определению свойств классических структур TPMS (таких как Primitive, Schoen I-WP, поверхность Neovius), обладающих кубической симметрией. Однако материалы на основе TPMS с ортотропными и анизотропными свойствами изучены недостаточно. Так структуры CLP и Schoen's I-WP(R)[226] обладают тетрагональной симметрией, а соответственно и ортотропными свойствами. Эти структуры имеют несколько различных плоскостей симметрии, что приводит к изменению свойств в разных направлениях. Модели Максвелла-Ойкена, Хашина-Штрикмана и Эшби неприменимы к таким материалам, поскольку не учитывают геометрические особенности структур.

Поверхности Schoen F-RD(R), Schoen I-WP(R) и CLP были получены с использованием программного пакета с открытым исходным кодом Surface

Evolver с использованием библиотек поверхностей и встроенных функций. Элементарные ячейки состоят из 16 лепесткообразных элементов. Используя встроенные функции, эти лепестки объединяются в одну элементарную ячейку, вписанную в куб. В программе сетка была уточнена для дальнейшего построения элементарной ячейки с максимальной точностью. Полученные модели были экспортированы в виде облака точек. После некоторого упрощения и сглаживания модель экспортируется в файл *.stl*. Затем фасетная поверхность импортируется в SpaceClaim Direct Modeler для твердотельного моделирования. С помощью встроенных функций формируется сплошной слой, ограниченный двумя симметричными поверхностями, расположенными на расстоянии $\delta/2$ от нулевой поверхности. Далее геометрия обрабатывается для устранения артефактов, которые могли возникнуть при нанесении сплошного слоя. После формирования сплошного слоя получается одна элементарная ячейка с тетрагональной симметрией. На заключительном этапе геометрия импортируется в формате *.scdoc*

Решетка TPMS образована последовательным объединением ячеек, вписанных в куб с длиной ребра a , по трём направлениям декартовых координат x, y, z с периодом, равным a . Ось 4-го порядка, совпадает с осью x , соответственно, эффективные свойства являются ортотропными, причем направления y и z равны. Тензор теплопроводности можно записать в виде симметричной матрицы $\lambda_{\alpha\beta\gamma}$, в которой компоненты ij равны компонентам ji . Каждая диагональная компонента связывает градиент температуры вдоль соответствующего направления системы координат с тепловым потоком в этом направлении. Недиagonальные компоненты тензора теплопроводности представляют собой эффект связи между градиентом температуры вдоль одного направления и тепловым потоком, перпендикулярным этому направлению. Поэтому, в зависимости от ориентации системы координат, компоненты λ_{xy} , λ_{yz} и λ_{zx} могут быть отрицательными, нулевыми или положительными. В частности, для структуры Schoen F-RD(R), Schoen I-

WP(R), CLP тензор теплопроводности содержит компоненту λ_{xx} , отличную от компонент λ_{yz} и λ_{zx} . Для исследования свойств структур Schoen I-WP(R), CLP также использовался метод репрезентативной элементарной ячейки (RUC), гомогенизации. После проведения моделирования ячейки TPMS условно заменяются кубами с длинами ребер, равными a , и эквивалентными теплофизическими свойствами. В этом случае тепловой поток через сечение TPMS площадью будет равен потоку в том же направлении через куб с длиной ребра a . Тогда эффективная теплопроводность для ячеек TPMS определяется следующим тензором:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \begin{bmatrix} \frac{-q_{xx} S_{xx}}{a \Delta T} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-q_{yy} S_{yy}}{a \Delta T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-q_{zz} S_{zz}}{a \Delta T} \end{bmatrix}, \quad (2.7.1)$$

где ΔT – разность температур между противоположными гранями ячейки в направлении переноса энергии, °C; a – размер периода поверхности уровня, м.

На рисунке 2.7.1 представлены результаты численного моделирования переноса тепла от пористости, результаты натурального эксперимента с исключением влияния теплопроводности воздуха, а также результаты моделирования теплопроводности структур CLP в другом исследовании [18]. В численной модели влияние излучения или конвекции не рассматривается; однако оно может оказывать нелинейное влияние на теплопередачу в пористых структурах TPMS. Результаты эксперимента, без учета влияния воздуха, находятся в доверительном интервале, что может свидетельствовать о достоверности численного эксперимента.

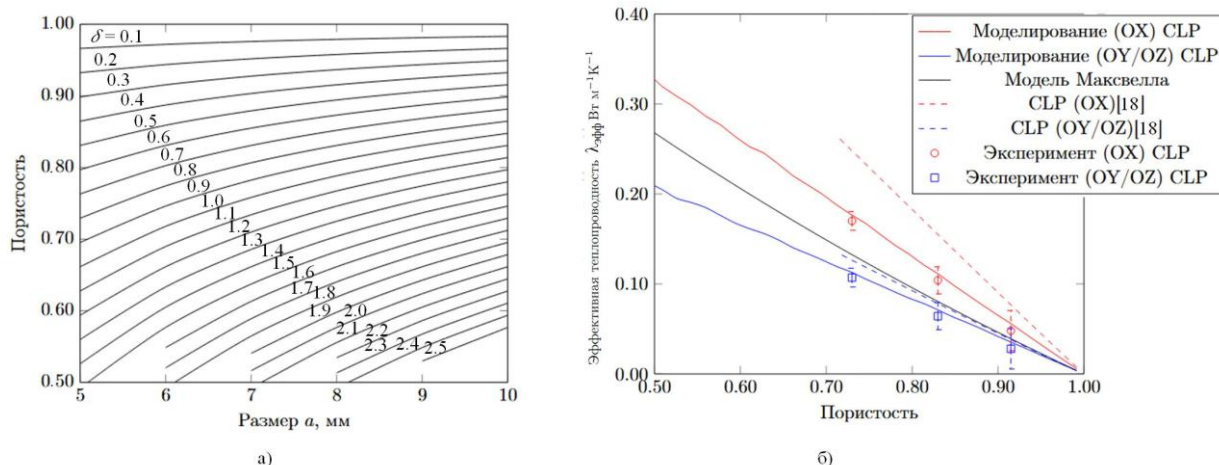


Рисунок 2.7.1. а) Зависимость пористости от разности расстояний между поверхностями уровня δ и размера периода поверхности уровня a б) зависимость эффективной теплопроводности материала TPMS типа CLP из фотополимерной смолы от пористости

Увеличение периода ячейки a при фиксированной толщине стенок δ оказывает выраженное нелинейное влияние на эффективную теплопроводность (см. рис.2.7.2) Как следует из представленных графиков, повышение теплопроводности исходного непористого материала, а также увеличение χ , приводят к линейному росту эффективной теплопроводности структуры. Это позволяет выразить теплопроводящие свойства TPMS материалов в обобщённой форме через геометрические и физические параметры, аналогично структурам, рассмотренным в параграфе 2.6.

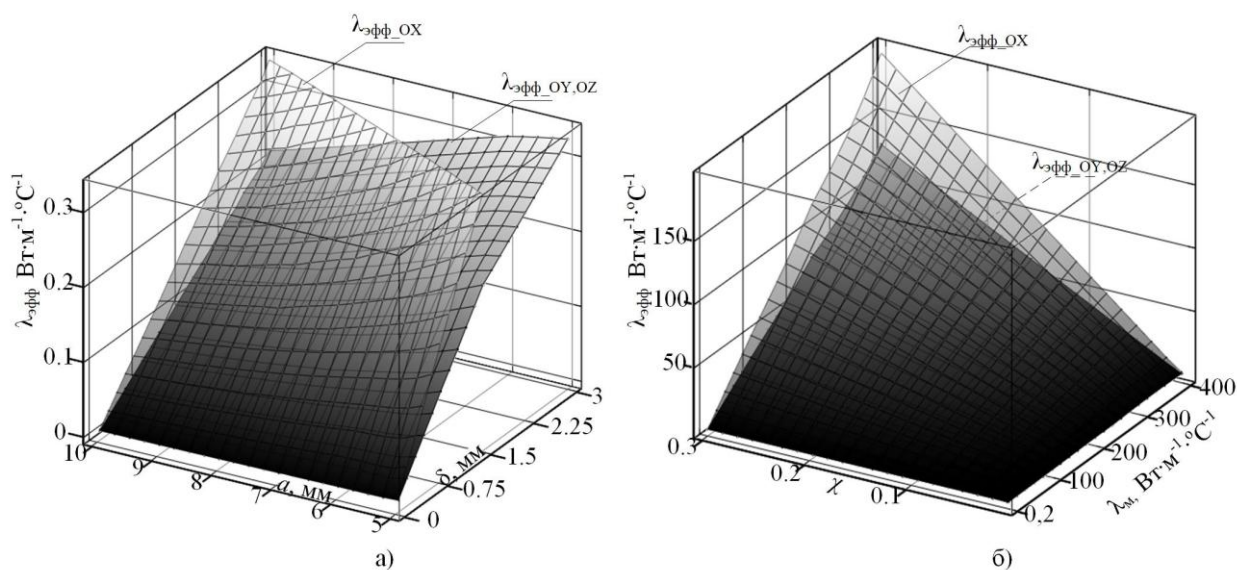


Рисунок 2.7.2. Результаты численного моделирования: а) график эффективной теплопроводности TPMS структуры из фотополимера от

характерных размеров для структуры CLP; б) график эффективной теплопроводности TPMS структуры из различных материалов от безразмерного параметра χ

Графики разностей зависимости нормализованной эффективной теплопроводности в структурах CLP и Schoen I-WP(R), Schoen F-RD(R), от геометрических параметров структуры в направлении осей OX и OY/OZ представлены на рис. 2.7.3. Теплообмен более интенсивен в направлении оси OX на 40% и на 60% выше в структуре Schoen I-WP(R), Schoen F-RD(R) и CLP соответственно. Следует отметить, что это свойство может быть использовано для прогнозирования тангенциального теплоотвода[232].

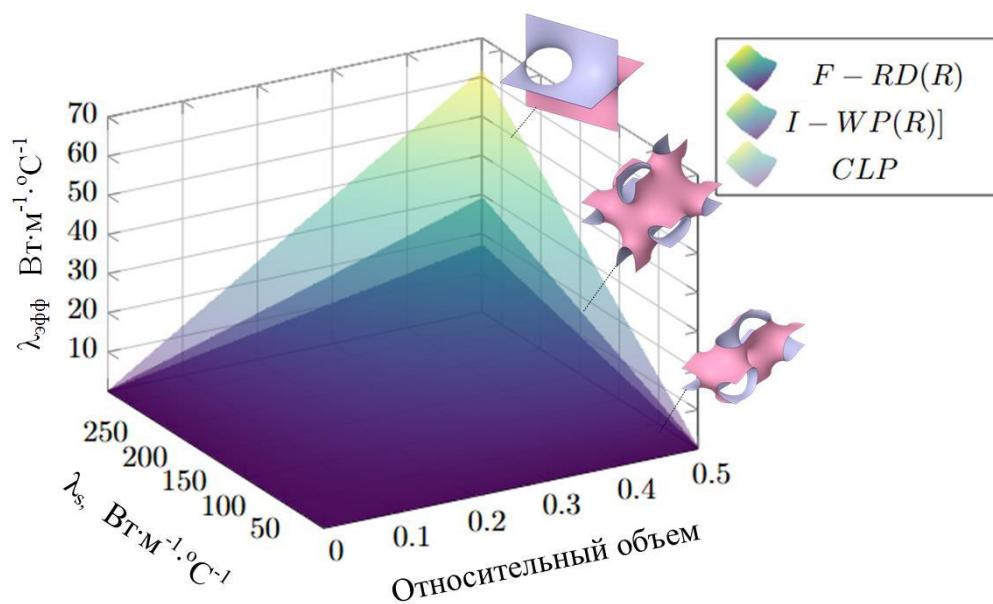


Рисунок 2.7.3. Разность отличающихся коэффициентов тензора теплопроводности в главной диагонали для структур Schoen F-RD(R), Schoen I-WP(R) и CLP.

Результаты численного моделирования теплопередачи были использованы для получения зависимостей эффективной теплопроводности пористого материала от χ в направлениях OX и OY . Линейная зависимость теплопроводности в материалах TPMS от относительной толщины сохраняется независимо от размера, направления, материала и формы ячеек. Одинаковые значения эффективной теплопроводности можно получить при различных сочетаниях размера и толщины ячеек. Нормализация по

теплопроводности позволяет прогнозировать тепловые свойства пористых материалов TPMS, не ограничиваясь материалами, рассматриваемыми в данном исследовании. Это имеет решающее значение для многих структурных приложений, где используются различные материалы, такие как металлические сплавы.

На рисунке 2.7.4 представлены результаты численного моделирования, результаты проведенного эксперимента, а также сравнение с другими видами структур TPMS, нормализованные по теплопроводности λ_s исходного безпористого материала. Из рисунка видно, что результаты эксперимента удовлетворительно согласуются с результатами численного моделирования.

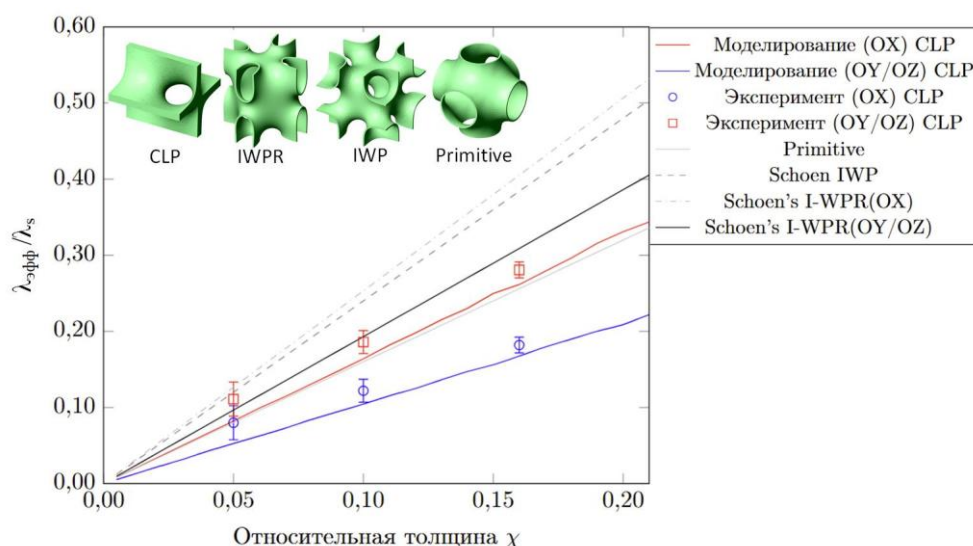


Рисунок 2.7.4. Нормализованная зависимость эффективной теплопроводности по свойствам исходного материала от характерных размеров χ для структур CLP, Schoen IWP, Primitive, Schoen's IWPR

Результаты численного эксперимента при пористости 0,85 ($\chi = 0,05$) отклоняется от экспериментальных данных в 1,3 или 1,4 раза. Это отклонение обусловлено наличием воздуха в межпоровом пространстве экспериментальных образцов, что не учитывалось при CAE-моделировании. Однако при пористости 0,7 ($\chi = 0,1$) и ниже отклонение составляет 7%, а при пористости 0,53 ($\chi = 0,16$) – не более 3%. Очевидно, что в моделях с низкой пористостью влияние воздуха существенно меньше, чем в моделях с пористостью, близкой к 1. Несмотря на использование 3D-принтеров с

толщиной слоя 0,1 мм и тщательной постобработка образцов, возможны расхождения между экспериментальной и численной геометрическими моделями, что также может привести к расхождениям в результатах. В частности, было обнаружено, что фактическая пористость образцов на 0,6%-3% выше, чем у CAD-модели. Наибольшее отклонение от фактической пористости наблюдалось при наибольших относительных толщинах, что может быть объяснено трудностью промывки образцов, уменьшением сквозных каналов и, как следствие, удерживанием части фотополимерной смолы внутри экспериментального образца. Послойное изготовление экспериментального образца также может влиять на теплопередачу, что не учитывалось в данной работе и могло вносить систематическую погрешность в экспериментальные результаты. Расхождения между численной и экспериментальной моделями могут быть также вызваны конвекцией и излучением в пористой среде, которые не учитывались в данной работе [235].

Обобщенные зависимости эффективной теплопроводности для структуры CLP могут быть записаны в виде тензора теплопроводности:

$$\lambda_{эфф} = \begin{bmatrix} 1,65\lambda_s\chi & 0 & 0 \\ 0 & 1,05\lambda_s\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1,05\lambda_s\chi \end{bmatrix} \quad (2.7.2)$$

Обобщенные зависимости эффективной теплопроводности для структуры Schoen I-WP(R) могут быть записаны в виде тензора теплопроводности:

$$\lambda_{эфф} = \begin{bmatrix} 2,53\lambda_s\chi & 0 & 0 \\ 0 & 1,93\lambda_s\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1,93\lambda_s\chi \end{bmatrix} \quad (2.7.3)$$

Полученная обобщенная зависимость тензора теплопроводности существенно упрощает процесс проектирования и инженерных расчетов теплопереноса в TPMS материалах на основе типа CLP и Schoen I-WP(R), Schoen F-RD(R). Важно отметить, что в одном из направлений переноса тепла

процесс проходит более интенсивно (до 60%), что может быть использовано в тангенциально-направленном отведении тепловой энергии.

2.8. Эффективная теплопроводность TPMS материала с учетом теплопроводности воздуха в межпоровом пространстве

В данном разделе представлены результаты численного и экспериментального исследования тепловых свойств материалов с учетом наличия воздуха в межпоровом пространстве, а также их анализ. Полученные зависимости демонстрируют схожий вид (см. рис. 2.8.1) с эффективной теплопроводностью $\lambda_{эфф}$ конструкции без учета воздуха. Однако наблюдается расхождение в результатах, величина которого сопоставима с теплопроводностью воздуха. Полученные результаты были обработаны по методике, представленной ранее.

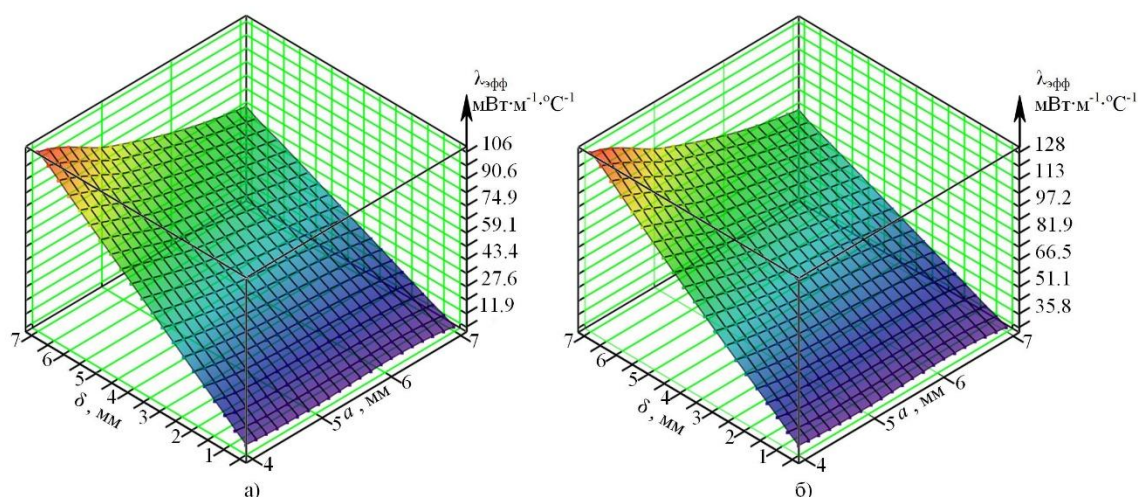


Рисунок 2.8.1. Эффективная теплопроводность пористой структуры Primitive из материала PNP: а) структура TPMS б) структура TPMS с воздухом

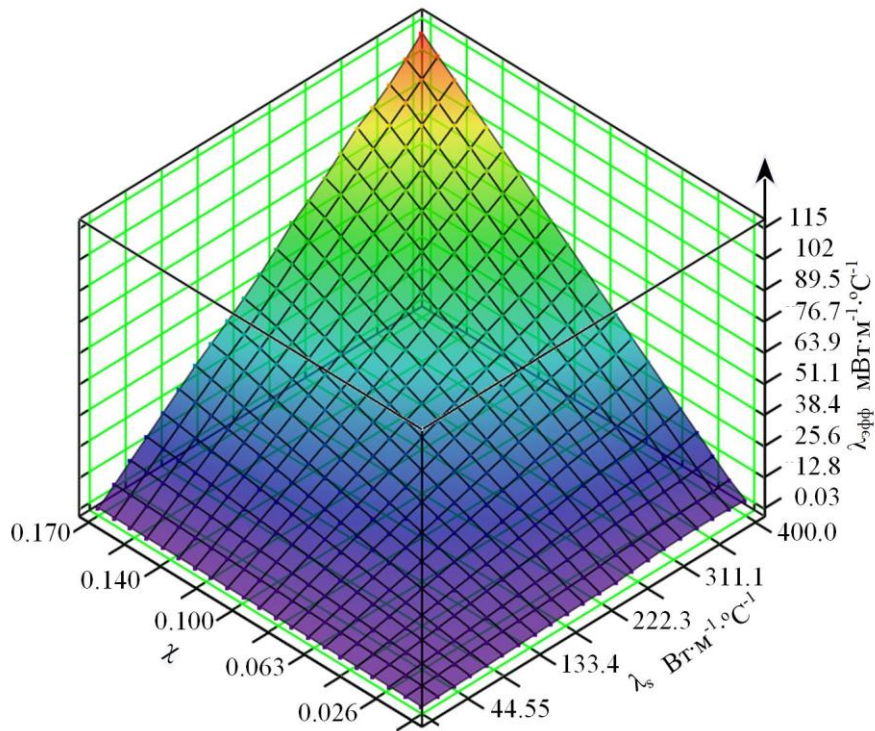


Рисунок 2.8.2. Эффективная теплопроводность пористого материала с переменной относительной толщиной и переменная теплопроводность беспористого материала с учетом воздуха

После проведения анализа и аппроксимации данных была выведена эмпирическая зависимость 2.8.1 для теплопроводности пористого материала на основе TPMS Primitive с учетом наличия воздуха в межпоровом пространстве:

$$\lambda_{эфф} = (1.65\lambda_s - 0.027)\chi - (0.0031\lambda_s - 0.026) \quad (2.8.1)$$

Для установления области применимости уравнения (2.8.1) проведено моделирование теплопередачи для конструкций из Ti-6AL-4V, стали, меди и других материалов с теплопроводностью от 0,12 до 400 Вт/(м °С). Результаты моделирования представлены на рис. 2.8.2.

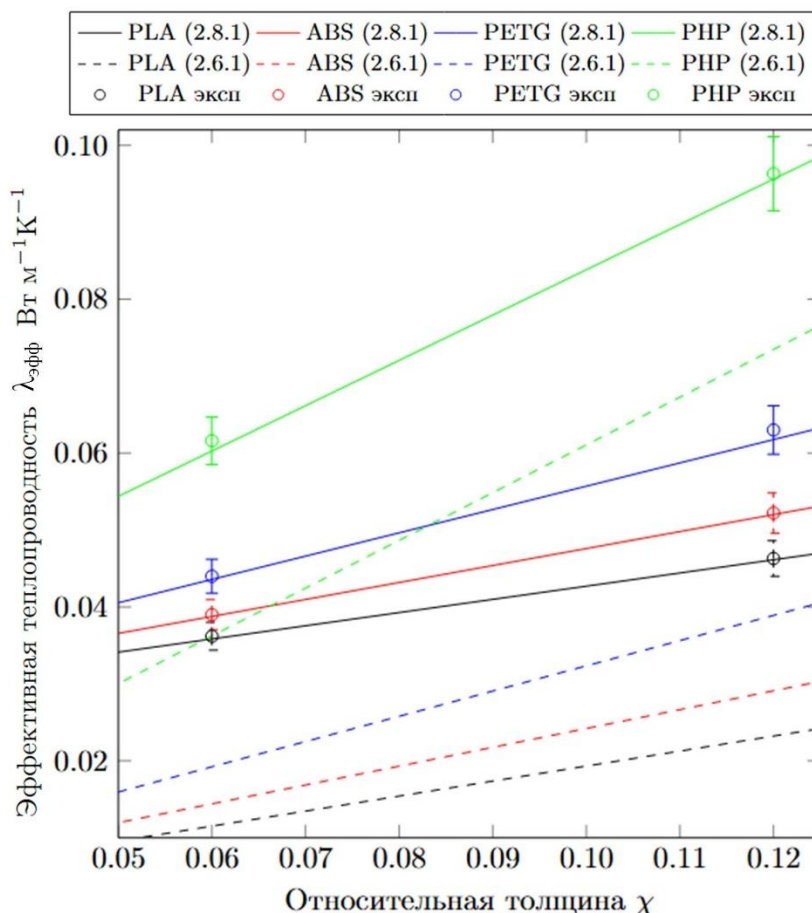


Рисунок 2.8.3. Зависимость эффективной теплопроводности с воздухом и без воздуха от относительной толщины в структуре Primitive.

Анализ полученной зависимости для других материалов показал отклонения от численного моделирования теплопередачи с исходными материалами с теплопроводностью от 0,12 до 5 не более чем на 1%, и не более чем на 2% для материалов с теплопроводностью от 5 до 400. Это существенно расширяет область применения TPMS-материалов в условиях атмосферного воздуха. При заполнении межпорового пространства веществом отличным от воздуха или для других видов TPMS рекомендуется использование формулы 2.6.1 совместно с моделью Эшби 2.2.3. На рис. 2.8.3 показаны зависимости 2.8.1(с воздухом), 2.6.1(без учета воздуха), и экспериментальные результаты для материалов PLA, ABS, PETG и PHP.

Полученная зависимость между эффективной теплопроводностью и пористостью для материала Primitive с включением воздуха согласуется с результатами экспериментальных данных.

Однако существует некоторое расхождение между уравнением 2.8.1 и экспериментальными значениями в диапазоне от 1 до 4%. Это расхождение можно объяснить несовершенным контактом между образцом и нагревательной и охлаждающей пластинами.

Для оценки влияния воздуха было рассмотрено отношение теплопроводностей структуры с воздухом и без него при относительной толщине 0,014. Результаты сравнения представлены на рис. 2.8.4. Влияние воздуха на теплопередачу в структурах Neovius и Schoen IWP практически одинаково. Это связано со схожестью геометрии решетки и межпорового пространства. При теплопроводности основного материала от 0,12 до 1,4 Вт/(м °С) влияние воздуха в структуре Primitive на 20-40% выше, чем для других TPMS. Таким образом, при одинаковой относительной толщине и теплопроводности решеточного материала влияние второй компоненты в межпоровом пространстве различается для разных типов TPMS. Это важно учитывать при создании фазоизменяющихся материалов на основе TPMS. При теплопроводности основного материала от 8 Вт/(м °С) наличием воздуха в межпоровом пространстве можно пренебречь для структур типа Neovius и Schoen IWP. Погрешность в этом случае не превысит 5%. Для материалов с теплопроводностью решетки выше 40 Вт/(м °С) воздухом в межпоровом пространстве можно пренебречь для всех трех рассматриваемых структур. Отклонения в результатах составят не более 0,5-5%. В случаях, когда теплопроводность решетки TPMS существенно превышает теплопроводность материала в межпоровом пространстве, основной поток тепла происходит через неё. Однако, когда теплопроводность решетки сравнима с теплопроводностью материала в межпоровом пространстве, необходимо учитывать теплопередачу от всех компонентов. Поэтому для

высокопроводящих материалов можно использовать зависимость без учёта теплопроводности воздуха, так как она незначительно влияет на теплопередачу.

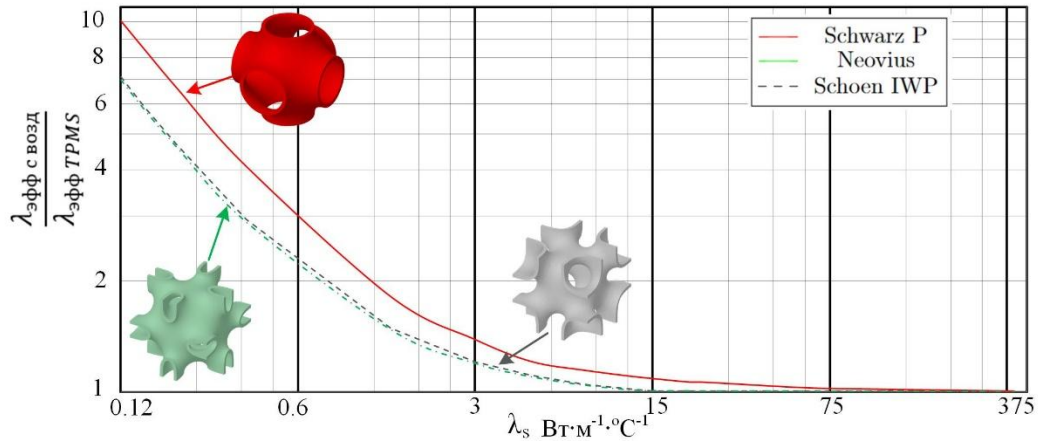


Рисунок 2.8.4. Влияние воздуха на теплопроводность конструкции

2.9. Тепловые потоки в пористых материалах, основанных на топологии трижды периодических минимальных поверхностей

В настоящее время с развитием технологий микроэлектроники, переходом на возобновляемую энергетику, созданием новых композиционных материалов возникает необходимость разработки новых систем охлаждения и регулирования температур. Это связано с развитием высокоточных и энергоэффективных технологий, инновационных материалов и увеличением требований к их надежности. Совместно с этим остро встает вопрос о распределении тепловых потоков в системах отвода тепла, что позволяет увеличивать эффективность отвода тепла от таких систем [133].

Так, например, развитие микроэлектроники напрямую связано с уменьшением размеров элементов и увеличением тепловыделений на единицу площади. Точное понимание тепловых потоков необходимо для предотвращения перегрева и обеспечения стабильности работы устройств [134]. Контроль тепловых потоков здесь напрямую влияет на долговечность и производительность электроники. Для развития геотермальной и солнечной энергетики необходимо управление тепловыми потоками в системах сбора и

хранения энергии, что позволяет увеличивать энергоэффективность и срок службы [135].

Одновременно с этим для систем охлаждения микроэлектроники и систем хранения тепловой энергии разрабатываются материалы, основанные на TPMS. Куреши [136] рассмотрел системы хранения энергии, основанные на материалах с фазовым переходом. В качестве решетки для переноса энергии была рассмотрена система TPMS, применение которой позволило сократить время плавления материалов на 31-40,3% по сравнению с классическими решетками.

Также предложены радиаторы охлаждения, основанные на TPMS, которые демонстрируют высокую удельную площадь поверхности [137]. Это может эффективно решить проблемы охлаждения чипов в области микроэлектроники [138].

Однако для развития указанных направлений важно определение распределения тепловых потоков в TPMS материале. Это позволит не только оптимизировать теплообмен, но и определить области, где могут возникать термические деформации и внутренние напряжения, вызванные неравномерным распределением тепла. Перегрев важных компонентов сокращает срок службы всей системы, так как высокие температуры могут приводить к плавлению, выгоранию или разрушению материала. Соответственно, в текущей работе предложено исследование распределения тепловых потоков и в конструкциях на основе TPMS.

Формирование геометрии выполнялось по методике, указанной ранее. Всего были рассмотрены различные топологии TPMS представленные на рисунке 2.9.1. Толщина стенки составляет 0.1, а длина ячеек 5 мм. На противоположных сторонах элементарных ячеек задавались граничные условия 1 рода с разницей температур 50°C ($T_1=0^{\circ}\text{C}$, $T_2=50^{\circ}\text{C}$), а свойства материала, из которого изготовлена решетка приняты постоянными и независимыми от температуры.

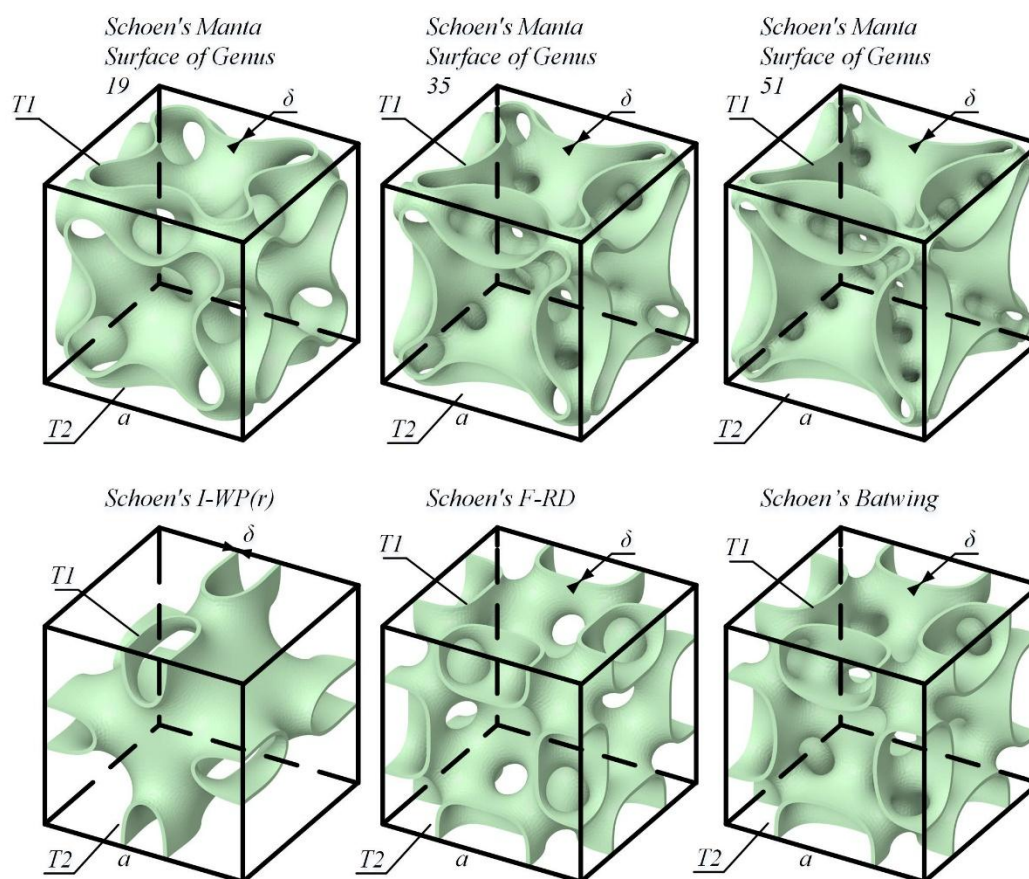


Рисунок 2.9.1. Расчетные геометрические модели конструкций на основе TPMS типа Schoen's Manta Surface of Genus 19, Schoen's Manta Surface of Genus 35, Schoen's Manta Surface of Genus 51, Schoen's I-WP(r), Schoen's F-RD, Schoen's Batwing

Для исследования переноса тепла в пористых материалах, основанных на TPMS, были выбраны численные методы конечных элементов, реализованные в программном комплексе ANSYS модуле Steady-State Thermal. Выбор программного обеспечения, а также методов решения основан на скорости решения задачи и возможности визуализации результатов. Однако при решении численными методами могут возникать ошибки дискретизации сетки, избыточные увеличения затрачиваемых вычислительных мощностей и времени, локальные ошибки и аномалии, неустойчивость системы. Для устранения указанных проблем, а также оптимизации времени и вычислительных ресурсов была выполнен анализ независимости сетки, представленный на рисунке 2.9.2. Для расчета использовались модели с

количеством элементов от 1080657 до 2140657. Такое количество элементов сокращает вычислительные мощности сохраняя при этом необходимую точность расчета.

В ходе компьютерного моделирования были определены тепловые потоки, проходящие через структуры TPMS (см. рис. 2.9.3, 2.9.4) и поля распределения температуры (см. рис 2.9.5). Каждая структура имеет свою уникальную форму и структуру, что влияет на распределение тепловых потоков. Это открывает потенциальные возможности оптимизации переноса тепла в системах охлаждения и регулирования температур. Максимальные значения теплового потока всех структур наблюдаются на краях и изгибах поверхностей

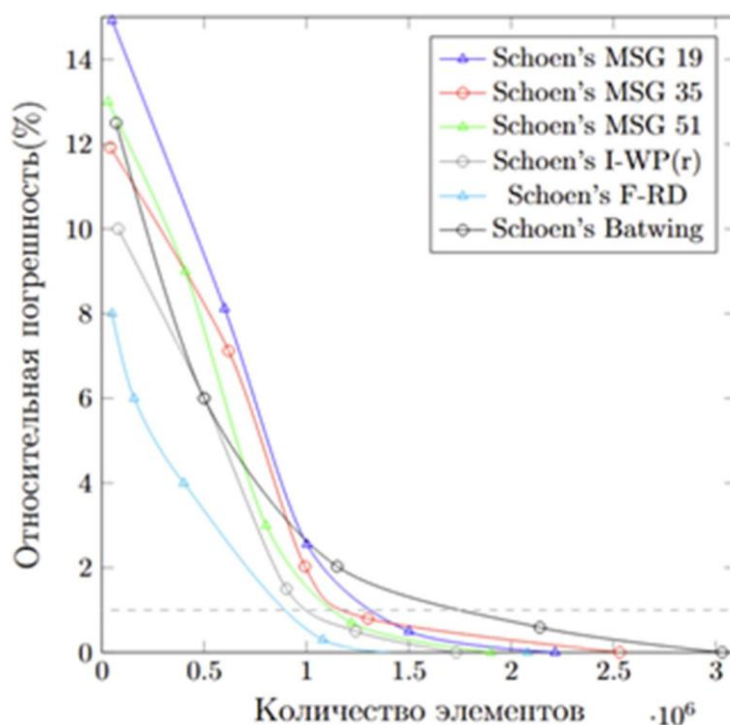


Рисунок 2.9.2. Анализ чувствительности сетки моделей типа Schoen's Manta Surface of Genus 19, Schoen's Manta Surface of Genus 35, Schoen's Manta Surface of Genus 51, Schoen's I-WP(r), Schoen's F-RD, Schoen's Batwing

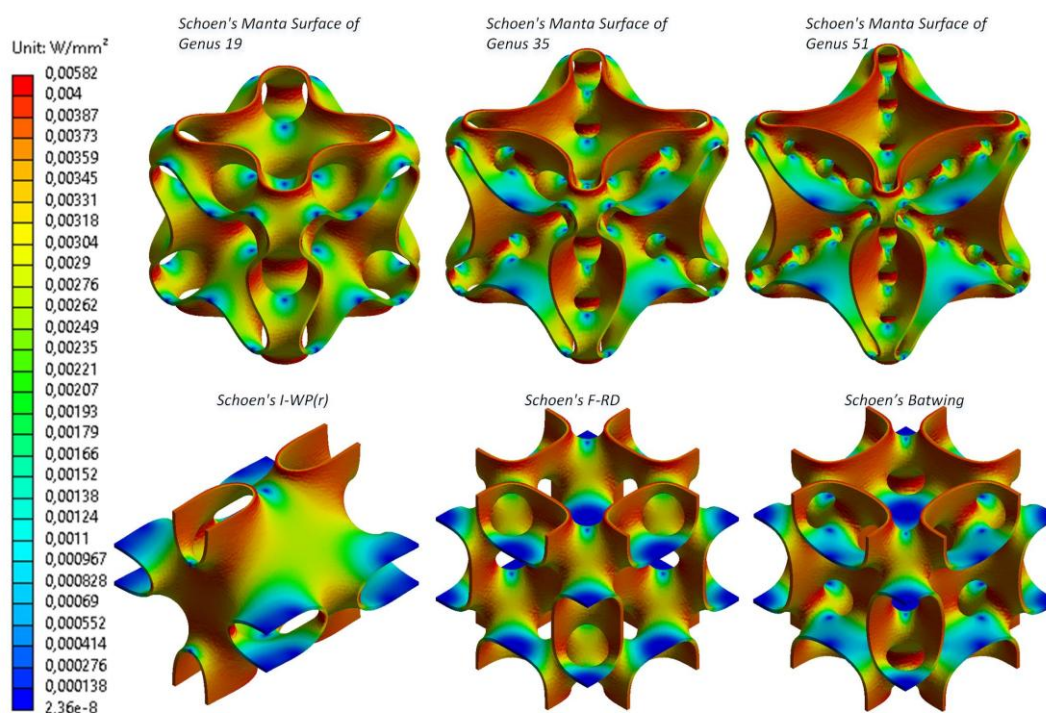


Рисунок 2.9.3. Распределение тепловых потоков в конструкциях на основе TPMS

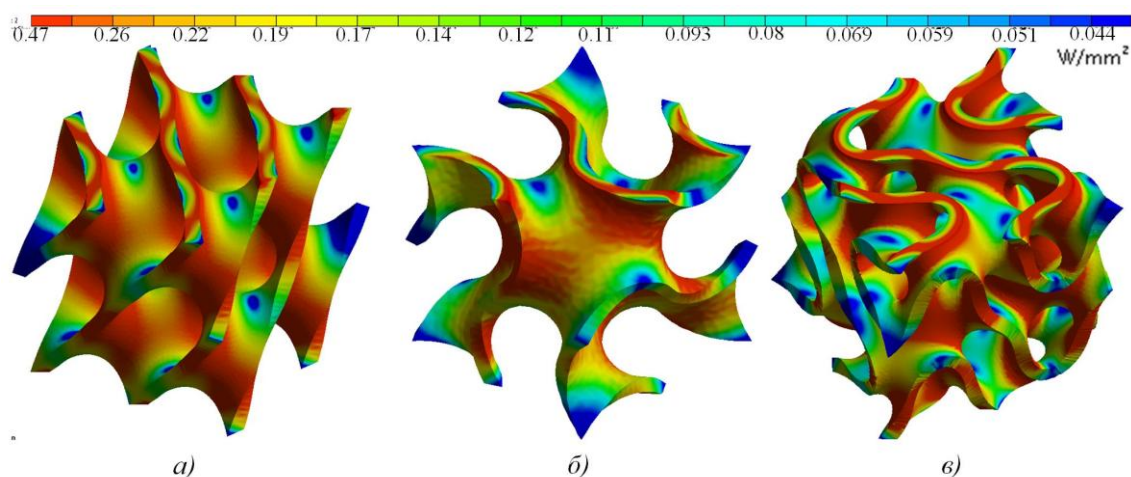


Рисунок 2.9.4. Распределение тепловых потоков: а) конструкция на основе Diamond; б) конструкция на основе Gyroid; в) конструкция на основе Fisher-Koch S

Области с максимальным тепловым потоком вызывают значительные термические напряжения, которые важно учитывать при разработке ребрения теплообменного оборудования. Во всех структурах в местах пересечения ребер ячейки имеются минимумы тепловых потоков. Максимумы тепловых потоков расположены на ребрах ячейки, где тепловая энергия может

передаваться потоку с закрученным характером движения [5]. Наименьшее количество зон с минимумами тепловых потоков отмечается у структуры Gyroid, что приводит к равномерной передаче тепла потоку [90]. Однако площадь поверхности Gyroid меньше, чем у других рассмотренных поверхностей, что снижает общую эффективность теплопередачи [75]. Структуры Diamond и Fisher-Koch S имеют более обширные области с максимальными тепловыми потоками, но из-за постоянного изменения направления потока и перемешивания, структуры могут демонстрировать высокий коэффициент теплоотдачи [79, 83]. Также большая извилистость структур может увеличивать путь потока и, соответственно, время взаимодействия между жидкостью и твердой стенкой [69].

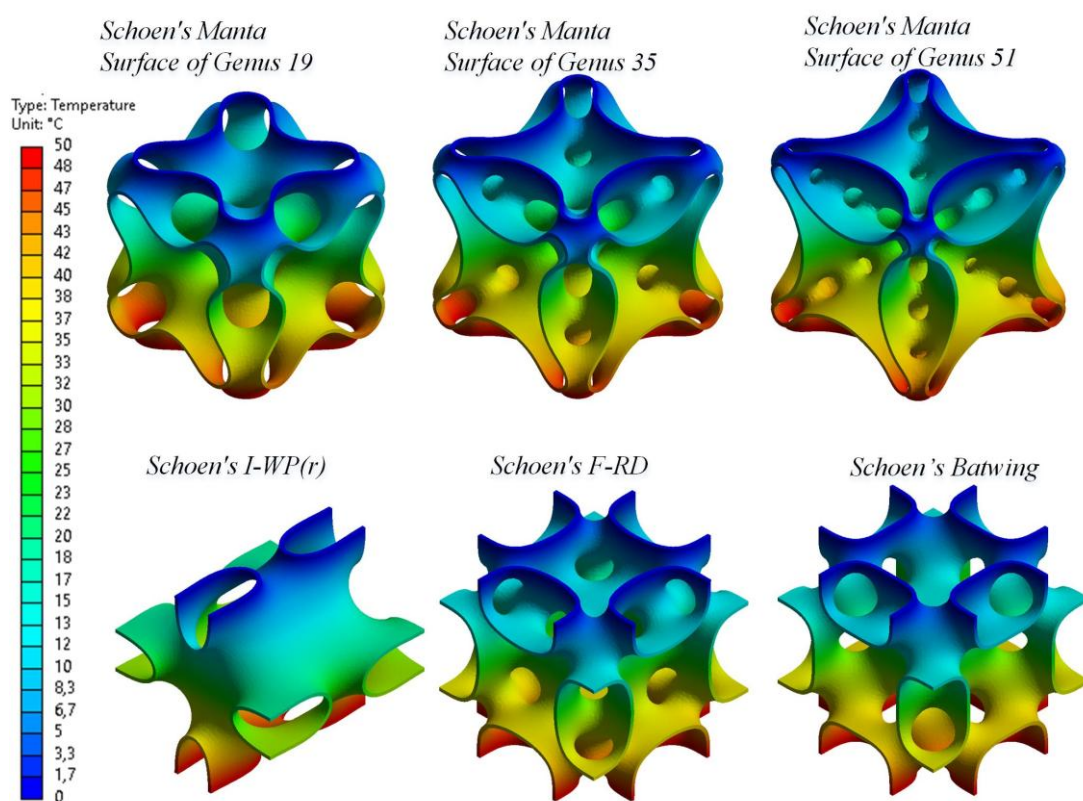


Рисунок 2.9.5. Распределение температур в структурах на основе TPMS

2.10. Теплопроводность композиционного материала с решеткой на основе TPMS типа

Многокомпонентные материалы, известные как композиционные материалы, применяются при изготовлении кузовных деталей автомобиля,

строительных конструкциях, ветряных турбинах, корпусах электроники и т.д. [139-140]. Они обладают прогнозируемыми физическими, прочностными и другими свойствами. В состав композита входят два и более компонента с существенно отличающимися физико-химическими свойствами. Путем объединения компонентов, получают новые материалы со свойствами, отличающимися от компонентов композита и не являющиеся их простой суперпозицией. Важно понимать, что компоненты композита могут иметь сложную геометрическую структуру. Путем изменения геометрических характеристик можно получить свойства композита в широком спектре. Многие новые материалы – композиты превосходят традиционные однородные материалы по механическим свойствам [141-142]. Комбинирование компонентов для получения нового материала позволяет получать требуемые свойства под конкретную конструкционную задачу. Часто композиты используются в целях уменьшения массы конструкции, улучшения прочностных характеристик. Так, например, в строительстве активно используется технология армирования бетонных конструкций арматурой [147-148]. Армирование способ увеличения прочностных характеристик материала другим материалом с превосходящими прочностными показателями. Так, арматура в бетонных конструкциях позволяет выдерживать нагрузки на растяжение, изгиб и скручивание [149]. А бетон, усиленный арматурой, также улучшает свои характеристики (повышение сопротивления динамическим и статическим воздействиям, трещиностойкость, срок службы и т.д.).

Существует и множество других примеров применения технологий армирования. В большинстве случаев в качестве армирующего материала используют металлы. Структура армирующего материала, как компонента композита, может быть со сложной геометрией, что также увеличивает прочностные показатели. На данный момент активно развиваются аддитивные технологии 3D печати, что упрощает изготовление композитов со сложной

геометрией. При проведении исследований часто используются промышленные и бытовые 3D принтеры [150].

Как правило, теплоизоляционные материалы имеют невысокие прочностные показатели, поэтому комбинирование их с металлическим армированием имеет высокий потенциал применения в строительстве и других сферах [241]. При этом важно понимать, как повлияет армирование материала на теплопроводящие свойства композита.

Очевидно, применение сфер не ограничивается автомобилестроением, строительством и энергетикой. Композиционные материалы продолжают находить все новые сферы применения благодаря возможности точного подбора их свойств под конкретные задачи и условия эксплуатации [143].

В ряде задач, связанных с переносом тепла, а в частности при проектировании тепловой защиты и изоляции систем, необходим точный подбор теплопроводности конструкции [144]. На данный момент существуют экспериментальные методы определения теплопроводности материалов, среди которых метод стационарного теплового потока, метод горячей нити, тепловизионный метод и другие [145,146]. Каждый из методов имеет свои особенности и ограничения, поэтому выбор конкретного метода зависит от типа материала, его структуры, толщины, а также от требуемой точности.

Однако в случае, когда необходимо определить теплопроводность материала на стадии проектирования до изготовления композита, применяются аналитические методы. Использование параллельной модели демонстрирует максимальные значения теплопроводности при параллельном расположении элементов композита. При более сложной структуре используются уравнения Максвелла. Однако уравнения Максвелла могут быть использованы для композитов с изотропными свойствами. В композиционных материалах с сотовым сердечником свойства чаще всего анизотропны, а теплопроводность описывается тензором теплопроводности (2.10.3). В этом случае термическое сопротивление материала зависит от направления

распространения тепла, что не учитывается в параллельной модели и уравнениях Максвелла.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.10.3)$$

В текущем исследовании представлен метод численного эксперимента, реализованного в программном комплексе ANSYS, который позволяет определять теплопроводность анизотропного композиционного материала.

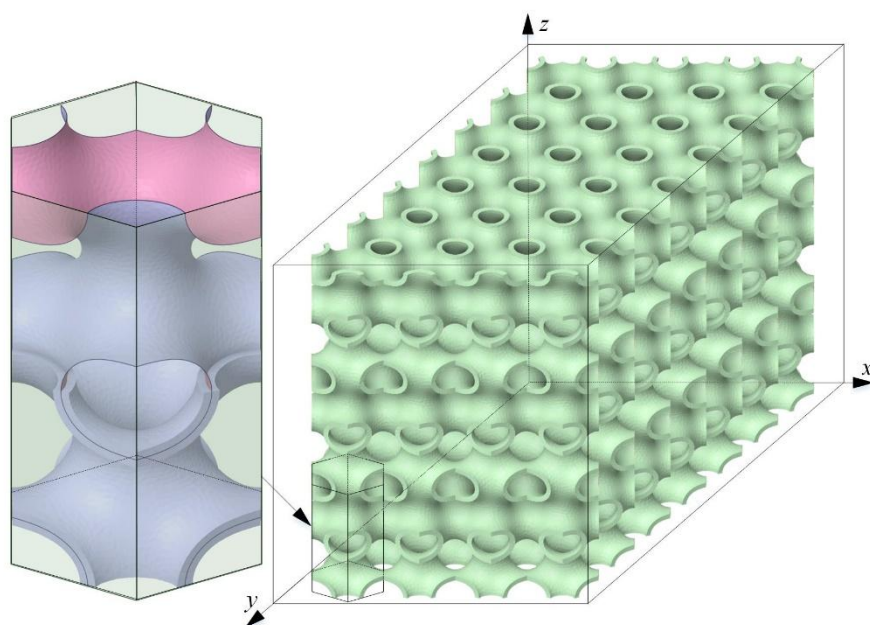


Рисунок 2.10.1. Стальной сердечник композиционного материала, основанный на TPMS типа Schoen's GW

В связи с вышеизложенными факторами было проведено исследование теплофизических свойств композиционного материала. В качестве матрицы стального армирования используется трижды периодическая минимальная поверхность Schoen's GW (рис.2.10.1). Указанная поверхность активно изучается и результаты исследований представлены в открытом доступе [151,74]. Материалы из TPMS обладают рядом преимуществ [152,153].

На рис. 2.10.1 представлена геометрическая модель сердечника композиционного материала. Комбинирование сердечников и последующее

заполнения межпорового пространства (матрицы) позволяет получить композиционный материал требуемого масштаба. В качестве стального сердечника используется структура, основанная на TPMS типа [154], а матрица композиционного материала заполнена керамикой.

Таблица 2.10.1 Геометрические размеры RVE объема Schoen's GW

№	Длина x, мм	Ширина z, мм	Высота y, мм	Относительный объем	
				Керамика	Металл
1	13,1	10,1	11,7	89%	11%
2	13,1	10,1	11,7	93%	7%
3	13,1	10,1	11,7	98%	2%

Для реализации решения численным методом выбран программный комплекс CAE моделирования ANSYS. Для исследования теплофизических свойств неоднородных материалов с упорядоченной структурой применяется метод репрезентативного элементарной ячейки [155]. Размеры расчетных моделей RUC представлены в таблице 2.10.1. Теплопроводящие свойства конструкции приняты постоянными и независимыми от температуры. Объемная доля решетки TPMS (сердечника композиционного материала) варьировалась от 2% до 11%.

Введем систему координат так, как показано на Рис. 2.10.2. Теплопроводящие свойства конструкции в направлении оси OX, OY, OZ могут отличаться из-за геометрических особенностей. Таким образом в работе рассматривается три модели переноса тепла в направлении оси OX, OY, OZ.

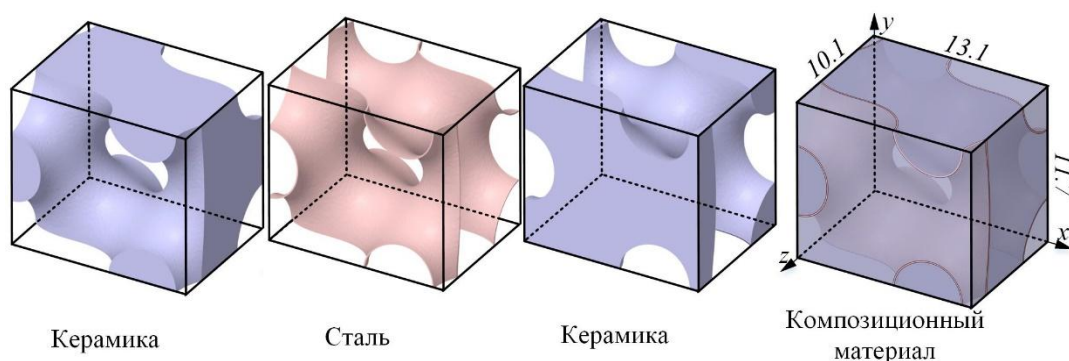


Рисунок 2.10.2. Объем RVE композиционного материала со стальным сердечником и матрицей из керамики Schoen's GW.

Для исследования используется численный эксперимент методом стационарного теплового потока. На противоположных границах ячеек задаются температуры 20°C 50°C. После определения теплового потока, проходящего через структуру в установившемся режиме, определяется эффективная теплопроводность конструкции исходя из закона Фурье (2.10.4).

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{pmatrix} \quad (2.10.4)$$

Результаты моделирования переноса тепла подтверждают анизотропность свойств рассмотренного композиционного материала. Основные результаты представлены на рисунке 2.10.3.

При увеличении относительного объема стальной решетки эффективная теплопроводность композиционного материала возрастает почти линейно во всех направлениях. Это связано с тем, что добавление стали с высокой теплопроводностью в композиционный материал, улучшает общие теплофизические свойства системы.

Теплопроводность в направлении осей OX, OY и OZ имеет различные значения, что подтверждает наличие анизотропии в структуре. Исходя из зависимости эффективной теплопроводности от относительного объема решетки TPMS в направлении оси OZ наблюдаются минимумы теплопроводности. Термическое сопротивление композиционного материала при переносе тепла в направлении OX и OY значительно ниже, что увеличивает плотность теплового потока в этих направлениях на 11-15%.

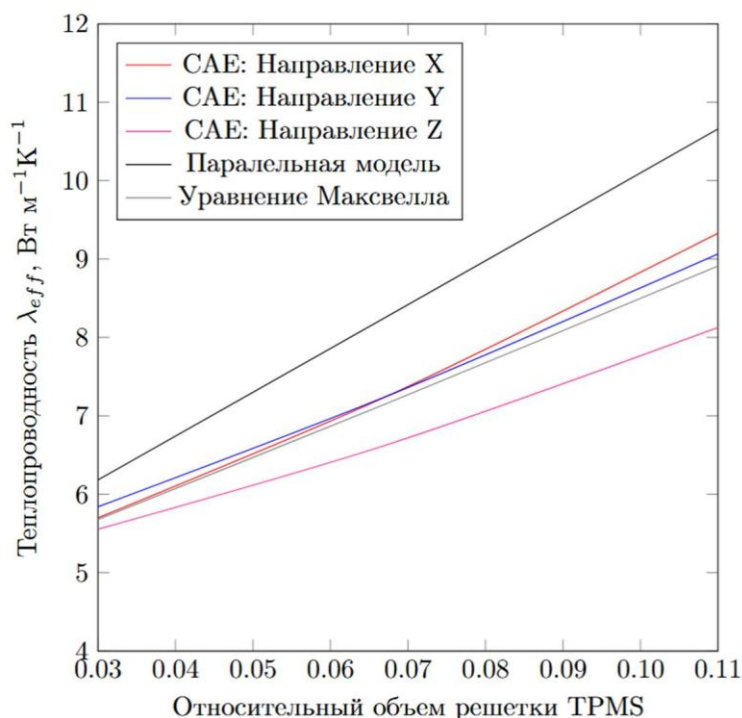


Рисунок 2.10.3. Зависимость теплопроводности композиционного материала от относительного объема стального сердечника полученная в ходе САЕ моделирования, Параллельной модели и уравнения Максвелла для структуры Schoen's GW.

Параллельная модель демонстрирует верхнюю границу для теплопроводности, поскольку она предполагает идеальный случай, при котором теплопроводность компонента распределяется параллельно по всему объему материала. Эта модель дает наибольшие значения теплопроводности, так как игнорирует сопротивление на границах между компонентами. Модель Максвелла может использоваться для определения осредненной теплопроводности по различным направлениям, однако при необходимости более точного понимания свойств могут применяться численные или натурные эксперименты.

Для использования композитов, основанных на сердечнике Schoen's GW, важно учитывать направление теплового потока и структурную анизотропию материала. Выбор ориентации композита существенно влияет на

эффективность теплопередачи, что может быть использовано при оптимизации термических характеристик конструкции.

2.11. Определение эффективной теплопроводности TPMS структуры Primitive посредством теоретического анализа

Эффективная теплопроводность решетки Primitive, определяемая геометрическими характеристиками и свойствами материала, может быть определена посредством теоретического анализа [234]. Теоретический анализ также включал методы гомогенизации и метод RVE. Структура Primitive представлена на рисунке 2.11.1.

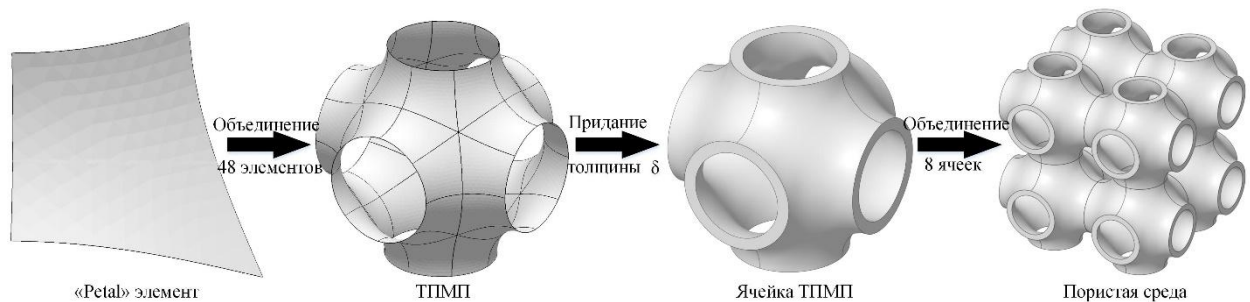


Рисунок 2.11.1. Решетка Primitive, построенная путем объединения лепестков с единую ячейку и последующее утолщение.

Свойства теплопроводности элементарной ячейки решетки Primitive в направлении оси OZ определяются свойствами материала каркаса, размером ячейки a и величиной толщина стенки δ . Для определения $\lambda_{эфф}$ просветность в направлении оси OZ рассматривалась как функция безразмерной координате Z и относительной толщины χ с использованием зависимости (2.11.1).

$$\gamma = \frac{a^2 - S_r}{a^2}. \quad (2.11.1)$$

На рис. 2.11.2 график иллюстрирует изменение просветности для различных значений χ и безразмерной координате Z. Независимо от χ график функции γ имеет экстремумы в точках ,безразмерной координаты Z =

0, 0,25, 0,5, 0,75, 1. Максимумы функции γ равны и наблюдаются при $z=0, 0.5, 1$, следовательно, $S_r(0) = S_r(0.5) = S_r(1) = \min$.

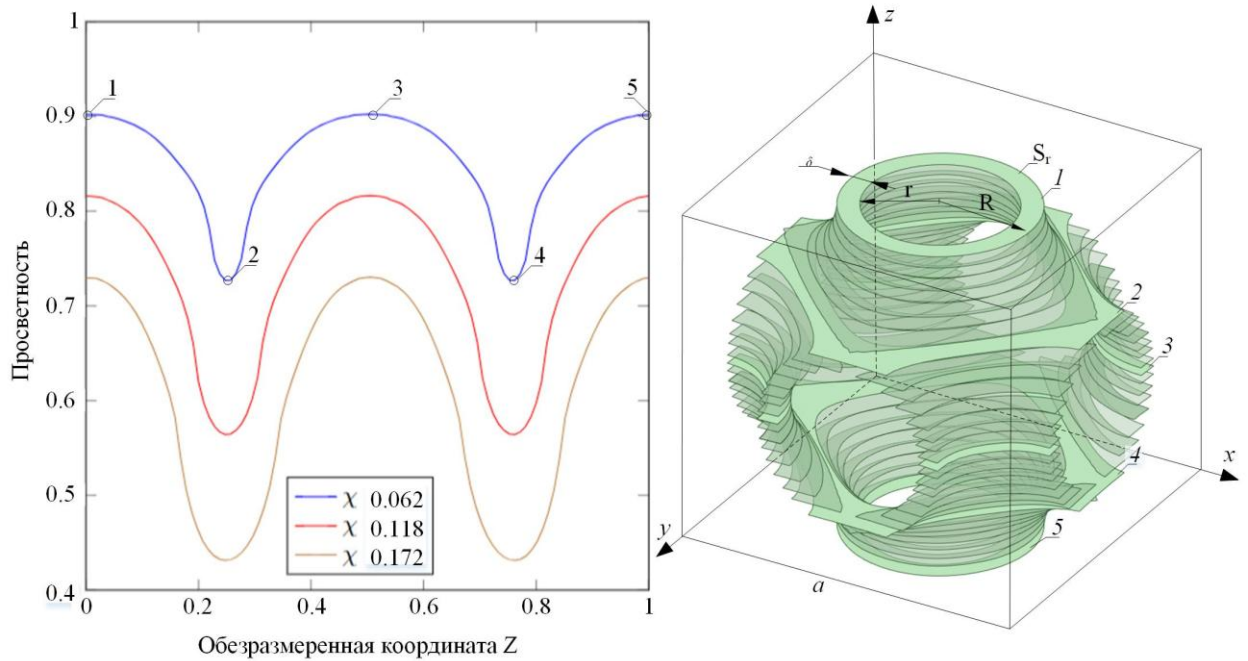


Рисунок 2.11.2. Определение просветности в элементарной ячейке а) зависимость просветности от безразмерной координаты Z и относительной толщины χ ; б) геометрическая модель ячейки Primitive

Коэффициент теплопроводности пористого материала не может быть больше, чем у твердого каркаса, и их равенство возможно только при $\gamma = 0$. Таким образом, для любого $\gamma > 0$ справедливо $\lambda_s > \lambda_{эфф}$. Теплопроводность пористого материала $\lambda_{эфф}$ меньше теплопроводности каркаса λ_s , из-за меньшей площади сечения, через которое происходит теплообмен. Далее будет показано, что отношение $\lambda_s > \lambda_{эфф}$ определяется просветностью в минимальном сечении. Это утверждение справедливо, когда градиенты температуры в соответствующих точках гомогенизированной среды и каркаса TPMS равны. Из рис. 2.11.2 а видно, что минимальная площадь каркаса ($z=0$) в направлении переноса тепла определяется как площадь кольца толщиной δ :

$$S_r = \pi(R^2 - r^2) = \pi \left(\left(\frac{a}{4} + \frac{\delta}{2} \right)^2 - \left(\frac{a}{4} - \frac{\delta}{2} \right)^2 \right) = \frac{\pi a \delta}{2}. \quad (2.11.2)$$

Учитывая, что через сечение $S_z = a^2$ протекает тепловой поток Q_z , равный тепловому потоку Q_r через S_r , эффективная теплопроводность при граничных условиях первого рода по схеме на рис. 2.11.2 б, определяется:

$$q_z S_z = q_r S_r \leftrightarrow \lambda_{эфф} (gradT)_z S_z = \lambda_s (gradT)_r S_r, \quad (3)$$

Градиент температуры в установившемся режиме при рассматриваемых граничных условиях составляет $gradT = \Delta T / a$ только для гомогенизированной среды, свойства которой остаются неизменными в направлении оси OZ. Для элементарной ячейки Primitive соотношение $(gradT)_z \approx (gradT)_r \approx \Delta T / a$ справедливо лишь приближенно. Из примерного равенства с учетом уравнений (2.11.2), (2.11.3) следует:

$$\lambda_{эфф} \approx \frac{\lambda_s S_r}{S_z} \approx \lambda_s \frac{\pi a \delta}{2a^2} \approx \frac{\pi}{2} \lambda_s \chi. \quad (2.11.4)$$

Классические уравнения определения эффективной теплопроводности (2.2.2) – (2.2.4) могут быть использованы для определения эффективной материалов с сферическими порами. Для определения теплопроводящих свойств каркаса на основе Primitive проведены множественные численные и экспериментальные исследования [239]. Зависимости коэффициентов теплопроводности каркаса от пористости, полученные в работах, могут быть обобщены и записаны в виде:

$$\lambda_{эфф} = \psi \lambda_s (1 - \varepsilon)^m, \quad (2.11.5)$$

где ψ и m – постоянные, определяемые согласно Табл. 2.11.1.

Таблица 2.11.1. Коэффициенты численных моделей

Модель	ψ	m
Molteni [47]	0.676	1
Stallard [154]	0.655	1
Mirabolghasemi [49]	0.6941	1.015
Abueidda [18]	0.65	0.988

На рисунке 2.11.3 представлены зависимости эффективной теплопроводности каркаса на основе Primitive от относительной толщины.

Рассматривается каркас из алюминиевого сплава AlSi10Mg [155]. На рис. 2.12.3 приведены результаты расчетов $\lambda_{эфф}$ по формулам 2.2.2 - 2.2.4, 2.11.4 - 2.11.5. Из анализа представленных графиков следует, что результаты расчетов по формулам 2.2.2 - 2.2.4, 2.11.4 - 2.11.5 согласуются лишь в диапазоне значений $0 \leq \chi < 0.1$.

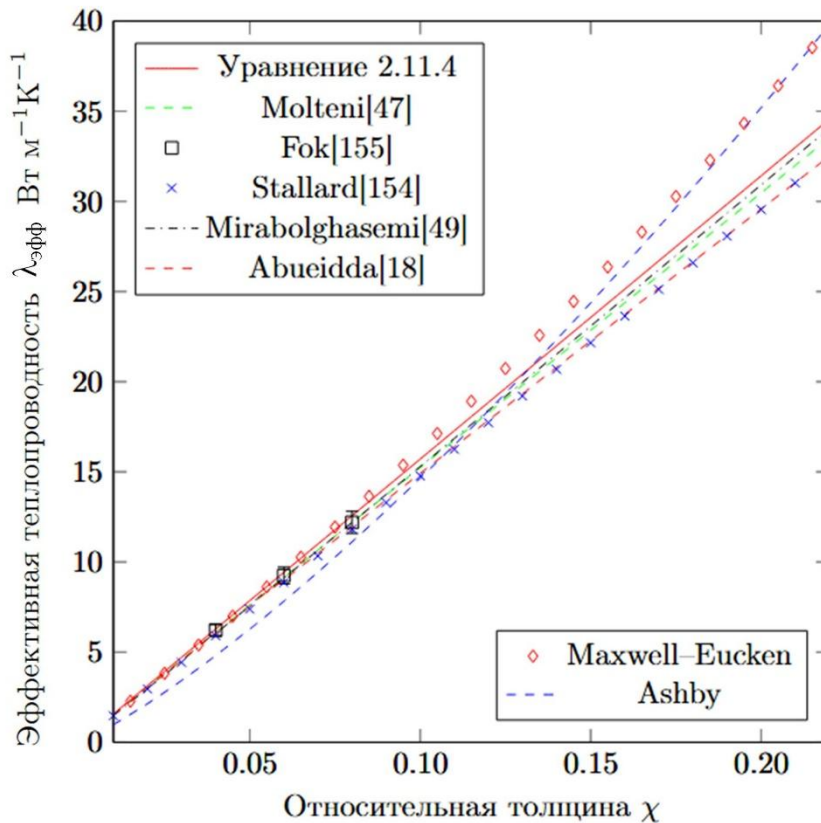


Рисунок 2.11.3. Эффективная теплопроводность каркаса на основе Primitive (AlSi10Mg) от относительной толщины по моделям текущей работы уравнение (2.11.4), Molteni [47], Fok [155], Stallard [154], Mirabolghasemi [49], Abueidda [18], Maxwell-Eucken

При большей относительной толщине расхождение результатов вычислений $\lambda_{эфф}$ возрастает. Таким образом, использование классических моделей Maxwell-Eucken, Ashby и др. возможно лишь в узком диапазоне изменения относительной толщины. Важно отметить, что результаты, полученные согласно моделям Molteni, Stallard, Mirabolghasemi, Abueidda и по формуле (4), согласуются во всем рассматриваемом диапазоне χ (расхождение

результатов не превышает 5%). Несущественное расхождение результатов может быть вызвано особенностями моделей САПР и CAE моделирования. Для создания модели САПР пористой среды в работах [18,47,49,154] использовались различные программные комплексы – Surface Evolver, MSLattice, Matlab соответственно. CAE моделирование осуществлялось с использованием Abaqus, Comsol Multiphysics и др. Уравнение (2.11.4) получено на основе анализа топологии TPMS ячейки, а не на основе обобщения данных вычислительных экспериментов, и, соответственно, не имеет погрешности вызванной дискретизацией модели. Отметим, что результаты, полученные в настоящей работе, практически совпадают с данными [49] (модель Mirabolghasemi). Это связано с использованием аналогичных подходов по осреднению свойств пористых сред – методов гомогенизация и RVE.

В случае, если при определении коэффициента эффективной теплопроводности по формуле (2.11.4) неизвестно значение относительной толщины λ , но задана пористость, можно воспользоваться приближенной зависимостью 2.1.5.

2.12. Теплопроводность конструкций на основе TPMS, полученных из цеолитных каркасов

Существуют новые подходы для генерации TPMS поверхностей, в том числе на основе генерации трехкратно периодических поверхностей, при помощи кристаллических структур химических соединений [229]. Однако аналогично другим TPMS структурам, необходимо исследование теплопроводящих свойств структур. В текущем параграфе рассмотрены теплопроводящие свойства новых TPMS структур, представленных на рисунке 2.12.1

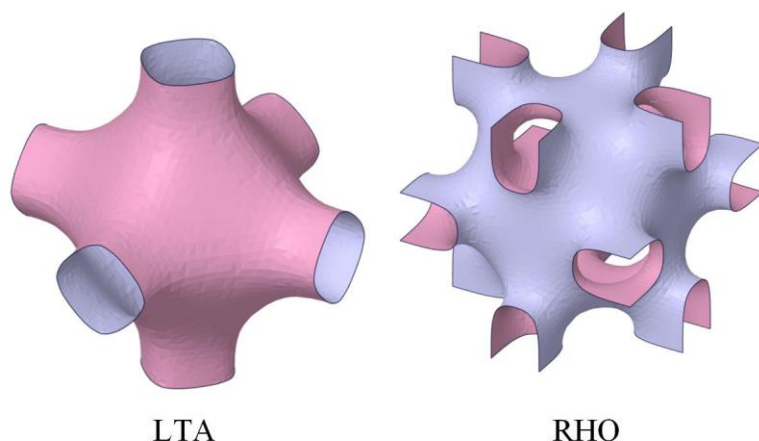


Рисунок 2.12.1. Структуры TPMS полученные на основе кристаллических структур химических соединений.

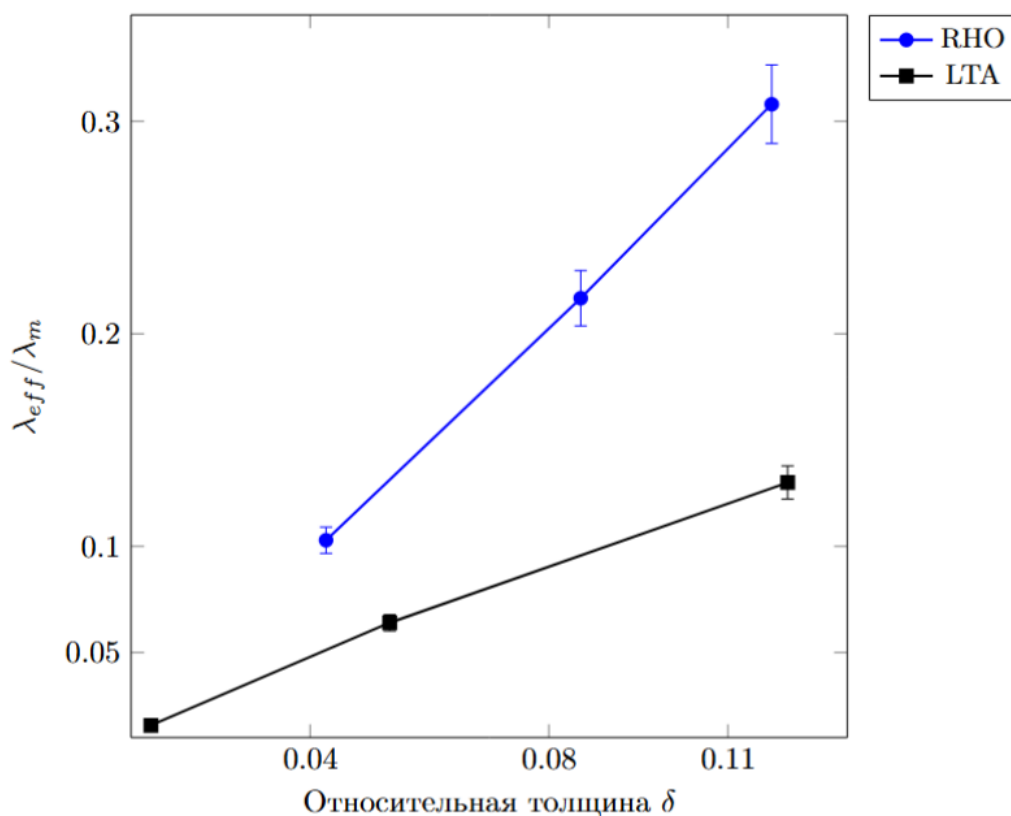


Рисунок 2.12.2. Зависимость эффективной теплопроводности от относительной толщины для новых видов TPMS типа LTA и RHO.

Аналогично методике, представленной в параграфе 2.2, было проведено исследование новых TPMS типов RHO и LTA. На рисунке 2.12.2 представлены результаты численного моделирования и натурального эксперимента эффективной теплопроводности от относительной толщины для нескольких материалов. В качестве минимального элементарного объема для

исследования согласно методике RUC использовалась также элементарная ячейка. По аппроксимации и нормализации по теплопроводности материала также получены коэффициенты β который используется для определения эффективной теплопроводности пористого образца TPMS структуры по уравнению 2.6.1. Коэффициенты β для новых структур представлены в таблице 2.12.1

Таблица 2.12.1 Константа β для структур LTA и RHO

TPMS	LTA	RHO
β	1.15	2.52

Таким образом, для создания материалов с заданными теплопроводящими свойствами также может использоваться новые TPMS структуры полученные на основе генерации трехкратно периодических поверхностей, при помощи кристаллических структур химических соединений. Полученные коэффициенты для зависимости 2.6.1 расширяют список TPMS которые могут найти применение в новых системах терморегулирования включая РСМ материалы, теплообменное оборудование и др.

3. Определение гидродинамических характеристик в конструкциях основанным на TPMS

В п. 3.1 представлены основные научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена. Обозначены основные проблемы традиционных методов подходов интенсификации теплопереноса. Существенный акцент сделан на возможности интенсификации теплопереноса путем внедрения TPMS конструкций в теплообменное оборудование.

П.3.2 посвящен описанию формирования геометрии оребрения и формирования расчетных моделей в системах САД комплексах. Геометрия п.2.1, однако требует более существенной обработки для компьютерного моделирования.

П3.3 содержит описание методов численного моделирования в рамках текущей главы, способов формирования сетки, определению формы потока в различных структурах TPMS, определению застойных областей, которые отрицательно сказываются на коэффициенте теплопередачи.

В п.3.4 рассмотрено определение гидравлических потерь давления потока при прохождении через структуру TPMS путем численного моделирования. Результаты численного моделирования аппроксимированы эмпирической зависимостью потерь давления от скорости и формы TPMS.

Верификация результатов численного моделирования выполнена при помощи натурного эксперимента описаного в п.3.5. Определение потерь давления потока при прохождении через TPMS вставку выполнялось на Лабораторная установка ВЕНТ-08-7ЛР-01.

В п.3.6 Разработана модифицированное уравнение Хагена–Пуазейля для расчёта гидравлических потерь давления в пористых материалах на основе TPMS, учитывающее параметры потока и геометрические характеристики структуры.

В п.3.7. рассмотрены совмещенные процессы тепломассопереноса в струах TPMS. Различные типы оребрения сравнивались между собой с учетом результатов, полученных в главе 2.

3.1. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена

Повышение эффективности теплопереноса в теплообменном оборудовании является актуальной и глобальной задачей [156], имеющей фундаментальное и прикладное значение для энергетики, машиностроения, химической промышленности и аэрокосмических технологий. Увеличение плотности тепловых потоков [157], рост рабочих температур и ужесточение требований к массо-габаритным характеристикам [158], к энергоэффективности и надёжности оборудования обуславливают необходимость создания теплообменных устройств с высокой удельной производительностью [159]. В этих условиях интенсификация процессов тепло- и массообмена рассматривается как один из основных путей повышения эффективности функционирования теплотехнических систем. При этом традиционное увеличение размеров теплообменных поверхностей или повышение расхода теплоносителя не всегда является допустимым решением [160].

Существующие методы интенсификации процессов тепло- и массообмена условно подразделяются на пассивные и активные. Активные методы предполагают использование внешних воздействий на поток или теплообменную поверхность, таких как вибрации [161], пульсации [162], и управляемых изменений режимов течения [163]. Несмотря на высокую эффективность, данные подходы ограничены сложностью реализации и дополнительными энергетическими затратами, что сдерживает их широкое промышленное применение. В связи с этим наибольшее распространение получили пассивные методы интенсификации, не требующие подвода дополнительной энергии и реализуемые за счёт конструктивных изменений теплообменного тракта. К традиционным пассивным методам относятся

оребрение теплообменных поверхностей [164], использование турбулизаторов [165], шероховатых и пористых вставок [166].

Одним из наиболее распространённых способов интенсификации теплопереноса является увеличение площади теплообменной поверхности, реализуемое за счёт оребрения или использования развитых геометрических структур. Рост площади контакта между теплоносителем и твёрдой поверхностью приводит к увеличению суммарного теплового потока без необходимости существенного изменения режимных параметров течения.

Другим широко применяемым механизмом является турбулизация потока, направленная на разрушение пограничных слоёв. Введение в поток турбулизаторов и вихрегенирующих элементов способствует интенсификации тепло- и массообмена за счёт увеличения перемешивания и снижения термического сопротивления вблизи стенки. Однако данный подход, как правило, сопровождается значительным ростом гидравлического сопротивления, что ограничивает его эффективность с точки зрения энергетического баланса теплообменного оборудования [167].

С точки зрения теплофизики, процессы интенсификации теплопереноса основаны на управлении механизмами переноса энергии и вещества, включая теплопроводность, конвекцию и диффузию. Эффективность теплообмена определяется режимом течения, геометрией теплообменной поверхности, а также свойствами теплоносителя и материала конструкции. Важную роль играют безразмерные критерии, такие как числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, позволяющие обобщать результаты исследований и выявлять закономерности интенсификации.

В задачах тепловой защиты [168] особое значение приобретает возможность контролируемого распределения тепловых потоков и снижения локальных тепловых нагрузок, локальных температурных градиентов и термических напряжений. Это требует разработки методов, обеспечивающих не только увеличение интенсивности теплообмена, но и управление его

пространственной направленностью [169]. В связи с этим современные исследования направлены на поиск структурных и геометрических решений, позволяющих сочетать высокую эффективность теплопереноса с оптимальными гидродинамическими и тепловыми характеристиками.

Несмотря на широкое распространение и доказанную эффективность, традиционные методы интенсификации теплопереноса обладают рядом существенных ограничений, которые сдерживают их применение в современных теплообменных системах. В первую очередь это связано с тем, что повышение коэффициента теплоотдачи за счёт турбулизации потока или усложнения геометрии канала, как правило, сопровождается ростом гидравлического сопротивления. В результате возрастает потребляемая мощность насосного оборудования. Кроме того, реализация данных методов часто требует увеличения массогабаритных характеристик аппаратов, что противоречит современным требованиям к компактности и конструкционной эффективности.

Дополнительным ограничением является ограниченная управляемость геометрических параметров традиционных интенсификаторов. Оребрение, турбулизаторы и пористые вставки часто имеют фиксированную или слабо варьируемую форму, что затрудняет их оптимизацию под конкретные условия эксплуатации. Кроме того, многие конструкции характеризуются локальными концентрациями напряжений и неравномерным распределением тепловых потоков, что негативно сказывается на долговечности и надёжности оборудования, особенно в условиях высоких температур и циклических тепловых нагрузок. Ограниченные возможности геометрической оптимизации традиционных интенсификаторов, а также их локальный характер воздействия на поток обуславливают необходимость разработки новых подходов к формированию теплообменного тракта, основанных на управляемой пространственной организации структуры.

Особую актуальность приобретают методы, позволяющие одновременно увеличивать удельную поверхность теплообмена, усиливать перемешивание теплоносителя и при этом сохранять приемлемый уровень гидравлических потерь. Это создаёт предпосылки для внедрения новых геометрических концепций, способных обеспечить эффективную интенсификацию тепло- и массообмена при оптимальном соотношении потерь давления в теплообменных устройствах. В рамках таких подходов интенсификация теплопереноса рассматривается не как побочный эффект турбулизации, а как результат целенаправленного формирования структуры течения и теплового поля [170]. Такие подходы должны обеспечивать согласованное повышение теплообменной эффективности и снижение термических напряжений при приемлемом уровне гидравлических потерь.

В условиях выявленных ограничений традиционных методов интенсификации особый интерес представляют подходы, основанные на использовании структурно-упорядоченных поверхностей и пористых сред с контролируемой геометрией [171]. В отличие от стохастических или локальных интенсификаторов, такие структуры позволяют целенаправленно формировать тепловые и гидродинамические поля, что открывает перспективы для интенсификации тепло- и массообмена при ограничении роста гидравлического сопротивления.

Развитие аддитивных технологий изготовления существенно расширило возможности практической реализации сложных пространственных структур, ранее недоступных традиционным методам производства [172]. Это привело к активному исследованию периодических пористых материалов и поверхностей, геометрия которых может быть строго задана аналитически.

Среди таких структур как уже отмечалось ранее особое место занимают тройные периодические минимальные поверхности (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS), представляющие собой класс математически описываемых поверхностей, обладающих высокой удельной поверхностью при заданном

объёме и регулярной пространственной организацией и возможностью аналитического задания геометрии, что делает их удобным объектом для численного и экспериментального анализа [173].

Использование тройных периодических минимальных поверхностей (TPMS) в качестве структурных элементов, функционально аналогичных ребрению может быть потенциально положительно сказываться на интенсификации теплопереноса [174]. Сложная криволинейная геометрия TPMS способствует формированию вторичных течений, интенсификации перемешивания и локальной турбулизации потока, что потенциально позволяет повысить коэффициент теплоотдачи. Нулевая средняя кривизна минимальных поверхностей может способствовать снижению локальных потерь давления по сравнению с традиционными турбулизаторами при сохранении интенсивного тепло- и массообмена.

Среди ключевых преимуществ исследователи отмечают возможность регулировки типа поверхности [29], толщины и длины ячейки [5], пористости материала под требования каждой уникальной задачи [61]. TPMS решетки обладают большей суммарной площадью теплообмена при минимальном объеме [236], а сама решетка делит пространство на два и более непересекающихся объема/лабиринта, что позволяет использовать такую структуру в рекуперативных теплообменниках [237]. Поскольку средняя кривизна TPMS равна нулю, поток через решетку TPMS может свободно двигаться в любом направлении без значительных гидравлических сопротивлений [83]. Исследования в области переноса массы и импульса также демонстрируют потенциал внедрения таких материалов в теплообменное оборудование [175,56,65]. Это объясняется рядом преимуществ TPMS конструкций перед другими ячеистыми решетками.

Как показано в предыдущих главах, в элементах теплообменного оборудования формируются зоны повышенных термических напряжений, обусловленные неравномерным распределением температурных полей и

локальными тепловыми нагрузками. С точки зрения повышения надёжности и долговечности конструкций важным является формирование таких теплообменных структур, в которых данные зоны эффективно омываются теплоносителем, обеспечивая интенсивный отвод тепла и снижение температурных градиентов. Вместе с тем вопросы количественной оценки гидравлических потерь и их зависимости от геометрических параметров TPMS-структур остаются недостаточно изученными.

Сочетание высокой удельной поверхности, регулярной геометрии и масштабируемости делает TPMS структуры перспективным инструментом интенсификации теплопереноса в теплообменном оборудовании нового поколения. Вместе с тем, несмотря на возрастающий интерес к данному классу поверхностей, вопросы обобщённого описания их теплофизических свойств и возможности универсального применения в теплообменных устройствах остаются недостаточно исследованными, что определяет актуальность дальнейших исследований в данном направлении. Фундаментальным этапом оценки эффективности TPMS структур является исследование структуры течения теплоносителя внутри таких конструкций. Анализ векторных полей скоростей, форм потоков, зон рециркуляции и интенсивности перемешивания позволяет выявить механизмы интенсификации тепло- и массообмена и установить связь между геометрическими параметрами структуры и её теплофизическими характеристиками.

На данный момент в качестве ребрения уже рассмотрена конструкция Primitive, которая продемонстрировала потенциал внедрения в теплообменное оборудование [176]. Однако в ходе углубленного исследования гидродинамических характеристик структуры, было выявлено, что ребрение на основе Primitive может приводить к возникновению застойных областей до 30% от общего объема. Площадь поверхности и эффективная теплопроводность конструкции Primitive [225] демонстрирует минимальные значения по сравнению с другими типами TPMS. Так конструкции на основе

Schoen's IWP и Neovius обладают большей эффективной теплопроводностью на 50-53% и на 42-46% большей площадью поверхности по сравнению с оребрением Primitive [233]. Возникновению застойных зон в структурах Schoen' WP и Neovius препятствуют постоянные изменения направления, завихрений, перемешивания и турбулизации потока теплоносителя [227]. Однако это приводит к увеличению потери давления для Neovius в 8 раз. Увеличение потерь давления в 8 раз приводит к значительным дополнительным затратам электроэнергии на перенос жидкости в теплообменном устройстве. Увеличение потерь давления потока при прохождении через конструкцию Schoen' WP составляет не более 50%. Поток в структуре Primitive имеет прямолинейной трубчатой формой, в то время как поток в структуре Schoen's IWP обладает извилистостью, которая увеличивает путь потока и, соответственно, время взаимодействия между жидкостью и твердой стенкой [69].

В этой связи актуальной является постановка задачи комплексного исследования гидродинамических и термодинамических процессов в теплообменных конструкциях на основе TPMS.

3.2. Формирование САПР оребрения и теплообменного оборудования на основе TPMS-структур

Описание формирования геометрии структуры TPMS представлено ранее и общий подход совпадает с подходом описанным в параграфе 2.1. TPMS поверхности описываются строгими тригонометрическими уравнениями. Так решетка типа Schoen's IWP может быть описана функцией (3.2.1)

$$2 \left[\cos \frac{2\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{a} + \cos \frac{2\pi y}{a} \cos \frac{2\pi z}{a} + \cos \frac{2\pi z}{a} \cos \frac{2\pi x}{a} \right] - \left[\cos \frac{4\pi x}{a} + \cos \frac{4\pi y}{a} + \cos \frac{4\pi z}{a} \right] = \pm \frac{\delta}{2} \quad (3.2.1)$$

Вся решетка может быть разбита на повторяющиеся элементы – элементарные ячейки. Характерными размерами, исходя из функции 3.2.1 и предыдущих исследований [227], являются длина «а» равная периоду поверхности уровня и толщина ячейки «δ» равная разности параметров

смещения двух уравнений поверхности уровня $f(x,y,z,a)$. Область, ограниченная эквидистантными поверхностями, образует стенку. Таким образом, вся геометрия структуры TPMS с жидкостью в межпоровом пространстве может быть описана выражением:

$$f(x, y, z, a) = \begin{cases} f > \delta/2 \forall f \in \Omega_1 (\text{Теплоноситель}) \\ |f| \leq \delta/2 \forall f \in \Omega_2 (\text{Оребрение}) \\ f < \delta/2 \forall f \in \Omega_3 (\text{Теплоноситель}) \end{cases} \quad (3.2.2)$$

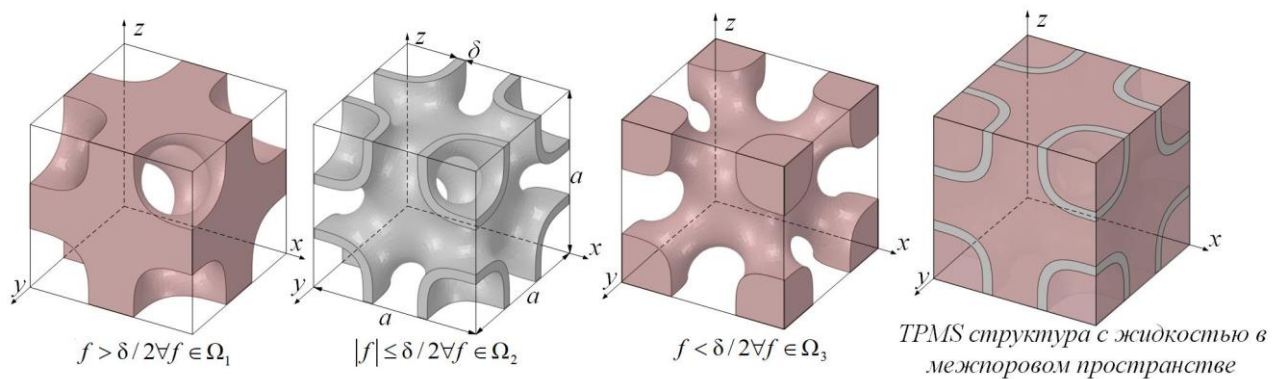


Рисунок 3.2.1. Решетка, основанная на элементарных ячейках TPMS типа Schoen's IWP, с заполненным межпоровым пространством

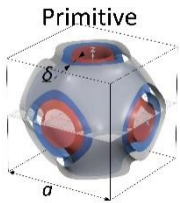
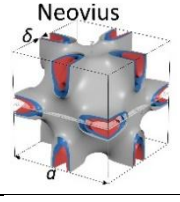
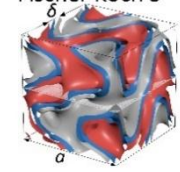
На рисунке 3.2.1 представлена решетка и элементарная ячейка, основанные на поверхности типа Schoen's IWP с учетом жидкости в межпоровом пространстве.

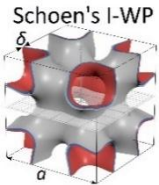
Первым шагом процесса формирования геометрии является импортирование файла с информацией о неявной функции из библиотеки Кена Бракке в Surface Evolver. В программе выполняется построение фасетированной поверхности в виде облака точек. После облако точек обрабатывается и формируется CAD модель фасетированной поверхности TPMS с нулевой толщиной. С помощью встроенных функций ANSYS модуля SpaceClaim Direct Modeler из поверхности формировалась твердотельная структура TPMS ограниченная двумя эквидистантными поверхности отдаленными друг от друга на величину δ . После получения твердотельной геометрической модели оребрения в среде CAD моделирования формируется канал теплоносителя и греющие пластины.

Несмотря на то, что TPMS конструкции описываются строгими математическими уравнениями применение традиционных аналитических методов [177-178], вызывает ряд сложностей, в том числе описание турбулентного потока, описание застойных зон с завихрениями и обратными токами, нелинейность уравнений переноса, многообразие масштабов потоков теплоносителя. Использование компьютерного моделирования может использоваться для решения таких задач посредством численных методов конечных элементов [228]. Соответственно для исследования тепломассопереноса в рамках текущего исследования выбран программный комплекс ANSYS 2019 R3 модуль Fluid Flow (Fluent).

В соответствии с результатами представленными в второй главе для исследования гидродинамических и совмещенных задач тепломассопереноса в оребрении предложено рассмотрение наиболее простых и распространенных структур для формирования подходов исследования тепломассопереноса. К таким структурам относятся поверхности Primitive, Neovius, Schoen's I-WP, Fischer Koch S.

Таблица 3.2.1. Уравнения TPMS

Название и изображение TPMS	Частное уравнения поверхностей уровня $f(x, y, z, a) = \delta$ при $a = 10$ мм и $\delta = 0,5$ мм.
 <p>Primitive</p>	$\cos(2\pi x/10) + \cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi z/10) = \pm 0,25$
 <p>Neovius</p>	$3[\cos(2\pi x/10) + \cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi z/10)] + 4\cos(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) = \pm 0,25$
 <p>Fischer Koch S</p>	$\cos\left(\frac{4\pi x}{10}\right)\sin\left(\frac{2\pi x}{10}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{10}\right) + \cos\left(\frac{2\pi x}{10}\right)\cos\left(\frac{4\pi y}{10}\right)\sin\left(\frac{2\pi z}{10}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x}{10}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{10}\right)\cos\left(\frac{4\pi z}{10}\right) = \pm 0,25$

 <p>Schoen's I-WP δ a</p>	$2\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{10}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{10}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{10}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{10}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{10}\right)\cos\left(\frac{2\pi x}{10}\right)\right]$ $-\left[\cos\left(\frac{4\pi x}{10}\right) + \cos\left(\frac{4\pi y}{10}\right) + \cos\left(\frac{4\pi z}{10}\right)\right] = \pm 0,25$
---	--

3.3. Векторное распределение потока при прохождении через структуру TPMS

Анализ векторного распределения скорости потока является одним из ключевых инструментов при исследовании процессов тепло- и массообмена в теплообменных конструкциях со сложной геометрией. В отличие от характеристик, таких как средняя скорость или перепад давления, векторные поля позволяют выявить локальные особенности течения, определяющие характер омывания теплообменной поверхности, интенсивность конвективного переноса и формирование температурных неоднородностей.

В работах, посвящённых исследованию TPMS-структур, показано, что именно пространственное перераспределение векторов скорости обуславливает интенсификацию теплообмена за счёт формирования вторичных течений и периодического разрушения пограничного слоя. При этом для оценки эффективности таких структур принципиально важно учитывать не только наличие зон ускорения потока, но и области локального замедления, которые могут приводить к снижению теплоотдачи и возникновению зон перегрева.

Особое значение анализ векторных полей скорости приобретает в контексте термических напряжений. Как показано в главе 2, зоны максимальных температур и температурных градиентов локализуются вблизи элементов конструкции, недостаточно интенсивно омываемых теплоносителем. Следовательно, структура потока должна обеспечивать активное омывание именно этих областей, что невозможно оценить без детального анализа пространственного распределения скорости.

Кроме того, локальные изменения скорости оказывают прямое влияние на гидравлическое сопротивление. Резкие ускорения и замедления потока, а также значительные градиенты скорости вблизи поверхности приводят к росту потерь давления. В связи с этим анализ векторных полей скорости в TPMS-структурах рассматривается как необходимый этап при оценке их применимости в теплообменном оборудовании.

На рисунке 3.3.1а представлена одна из расчетных моделей рассмотренных в рамках этой главы. Перед структурой TPMS и после выполняется построение прямолинейных каналов для стабилизации потока. Поток внутри пористой вставки является турбулентным из-за высокого числа Рейнольдса и постоянного изменения сечения канала потока [179]. Поверхности S1,S2,S3 соответствуют нулевой поверхности уровня и двум эквидистантным поверхностям на расстоянии толщины структуры TPMS. Для моделирования выбрана широко используемая модель турбулентности k-omega SST, поскольку она позволяет точно прогнозировать перепад давления. Чтобы поддерживать равный массовый расход на входе и выходе модели, уравнение неразрывности решается для установившегося потока:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.3.1)$$

Уравнение сохранения импульса в декартовой тензорной форме записывается как:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (3.3.2)$$

В этой модели не исследовались теплопередающие свойства структур TPMS. Уравнение энергии для турбулентного потока имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)](\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) \quad (3.3.3)$$

Сетка для геометрий создается в модуле ANSYS Fluent и представлена на рис. 3.3.1б. Выбор вида сетки был основан на исследованиях теплообменных аппаратов с оребрением [18]. Сетка состоит из многогранных

элементов с пограничным слоем вблизи структур TPMS. Анализ чувствительности сетки проводился для измерения точности моделирования в отношении количества ячеек сетки. Были приняты и сравнены пять размеров ячеек для каждой геометрии TPMS. Таким образом, для расчета использовались модели, процентное расхождение потерь давления которых было меньше 1% для экономии вычислительного времени и сохранения точности расчета.

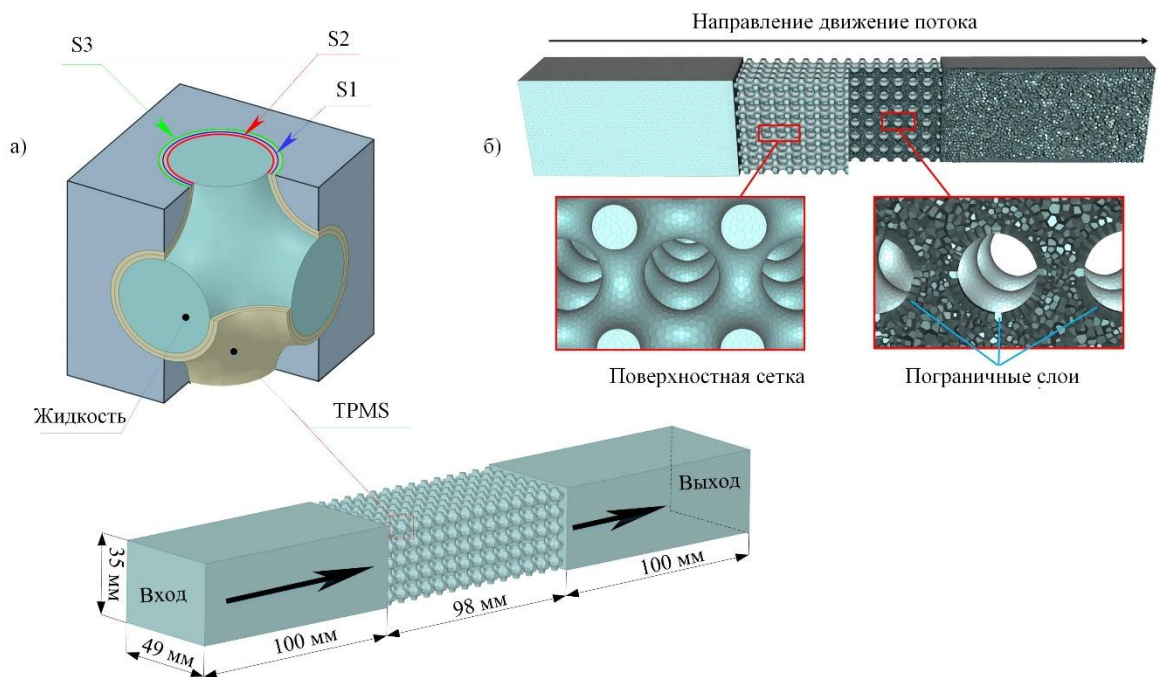


Рисунок 3.3.1. а) схема проводимого эксперимента; б) расчетная сетка для CFD моделирования.

Численное моделирование потока жидкости внутри геометрических форм TPMS Schoen I-WP, Neovius и Primitive показано на рис. 3.3.2-3.3.4. Моделирование проводилось для различных геометрических форм, размеров ячеек, входных скоростей и значений пористости. Только геометрия TPMS оказывала существенное влияние на общее распределение потока. Поэтому результаты показаны для каждой структуры TPMS с одинаковым набором геометрических и граничных условий.

Распределение потока внутри I-WP Шёна характеризуется зонами без движения жидкости. Эти зоны видны на рис. 3.3.2 (а, б, в) слева и справа от

центра ячейки. Такое поведение потока является причиной значительного обратного потока и, следовательно, еще большей извилистости потока. Авторы Attarzadeh и др. [57] наблюдали аналогичный эффект и на других геометрических конфигурациях TPMS:

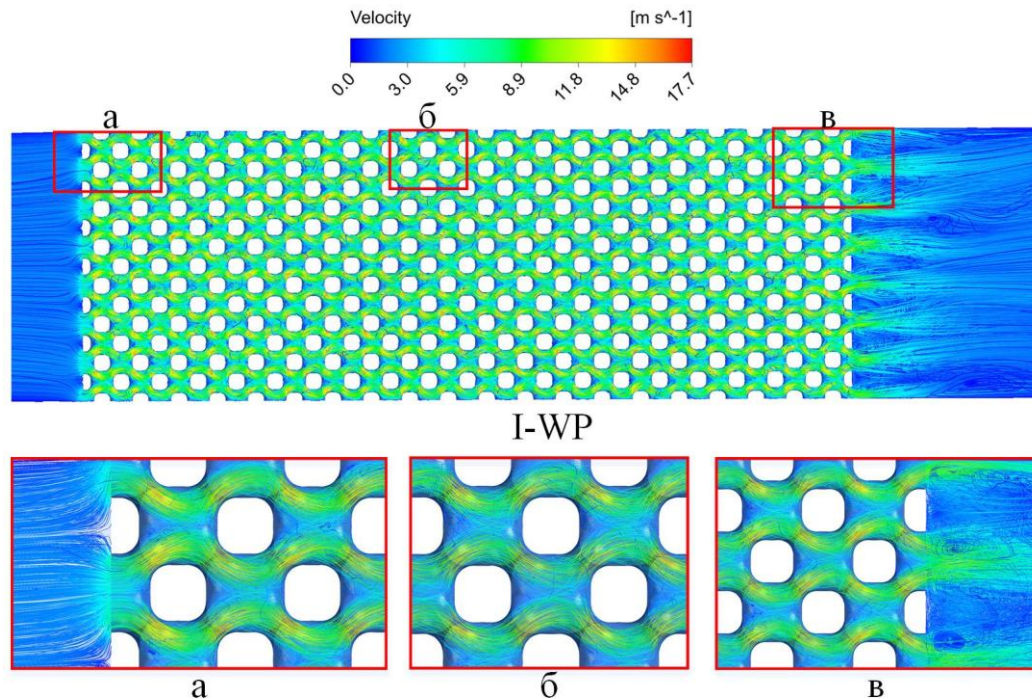


Рисунок 3.3.2. Вид сбоку распределения потока внутри конструкции Schoen I-WP TPMS при входной скорости 2 м/с, пористости 0,35 и размере ячейки 5 мм: а) на входе потока внутри TPMS; б) в центральной части; в) на выходе.

При текущей геометрии извилистость потока составляла около 5%. В насадочном слое TPMS I-WP Шёна наблюдается более интенсивное движение жидкости в центре каждой ячейки. Причина заключается в столкновении жидкости в центре ячейки с четырех направлений из-за геометрии ячейки. После столкновения поток снова разделяется и выходит из ячейки. Такая картина потока приводит к разрушению пограничного слоя, что усиливает турбулентные движения потока. Более высокая турбулентность потока положительно влияет на характеристики теплопередачи [76]. Также на рис. 3.3.2 после выхода воздушного потока из насадочного слоя происходит

вертикальное движение. Это движение жидкости вызывает неблагоприятные обратные течения, которые влияют на измерения расхода [180].

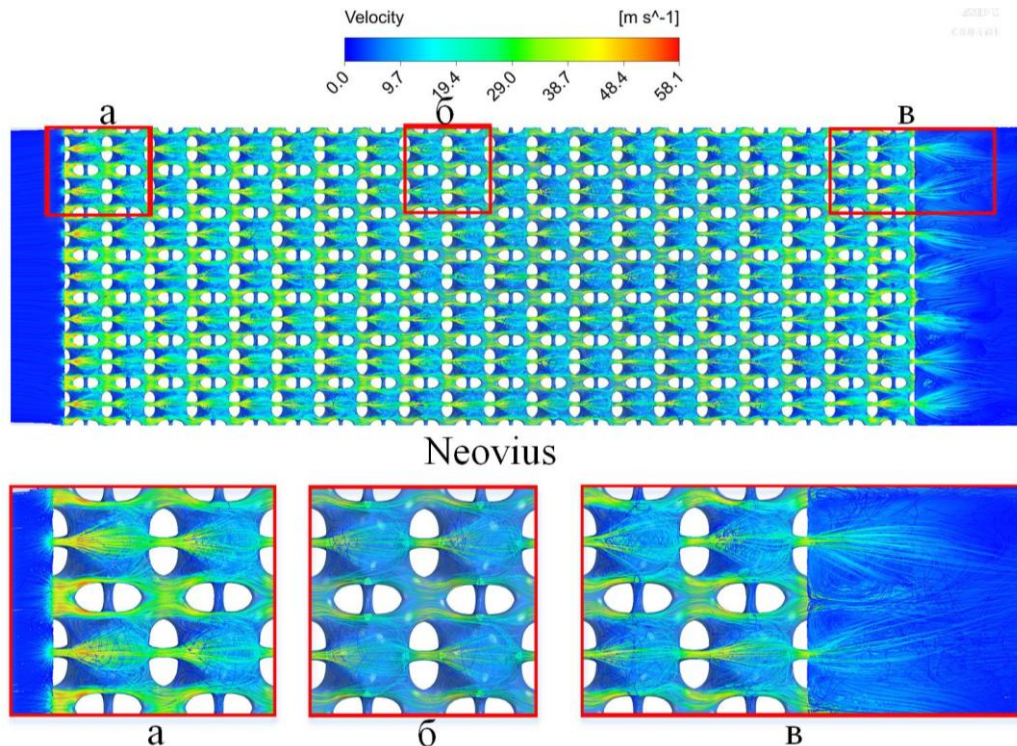


Рисунок 3.3.3. Вид сбоку распределения потока внутри структуры Neovius TPMS при входной скорости 2 м/с, пористости 0,35 и размерах ячеек 5 мм: а) на входе потока внутри TPMS; б) в центральной части; в) на выходе.

Схема потока внутри Neovius TPMS представлена на рис. 3.3.3. Жидкость поступает в ячейку через четыре различных отверстия в центре каждой стороны ячейки. На выходе из ячейки потоки сталкиваются, обеспечивая лучшее перемешивание жидкости, что благоприятно для практических применений [84,61,181].

В центральной части каждой ячейки наблюдаются обратный поток и завихрение. Такое поведение потока является причиной большего перепада давления. Спиральные движения усиливаются по мере увеличения отношения площади поперечного сечения центральной части к площади входящей части. Это отношение увеличивается из-за изменения структурной пористости. Из-за обратного потока и спиральных движений наблюдалась средняя извилистость 1,1 на среде Neovius TPMS. Перемешивание жидкости в радиальном

направлении между соседними ячейками очень слабое. Однако межклеточное перемешивание происходит в осевом направлении.

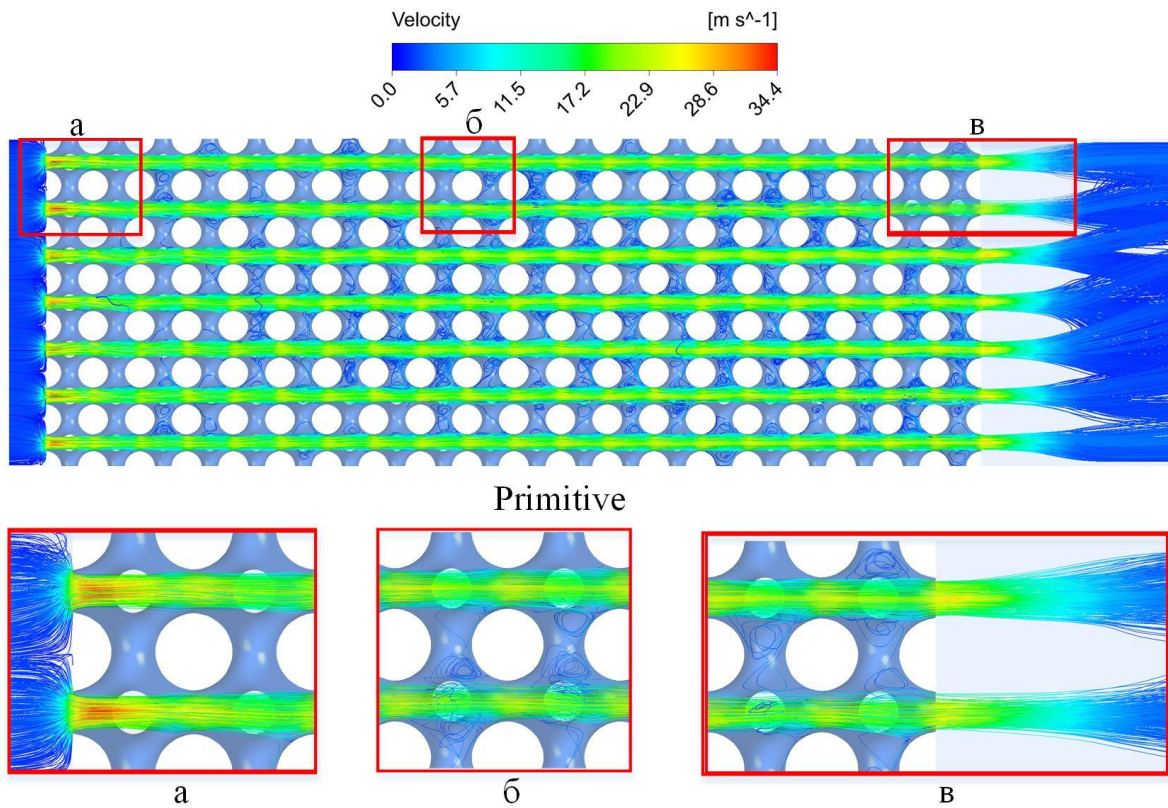


Рисунок 3.3.4 Вид сбоку распределения потока внутри структуры TPMS Primitive при входной скорости 2 м/с, пористости 0,35 и размерах ячеек 5 мм: а) на входе потока внутри TPMS; б) в центральной части; в) на выходе.

Линии тока скорости внутри ячейки Primitive (см. рис 3.3.4) отличаются от линий тока в ячейке I-WP Неовиуса и Шёна. Поток входит в ячейку Primitive только через одну грань, а не через четыре, как в случае с ячейкой I-WP Неовиуса и Шёна. В результате такая топология препятствует межклеточному смешиванию жидкости. Единственный возможный канал для смешивания расположен перпендикулярно основному потоку и создает высокое локальное сопротивление. Поэтому скорость жидкости внутри этих каналов практически равна нулю. Поток внутри ячейки Primitive очень похож на поток в трубке. Вне трубчатого потока наблюдаются незначительные завихрения и застойные области. Извилистость потока внутри трубки равна 1, но в ячейке Primitive извилистость примерно на 3% выше. Этот эффект объясняется расширением

потока в центре ячейки, что увеличивает расстояние перемещения жидкости. Для корректной оценки перепада давления внутри структуры Primitive необходимо учитывать член, описывающий извилистость. Спиральные движения внутри ячейки и на выходе из набивного слоя не наблюдаются.

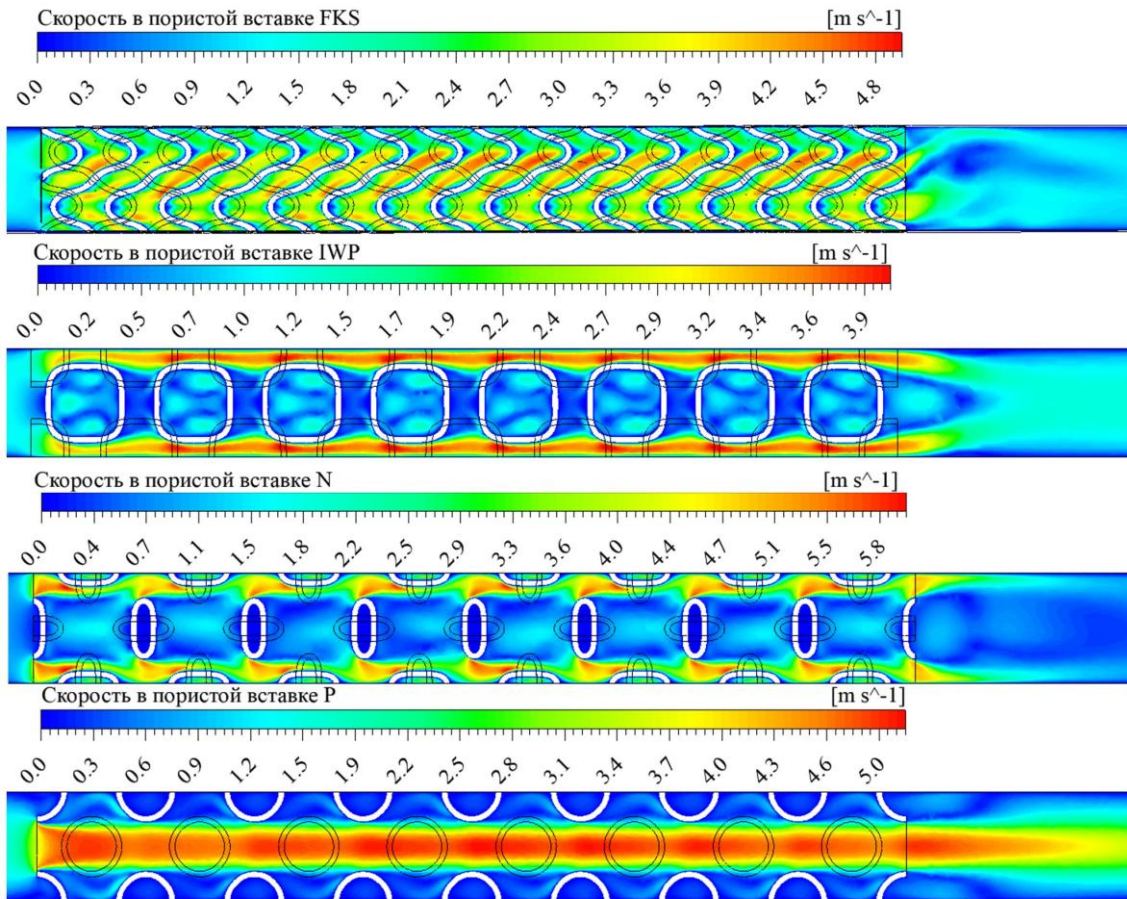


Рисунок 3.3.5. Векторное поле распределения скорости потока в пористых вставках TPMS при скорости на входе 0,9 м/с

На рисунке 3.3.5. представлены векторные распределения скорости в структурах FKS, IWP, N и P при прохождении через внутреннюю и внешнюю часть TPMS структур. Форма потока во всех пористых вставках для первых двух ячеек незначительно отличается от последующих, что может увеличивать интенсивность теплообмена на начальной области пористой вставки [182]. У вставки FKS застойные области между ячейками практически отсутствуют, распределение скорости равномернее по сравнению с другими рассмотренными вставками. Важно отметить, что основной поток контактирует практически со всей поверхностью пористой вставки FKS, что

важно для интенсификации теплоотдачи. Площадь поверхности FKS больше, чем у структуры P [81], N [54], IWP на 186%, 54% и 56% соответственно. Во вставке IWP и N внутри ячеек наблюдаются зоны обратного течения и, соответственно, дополнительная турбулизация потока, что согласуется с аналогичным исследованием [84]. Обратные течения и турбулентность потока играют доминирующую роль в усилении теплоотдачи, что необходимо учитывать при расчете теплообменных аппаратов [183]. Обратные течения вызваны ударами основного потока в стенку ячейки, что приводит к дополнительным потерям давления. Площадь контакта основного потока и структуры P имеет минимальное значение по сравнению с другими рассмотренными TPMS.

Кроме изменений направлений потока во всех TPMS вставках также наблюдается локальная изменчивость скорости, которая коррелируется с просветностью структуры. На рисунке 3.3.6. представлено изменение средней скорости потока вдоль направления движения теплоносителя в пределах одной элементарной ячейки TPMS. Для всех рассмотренных структур наблюдается квазипериодический характер изменения скорости, отражающий периодичность геометрии минимальной поверхности. Амплитуда колебаний скорости существенно зависит от типа TPMS-структуры и её просветности. Для структур с меньшей просветностью характерны более выраженные локальные ускорения и замедления потока, что указывает на усиление процессов перемешивания и интенсификации теплообмена. Вместе с тем такие режимы течения могут сопровождаться увеличением гидравлических потерь, что требует учёта при проектировании теплообменных устройств.

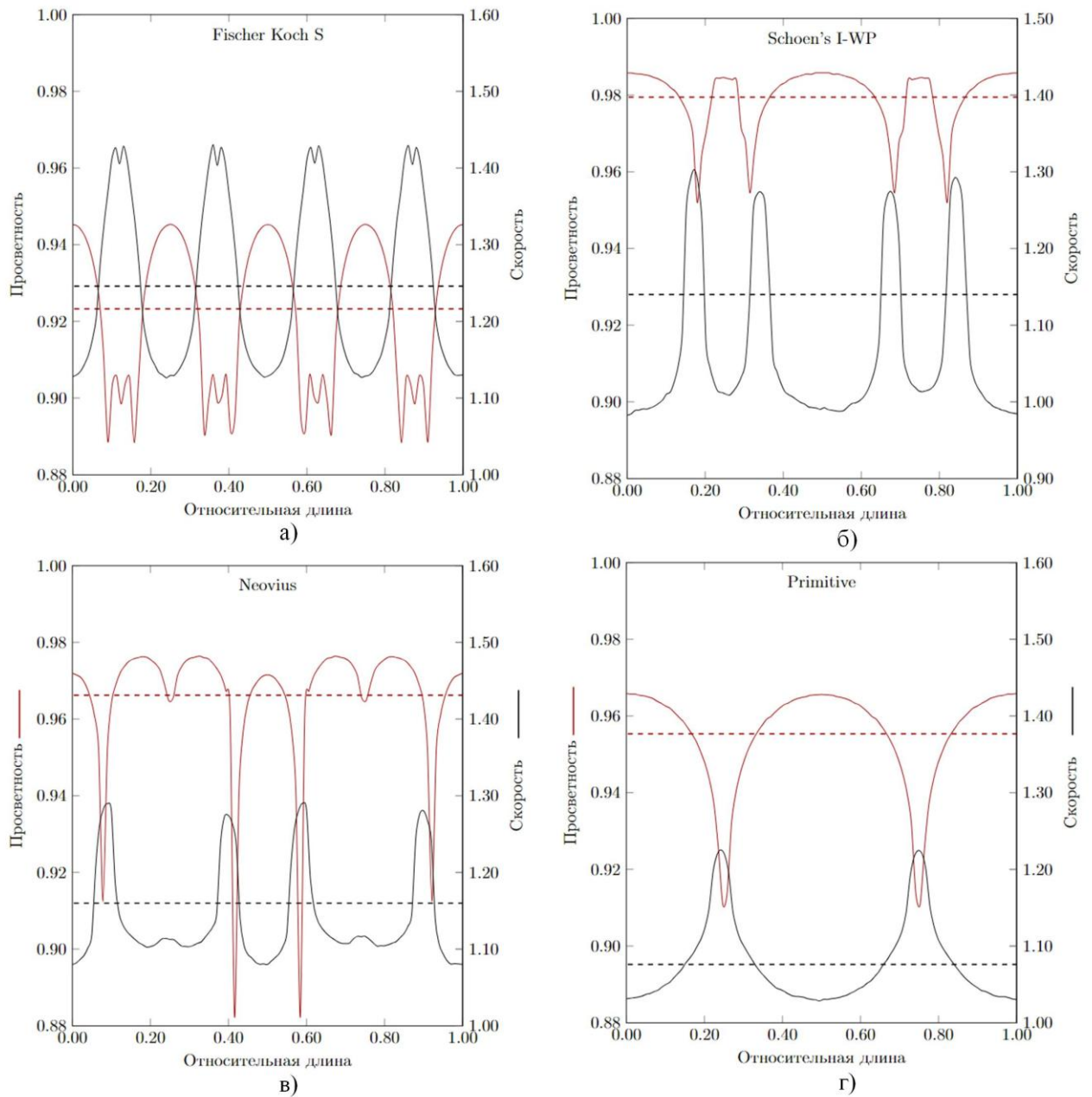


Рисунок 3.3.6. Локальная изменчивость средней скорости в направлении движения потока в ячейке TPMS в зависимости от просветности: а) вставка FKS; б) вставка IWP; в) вставка N; г) вставка P

У вставки Primitive количество экстремумов локальной скорости и средняя скорость по сравнению с другими вставками минимальны. Изменение локальной скорости более плавны/сглажены. У вставок IWP и N наблюдаются наибольшие максимумы производной локальной скорости, а графики изменения скорости схожи. Максимальное количество экстремумов (16) и наибольшая средняя скорость наблюдаются во вставке FKS.

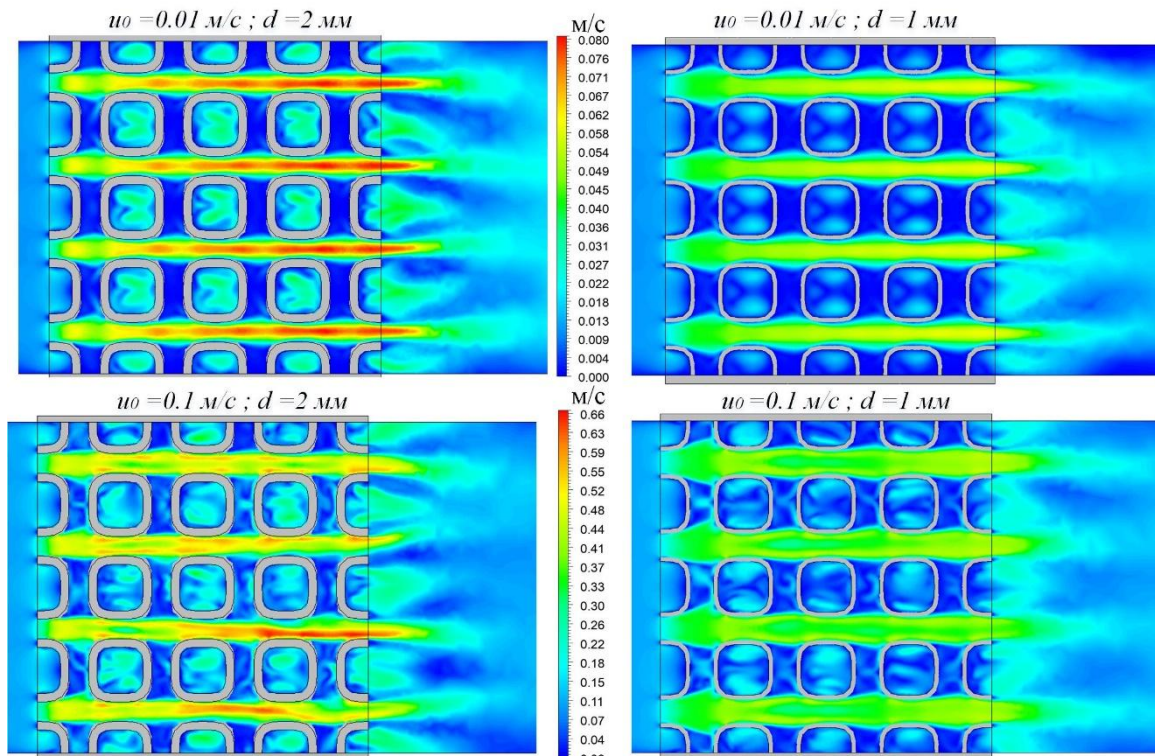


Рисунок 3.3.7. Контурные распределения скорости потока в канале с оребрением

Также, очевидно, что толщина структуры также может оказывать влияние на распределение векторного распределения скорости. В ходе численного эксперимента переноса массы в канале с оребрением на основе TPMS типа Schoen's IWP были определены профили скорости. Исходя из рисунка 3.3.7 толщина δ незначительно влияет на форму потока при прохождении через оребрение. Так увеличение толщины структуры смещает области завихрения и обратного тока увеличивая кривизну основного потока, а также увеличивает среднюю скорость потока. Увеличение скорости в пористой вставке, объясняется уменьшением пористости. В центрах ячейки наблюдается завихрения, перемешивания, и зоны обратного течения, которые препятствуют возникновению застойных областей и увеличивают теплоотдачу, что согласуется с другими исследованиями [233,227]. Также завихрения основного потока могут создавать винтовое движение по потоку, которые разрушают пограничный слой у поверхности оребрения, что улучшает коэффициент теплоотдачи.

Важно отметить, что в зависимости от того, как расположена структура TPMS в потоке может существенно изменяться распределение полей векторов скорости. На рисунке 3.3.8. представлено обтекание ячейки TPMS типа Primitive при углах атаки 0° и 45°

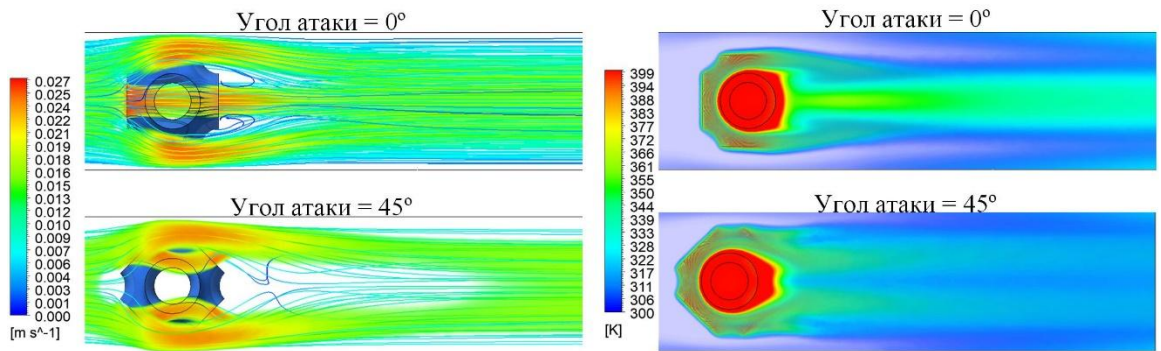


Рисунок 3.3.8. Распределение скорости и тепловых полей потока при прохождении через оребрение с поворотом структурных элементов в канале на 0° и 45° .

При обоих углах атаки наблюдается симметричное течение, скорость потока снижается перед оребрением, и за ним образуются застойные области. Основное течение остается относительно прямолинейным, преимущественно продольный характер с меньшим количеством турбулентных завихрений, при этом зоны повышенной скорости локализуются вдоль оси канала.

При повороте оребрения на 45° наблюдается существенное изменение структуры течения, сопровождающееся формированием поперечных составляющих скорости и усилением перемешивания потока. Количество завихрений при угле атаки 0° меньше по сравнению с 45° , что создает меньшее гидравлическое сопротивление. При увеличении угла атаки поток начинает отклоняться, образуя завихрения и турбулентные зоны после оребрения. Это приводит к возмущению потока, усиливая турбулентность и увеличивая гидравлическое сопротивление.

Результаты численного моделирования показывают, что течение теплоносителя в TPMS-вставках характеризуется существенной пространственной неоднородностью и выраженным трёхмерным характером. Векторные поля скорости демонстрируют непрерывное изменение

направления движения потока при прохождении через периодическую структуру, что приводит к формированию вторичных течений и зон интенсивного перемешивания.

В отличие от традиционных оребренных каналов, где направление вектора скорости преимущественно совпадает с направлением основного потока, в TPMS-структурах наблюдается значительная поперечная составляющая скорости. Это способствует разрушению теплового пограничного слоя и повышению равномерности теплообмена по поверхности конструкции. При этом локальные зоны ускорения потока, как правило, формируются в сужениях каналов, образованных геометрией минимальной поверхности, тогда как в расширениях наблюдается перераспределение скорости и изменение направления векторов.

Анализ распределения скорости по длине элементарной ячейки TPMS показывает, что средняя скорость изменяется квазипериодически, отражая периодичность геометрии структуры. Амплитуда этих изменений зависит от типа TPMS-структуры и её просветности. Для структур с меньшей просветностью характерны более выраженные колебания скорости, что указывает на усиление эффектов интенсификации, но одновременно свидетельствует о потенциальном росте гидравлических потерь.

Полученные результаты подтверждают, что геометрия TPMS-структуры оказывает определяющее влияние на характер течения и должна рассматриваться как основной параметр при оптимизации теплообменных характеристик.

3.4. Определение гидравлических потерь давления потока при прохождении через структуру TPMS путем численного моделирования

Определение гидравлических потерь давления является одной из ключевых задач при расчёте и проектировании теплообменного оборудования. Уровень потерь давления напрямую влияет на энергетические затраты на массоперенос теплоносителя и, следовательно, определяет эффективность и

область применимости теплообменных конструкций. В случае использования пористых структур на основе трипериодических минимальных поверхностей (TPMS) задача оценки потерь давления приобретает особую значимость вследствие сложной пространственной геометрии теплообменного тракта.

Определение гидравлических потерь давления потока при прохождении через пористые вставки на основе четырёх TPMS-топологий: Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP и Fischer-Koch S (FKS) выполнялось на основе численного моделирования и натуральных экспериментов.

Падение давления внутри TPMS-вставок формируется вследствие совокупного действия нескольких факторов, включая постоянное изменение направления потока, локальные ускорения теплоносителя в сужениях каналов, интенсивное перемешивание, что продемонстрировано в предыдущем параграфе и силы вязкого трения. В отличие от прямолинейных каналов, в насадочных слоях TPMS основные потери давления определяются локальными сопротивлениями, распределёнными по объёму структуры.

Падение давления вдоль осевого направления для четырех геометрий насадочного слоя TPMS представлено на рис. 3.4.1.

На основании численных и экспериментальных данных общее падение давления в пористой вставке было аппроксимировано эмпирической зависимостью вида

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{c v^{1.75}}{a}, \quad (3.4.1)$$

где L – длина пористой вставки; c – коэффициент, зависящий от заданной температуры потока, вязкости, плотности, размера пор и пористости. Для воздуха при температуре 301 К значения коэффициента c принимают значения согласно таблице 3.4.1.

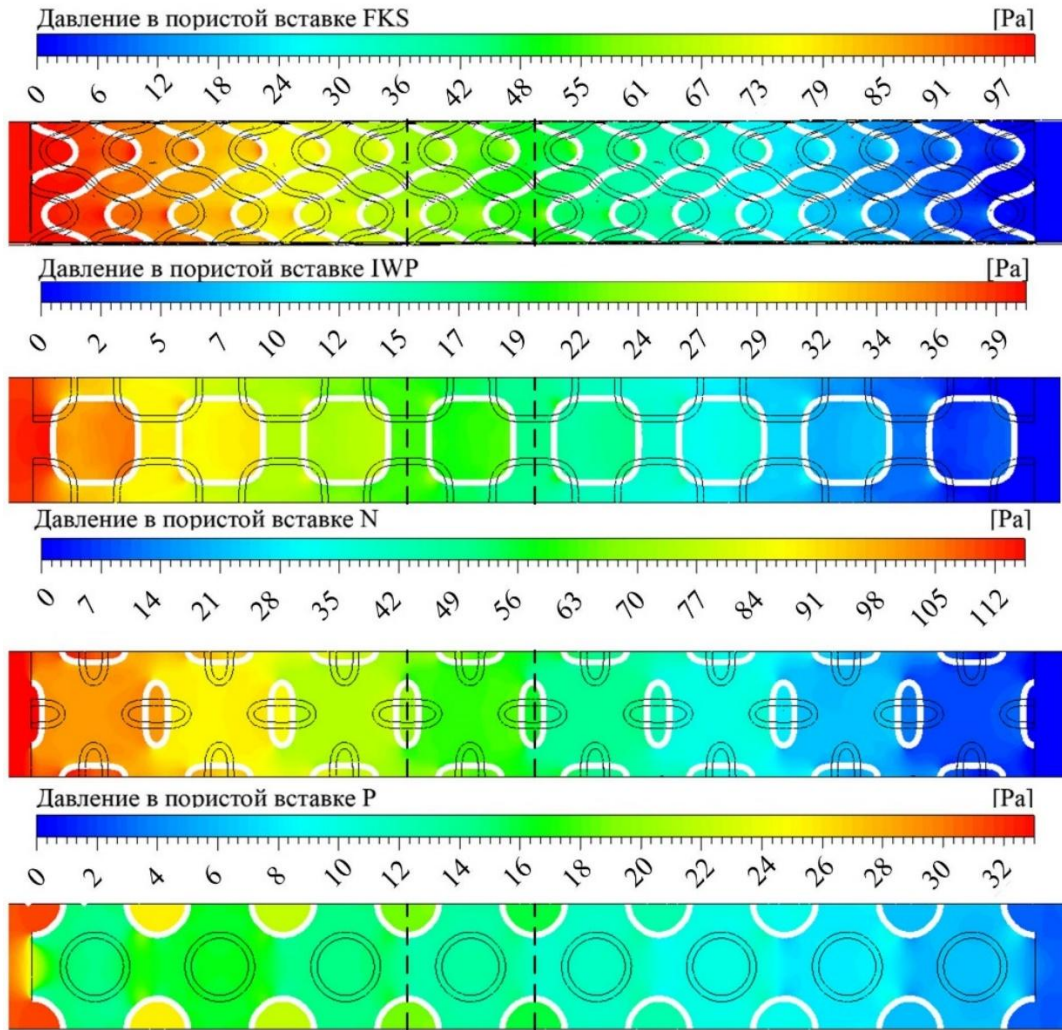


Рисунок 3.4.1. Падение давления в пористой вставке при скорости 0,9 м/с.

Таблица 3.4.1 Коэффициент «с» для уравнения потерь давления (1)

Primitive	Neovius	Schoen's I-WP	Fischer Koch S
3.9	32	6	13.8

Для вставки I-WP потери давления оказываются на 54 % выше по сравнению с Primitive, что связано с большей извилистостью течения, увеличенной средней скоростью и наличием выраженных экстремумов локальной скорости. Ячейка I-WP Шёна имела в два раза большее поперечное сечение канала, чем ячейка Primitive, но поток постоянно закручивался и сталкивался внутри каждой ячейки, что приводило к большему падению давления. Несмотря на геометрическое сходство структур I-WP и Neovius, в

последней потери давления оказываются в несколько раз выше. Это объясняется тем, что в структуре Neovius основной поток многократно сталкивается со стенками, что приводит к формированию обширных зон обратных течений и дополнительным потерям давления.

Существенную роль играет и наличие участков резкого изменения просветности, вызывающих значительные локальные ускорения потока. Структура TPMS I-WP Шёна может быть использована в реакторах с псевдооживленным слоем, где допустимо среднее падение давления и важен эффективный контакт жидкости и твердых тел. Структура Неовиуса имеет наибольшее падение давления и может быть использована в приложениях, где высокое падение давления допустимо. Благодаря высоким значениям скорости внутри структуры и постоянному пересечению линий тока скорости, она обеспечивает лучшее перемешивание жидкости. В каталитических химических реакторах падение давления может быть незначительным по сравнению со стоимостью катализатора, например, при паровой конверсии метана. Таким образом, структура Неовиуса может быть полезна в каталитических химических реакциях, поскольку она улучшит перемешивание реагентов и повысит скорость реакции.

Несмотря на наибольшую извилистость течения и максимальное число экстремумов скорости, потери давления в структуре Fischer-Koch S оказываются существенно ниже, чем в структуре Neovius. Это связано с плавным характером поворотов основного потока и минимальным количеством застойных зон. Кроме того, большинство изменений просветности в структуре FKS не сопровождаются резкими изменениями скорости и направления течения, что согласуется с результатами аналогичных исследований.

3.5. Определение гидравлических потерь давления потока при прохождении через структуру TPMS путем натурального эксперимента

Для верификации результатов численного моделирования массопереноса в рамках определения потерь давления потока при прохождении через пористую вставку проведена серия натуральных экспериментов. Эксперимент проводился на Лабораторной установке ВЕНТ-08-7ЛР-01 (см рис.3.5.1). Установка состоит из следующего оборудования: воздухозаборник, осевой вентилятор №1, сотовый выпрямитель потока №2, воздухонагреватель №3, воздуховод №4, переходник воздуховода с квадратного на круглый №5, опытный образец №6, манометр дифференциального давления №7, трубка Пито №8 и панель управления №9. Сотовый выпрямитель используется для подавления осевой составляющей потока, нагнетаемого осевым вентилятором. Постоянная температура, а соответственно, постоянная плотность и вязкость поддерживается воздухонагревателем. В квадратном воздуховоде размещен опытный образец на базе TPMS таким образом, чтобы весь поток проходил через внутреннее пространство образца. Расстояние между опытным образцом и переходником №5 составляет 400 мм, чтобы исключить влияние переходных процессов. При прохождении воздушного потока через опытный образец поток теряет давление из-за высокого местного сопротивления. Манометр дифференциального давления измеряет падение давления. Скорость потока измеряется трубкой Пито рядом с выходным отверстием воздуховода. Дифференциальный манометр и трубка Пито подключены к панели управления, которая преобразует данные в цифровой формат и отображает их на дисплее. Частота вращения вентилятора варьировалась от 700 до 3000 об/мин, изменяя скорость воздушного потока от 0,3 до 4,5 м/с. Каждый эксперимент повторялся пять раз при одних и тех же рабочих и граничных условиях для определения диапазона неопределенности.

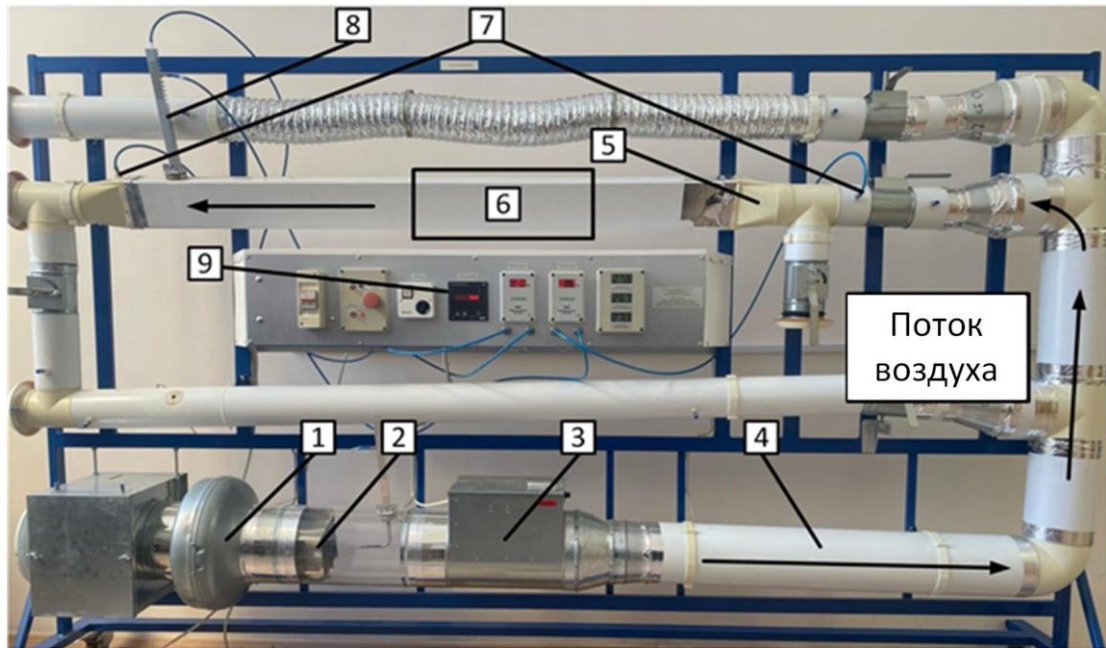


Рисунок 3.5.1. Лабораторная установка ВЕНТ-08-7ЛР-01.

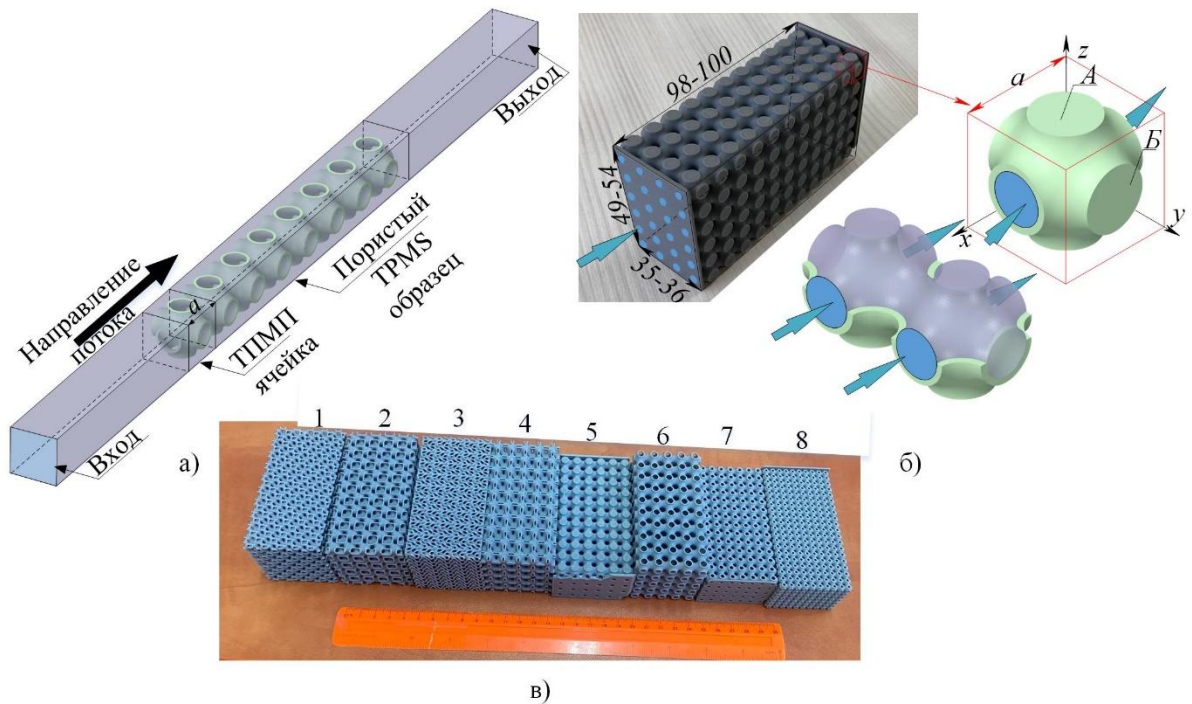


Рисунок 3.5.2. а) схема проводимого эксперимента при прохождении потока через внутреннее и внешнее пространство TPMS; б) опытный образец для натурального эксперимента прохождения потока через внутреннее пространство TPMS; в) опытные образцы для натурального эксперимента прохождения потока через внутреннее и внешнее пространство TPMS (1-4,6), и только через внутреннее пространство (5,7,8)

Для проведения натуральных экспериментов были использованы опытные образцы, представленные на рисунке 3.5.2.в. Изготовление экспериментальных образцов структур TPMS возможно с использованием аддитивных технологий селективного лазерного плавления (SLM), а также стереолитографии (SLA). Для текущего исследования были изготовлены опытные образцы с параметрами, представленными в таблице 3.5.1. После изготовления каждого опытного образца выполняются этапы последующей обработки с удалением остатков материалов, поддержек для 3D печати, и т.д.

Таблица 3.5.1. Опытные образцы

Наименование	Количество ячеек, шт	Размеры образца, мм	Пористость	Площадь поверхности, мм ² /яч	Площадь поверхности, м ²
Primitive	5x5x10	50x50x100	0.89	457	0.11425
Primitive	6x4x11	54x36x99	0.29	380	0.10032
Primitive	5x7x14	35x49x98	0.29	230	0.1127
Primitive	7x10x20	35x50x100	0.29	117	0.1638
Primitive	6x4x11	54x36x99	0.35	380	0.10032
Primitive	5x7x14	35x49x98	0.35	230	0.1127
Primitive	7x10x20	35x50x100	0.35	117	0.1638
Primitive	6x4x11	54x36x99	0.46	380	0.10032
Primitive	5x7x14	35x49x98	0.46	230	0.1127
Primitive	7x10x20	35x50x100	0.46	117	0.1638
Neovius	5x5x10	50x50x100	0.83	649	0.16225
Schoen's I-WP	5x5x10	50x50x100	0.83	671	0.16775
Fischer Koch S	5x5x10	50x50x100	0,73	984	0.246

Распределение падения давления вдоль осевого направления для различных TPMS-топологий показывает, что потери давления имеют выраженный неравномерный характер и дифференцируются при переходе потока из одной ячейки в другую. Это наглядно было показано в параграфе 3.4. В связи с этим целесообразно рассматривать общее падение давления в пористой вставке как сумму потерь давления на отдельных элементарных

ячейках по ходу движения потока. Такой подход позволяет корректно учитывать влияние периодической геометрии TPMS-структуры и упрощает анализ масштабируемости полученных результатов.

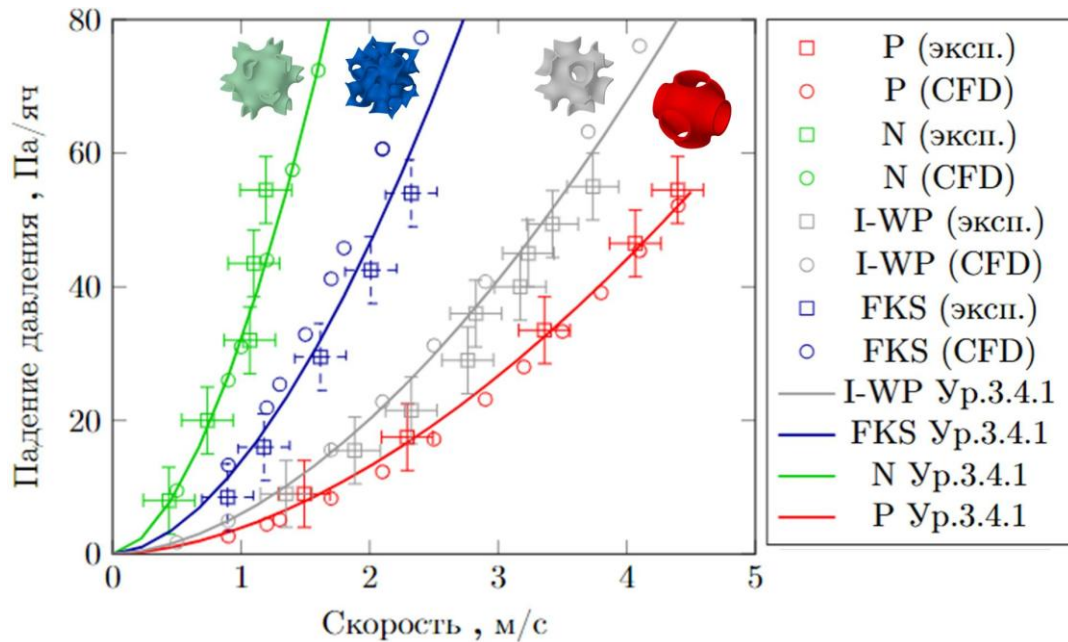


Рисунок 3.5.3. Падение давления на 1 ячейку TPMS от скорости. Численные (CFD) и натурные (эксп.) эксперименты, эмпирическая зависимость (Ур. 3.4.1).

На рисунке 3.5.3. представлено сравнение потерь давления, полученных путем численного моделирования, наутрного эксперимента и зависимости 3.4.1. при прохождении потока через внутреннее и внешнее пространство TPMS. Как видно из рисунка результаты, полученные путем численного моделирования, удовлетворительно согласуются с результатами натурального эксперимента. Эмперическое уравнение 3.4.1 также удовлетворительно согласуется с результатами численного и натурального эксперимента. Результаты натурального эксперимента для других опытных образцов будут представлены в следующих разделах как верификация методов и подходов.

3.6. Модифицированное уравнение определения потерь давление Hagen-Poiseuille

Представленная зависимость 3.4.1 требует проведения дополнительных численных или натуральных экспериментов для определения потерь давления в

различных TPMS, температуры потока, вязкости, плотности, размера пор и пористости. В связи с этим рассматривается определение потерь давления с использованием классических методов определения потерь давления в пористой среде. Один из методов расчета падения давления в пористых средах – уравнение Хагена-Пуазейля, которое приведено ниже:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2 \phi^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} u_s + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \phi \varepsilon^3} u_s^2, \quad (3.6.1)$$

Падение давления в пористых средах обусловлено потерями вязкой и кинетической энергии. Наиболее распространенной моделью для такого потока является уравнение Эргуна. Уравнение Эргуна записывается в следующей форме:

Поверхностная скорость определяется следующим образом:

$$u_s = \bar{u} \varepsilon, \quad (3.6.2)$$

Первый член описывает вязкое сопротивление, чаще всего встречающееся в ламинарном потоке. Этот член называется уравнением Блейка-Козени и записывается следующим образом:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2 \phi^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} u_s, \quad (3.6.3)$$

Второй член уравнения Эргуна вычисляет потери кинетической энергии, обычно присутствующие в турбулентном потоке. Этот член известен как уравнение Берка-Пламмера и имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \phi \varepsilon^3} u_s^2, \quad (3.6.4)$$

Еще один метод расчета падения давления в пористых средах – уравнение Хагена-Пуазейля, которое приведено ниже:

$$\Delta P = \frac{8\mu L \bar{u}}{r^2}, \quad (3.6.5)$$

Уравнение Хагена-Пуазейля описывает падение давления при течении жидкости в трубе. Поэтому были предложены различные вариации этого

уравнения, чтобы сделать его применимым для расчетов падения давления в пористых средах [184-197].

Для настоящего исследования был применен метод, описанный Ву [197], для модификации уравнения Хагена-Пуазейля при расчете перепада давления в геометрии Primitive TPMS. Этот метод может быть использован при соблюдении ряда допущений: твердая фаза в пористой структуре представлена сферами, а форма потока может быть представлена капиллярной. Следовательно, метод применим только для расчета перепада давления в плотно упакованном слое с твердыми частицами, имеющими сферическую форму. При заданных допущениях геометрия Шварца-П считается наиболее подходящей для аналитических исследований.

Таким образом, простейшая геометрия Шварца-П, а также аналогичные, но более сложные геометрии – I-WP Шёна и TPMS Neovius – были представлены в виде сферы с эквивалентным объемом. Диаметр частицы этой сферы рассчитывается следующим образом:

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{6V_{solid}}{\pi}}, \quad (3.6.6)$$

Средняя скорость потока рассчитывалась по следующей формуле:

$$\bar{u} = \frac{q}{A} = \frac{\Delta P_1 d^2}{32\mu L \tau}, \quad (3.6.7)$$

где q – объемный расход, м³/с; A – средняя площадь поперечного сечения, м²; d – средний диаметр потока, м; τ – извилистость.

Падение давления, вызванное внезапным расширением и сужением потока в пористых средах, обычно записывается в формуле, приведенной в работе:

$$h_{f2} = n \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) \frac{\rho v_s^2}{2g}, \quad (3.6.8)$$

где n – количество каналов, а β – геометрическая характеристика, определяемая следующим образом:

$$\beta = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} = \frac{A_1 + D_p}{A_1}, \quad (3.6.9)$$

где A_1 и A_2 – диаметры узкого и широкого каналов, как показано на рисунке 3.6.1.

Для компенсации влияния несферических частиц на поток был введен коэффициент сферичности ϕ твердой частицы. Уравнение Хагена-Пуазейля 3.6.5 можно переписать с помощью уравнений 3.6.6 - 3.6.9 следующим образом:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{72\mu\tau(1-\varepsilon)^2 v_s}{D_p^2 \phi^2 \varepsilon^3} + \frac{3\tau(1-\varepsilon)\rho v_s^2 n \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right)}{4\varepsilon^3 D_p \phi}, \quad (3.6.10)$$

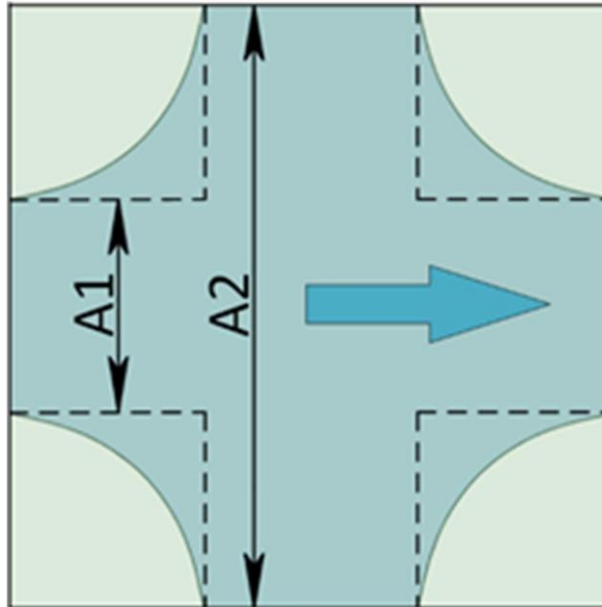


Рисунок 3.6.1. Схематическая модель течения жидкости внутри пористой среды

Экспериментальное исследование было проведено для проверки результатов моделирования CFD и аналитического решения. Измеренный перепад давления для опытных образцов и аппроксимирующие линии представлены на рисунке 3.6.2а. На рисунке 3.6.2б сравниваются значения перепада давления, полученные экспериментальным путем, с помощью CFD-моделирования и аналитического решения. Как экспериментальные, так и предсказанные с помощью CFD-моделирования значения перепада давления

хорошо согласуются, максимальное отклонение составляет менее 7,2%. Среднее отклонение между модифицированным уравнением Хагена-Пуазейля и экспериментальными результатами составило 3,9%. Это отклонение может быть обусловлено тем, что предложенное модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчета перепада давления подходит для сферических частиц. Влияние несферической формы частиц Шварца-П на перепад давления было уменьшено путем введения фактора сферичности φ , однако это не исключает остаточного влияния сложной структуры на потери давления.

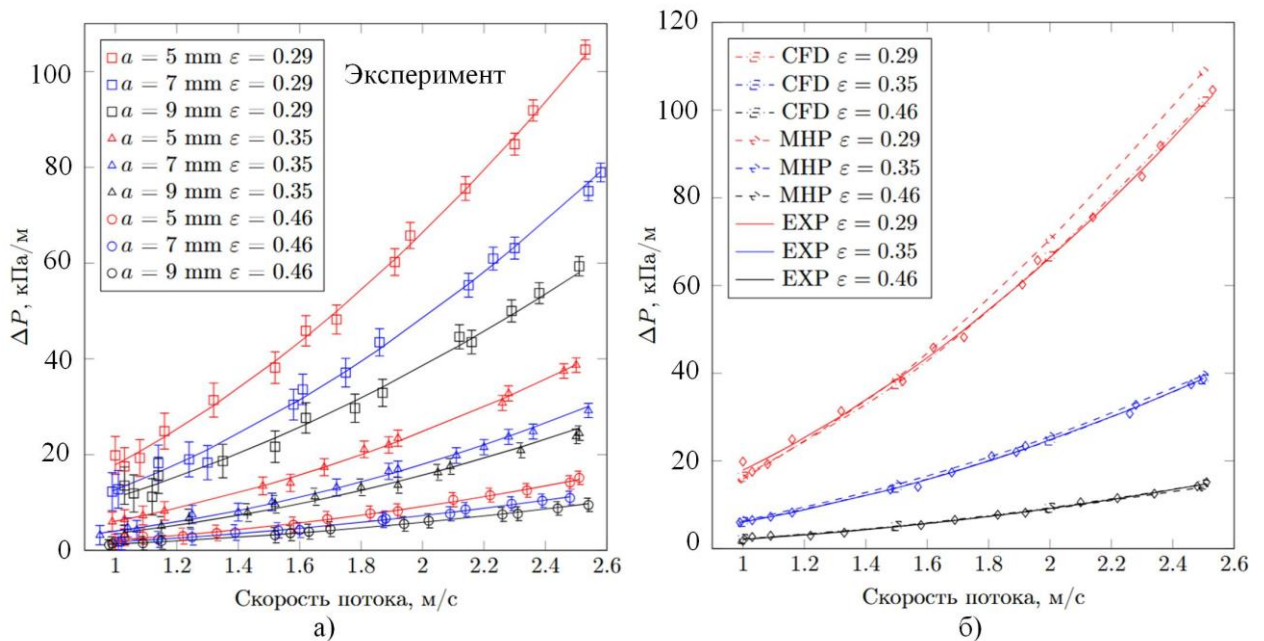


Рисунок 3.6.2: Падение давления потока в структуре Primitive с различной пористостью и размером ячеек для: а) эксперимент; б) сравнения модифицированного уравнения Хагена-Пуазейля (МНР), результатов CFD (CFD) и экспериментальных результатов (EXP) для ячейки с размерами $a = 7$ мм.

На рисунке 3.6.3 сравниваются результаты отношения падения давления потока, полученные с помощью уравнений Эргуна, Берка-Пламмера и Козени-Кармана и модифицированного уравнения Хагена-Пуазейля (уравнение 3.6.10) к экспериментальным данным для геометрии ячейки Primitive. Модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля учитывает эффект удельной извилистости упакованного слоя и потери давления из-за расширения и

сжатия потока. Следовательно, значения перепада давления на 55% ниже, чем у уравнения Эргуна, и ближе к экспериментальным результатам. Уравнение Козени-Кармана не смогло предсказать потери давления в турбулентном потоке, поскольку оно было разработано для ламинарного потока.

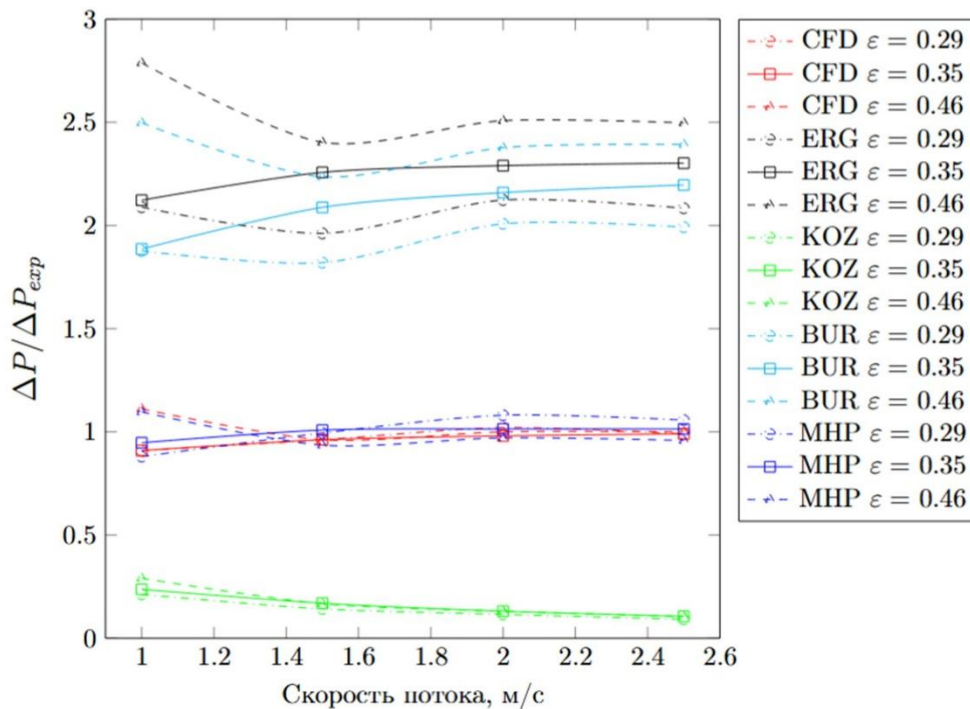


Рисунок 3.6.3: Отношение потерь давления при прохождении через структуру Primitive по модели Эргуна (ERG), Козени-Кармана (KOZ), Берка-Пламмера (BUR), модифицированного Хагена-Пуазейля (MHP), численное моделирование (CFD) к потерям давления полученным при проведении натурального эксперимента.

На рисунке 3.6.4 представлены результаты падения давления потока при прохождении через пористые вставки Schoen I-WP и Neovius TPMS определенные с помощью модифицированного уравнения Хагена-Пуазейля (3.6.10). Модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля удовлетворительно согласуется с результатами численного моделирования. Однако наблюдается незначительное расхождение между аналитическими и численными результатами

В целом, модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля позволяет с высокой точностью прогнозировать падение давления внутри набивного слоя

с геометрией TPMS для различных размеров ячеек, пористости структуры и скорости потока.

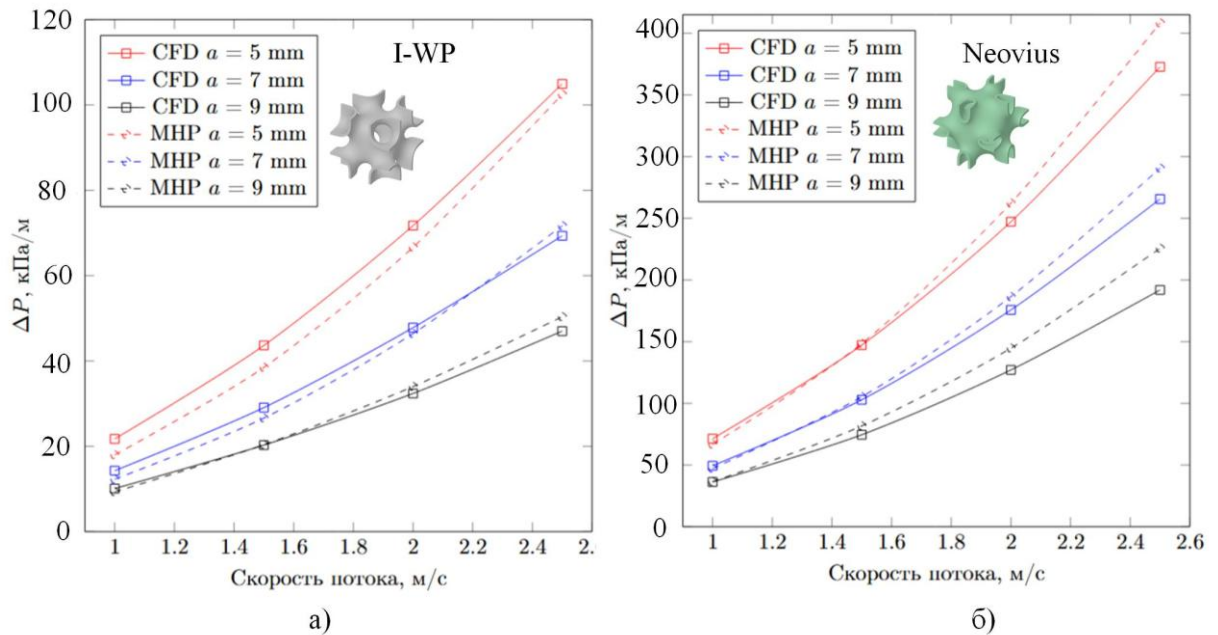


Рисунок 3.6.4: Сравнение падения давления потока, рассчитанного с помощью CFD и модернизированного уравнения Хагена-Пуазейля: а) Schoen I-WP; б) Neovius.

3.7. Определение температурных полей в канале с оребрением TPMS

Для внедрения TPMS структур в теплообменное оборудование в качестве оребрения помимо вопросов распределения потока и потерь давления рассмотрены в рамках главы является распределение температурных полей внутри потока. В связи с этим в рамках текущего параграфа рассмотрено распределение температурных полей в потоке различных вставок.

В качестве оребрения могла быть рассмотрена структура Primitive, однако в ходе углубленного исследования гидродинамических характеристик структуры, было выявлено, что оребрение на основе Primitive может приводить к возникновению застойных областей до 30% от общего объема. Площадь поверхности и эффективная теплопроводность конструкции Primitive демонстрирует минимальные значения по сравнению с другими типами TPMS. Так конструкции на основе Schoen's IWP и Neovius обладают большей

эффективной теплопроводностью на 50-53% и на 42-46% большей площадью поверхности по сравнению с оребрением Primitive [233]. Возникновению застойных зон в структурах Schoen' WP и Neovius препятствуют постоянные изменения направления, завихрений, перемешивания и турбулизации потока теплоносителя [227]. Для вихревой интенсификации ведущие ученые используют различные подходы подходы турбулизации потока. Так в работах И.А. Попова, А. Н. Скрыпника., Н. Н. Зубкова, С. А. Сверчкова и др. используются внутренние спиральное оребрение труб[189,190]. А в работах С. А. Исаева, Д. В. Никущенко, И. А. Попова, А. Г. Судакова, Н. В. Тряскина, Л. П. Юнакова используется нанесение на стенки упорядоченных лунок и изменение угла наклона этих лунок [188,191].

Завихрение в TPMS приводит к увеличению потери давления для Neovius в 8 раз. Увеличение потерь давления в 8 раз приводит к значительным дополнительным затратам электроэнергии на перенос жидкости в теплообменном устройстве. Увеличение потерь давления потока при прохождении через конструкцию Schoen' WP составляет не более 50%. Поток в структуре Primitive имеет прямолинейной трубчатой формой, в то время как поток в структуре Schoen's IWP обладает извилистостью, которая увеличивает путь потока и, соответственно, время взаимодействия между жидкостью и твердой стенкой [69].

В связи с этим, в рамках текущего исследования предлагается рассмотреть другие модель оребрения основанную на TPMS, которые могут продемонстрировать увеличение эффективности переноса тепла в теплообменном устройстве по сравнению Primitive. Для решения поставленной задачи планируется использование численного эксперимента, реализованного в программном комплексе Ansys 2019 R3 модуле Fluid Flow (Fluent).

Модель оребрения с граничными условиями представлена на рисунке 3.7.1. Так, в теплообменное устройство с оребрением TPMS подается теплоноситель с скоростью от 0,01 до 1 м/с.

Температура подаваемого теплоносителя составляет 300 К. Ко всем боковым границам канала в области оребрения подводится тепло от пластины с температурой $T_{ст} = 700$ К. Свойства теплоносителя и материала, из которого изготовлено оребрение, и греющая пластина представлено в таблице 3.7.1.

Таблица 3.7.1 Свойства материалов

Область	Плотность, кг м ⁻³	Теплопроводность, Вт м ⁻¹ К ⁻¹	Теплоемкость, Дж кг ⁻¹ К ⁻¹	Вязкость, кг м ⁻² с ⁻¹
Теплоноситель	998,2	4182	998,2	$1,003 \cdot 10^{-6}$
Оребрение	2719	871	2719	–

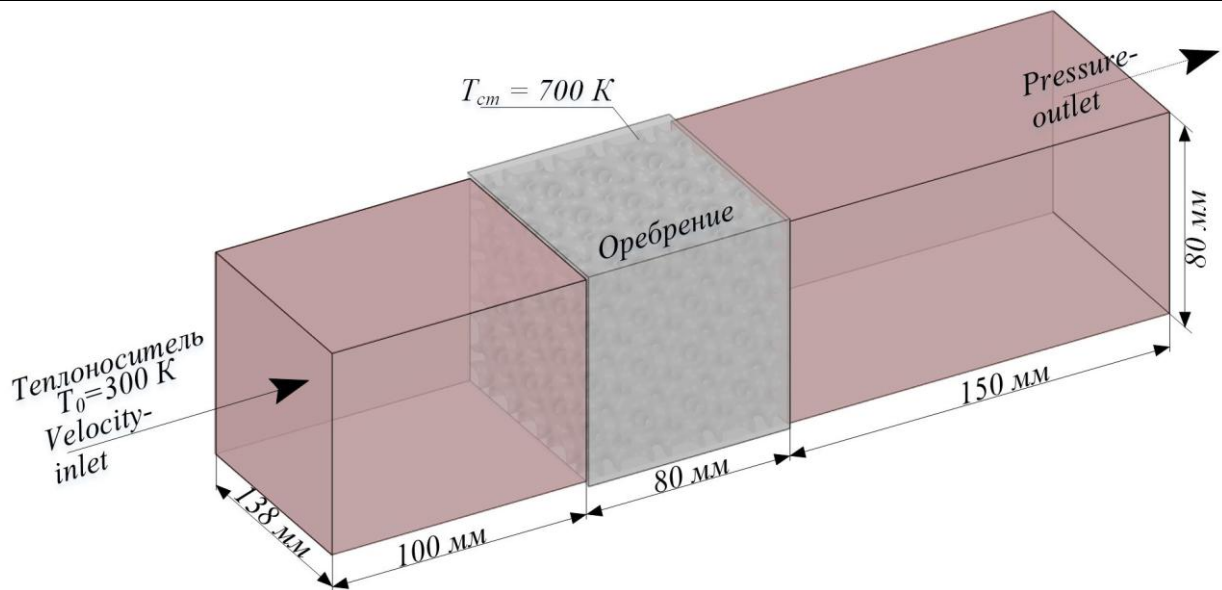


Рисунок 3.7.1: Модель оребрения основанного на TPMS с Граничными условиями.

Численные методы конечных элементов при решении поставленной задачи имеют проблемы стабильности и сходимости расчетной модели. Мелкие численные ошибки могут быстро накапливаться из-за нелинейной природы вышеизложенного уравнения, особенно в присутствии турбулентных режимов течения. В связи с этим проводится анализ чувствительности сетки для измерения точности моделирования в отношении количества ячеек сетки

по температуре на выходе теплообменника. Расчетная сетка для компьютерного моделирования формировалась в модуле Ansys Fluent. Выбор вида сетки был основан на исследованиях теплообменных аппаратов с оребрением [178]. Сетка состоит из многогранных элементов с пограничным слоем вблизи структур TPMS. Были приняты и сравнены пять размеров ячеек для двух геометрии TPMS оребрения с толщинами 1 мм и 2 мм. Разница температур на выходе из теплообменника, полученная на самой мелкой сетке, сравнивается с результатами, полученными на других сетках, и оценивается процентная разница. Результаты исследования независимости сетки двух моделей представлены на рис. 3.7.2. Таким образом, для расчета использовались модели, процентное расхождение температур потока на выходе из теплообменника которых было меньше 1% для экономии вычислительного времени и сохранения точности и стабильности расчета.

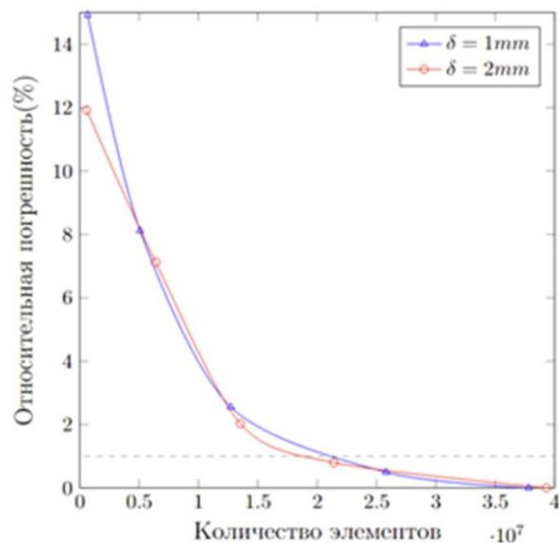


Рисунок 3.7.2. Анализ независимости сетки

Результаты текущего исследования теплопереноса в канале с оребрением на основе TPMS типа Schoen's IWP сравнены с результатами аналогичной задачи оребрения теплообменного устройства конструкцией TPMS Primitive[176] при характерных размерах : $a = 20$ мм , толщина стенки 1 и 2 мм. Результаты потерь давления и температуры на выходе из

теплообменника с оребрением на основе поверхности Schoen's IWP и Primitive представлены на рисунке 3.7.3.

При скорости до 0,1 м/с теплообменное устройство с оребрением на основе Schoen's IWP демонстрирует увеличение переданной энергии до 18% по сравнению с оребрением на основе Primitive. Увеличение потерь давления при этом составляет 42-48%. Увеличение потерь давления как уже отмечалось ранее вызвано более сложной структурой потока, наличием завихрений, зон обратного течения, винтовых движение потока теплоносителя. Увеличение эффективности теплопереноса может объясняться большей теплопроводностью конструкции, большей площадью поверхности, большей извилистостью потока, что соответственно, увеличивает время взаимодействие между жидкостью и твердой стенкой.

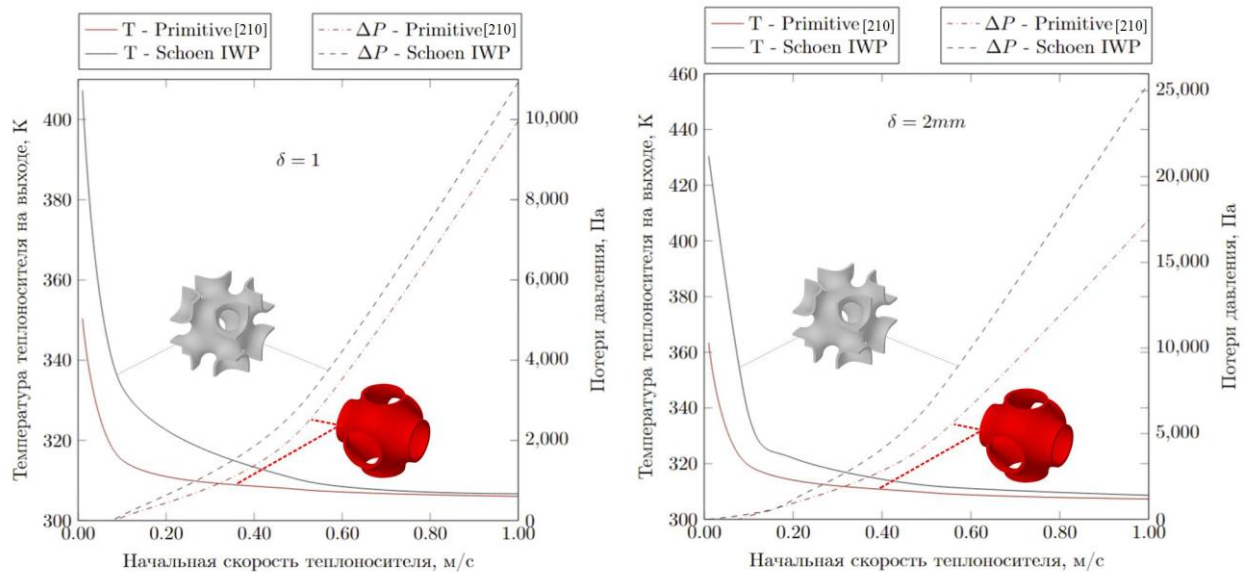


Рисунок 3.7.3. Графики зависимости температуры и потерь давления от начальной скорости потока для канала с оребрением на основе Schoen's IWP и Primitive при геометрических характеристиках $a = 20$ мм, $\delta = 1$ мм, $\delta = 2$ мм

При скорости более 0,1 м/с разность количества переданной энергии обеих моделей незначительна. Высокая скорость потока приводит к интенсификации перемешивания и турбулизация, а соответственно и увеличению теплообмена в обеих конструкциях. Однако при уменьшении скорости влияние застойных зон увеличивается, что приводит к заметному

снижению эффективности теплоотдачи в теплообменном устройстве на основе Primitive.

Несмотря на линейное влияние теплопроводности от толщины стенки при совмещенной задаче увеличение толщины стенки не приводит к значительному росту переданной энергии. В первую очередь это может объясняться большим влиянием коэффициента теплоотдачи на термическое сопротивление по сравнению с теплопроводностью. Таким образом для повышения эффективности переноса тепла большее внимание необходимо уделять гибридизации оребрения, снижению объема застойных зон, дополнительной турбулизации потока.

На рисунке 3.7.4. представлены профили распределения температуры теплоносителя при установившемся режиме при применении оребрения на основе Schoen's IWP и Primitive [176]. Исходя из рисунка 6 при скорости 0,1 м/с в передаче тепловой энергии задействовано меньшее количество рядов оребрения в вставке Schoen's IWP по сравнению с Primitive и потенциал оребрения Schoen's IWP в таком случае раскрыт не полностью. Это также является причиной равенства температур теплоносителя на выходе из теплообменника при больших начальных скоростях потока. Таким образом, увеличение объема оребрения Schoen's IWP при тех же граничных условиях будет приводить лишь к увеличению гидравлического сопротивления. Однако при использовании материалов оребрения с большей теплопроводностью модель Schoen's IWP может демонстрировать значительное увеличение эффективности оребрения, за счет увеличения количества задействованных в теплоотдаче рядов и, соответственно, эффективной площади теплообмена.

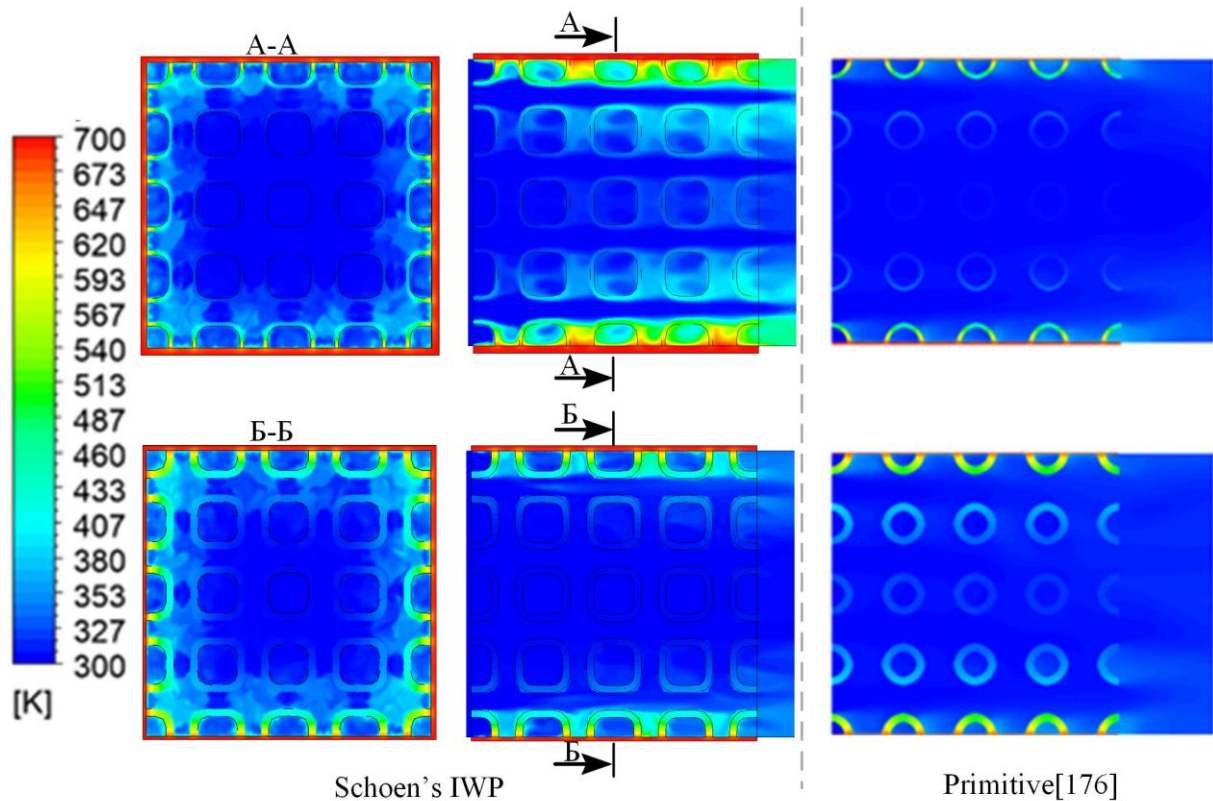


Рисунок 3.7.4. Контуры распределения температуры теплоносителя в канале с оребрением на основе Schoen's IWP и Primitive[176] при начальной скорости 0,1 м/с

Исходя из полученных результатов при проектировании теплообменных систем для увеличения количества переданной энергии рекомендуется использование структуры Schoen's IWP. При необходимости минимизировать потери давления, применение оребрения на основе Primitive может быть использовано для интенсификации теплообмена. Количество рядов оребрения необходимо прогнозировать в зависимости от скорости потока и граничных условий. В рамках текущего исследования продемонстрировано, что часть оребрения не задействовано в теплообмене при скоростях потока более 0,1 м/с.

Результаты исследования демонстрируют потенциал применения оребрения на основе TPMS поверхностей Primitive и Schoen's IWP. Однако для совершенствования оребрения необходимо рассмотреть и другие поверхности TPMS, которые могут увеличить эффективность теплопередачи или снижение потерь давления потока. В связи с этим дополнительно рассмотрены 5

геометрий по одной ячейке в качестве оребрения структуры P, FKS, N, I-WP, F-RD. Зависимости средней температуры на выходе из канала и зависимость перепада давления в зависимости от начальной скорости потока представлены на рисунке 3.7.5. Из анализа графика можно заключить, что наиболее эффективной с точки зрения теплоотдачи является TPMS Neovius. Однако, при течении жидкости через данную TPMS наблюдаются наибольшие потери давления.

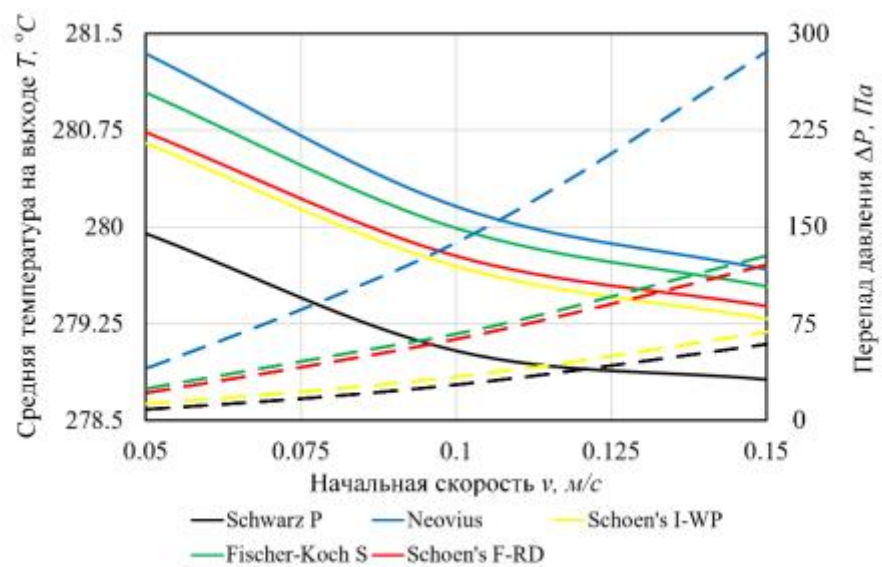


Рисунок 3.7.5. График зависимости температуры на выходе и перепада давления от начальной скорости.

TPMS-структуры характеризуются разделением пространства на два взаимосвязанных, но не пересекающихся объёма, что позволяет рассматривать их как основу для создания эффективных рекуперативных теплообменных устройств. При этом изменение топологических и геометрических параметров TPMS – пористости, относительной толщины стенки и типа поверхности – позволяет управлять как механическими, так и теплофизическими характеристиками структуры.

3.8. Исследование теплопередачи в канале с оребрением TPMS

Как уже отмечалось ранее одной из важнейших задач современной инженерии в области теплоэнергетики является разработка новых

теплопередающих структур, компактных теплообменных устройств[185], тепловой защиты[186] и интенсификация теплопередачи, в том числе с разрушением пограничного слоя [187]. Структуры TPMS разрушают пограничный слой за счет турбулизации потока в вставках TPMS, обладают высокой удельной площадью, что позволяет разрабатывать компактные теплообменные устройства, а также разрабатывать системы тепловой защиты на основе РСМ матераилов. Исследовательское сообщество активно изучает, как форма и размер теплоотводящих поверхностей влияют на эффективность теплопередачи. Геометрии с игольчатыми и пластинчатыми ребрами и облуненные каналы используются для увеличения площади поверхности и создания локального турбулентного перемешивания, тем самым повышая конвективную теплопередачу, но они обычно увеличивают гидравлическое сопротивление [188].

В текущем параграфе рассмотрено ребрение на основе TPMS и выполнено сравнение с классическими структурами по методологии используемой ведущими учеными в этом направлении: А. Н. Скрыпник[189], И.А. Попов[190], С.А. Исаев[188].

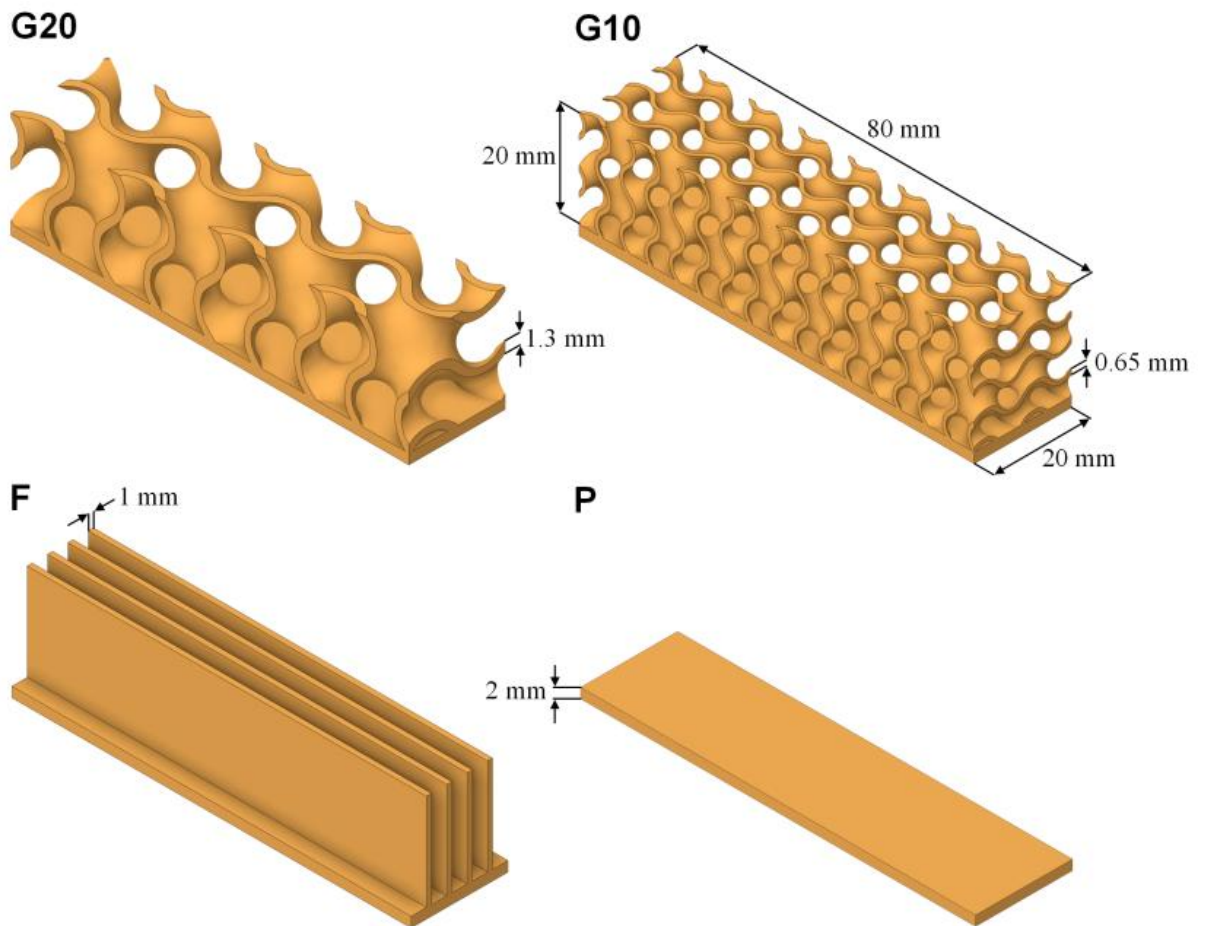


Рисунок 3.8.1. Расчетные геометрии.

Как упоминалось выше, топология Gyroid TPMS является одной из предпочтительной с точки зрения сочетания теплопередачи и гидродинамических характеристик. Две конфигурации радиатора Gyroid: одна, построенная из ячеек размером 20 мм (массив $1 \times 1 \times 4$), и другая, построенная из ячеек размером 10 мм (массив $2 \times 2 \times 8$) представлены на рисунке 3.8.1. В дополнение к этим вариантам Gyroid, также исследуются обычный радиатор с ребрами и плоская эталонная пластина без ребер. Во всех случаях толщина металлической опорной пластины, на которой установлены ребра или пористая структура, составляет 2 мм.

Несмотря на разработку аналитических методов исследования теплопередачи коллективами Э.М. Каташева[192] и С.А. Колесника[193] исследования теплопереноса в таких структур этими методами затруднено.

Соответственно для изучения процесса переноса в таких материалах в также использовались численные методы.

К пластине подводится тепловая энергия которая передается через ребрение к теплоносителю, омывающему ребрение с разной скоростью потока.

Каналы TPMS имеют локализованную изменчивость площади сечения канала, смоченного периметра и соответственно скорости и коэффициента теплопередачи по всей длине [210, 227]. Использование гидравлического диаметра на основе поперечного сечения и смоченного периметра в зависимости от места, в котором он был измерен может привести к систематической ошибке. В данной работе используется усреднение гидравлического диаметра на весь объем теплопереносного канала. Это упрощение использовалось в ряде схожих исследований потерь давления в TPMS каналах [57,210]. В этом случае безразмерное число Рейнольдса, основанное на усредненном гидравлическом диаметре, выражается как:

$$Re = \frac{ud_h}{\nu} = \frac{4uV_c}{\nu F}, \quad (4.1.3)$$

где u – средняя скорость потока в TPMS канале, м/с; dh – гидравлический диаметр, м; ν – кинематическая вязкость, m^2c^{-1} ; V_c – объем гидравлического канала теплообменника, m^3 .

На рисунке 3.8.2 видно, что геометрия способствует интенсивному перемешиванию, развитию вторичных потоков и значительно более высоким уровням турбулентности, что, в свою очередь, увеличивает гидравлическое сопротивление. Напротив, поток в каналах ребристого радиатора более упорядочен. На рис. 3.8.2 подчеркивается принципиальное различие в организации потока: в ребристой конфигурации линии тока остаются почти параллельными и непересекающимися, что указывает на сохранение слоистого потока со слабым перемешиванием и хорошо развитыми пограничными слоями вдоль поверхностей пластин. Такая структура потока обеспечивает относительно низкие гидравлические потери, но снижает

разрушение пограничного слоя и, следовательно, ограничивает конвективную теплопередачу. В гироидной структуре линии тока демонстрируют выраженное закручивание, локальное образование вихрей и взаимопроникновение траекторий между соседними каналами, что указывает на интенсивное поперечное перемешивание. Такое поведение разрушает пограничный слой, увеличивает локальный коэффициент теплопередачи.

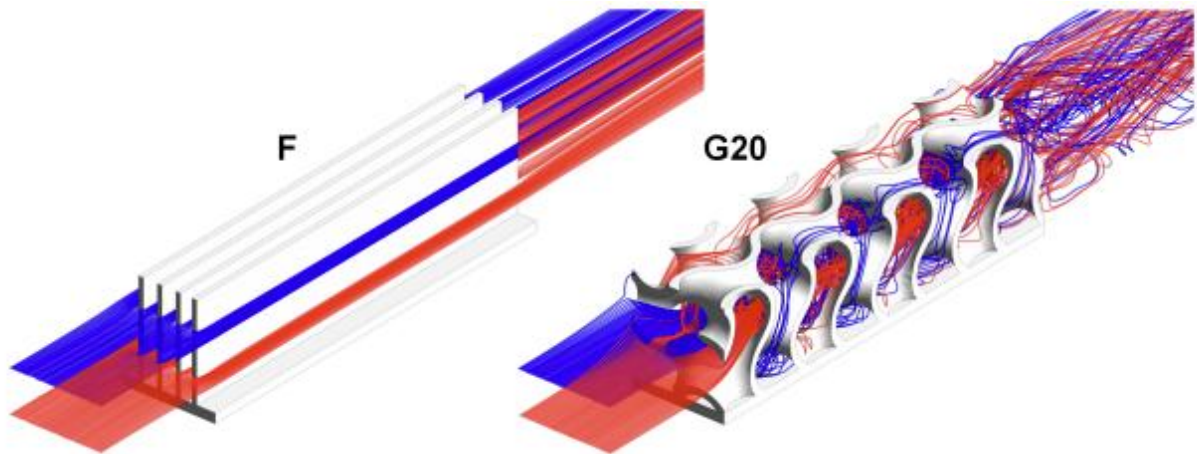


Рисунок 3.8.2. Линии тока при входной скорости $v = 0,5$ м/с.

На рисунке 3.8.3 представлены значения Nu для геометрий Gyroid полученные численными методами и сторонним экспериментом[68]. Также на график добавлены значения гладкого Nu для гладкого канала полученные по эмпирической формуле Михеева для течения жидкости в гладкостенных трубах. Такой подход использовался и в работах Попова[190] для сравнения эффективности оребрения. Численный эксперимент проводился при других числах Re по сравнению с натурным экспериментом, проводимым Samson, что затрудняет прямую верификацию данных. Однако по экстраполяции данных полученных в рамках численного эксперимента наблюдается удовлетворительное согласование с результатами натурального эксперимента. Значения Nu для G10 и G20 не существенно отличаются (менее 10%) в связи с чем для дальнейшего анализа использовались усредненные значения для этих геометрий. Из рис 3.8.3.б видно, что значения Nu для канала с оребрением G существенно превышают значения, полученные для гладкого канала, что

свидетельствует о существенном повышении теплопередачи по сравнению с гладким каналом.

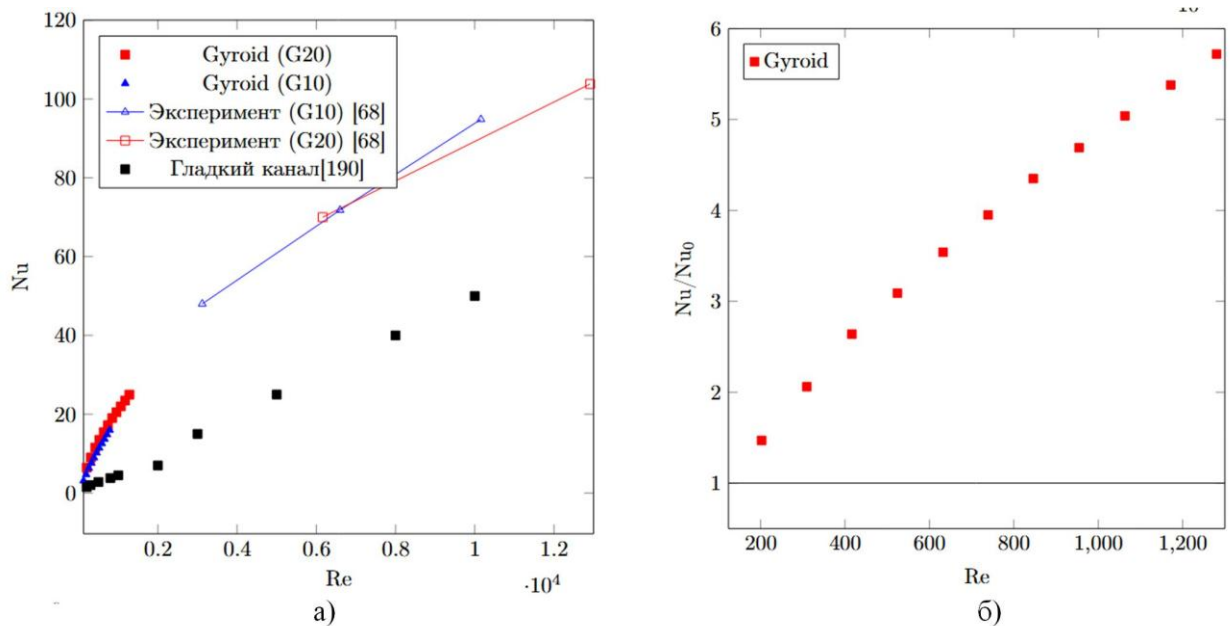


Рисунок 3.8.3. а) данные по средней теплоотдаче канала с оребрением для структуры G; б) сравнение средних коэффициентов теплоотдачи теплоотдаче канала с оребрением для структуры G с коэффициентом теплоотдачи в гладких трубах

В инженерной практике для оценки теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена часто применяют критерий, основанный на аналогии Рейнольдса, представленный в виде отношения $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ [189, 194]. В этом выражении за базовые (обозначенные индексом 0) принимаются значения числа Нуссельта Nu_0 и коэффициента гидравлического сопротивления ξ_0 для трубы с гладкой поверхностью при тех же значениях числа Рейнольдса. Для анализа теплогидравлической эффективности дополнительно применяют показатель вида $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)^{0,33}$, который, в отличие от классического критерия на основе аналогии Рейнольдса, учитывает затраты мощности на прокачку теплоносителя.

Критерий, основанный на аналогии Рейнольдса растет на всем исследуемом диапазоне и превышает значение 1 при $Re > 630$. До чисел $Re = 630$ $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0) < 1$, что не свидетельствует о том, что теплогидравлические

характеристики канала с оребрением для структуры G становятся хуже. Такое значение лишь указывает на то, что при заданных скорости потока и эквивалентном диаметре канала данный способ интенсификации не приводит к улучшению характеристик по сравнению с базовым вариантом. Для показателя вида $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)^{0,33}$ с учетом мощности на прокачку теплоносителя на всем диапазоне наблюдаются значения больше 1, а сам показатель растет по функции близкой к линейной.

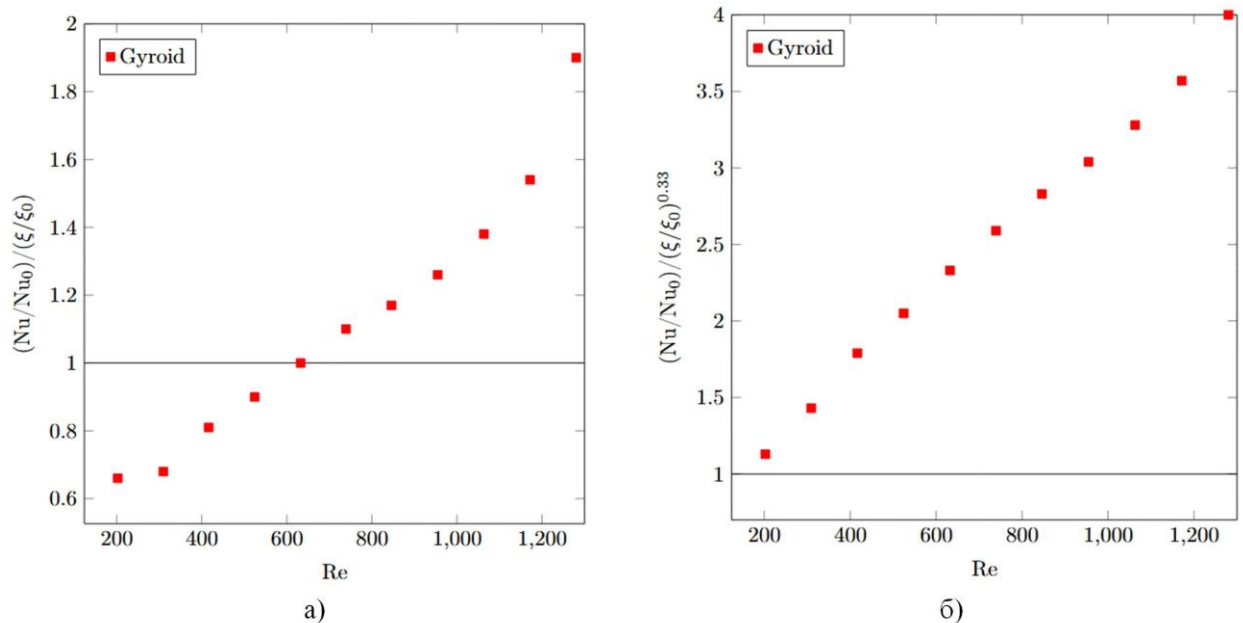


Рисунок 3.8.4. а) фактор аналогии Рейнольдса канала с оребрением для структуры G; б) фактор повышения эффективности с оребрением для структуры G с учетом мощности на прокачку теплоносителя

4. Теплообменное устройство на основе TPMS

В п. 4.1 представлена новая конструкция теплообменного устройства на основе TPMS типа Primitive. Выполнено численное моделирование тепломассопереноса в разработанном теплообменном устройстве и определены зависимости числа Nu, потерь давления и кольберна от числа Re

П.4.2 предложены другие виды теплообменных устройств на основе TPMS. На разработанном лабораторном стенде проведен комплекс натуральных экспериментов с разработанными теплообменными устройствами из различных материалов.

4.1. Исследование характеристик теплопередачи теплообменника на основе TPMS типа Primitive

Как уже отмечалось ранее, переход к компактным теплообменникам вызван необходимостью снижения массы [198], объема [199] и повышению мощности [200]. Несмотря на развитие традиционного тепло- массообменного оборудования достижение оптимальных характеристик массы, объема, потерь давления и высокой производительности ограничено их геометрическими особенностями [4, 201]. Поэтому активно разрабатываются конструкции высокопроизводительных теплообменных устройств посредством новых теоретических подходов [202, 203], изменений формы теплообменного тракта [204], в том числе, разработке новых теплообменных поверхностей [5] и теплоносителей [205] и других соответствующих аспектов.

Развитие аддитивных технологий и прогресс в материаловеденье позволяет интенсифицировать процессы теплообмена на структурированных поверхностях, что подчеркивают ведущие мировые исследователи в области интенсификации теплообмена: И.А. Попов [190], С. А. Исаев [207], J. Chen [83]. Как уже отмечалось ранее одними из наиболее перспективных, но малоизученных новых теплообменников с структурированной поверхностью теплообмена являются теплообменники на основе TPMS изготовленные посредством аддитивных технологий [58, 59]. При одной и той же мощности

насоса, структуры TPMS обеспечивают более высокий коэффициент теплопередачи, чем РСНЕ на 16-120% [60]. Структуры TPMS описываются строгими математическими уравнениями, что позволяет регулировать теплопередающие свойства [206, 240] изменяя геометрические параметры структуры включая размер конструкций, период поверхности уровня [5], толщину стенки [57], пористость [208], площадь поверхности [209]. Кривизна TPMS равна нулю, что исключает резкие изменения направлений потока внутри структуры и, соответственно, снижает потери давления [83]. Особенность TPMS делить пространство на 2 не пересекаемых объема/лабиринта позволяет использовать такую структуру в рекуперативных теплообменниках с большой площадью теплообмена [233]. По сравнению с традиционными конструкциями структуры TPMS демонстрируют превосходные характеристики с точки зрения сопротивления течению [56], площади поверхности [61], коэффициентов теплопередачи [62] и структурной прочности [63].

Предыдущие исследования демонстрируют значительно увеличение эффективности при сокращении массы и объема теплообменного оборудования. Однако основное внимание направлено на CFD моделирование конкретных деталей теплообменника, а не всего теплообменника [81], или оптимизацию моделирования части теплообменника [59]. В работе по изучению производительности модели сосудистого канала выявлено, что отсутствие коллекторов, может приводить к неравномерному распределению потока [88]. Очевидно, это может оказывать влияние на падение давления, реальную площадь теплообмена и другие параметры при проектировании TPMS теплообменных устройств.

В данном параграфе рассмотрено теплообменное устройство на основе поверхности Primitive, поскольку эта структура демонстрирует наименьшие потери давления. Важно отметить, что для дальнейшего прикладного применения впервые были смоделированы коллекторы. Величина $\delta/2$ является

параметром смещения эквидистантных поверхностей от нулевой поверхности уровня TPMS или половиной толщины TPMS. Область, ограниченная эквидистантными поверхностями, образует теплопередающую стенку, разделяющую два канала теплоносителей. Таким образом вся геометрия теплообменника может быть описана выражением:

$$f(x, y, z, a) = \begin{cases} f > \delta/2 \forall f \in \Omega_1 (\text{Горячий_теплоноситель}) \\ |f| \leq \delta/2 \forall f \in \Omega_2 (\text{Структура_TPMS}) \\ f < \delta/2 \forall f \in \Omega_3 (\text{Холодный_теплоноситель}) \end{cases}, \quad (4.1.1)$$

где, $\delta/2$ – константа уровня, определяющая параметр смещения эквидистантной поверхности и, соответственно, область (Ω_2) структуры TPMS. Области Ω_1 и Ω_3 соответствуют полному набору извилистых путей в теплообменном устройстве TPMS для нагреваемого и греющего теплоносителя. Таким образом в TPMS теплообменнике формируются два равных отдельных непересекающихся канала разделенных структурой TPMS.

Размер теплопередающей стенки и каналов теплоносителей может быть изменен путем регулировки периода (a), а также значения параметра смещения δ поверхности уровня. Эти параметры напрямую влияют на другие характерные размеры, например, гидравлический диаметр, пористость. Эффективная площадь теплообмена 1 ячейки на единицу объема определена с помощью комплексов CAD моделирования и триангуляции поверхности (STL). Большая площадь поверхности на единицу объема структур TPMS является решающим фактором их пригодности в качестве теплообменных устройств [68]. Структура Primitive обладает наименьшей удельной площадью поверхности по сравнению с Gyroid, Diamond при этих же параметрах периода и смещения поверхности уровня. Однако пористость структур G и D меньше, чем у Primitive, что вызывает дополнительные гидравлические сопротивления, а также увеличивает массу теплообменного устройства.

Для создания компактного теплообменника на основе топологий TPMS были выбран период поверхности уровня $a = 25$ мм, и параметр смещения $\delta = 2.5$ мм.

На рисунке 4.1.1. представлена модель теплообменника TPMS. Внутри теплообменника содержится 24 ячейки ($4 \times 3 \times 2$) которые образуют две разделенных структурой TPMS канала с греющим и нагреваемым теплоносителем. Толщина корпуса составляет 3 мм. Для обеспечения равномерного распределения жидкости и минимизации потерь давления были включены коллекторы. При отсутствии коллекторов теплоносители проходят через 1-2 ячейки, а после незначительно распределяются по устройству, что снижает реальную площадь теплообмена и препятствует прикладному применению теплообменных устройств.

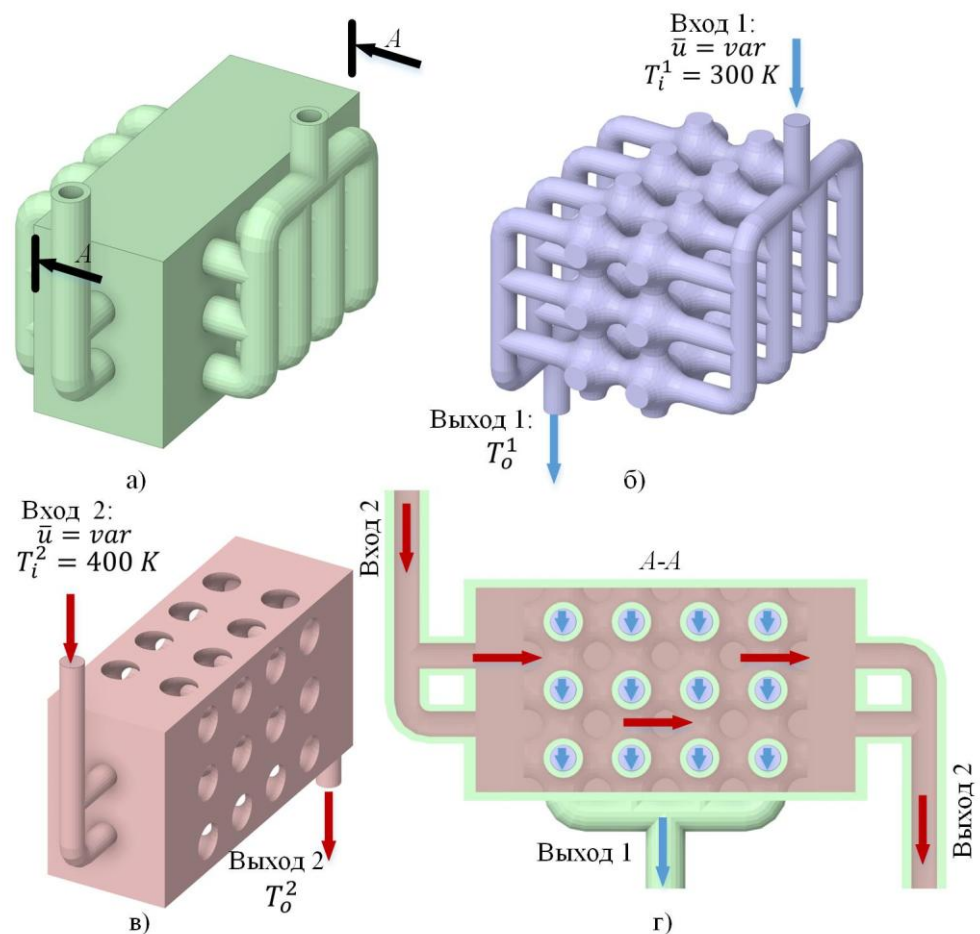


Рисунок. 4.1.1. Модель теплообменника на основе TPMS Primitive: а) геометрическая модель теплообменника с коллекторами; б) геометрия

нагреваемого теплоносителя; в) геометрия греющего теплоносителя; г) поперечное сечение модели теплообменника.

Вход и выход теплоносителя в каналах TPMS осуществляется через коллекторы и трубы диаметром 9 мм. В связи с особенностями конструкций TPMS на входах в коллекторы устанавливаются дополнительные перегородки, чтобы предотвратить слияние двух каналов, разделенных конструкцией TPMS, избегая смешивания и прямого контакта нагревающей и нагреваемой жидкостей. Длина подводных патрубков составляет 50 мм, что обеспечивает стабилизации потока на входе и выходе теплообменника в компьютерной модели.

Изготовление теплообменного устройства TPMS возможно с использованием методов 3D-лазерного плавления и стереолитографии с использованием различных материалов [210]. Для этого исследования был выбран материал PNP используемый в аддитивном производстве [225].

Одной из задач данного параграфа является определение безразмерного комплексного коэффициента теплопередачи (j/f) и потери давления в теплообменном устройстве на основе топологии TPMS Primitive. Коэффициент Колберна j используется в качестве общей меры эффективности теплопередачи, а Коэффициент трения f используется при описании перепадов давления в каналах.

Для упрощения вычислений в работе принято, что потери тепла незначительны, а всё передаваемое тепло должно быть принято нагреваемым теплоносителем. Общий коэффициент теплопередачи k можно рассчитать по уравнению.

$$k = \frac{Q}{F\Delta T_{lmd}}, \quad (4.1.2)$$

где F – площадь поверхности, m^2 ; ΔT_{lmd} – установившаяся средняя логарифмическая разница температур между двумя потоками жидкости, oC .

Безразмерный параметр числа Прандтля с учетом температуропроводности определяется из соотношения:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\nu \rho c}{\lambda}, \quad (4.1.4)$$

где, α – температуропроводность, $\text{м}^2\text{с}^{-1}$; λ – теплопроводность стенки, $\text{Вт м}^{-1}\text{°С}^{-1}$; c – теплоемкость, $\text{Дж кг}^{-1}\text{°С}^{-1}$; ρ – плотность, кг м^{-3}

Число Нуссельта (Nu), коэффициент Колберна j и коэффициент трения [84] с учетом осредненного гидравлического диаметра могут быть записана в виде:

$$\text{Nu} = \frac{4kV_c}{F\lambda}, \quad (4.1.5)$$

$$j = \frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{1/3} \text{Re}}, \quad (4.1.6)$$

$$f = \frac{2\Delta p V_c}{\rho u^2 FL}, \quad (4.1.7)$$

где Δp – перепад давления, Па; L – длина канала теплообмена, м.

После создания каналов теплообмена, корпуса теплообменного устройства, входных и выходных труб, коллекторов и дополнительных перегородок, модель была загружена в Fluent Meshing. В этом модуле модель была дискредитирована с использованием сетки Poly-Hexcore. Этот тип сетки оказался эффективным для изучения тепломассопереноса в каналах TPMS [214]. Модель Fluent Meshing также включала настройку пограничного слоя. Значение y^+ не превышало 0,97 для более точного разрешения вязкого пограничного слоя.

Анализ сходимости сетки выполнялся с использованием формулы, представленной в аналогичном исследовании [51]:

$$\varepsilon = \frac{|Q_{fine} - Q_i|}{Q_{fine}}, \quad (4.1.8)$$

где Q_{fine} – мощность теплообменника, полученная при самой мелкой расчетной сетке, Вт; Q_i – мощность теплообменника, полученная для конкретного случая разрешения сетки, Вт.

На основе анализа сходимости сетки, представленного на рисунке 4.1.2, для теплообменного устройства на основе Primitive была выбрана модель с количеством элементов – 18 млн. Указанное количество элементов сетки приводит к ошибке менее 1 процента в численном исследовании, и любое дальнейшее увеличение количества элементов значительно увеличит требуемую вычислительную мощность с точки зрения оперативной памяти и процессора (RAM и CPU).

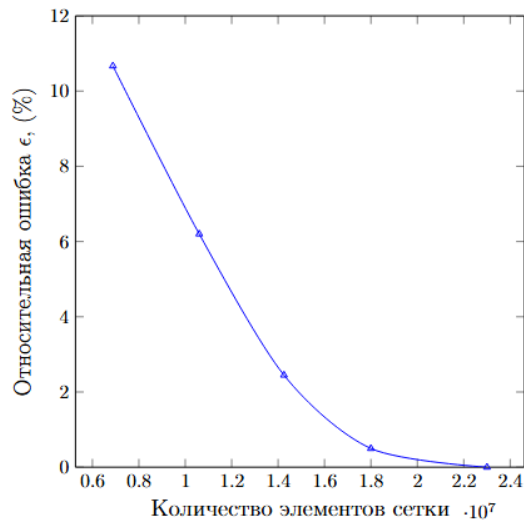


Рисунок 4.1.2. Анализ независимости сетки

Предполагается, что текучая среда несжимаема, а поток текучей среды рассматривается как установившийся турбулентный поток с переносом касательного напряжения, смоделированный с использованием подхода $k-\omega$ (SST) [56]. Основные уравнения, используемые для решения тепло- и массопереноса в установившемся режиме, представлены ниже.

Чтобы поддерживать равный массовый расход на входе и выходе модели, уравнение неразрывности решается для установившегося потока:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (4.1.9)$$

Уравнение сохранения импульса в декартовой тензорной форме записывается как:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{-\rho u_i u_j}), \quad (4.1.10)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k \partial T}{C \partial x_j} \right), \quad (4.1.11)$$

Турбулентная кинетическая энергия k и удельная скорость диссипации ω определяются следующими уравнениями переноса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + \bar{S}_k, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + \bar{S}_\omega. \end{aligned} \quad (4.1.12)$$

Таблица 4.1.1. Граничные условия

	Вход 1 греющего теплоносителя	Вход 2 нагреваемого теплоносителя	Стенка
Скорость, м с ⁻¹	0,1-3		-
Расход, кг с ⁻¹	0,006-0,19		-
Температура, К	400	300	-
Плотность, кг м ⁻³	998,2		1500
Теплопроводность, Вт м ⁻¹ К ⁻¹	0,6		0,174
Теплоемкость, Дж кг ⁻¹ К ⁻¹	4182		1000
Вязкость, кг м ⁻¹ с ⁻¹	0,001		-

Граничные условия и свойства материалов, используемые в текущем исследовании представлены в таблице 4.1.1. Скорость и расход на входе варьировались в пределах 0,1-3 м/с и 0,00634-0,1902 кг/с соответственно. Разность температур теплоносителей, подаваемых в теплообменное устройство для численного эксперимента, составляла 100 °С.

В ходе численного моделирования были получены контуры распределения скорости холодного (рисунок 4.1.3а) и горячего (рисунок 4.1.3б) теплоносителя по сечениям теплообменника. Очевидно внедрение коллекторов способствует равномерному распределению потоков теплоносителя по объему теплообменного устройства. Схожие результаты

были получены и в исследовании производительности модели сосудистого канала [88].

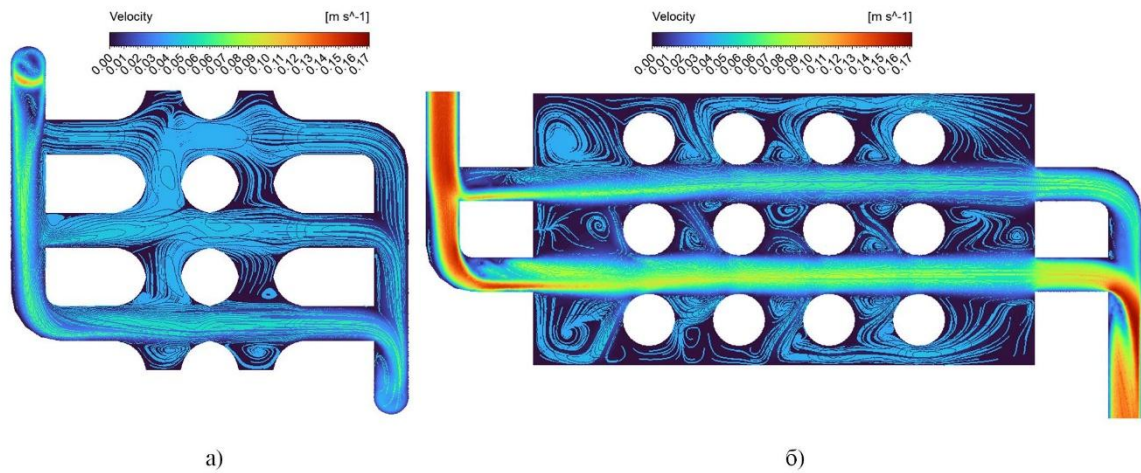


Рисунок 4.1.3. Контуры распределения скорости холодного (а) и горячего (б) теплоносителя в теплообменном устройстве TPMS с коллекторами

Для геометрии устройства характерны прямолинейные сквозные потоки с локальными завихрениями в области пересечения поперечных потоков. Большая часть завихрений наблюдаются в области расширения ячеек перед соплообразным сужением основного потока, что приводит к значительному снижению средней скорости потока в поперечном сечении. Большинство обратных токов и завихрений наблюдается в областях максимальной площади поперечного сечения, что указывает на наличие сложных схем течения и значительное смешивание жидкостей в нескольких направлениях. Подобные завихрения, а также повторное расширение и сужение поперечного сечения канала потока, создает повторяющееся замедление и ускорение жидкости, что способствуют разрушению приграничного слоя и интенсифицируют теплоперенос, однако может вызывать дополнительные потери давления. Несмотря на добавление коллекторов наблюдается неравномерное распределение скорости по различным каналам и наличие застойных областей в поперечных ответвлениях структуры, что отрицательно сказывается на

теплопередаче. Исходя из этого необходимо дополнительные конструкционные элементы, направляющие поток в крайние прямолинейные каналы (см. рис 4.1.3.б), для увеличения эффективной площади теплообмена.

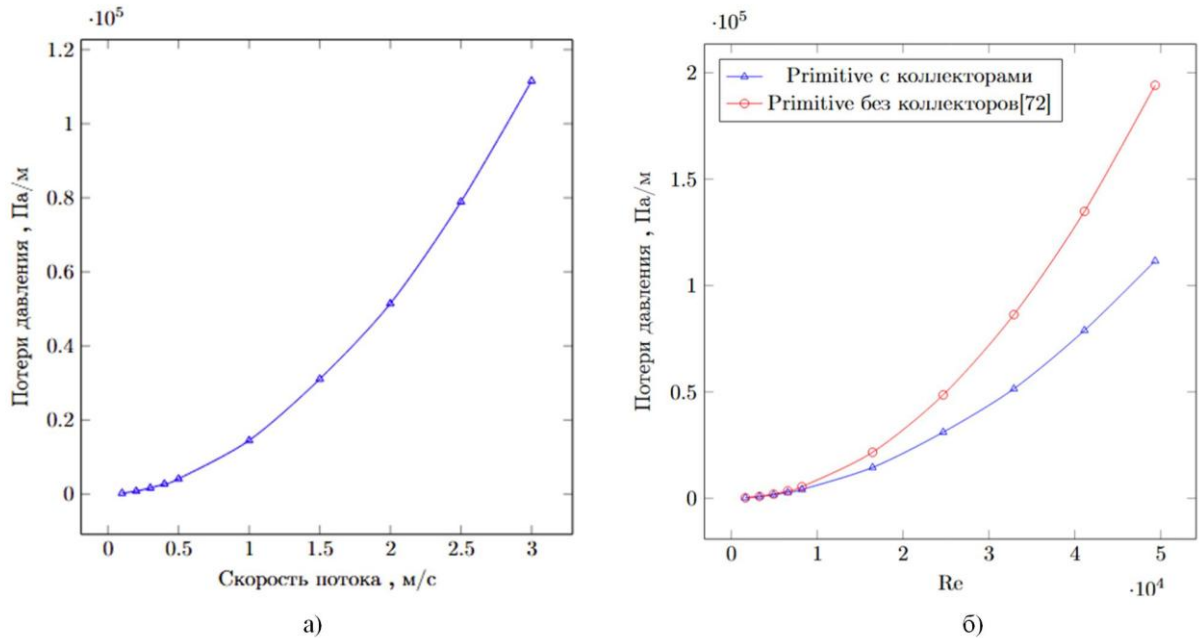


Рисунок 4.1.4. График потери давления, а) от скорости потока на входе в коллектор б) от числа Re

Потери давления теплоносителей от скорости и числа Re представлены на рисунке 4.1.4. Зависимость потерь давления от усредненной скорости потока может быть описан уравнением:

$$\frac{\Delta P}{L} = C \cdot u^{1.75}, \quad (4.1.12)$$

где c – коэффициент, учитывающий размеры ячеек и пористость. Для предложенной в работе геометрии теплообменного устройства коэффициент $C = 1488$. Схожий вид уравнения был получен и в других исследованиях гидродинамического сопротивления пористых вставок TPMS [215, 233]. На потери давления в пористых вставках на основе TPMS в большей мере влияет количество ячеек [227], поскольку поток испытывает возмущения, завихрений и изменений направления движения жидкости в каждой ячейке. Исходя из этого для сравнения гидравлических свойств потока необходимо рассматривать теплообменные устройства с равным количеством ячеек. С

учетом приведенного количества ячеек потери давления потока без коллекторов [72] и с коллекторами в теплообменном устройстве представлены на рисунке 4.1.4. Внедрение коллекторов способствовало равномерному распределению теплоносителя по всему объёму теплообменного устройства и снизило потери давления потока при числах $Re > 10000$. При ламинарном режиме течения и до чисел $Re < 10000$ потери давления потока в теплообменных устройствах с коллекторами и без коллекторов равны. Это может быть объясняется тем, что при низких скоростях потока по сквозным каналам теплообменного устройства на основе Primitive поток проходит без существенных возмущений, завихрений и изменений направлений основного движения [230]. Увеличение скорости потока без добавления коллекторов, которые стабилизируют основной поток, может вызывать завихрения и обратные токи, что является одним из основных источников потерь давления в структурах TPMS [57].

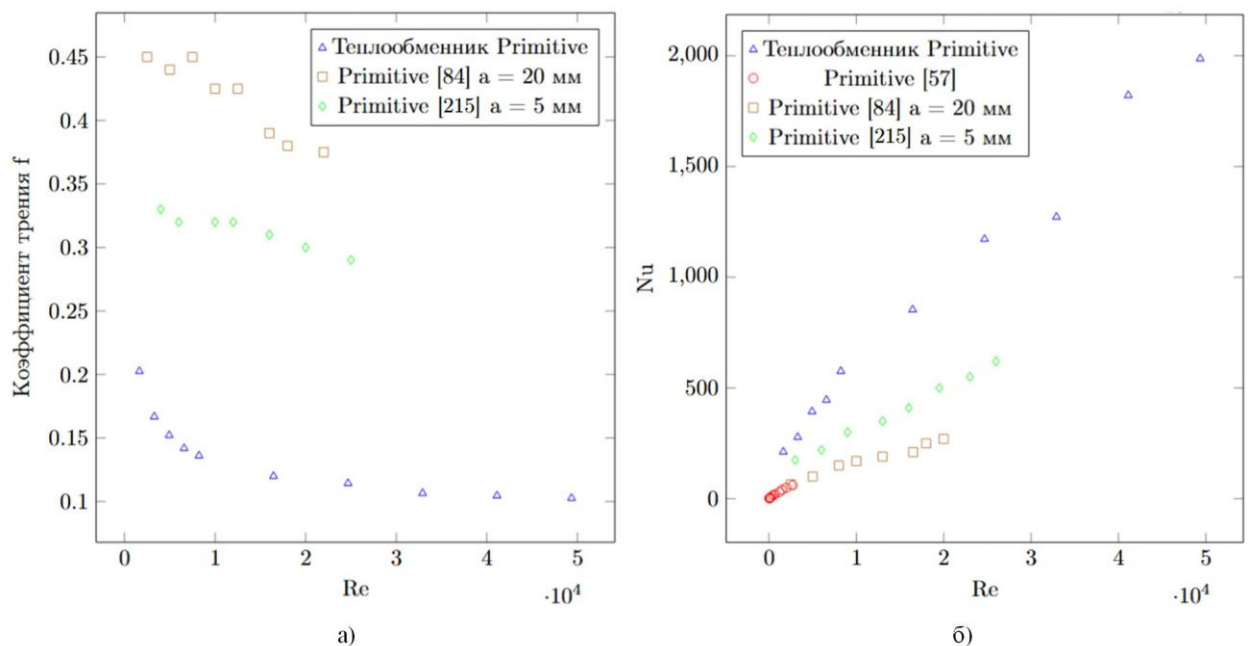


Рисунок 4.1.5. Зависимость коэффициента трения(а) и числа Нуссельта(б) от Re для теплообменных устройств на основе Primitive с коллекторами и без коллекторов [57,84,215]

На рисунке 4.1.5.а представлена зависимость коэффициента трения от числа Re . С увеличением скорости, и, соответственно, числа Re коэффициент

трения снижается до постоянной величины, что отмечается и в других исследованиях [84,215]. Зависимость коэффициента трения для модели с коллекторами от Re в границах до 10000 имеет степенной вид. При отсутствии подводных коллекторов [84,211] коэффициент трения имеет линейную зависимость на всех исследуемых (до $Re < 25000$) областях. По мере увеличения скорости потока возмущение внутри структуры TPMS усиливается, что способствует усилению теплопередачи.

Равномерное распределение потока теплоносителей по объему теплообменного устройства значительно увеличило эффективную площадь теплообмена, и, следовательно, увеличило количество переданной тепловой энергии. В таком случае усреднённое число Nu по объему теплообменного устройства увеличилось по сравнению с другими исследованиями до 80%, что видно на рисунке 4.1.5.б. При числах Рейнольдса до 10000 рассмотренная модель теплообменного устройства и другие численные и экспериментальные модели демонстрируют числа Нуссельта, не превышающие 500. Однако при увеличении числа Рейнольдса до 24677 в предложенном теплообменном устройстве наблюдается рост числа Нуссельта до 1172. Как и ожидалось, коэффициент Нуссельта для предложенного теплообменного устройства и увеличивающийся с повышением числа Re , оказался больше по сравнению с Nu для традиционных теплообменных устройств [57] и других конструкций TPMS без подводных коллекторов. Для сравнения с классическими теплообменными устройствами были рассчитаны Nu_0 для гладких труб по классической методологии [217,218] и для металлических пен со стохастической структурой [219,220]. На рисунке 4.1.6 представлено сравнение Nu для разработанного теплообменного устройства, а также параметр, основанный на аналогии Рейнольдса, представленный в виде отношения $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ [189, 194] используемый ведущими учеными в этом направлении. Ранее этот параметр использовался в параграфе 3.8 для оценки эффективности оребрения.

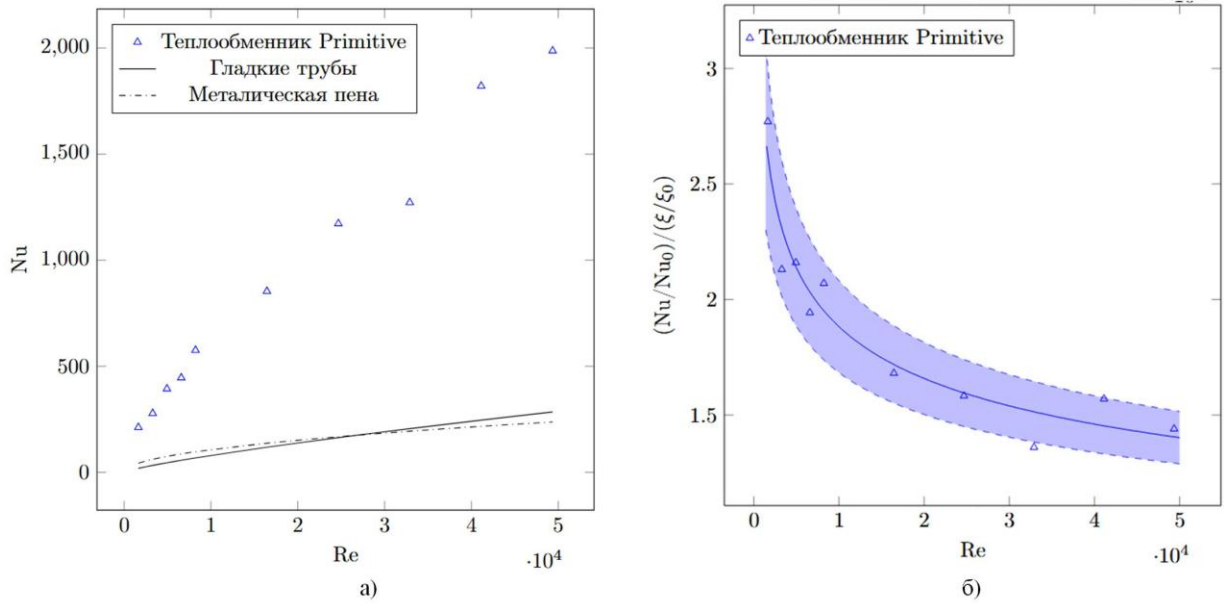


Рисунок 4.1.6. Зависимость числа Nu от числа Re для структуры TPMS, гладких труб и металлической пены; фактор аналогии Рейнольдса $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ для TPMS структуры по сравнению с гладкими трубами.

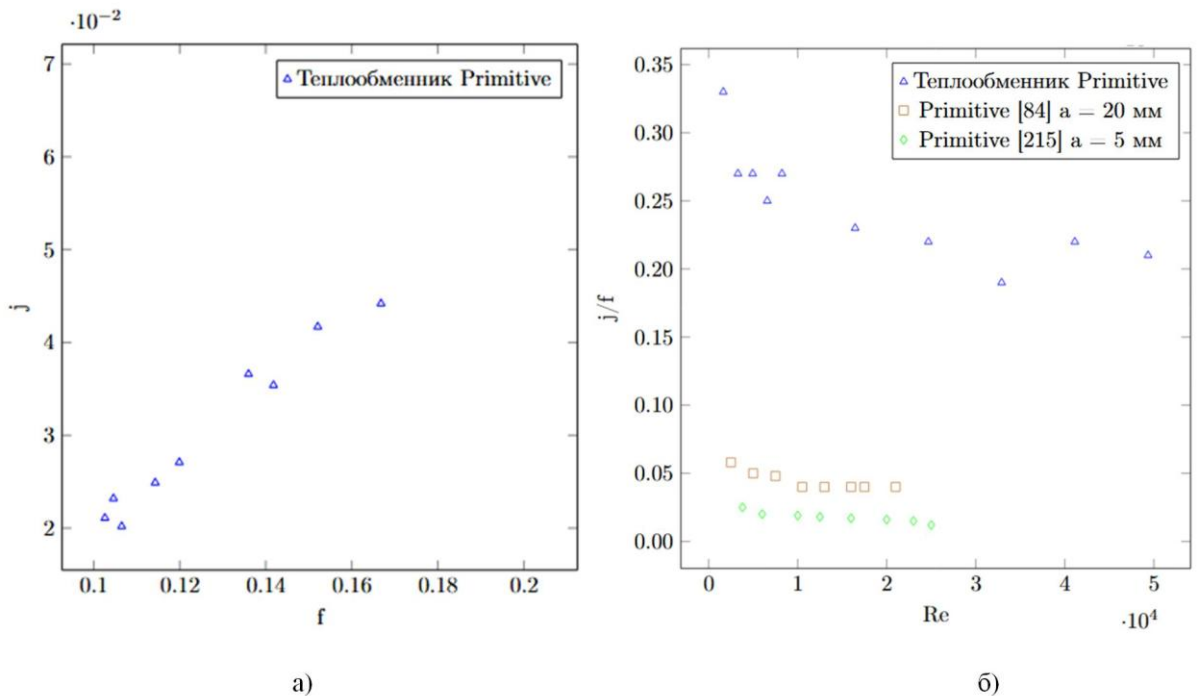


Рисунок 4.1.7. Зависимость коэффициента Кольберна от коэффициента трения, а также отношение этих коэффициентов от числа Re в теплообменных устройствах на основе Primitive с коллекторами и без коллекторов [84,215]

На рисунке 4.1.7 представлена зависимость коэффициента Кольберна от коэффициента трения, а также отношение этих коэффициентов от числа Re.

Отношение коэффициента Колберна j как общей меры эффективности теплопередачи, к коэффициенту трения f демонстрирует наиболее оптимальные область работы теплообменного устройства на основе TPMS и позволяет сравнивать результаты с другими теплообменными устройствами, включая традиционные устройства. Увеличение коэффициента сопротивления сопровождается линейным ростом безразмерного коэффициента теплопередачи Колберна. С увеличением числа Re отношение j/f снижается, аналогично другим исследованиям [84,215]. Это означает, что увеличение скорости при числах $Re > 10000$ приводит к значительному увеличению потерь давления, без существенного увеличения переданной энергии. В первую очередь это может быть связано с наличием застойных зон в теплообменном устройстве. После разработки дополнительных компонентов теплообменного устройства, позволяющих снизить застойные области и задействовать больший объем теплопередающего канала область оптимального соотношения коэффициентов j/f может быть изменена. Тем не менее, использование коллекторов позволило увеличить эффективную площадь теплообмена и увеличить числа Нуссельта и, соответственно, коэффициента Колберна, а также снизить влияние обратных токов и других гидравлических сопротивлений. В связи с этим отношение коэффициентов j/f существенно увеличилось по сравнению с другими моделями без коллекторов.

Результаты этого исследования могут быть использованы для проектирования усовершенствованных теплообменников. Рассмотрение других типов TPMS для разработки полноценных теплообменных устройств с коллекторами является следующим шагом для проектирования компактных теплообменных устройств.

4.2. Экспериментальное исследование теплопередачи в теплообменнике структуры I-WP

Несмотря на возрастающий интерес к структурам TPMS, большая часть исследований сосредоточена на численном моделировании. Количество

исследований, посвященных экспериментальному изучению теплообменных устройств с использованием TPMS в качестве поверхности теплопередачи, крайне ограничено, как отмечено в работах [85,86]. Это связано с высокой стоимостью и технологическими трудностями изготовления опытных образцов. Фактические потери давления в теплообменниках TPMS могут быть на 10-70% выше, чем прогнозы CFD, из-за шероховатости поверхности [87]. В связи с вышеизложенным возникает задача проведения комплексных экспериментальных исследований, а также определение коэффициентов эффективности j/f в теплообменных устройствах на основе поверхности I-WP.

Поверхность теплообмена в TPMS теплообменнике на основе I-WP описывается поверхностями уровня:

$$f(x, y, z, a) = 2\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\right] - \left[\cos\left(\frac{4\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi z}{a}\right)\right] = \pm \frac{\delta}{2} \quad (4.2.1)$$

где x, y, z – пространственные координаты, выраженные в безразмерной форме, соответствующей периоду ячейки структуры. Таким образом вся геометрия теплообменника может быть описана выражением:

На рисунке 4.2.1.а представлена одна элементарная ячейка поверхности TPMS типа I-WP. Путем последовательного повторения этих ячеек с периодом $\frac{2\pi}{a}$ в различных направлениях возможно формирование полноценной структуры теплообменного устройства. Как показано на рисунке 4.2.1.б, в конструкции теплообменника на основе структуры I-WP пространство внутри рабочей области делится на две непересекающиеся области.

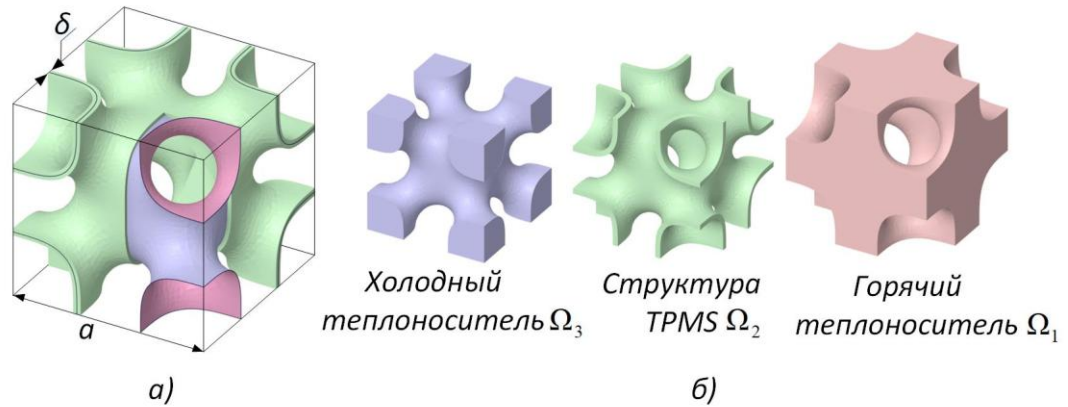


Рисунок 4.2.1. а) элементарная ячейка TPMS типа I-WP; б) разделенные пространства теплообменного устройства согласно уравнению 4.2.1.

На рисунке 4.2.2.а представлен опытный образец теплообменного устройства, изготовленный посредством аддитивных технологий из материала AlSi10Mg [222]. Разрез модели, используемой для создания образца представлен на рисунке 4.2.2.б, где также представлена схема движения теплоносителя в рамках эксперимента. Внутри рабочей области конструкция теплообменного устройства с геометрией TPMS размещено 200 элементарных ячеек (10 x 5 x 4). Корпус аппарата выполнен с толщиной 1,5 мм.

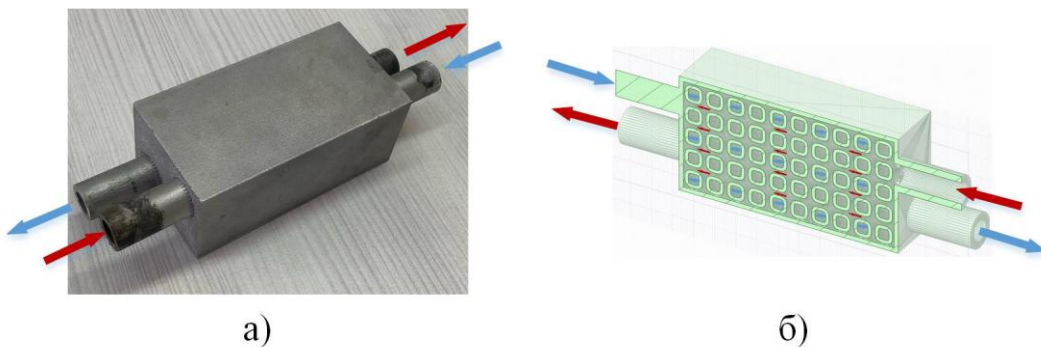


Рисунок 4.2.2. Модель теплообменника на основе TPMS I-WP: а) образец теплообменного устройства, изготовленный при помощи аддитивных технологий; б) Поперечное сечение модели теплообменного устройства.

На рисунке 4.2.3.а представлена схема экспериментальной установки, предназначенной для натурного исследования процессов теплопереноса в теплообменном устройстве. Установка включает теплообменное устройство, соединённое с системой трубопроводов для подачи горячего и холодного теплоносителей, датчики давления и термопары, расходомеры, электрический

нагревательный элемент, блок управления (персональный компьютер), резервуары для теплоносителей и регуляторы расхода.

Горячий теплоноситель из резервуара 2 через регулятор расхода и расходомер подавался в электрический котёл, после чего направлялся в теплообменное устройство. Расход теплоносителей регулировался в диапазоне 0,05-0,2 л/с и измеряется с помощью электромагнитного расходомера с точностью 0,2% и фиксируется каждую секунду. Перед входом в теплообменное устройство измерялись температура и давление горячего теплоносителя; полученные значения автоматически регистрировались блоком управления. Температура и давление греющего теплоносителя на выходе из теплообменного устройства также измерялись и фиксировались с частотой 1 с. После прохождения теплообменного устройства горячий теплоноситель возвращался обратно в резервуар 2. Холодный теплоноситель подавался из резервуара 3 с постоянной температурой. После регулятора расхода и расходомера он направлялся в теплообменное устройство, откуда затем возвращался в резервуар 3. Температура и давление холодного теплоносителя измерялись на входе и выходе теплообменного устройства и регистрировались блоком управления. Температура холодного теплоносителя в ходе экспериментов составляла 23 °С, в то время как температура горячего теплоносителя варьировалась в диапазоне 40-65 °С. Измерения проводились в установившемся режиме, который считался достигнутым при условии, что температура на выходе горячего и холодного теплоносителей не изменялась более чем на 0,5 °С в течение 60 с. После подключения теплообменника к системе проводится тщательная проверка оборудования и трубопроводов на герметичность. Также проводится калибровка датчиков. Для минимизации потерь тепла от теплообменника TPMS в окружающую среду используется съёмный защитный кожух из теплоизоляционных материалов.

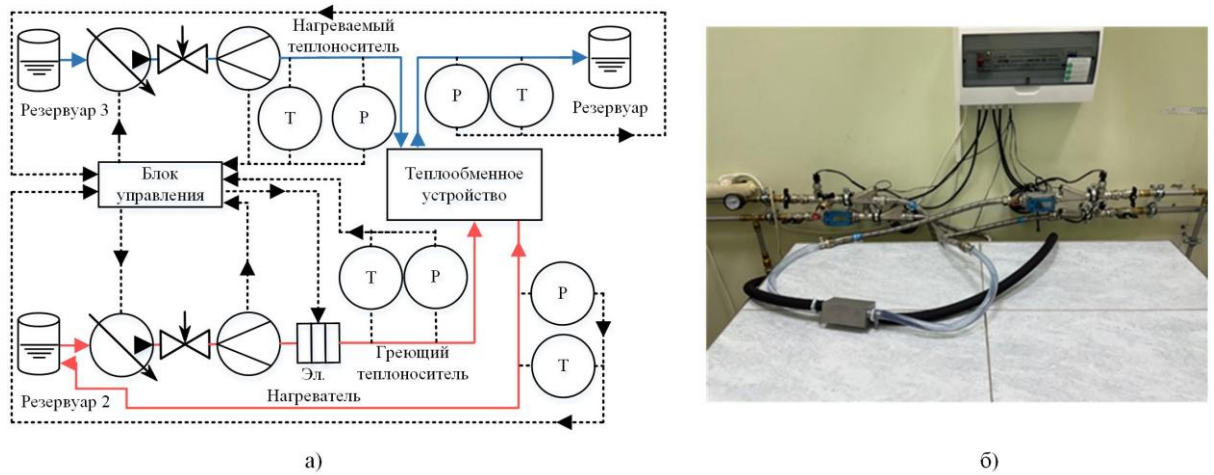


Рисунок 4.2.3. А) схема проводимого эксперимента б) Лабораторная установка для исследования теплопереноса

С учетом погрешности измерения температур составляющей $0,5^{\circ}\text{C}$, расходомера с погрешностью 1% от расхода, датчиков давления $0,7\%$. Производственные отклонений от CAD модели при изготовлении опытного образца оцениваемого в 5% [132]. Общая экспериментальная неопределенность была оценена как квадратный корень из суммы квадратов независимых источников неопределенности и составила 6%.

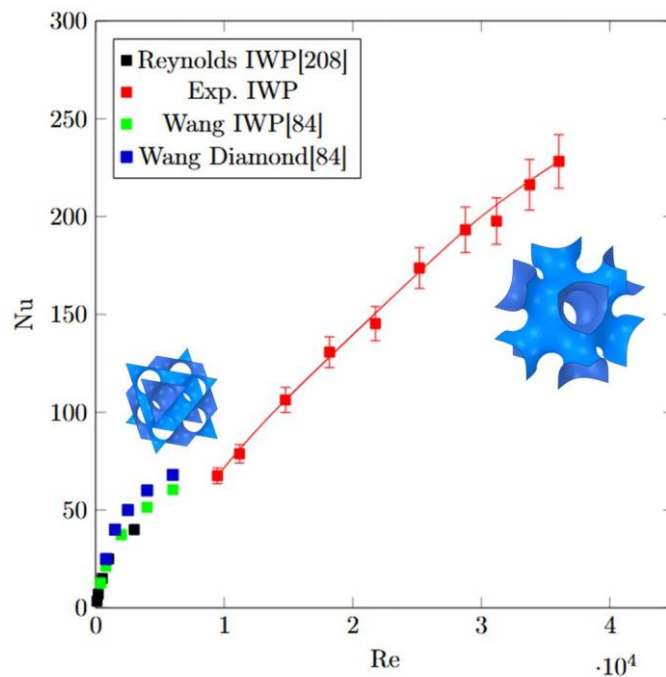


Рисунок 4.2.4. График зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса

На рисунке 4.2.4 представлена зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса, полученная в ходе натурального эксперимента для теплообменного устройства на основе TPMS-структуры I-WP. Как и в ряде исследований [208,210], с увеличением числа Рейнольдса наблюдается монотонный рост числа Нуссельта, что связано с интенсификацией теплопереноса при переходе к более развитым турбулентным режимам течения.

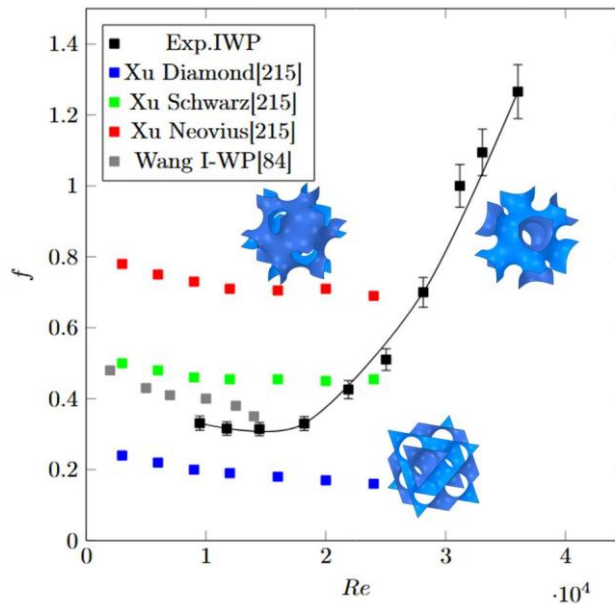


Рисунок 4.2.5. Взаимосвязь между коэффициентом f и числом Рейнольдса [215,84]

Сравнение экспериментальных данных с результатами независимых численных исследований показывает удовлетворительное согласие в диапазоне чисел Re до 10 000. При этом результаты численного моделирования демонстрируют незначительное завышение коэффициента теплоотдачи по сравнению с экспериментом. Данное расхождение может быть обусловлено идеализацией геометрии TPMS-структуры в численных моделях, отсутствием шероховатости, а также допущениями, принятыми при выборе турбулентной модели. Следует отметить, что структуры типа Diamond [223], демонстрируют более высокие значения Nu по сравнению с I-WP [208,210]. Это связано не только с большей площадью теплообмена, но и с особенностями внутренней структуры потока, в частности с отсутствием сквозных каналов и более выраженной генерацией вихревых структур. Тем не

менее, геометрия I-WP обеспечивает устойчивый теплообмен при раздельном движении горячего и холодного теплоносителей в каналах, разделённых TPMS-стенкой во всём исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.

На рисунке 4.2.5 представлена зависимость коэффициента трения f от числа Рейнольдса. В диапазоне $Re \leq 20\ 000$ экспериментальные данные демонстрируют несколько меньшие значения гидравлического сопротивления по сравнению с результатами численного моделирования [84], различие составляет порядка 10-20 %. Данное расхождение может быть связано с влиянием входных и выходных участков экспериментальной установки, патрубков и подводных труб, которые не учитывались в рамках работы, а также с отличиями в реальном распределении скоростей внутри TPMS-структуры по сравнению с идеализированной численной моделью.

При дальнейшем увеличении числа $Re > 20\ 000$ наблюдается нелинейный рост коэффициента трения, достигающий максимального значения порядка 1,3 при $Re \approx 36000$. Подобное поведение может быть обусловлено усилением локальных ускорений потока, формированием зон интенсивного вихреобразования и ростом доли инерционных потерь, что характерно для сложных периодических структур [227].

Сравнение с другими TPMS-структурами показывает, что при $Re \leq 20\ 000$ структура I-WP демонстрирует меньшие потери давления по сравнению со структурой Neovius [215] на 35-120 %, что согласуется с результатами работ [227,224]. При этом структура Diamond [84] характеризуется меньшими потерями давления во всём исследованном диапазоне чисел Рейнольдса, что связано с более плавным изменением просветности каналов и меньшим числом зон обратных течений. Также потери структуры в структуре Schwarz [215] превосходит по потерям давления теплообменное устройство на основе I-WP при $Re < 22\ 000$ до 40%, однако при $Re > 22000$ потери у структуры I-WP существенно возрастают и превосходят потери в структуре Schwarz.

На рисунке 4.2.6 приведена зависимость коэффициента Кольберна j от числа Рейнольдса. С увеличением Re наблюдается незначительное снижение коэффициента j , что характерно для развитых турбулентных режимов течения. Это может быть связано с тем, что при высоких скоростях потока дальнейшее разрушение теплового пограничного слоя становится менее эффективным, а рост теплоотдачи происходит медленнее по сравнению с ростом скорости потока, и числа Re соответственно.

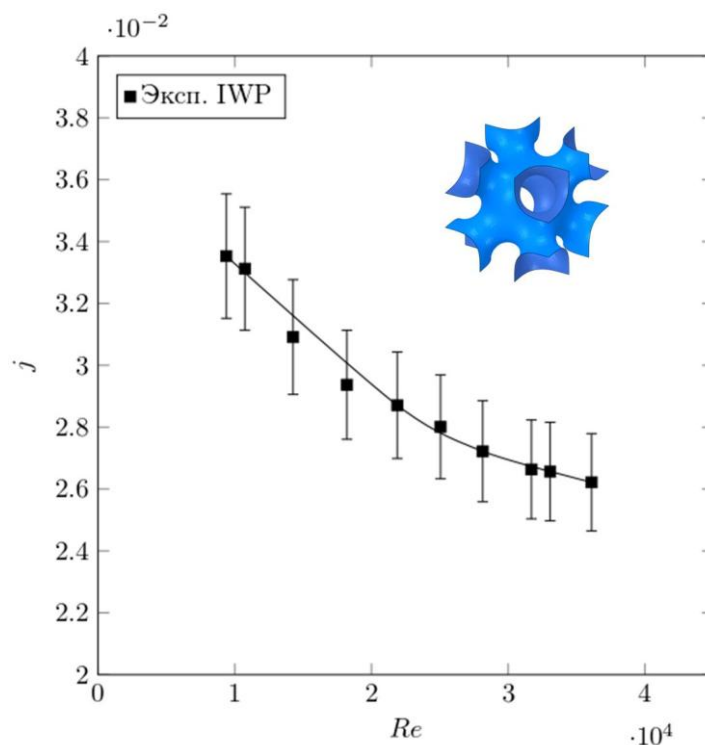


Рисунок 4.2.6. Взаимосвязь между коэффициентом трения j и числом Re

Аналогичное поведение коэффициента j для TPMS-структур отмечается в работах [70,67], где указывается, что геометрическая интенсификация теплопереноса достигает определённого предела при переходе к высоким числам Re .

Для практического применения теплообменного оборудования особый интерес представляет соотношение между интенсивностью теплопереноса и гидравлическими потерями. В качестве критерия в данной работе использовано отношение j/f , представленное на рисунке 4.2.7. Сравнение результатов натурального эксперимента с данными независимых численных моделей для TPMS-структур I-WP, Primitive, Neovius и Diamond показало, что

при числах Re до 22 000 структура I-WP демонстрирует наилучшее соотношение переданной тепловой энергии к потерям давления.

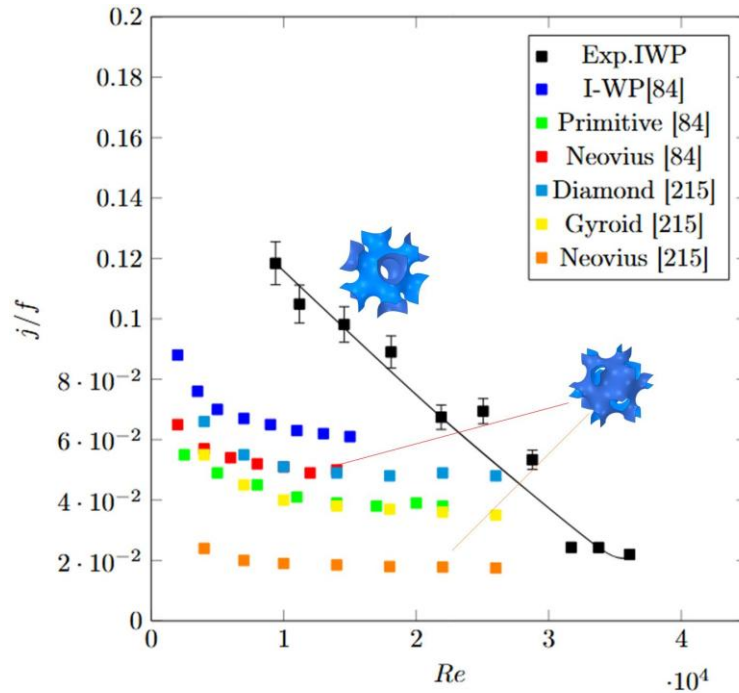


Рисунок 4.2.7. График зависимости j/f от числа Re

В эксперименте наблюдается постепенное снижение значения j/f с ростом Re , тогда как в численных моделях при $Re > 10\,000$ данный параметр остаётся практически неизменным. В частности, при $Re \approx 10\,000$ значение показателя j/f для структуры I-WP превышает соответствующие значения для структуры Neovius примерно на 96-426%, а по сравнению с результатами численного моделирования теплопереноса в структуре Schoen's I-WP до 50%. По отношению к структуре Schwarz-P превосходство структуры I-WP в указанном диапазоне чисел Re составляет до 143%, что свидетельствует о более эффективной реализации процессов теплообмена при сопоставимых потерях давления. Такое расхождение может быть связано с реальными эффектами трёхмерного перемешивания, не полностью воспроизводимыми в рамках численного моделирования.

При $Re > 28\,000$ теплообменное устройство на основе структуры I-WP демонстрирует меньшее значение j/f по сравнению с другими TPMS-структурами, что указывает на снижение относительной эффективности при

экстремальных режимах течения. Тем не менее, в диапазоне рабочих режимов, характерных для компактных теплообменников, структура I-WP обеспечивает оптимальный баланс между теплопередачей и гидравлическими потерями.

При увеличении числа Рейнольдса до $Re \approx 25\ 000$ наблюдается постепенное сближение значений j/f для различных TPMS-структур. В этом диапазоне преимущество структуры I-WP по сравнению со структурой Diamond снижается и не превышает 45 %, по сравнению со структурой Primitive – 80 %, Neovius – до 390 %. Подобное поведение может быть связано с особенностями формирования полей скорости внутри структуры I-WP. При умеренных числах Re сложная периодическая геометрия способствует интенсивному трёхмерному перемешиванию и эффективному разрушению теплового пограничного слоя при умеренных потерях давления. Однако при высоких числах Re вклад местных потерь возрастает [227], что приводит к более быстрому росту гидравлического сопротивления по сравнению с ростом теплоотдачи.

Совокупность экспериментальных данных может быть использована для уточнения расчётных моделей теплообменников на основе поверхности I-WP, разработки инженерных рекомендаций по выбору оптимальных режимов работы, а также для последующей оптимизации параметров ячейки и топологии каналов в задачах проектирования компактных высокоэффективных теплообменных устройств.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик теплообменного устройства, содержащего пористую вставку на основе TPMS-структуры типа Schoen's I-WP. В ходе натурных экспериментов получены зависимости основных критериев теплообмена и гидродинамики: чисел Нуссельта и Рейнольдса, коэффициента трения, коэффициента Кольберна и j/f в широком диапазоне режимов течения.

Показано, что увеличение числа Рейнольдса приводит к существенной интенсификации теплопереноса. При этом рост теплоотдачи сопровождается увеличением гидравлических потерь, однако в диапазоне умеренных чисел Рейнольдса структура I-WP демонстрирует оптимальное соотношение между интенсивностью теплопереноса и гидравлическими потерями давления.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами независимого численного моделирования показало удовлетворительное согласие по основным тенденциям изменения тепло- и гидродинамических характеристик. Расхождения могут быть вызваны особенностями геометрии структуры, шероховатостью, идеализированием численной модели, влиянием входных эффектов и ограничениями используемых численных моделей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных зависимостей при проектировании теплообменного оборудования с TPMS-структурами в качестве элементов интенсификации теплопереноса. Результаты исследования могут быть применены при оптимизации теплообменников, работающих в условиях ограниченных массогабаритных характеристик и повышенных тепловых нагрузок, а также служить основой для дальнейших исследований, направленных на разработку обобщённых расчётных моделей TPMS-структур различной топологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработаны комплексные подходы определения теплофизических свойств и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, основанная на анализе и обобщении результатов численных и натуральных экспериментов с использованием методов вычислительной гомогенизации, репрезентативной элементарной ячейки и нормализации по теплофизическим параметрам исходного материала. Предложенные подходы обеспечивает корректное обобщение экспериментальных и расчётных данных и расширяет возможности анализа материалов с упорядоченной структурой, а в частности, TPMS-структур, различной топологии и масштаба.
- Получены обобщённые зависимости эффективной теплопроводности пористых TPMS-материалов от геометрических параметров элементарной ячейки и теплофизических свойств материала каркаса. Показано, что введение безразмерных параметров позволяет описывать теплофизические свойства материалов с различной топологией TPMS в унифицированной форме.
- Выполнено численное и экспериментальное исследование гидродинамических характеристик пористых материалов на основе TPMS, включая распределения скоростей и давления, а также потери давления при течении теплоносителя. Установлено, что сложная топология порового пространства приводит к формированию неравномерных векторных полей скорости и оказывает существенное влияние на величину гидравлического сопротивления.
- Предложено модифицированное уравнение Хагена-Пуазейля для расчёта потерь давления при течении жидкости через пористые материалы с упорядоченной макроструктурой, учитывающее параметры потока и геометрические характеристики структуры. Показано, что предложенная

зависимость обеспечивает более точное описание гидравлических потерь по сравнению с классическими моделями для пористых сред.

- Разработаны и исследованы теплообменные устройства на основе TPMS структур, для которых выполнен анализ безразмерных характеристик с учетом взаимосвязи процессов теплообмена и потерь давления. Показано, что особенности пространственного распределения скорости в TPMS теплообменных трактах оказывают определяющее влияние на характер теплопередачи.
- Результаты численных исследований верифицированы комплексом натуральных экспериментов, что подтвердило корректность применяемых численных моделей, разработанных подходов и предложенных обобщённых зависимостей. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании материалов с заданными теплофизическими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Q. et al. Compact heat exchangers: A review and future applications for a new generation of high temperature solar receivers //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Т. 15. – №. 9. – С. 4855–4875.
2. Shah R. K. Advances in science and technology of compact heat exchangers //Heat Transfer Engineering. – 2006. – Т. 27. – №. 5. – С. 3–22.
3. Xia Q. et al. Triply periodic minimal surfaces based topology optimization for the hydrodynamic and convective heat transfer //Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2024. – Т. 131. – С. 107819.
4. Tsai Y. C., Liu F. B., Shen P. T. Investigations of the pressure drop and flow distribution in a chevron-type plate heat exchanger //International communications in heat and mass transfer. – 2009. – Т. 36. – №. 6. – С. 574–578.
5. Attarzadeh R., Attarzadeh-Niaki S. H., Duwig C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery //Applied Thermal Engineering. – 2022. – Т. 212. – С. 118448.
6. Chen X. et al. Experimental and theoretical investigation of the migration and plugging of the particle in porous media based on elastic properties //Fuel. – 2023. – Т. 332. – С. 126224.
7. Pramanik D., Manna S. Dynamic behavior of material strength due to the effect of prestress, aeolotropy, non-homogeneity, irregularity, and porosity on the propagation of torsional waves //Acta Mechanica. – 2022. – Т. 233. – №. 3. – С. 1125–1146.
8. Siddique A. R. M. et al. Thermal field investigation of lithium-ion battery with porous medium under vibration //Journal of Energy Storage. – 2022. – Т. 47. – С. 103632.
9. Ma J. et al. Effect of agricultural organic inputs on nanoplastics transport in saturated goethite-coated porous media: particle size selectivity and role

of dissolved organic matter //Environmental Science & Technology. – 2022. – T. 56. – №. 6. – C. 3524–3534.

10. Raghunath K. et al. Effects of Soret, rotation, Hall, and ion slip on unsteady MHD flow of a Jeffrey fluid through a porous medium in the presence of heat absorption and chemical reaction //Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2022. – T. 45. – №. 3. – C. 80–97.

11. Sheikholeslami M. Modeling investigation for energy storage system including mixture of paraffin and ZnO nano-powders considering porous media //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – T. 219. – C. 111066.

12. Fteiti M. et al. The impact of random porosity distribution on the composite metal foam-phase change heat transfer for thermal energy storage //Journal of Energy Storage. – 2023. – T. 60. – C. 106586.

13. Su Y. et al. Statistical effects of pore features on mechanical properties and fracture behaviors of heterogeneous random porous materials by phase-field modeling //International Journal of Solids and Structures. – 2023. – T. 264. – C. 112098.

14. Liu Z. et al. Topological design, mechanical responses and mass transport characteristics of high strength-high permeability TPMS-based scaffolds //International Journal of Mechanical Sciences. – 2022. – T. 217. – C. 107023.

15. Chen Q., Luo J., Heng Y. High-Throughput Optimal Design of Spacers Using Triply Periodic Minimal Surfaces in BWRO //Separations. – 2022. – T. 9. – №. 3. – C. 62.

16. Cai Z. et al. The effect of porosity on the mechanical properties of 3D-printed triply periodic minimal surface (TPMS) bioscaffold //Bio-Design and Manufacturing. – 2019. – T. 2. – C. 242–255.

17. He X. et al. A fast evaluation method for surface area, volume fraction, and hydraulic diameter of TPMS with different geometric characteristics //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2025. – T. 239. – №. 1. – C. 3–18.

18. Abueidda D. W. et al. Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces //Mechanics of Materials. – 2016. – T. 95. – C. 102–115.
19. Hanks B. et al. Mechanical properties of additively manufactured metal lattice structures: Data review and design interface //Additive Manufacturing. – 2020. – T. 35. – C. 101301.
20. Pashchenko D. Intra-particle diffusion limitation for steam methane reforming over a Ni-based catalyst //Fuel. – 2023. – T. 353. – C. 129205.
21. Wohlgenuth M. et al. Triply periodic bicontinuous cubic microdomain morphologies by symmetries //Macromolecules. – 2001. – T. 34. – №. 17. – C. 6083–6089.
22. Blanquer S. B. G. et al. Surface curvature in triply-periodic minimal surface architectures as a distinct design parameter in preparing advanced tissue engineering scaffolds //Biofabrication. – 2017. – T. 9. – №. 2. – C. 025001.
23. Michielsen K., Kole J. S. Photonic band gaps in materials with triply periodic surfaces and related tubular structures //Physical Review B. – 2003. – T. 68. – №. 11. – C. 115107.
24. Rajagopalan S., Robb R. A. Schwarz meets Schwann: design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds //Medical image analysis. – 2006. – T. 10. – №. 5. – C. 693–712.
25. Callens S. J. P. et al. Decoupling minimal surface metamaterial properties through multi-material hyperbolic tilings //Advanced Functional Materials. – 2021. – T. 31. – №. 30. – C. 2101373.
26. Feng J. et al. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications //International Journal of Extreme Manufacturing. – 2022. – T. 4. – №. 2. – C. 022001.

27. Yoo D. J. Porous scaffold design using the distance field and triply periodic minimal surface models //Biomaterials. – 2011. – T. 32. – №. 31. – C. 7741–7754.
28. Vijayavenkataraman S., Kuan L. Y., Lu W. F. 3D–printed ceramic triply periodic minimal surface structures for design of functionally graded bone implants //Materials & Design. – 2020. – T. 191. – C. 108602.
29. Hsieh M. T., Valdevit L. Minisurf–A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing //Software Impacts. – 2020. – T. 6. – C. 100026.
30. Jones A. et al. TPMS designer: A tool for generating and analyzing triply periodic minimal surfaces //Software Impacts. – 2021. – T. 10. – C. 100167.
31. Hsieh M. T., Valdevit L. Update (2.0) to MiniSurf–A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing //Software Impacts. – 2020. – T. 6. – C. 100035.
32. Zhang Y., Hsieh M. T., Valdevit L. Mechanical performance of 3D printed interpenetrating phase composites with spinodal topologies //Composite Structures. – 2021. – T. 263. – C. 113693.
33. Zhang Y. Mechanical Properties of Architected Materials with Spinodal Topologies: An Experimental Investigation. – University of California, Irvine, 2021.
34. Hsieh M. T., Begley M. R., Valdevit L. Architected implant designs for long bones: Advantages of minimal surface–based topologies //Materials & Design. – 2021. – T. 207. – C. 109838.
35. Brakke K. A. The surface evolver //Experimental mathematics. – 1992. – T. 1. – №. 2. – C. 141–165.
36. Brakke K. A. Surface evolver manual //Mathematics Department, Susquehanna Univerisity, Selinsgrove, PA. – 1994. – T. 17870. – №. 2.24. – C. 20.
37. Lee D. W., Khan K. A., Al–Rub R. K. A. Stiffness and yield strength of architected foams based on the Schwarz Primitive triply periodic minimal surface //International Journal of Plasticity. – 2017. – T. 95. – C. 1–20.

38. Dalaq A. S., Abueidda D. W., Al-Rub R. K. A. Mechanical properties of 3D printed interpenetrating phase composites with novel architected 3D solid-sheet reinforcements //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – T. 84. – C. 266–280.
39. Ma Q. et al. Elastically-isotropic open-cell minimal surface shell lattices with superior stiffness via variable thickness design //Additive Manufacturing. – 2021. – T. 47. – C. 102293.
40. Viet N. V. et al. Effective compressive behavior of functionally graded TPMS titanium implants with ingrown cortical or trabecular bone //Composite Structures. – 2023. – T. 303. – C. 116288.
41. Gado M. G. et al. Adsorbent beds packed in triply periodic minimal surface-derived structures and their performance in adsorption desalination/cooling systems //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024. – T. 150. – C. 107205.
42. Karpilov I., Pashchenko D. Steam methane reforming over a preheated packed bed: Heat and mass transfer in a transient process //Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – T. 42. – C. 101868.
43. Lu J. et al. Lightweight, ultra-broadband SiOC-based triply periodic minimal surface meta-structures for electromagnetic absorption //Chemical Engineering Journal. – 2024. – T. 488. – C. 151056.
44. Qureshi Z. A. et al. Architected lattices embedded with phase change materials for thermal management of high-power electronics: A numerical study //Applied Thermal Engineering. – 2023. – T. 219. – C. 119420.
45. Fan Z. et al. Investigation on heat transfer enhancement of phase change material for battery thermal energy storage system based on composite triply periodic minimal surface //Journal of Energy Storage. – 2023. – T. 57. – C. 106222.
46. Tian Y. et al. Sea urchin skeleton-inspired triply periodic foams for fast latent heat storage //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 206. – C. 123944.

47. Molteni M. et al. Improving the thermal response flexibility of 2–and 3–phase composite phase change materials by metallic triply periodic minimal surface structures //Journal of Energy Storage. – 2023. – T. 72. – C. 108185.
48. Montemurro M., Refai K., Catapano A. Thermal design of graded architected cellular materials through a CAD–compatible topology optimisation method //Composite Structures. – 2022. – T. 280. – C. 114862.
49. Mirabolghasemi A. et al. Thermal conductivity of architected cellular metamaterials //Acta Materialia. – 2019. – T. 174. – C. 61–80.
50. Wang F. et al. Predicting thermal and mechanical performance of stochastic and architected foams //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 171. – C. 121139.
51. Luo J. W. et al. Macroscopic transport properties of Gyroid structures based on pore–scale studies: permeability, diffusivity and thermal conductivity //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – T. 146. – C. 118837.
52. Pires T. et al. Numerical–experimental analysis of the permeability–porosity relationship in triply periodic minimal surfaces scaffolds //Journal of Biomechanics. – 2021. – T. 117. – C. 110263.
53. Singh R. K. et al. Hydrodynamics of countercurrent flow in an additive–manufactured column with triply periodic minimal surfaces for carbon dioxide capture //Chemical Engineering Journal. – 2022. – T. 450. – C. 138124.
54. Iyer J. et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces //Applied Thermal Engineering. – 2022. – T. 209. – C. 118192.
55. Cheng Z. et al. Investigations on porous media customized by triply periodic minimal surface: Heat transfer correlations and strength performance //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 129. – C. 105713.

56. Cheng Z., Xu R., Jiang P. X. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 170. – C. 120902.
57. Attarzadeh R., Rovira M., Duwig C. Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 177. – C. 121415.
58. Kim J., Yoo D. J. 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures //Journal of Computational Design and Engineering. – 2020. – T. 7. – №. 4. – C. 527–550.
59. Jiang Y. et al. Meshless optimization of triply periodic minimal surface based two–fluid heat exchanger //Computer–Aided Design. – 2023. – T. 162. – C. 103554.
60. Li W., Yu G., Yu Z. Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO₂ cycles //Applied Thermal Engineering. – 2020. – T. 179. – C. 115686.
61. Yeranee K., Rao Y. A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS) //Energies. – 2022. – T. 15. – №. 23. – C. 8994.
62. Alteneiji M. et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers //Energy Storage and Saving. – 2022. – T. 1. – №. 3. – C. 153–161.
63. Qiu N. et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures //International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – T. 261. – C. 108657.
64. Catchpole–Smith S. et al. Thermal conductivity of TPMS lattice structures manufactured via laser powder bed fusion //Additive Manufacturing. – 2019. – T. 30. – C. 100846.

65. Fan Z., Gao R., Liu S. A novel battery thermal management system based on P type triply periodic minimal surface //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – T. 194. – C. 123090.
66. Dixit T. et al. High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing //Applied Thermal Engineering. – 2022. – T. 210. – C. 118339.
67. Oh S. H. et al. Functional morphology change of TPMS structures for design and additive manufacturing of compact heat exchangers //Additive Manufacturing. – 2023. – T. 76. – C. 103778.
68. Samson S., Tran P., Marzocca P. Design and modelling of porous gyroid heatsinks: Influences of cell size, porosity and material variation //Applied Thermal Engineering. – 2023. – T. 235. – C. 121296.
69. Liang D. et al. Design, flow characteristics and performance evaluation of bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 201. – C. 123620.
70. Moradmand M. M., Sohankar A. Numerical and experimental investigations on the thermal–hydraulic performance of heat exchangers with Schwarz–P and gyroid structures //International Journal of Thermal Sciences. – 2024. – T. 197. – C. 108748.
71. Li W., Li W., Yu Z. Heat transfer enhancement of water–cooled triply periodic minimal surface heat exchangers //Applied Thermal Engineering. – 2022. – T. 217. – C. 119198.
72. Yan G. et al. Experimental study on flow and heat transfer performance of triply periodic minimal surface structures and their hybrid form as disturbance structure //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 147. – C. 106942.
73. Khalil M. et al. Forced convection heat transfer in heat sinks with topologies based on triply periodic minimal surfaces //Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – T. 38. – C. 102313.

74. Qureshi Z. A. et al. Heat transfer performance of a finned metal foam–phase change material (FMF–PCM) system incorporating triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 170. – C. 121001.
75. Tang W. et al. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 201. – C. 123642.
76. Yan K. et al. Numerical investigation into thermo–hydraulic characteristics and mixing performance of triply periodic minimal surface–structured heat exchangers //Applied Thermal Engineering. – 2023. – T. 230. – C. 120748.
77. Femmer T., Kuehne A. J. C., Wessling M. Estimation of the structure dependent performance of 3–D rapid prototyped membranes //Chemical Engineering Journal. – 2015. – T. 273. – C. 438–445.
78. Gao S. et al. Numerical and experimental investigation of additively manufactured shell–lattice copper heat exchanger //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 147. – C. 106976.
79. Yan G. et al. Simulation and experimental study on flow and heat transfer performance of sheet–network and solid–network disturbance structures based on triply periodic minimal surface //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – T. 219. – C. 124905.
80. Zhang T. et al. Numerical study on the anisotropy in thermo–fluid behavior of triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 215. – C. 124541.
81. Knödler P., Dreissigacker V. Fluid Dynamic Assessment and Development of Nusselt Correlations for Fischer Koch S Structures //Energies. – 2024. – T. 17. – №. 3. – C. 688.

82. Tang W. et al. Experimental Investigation on the Convective Heat Transfer Performance of Five Triply Periodic Minimal Surfaces (Tpms): Gyroid, Diamond, Iwp, Primitive, and Fischer–Koch–S //Diamond, Iwp, Primitive, and Fischer–Koch–S.

83. Qian C. et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of copper heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024. – T. 152. – C. 107292.

84. Wang J. et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) //Energy Conversion and Management. – 2023. – T. 283. – C. 116955.\

85. Dutkowski K., Kruzel M., Rokosz K. Review of the state-of-the-art uses of minimal surfaces in heat transfer //Energies. – 2022. – T. 15. – №. 21. – C. 7994.

86. Röver T. et al. Design and numerical assessment of an additively manufactured Schwarz diamond triply periodic minimal surface fluid–fluid heat exchanger //Journal of laser applications. – 2023. – T. 35. – №. 4.

87. Yan K. et al. Thermo–hydraulic performance evaluation through experiment and simulation of additive manufactured Gyroid–structured heat exchanger //Applied Thermal Engineering. – 2024. – T. 241. – C. 122402.

88. Shi J. et al. Study on Performance Simulation of Vascular–like Flow Channel Model Based on TPMS Structure //Biomimetics. – 2023. – T. 8. – №. 1. – C. 69.

89. Liang D. et al. The effect of unit size on the flow and heat transfer performance of the “Schwartz–D” heat exchanger //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 214. – C. 124367.

90. Chen F. et al. Heat transfer efficiency enhancement of gyroid heat exchanger based on multidimensional gradient structure design //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2023. – T. 149. – C. 107127.

91. Gao S. et al. Influence of cell size and its gradient on thermo–hydraulic characteristics of triply periodic minimal surface heat exchangers //Applied Thermal Engineering. – 2023. – T. 232. – C. 121098.
92. Jones A. et al. Parametric design and evaluation of TPMS–like cellular solids //Materials & Design. – 2022. – T. 221. – C. 110908.
93. Ramírez E. A. et al. A design methodology for graded density triply periodic minimal surfaces //International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – C. 955–966.
94. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R. K. MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces //Material Design & Processing Communications. – 2021. – T. 3. – №. 6. – C. e205.
95. Al Hashimi N. S. et al. 3D printing of complex architected metamaterial structures by simple material extrusion for bone tissue engineering //Materials Today Communications. – 2022. – T. 31. – C. 103382.
96. Weber D., Srinivas Sundarram S. 3D-printed and foamed triply periodic minimal surface lattice structures for energy absorption applications //Polymer Engineering & Science. – 2023. – T. 63. – №. 4. – C. 1133–1145.
97. Maskery I. et al. FLatt Pack: A research–focussed lattice design program //Additive Manufacturing. – 2022. – T. 49. – C. 102510.
98. Raju S. K. K., Onkar P. S. Lattice_Karak: Lattice structure generator for tissue engineering, lightweighting and heat exchanger applications //Software Impacts. – 2022. – T. 14. – C. 100425.
99. Perez–Boerema F., Barzegari M., Geris L. A flexible and easy–to–use open–source tool for designing functionally graded 3D porous structures //Virtual and Physical Prototyping. – 2022. – T. 17. – №. 3. – C. 682–699.
100. Karakoç A. RegionTPMS–Region based triply periodic minimal surfaces (TPMS) for 3–D printed multiphase bone scaffolds with exact porosity values //SoftwareX. – 2021. – T. 16. – C. 100835.

101. Iamsamang J., Naiyanetr P. Computational method and program for generating a porous scaffold based on implicit surfaces //Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2021. – T. 205. – C. 106088.

102. Poureslami P. 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 //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 126. – C. 105465.

103. Kolken H. M. A. et al. Merging strut–based and minimal surface meta–biomaterials: Decoupling surface area from mechanical properties //Additive Manufacturing. – 2022. – T. 52. – C. 102684.

104. Maxwell J. C. A treatise on electricity and magnetism. – Clarendon press, 1873. – T. 1.

105. Eucken A. Allgemeine gesetzmäßigkeiten für das wärmeleitvermögen verschiedener stoffarten und aggregatzustände //Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A. – 1940. – T. 11. – C. 6–20.

106. Ashby M. F. The properties of foams and lattices //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2006. – T. 364. – №. 1838. – C. 15–30.

107. Huang C. L., Qian X., Yang R. G. Influence of nanoparticle size distribution on the thermal conductivity of particulate nanocomposites //Europhysics Letters. – 2017. – T. 117. – №. 2. – C. 24001.

108. Nan C. W. et al. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance //Journal of Applied Physics. – 1997. – T. 81. – №. 10. – C. 6692–6699.

109. Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials //Journal of applied Physics. – 1962. – T. 33. – №. 10. – C. 3125–3131.

110. Kumar P., Topin F. Thermal conductivity correlations of open–cell foams: Extension of Hashin–Shtrikman model and introduction of effective solid

phase tortuosity //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 92. – С. 539–549.

111. Formalev V. F., Kolesnik S. A. Temperature–dependent anisotropic bodies thermal conductivity tensor components identification method //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Т. 123. – С. 994–998.

112. Cao Y. et al. Observation the melting process of the phase change material inside a half–cylindrical with thermal non–equilibrium porous media: CFD simulation //Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. – Т. 28. – С. 101496.

113. Eremin A. V., Kishov E. A., Popov A. I. Discrete heat transfer model with space–time nonlocality //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2022. – Т. 138. – С. 106346.

114. Шоев Г. В. и др. Разработка и апробация методики численного моделирования термически неравновесных диссоциирующих течений в ANSYS Fluent //Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – №. 2. – С. 159–171.

115. Pashchenko D., Eremin A. Heat flow inside a catalyst particle for steam methane reforming: CFD–modeling and analytical solution //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 165. – С. 120617.

116. Попов А. Ю. Алгоритмы численного анализа неклассических математических моделей термомеханики //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №. 6. – С. 83–98.

117. Ананьев Д. В., Халитова Г. Р., Вачагина У. К. Гидродинамика и теплоперенос при ламинарном течении вязкоупругой жидкости в плоскощелевом канале //Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22. – №. 1. – С. 49–60.

118. Максимов В. И., Салум А. Математическое моделирование процессов теплопереноса при работе теплонасосных систем использования геотермальной энергии //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №. 4. – С. 126–135.

119. Kaur I., Singh P. Flow and thermal transport characteristics of Triply-Periodic Minimal Surface (TPMS)-based gyroid and Schwarz-P cellular materials //Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. – 2021. – Т. 79. – №. 8. – С. 553–569.
120. Sadeghi F. et al. TPMS metamaterial structures based on shape memory polymers: Mechanical, thermal and thermomechanical assessment //Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Т. 23. – С. 3726–3743.
121. Karmakar S. et al. Comparative Study of the Effective Properties of 0–3 and Gyroid Triply Periodic Minimal Surface Cement-Piezocomposites //Global Challenges. – 2023. – Т. 7. – №. 2. – С. 2200122.
122. Zhao M. et al. TPMS-based interpenetrating lattice structures: design, mechanical properties and multiscale optimization //International Journal of Mechanical Sciences. – 2023. – Т. 244. – С. 108092.
123. Карташов Э. М., Крылов С. С. Новые аналитические решения математических моделей теплового удара локально-неравновесного теплообмена //Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. №. 6. С. 44–60.
124. Карташов Э. М., Кудинов И. В., Кудинов В. А. Новые модельные представления нестационарного теплообмена //Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. №. 4. С. 67–74.
125. Видин Ю. В., Злобин В. С. К расчету нестационарного температурного поля цилиндрического тела //Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. №. 1. С. 51–56.
126. Кротов Г. С. Аналитическое решение и функция Грина первой краевой задачи нестационарной теплопроводности в ограниченной области с границей, движущейся по корневой зависимости //Известия Российской академии наук. Энергетика. 2021. №. 1. С. 149–160.

127. Zhou Z. et al. Effective Thermal Conductivity and Heat Transfer Characteristics of a Series of Ceramic Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structure //Advanced Engineering Materials. 2023. V. 25. №. 17. P. 2300359.

128. Baobaid N. et al. Fluid flow and heat transfer of porous TPMS architected heat sinks in free convection environment //Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 33. P. 101944.

129. Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Al-Rub, R. K. A. (2018). Topologymechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. Additive Manufacturing, 19, 167–183.

130. Soro, N., Saintier, N., Merzeau, J., Veidt, M., & Dargusch, M. S. (2021). Quasi-static and fatigue properties of graded Ti-6Al-4V lattices produced by Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Additive Manufacturing, 37, 101653

131. Shemelya C. et al. Anisotropy of thermal conductivity in 3D printed polymer matrix composites for space based cube satellites //Additive Manufacturing. – 2017. – T. 16. – C. 186–196.

132. Pan C., Tang H., Yue X. Minimum cross-section dominated effective thermal conductivity in morphology-modulated gyroid lattices //International Journal of Thermal Sciences. – 2026. – T. 221. – C. 110468.

133. Wu C. et al. A new design of cooling plate for liquid-cooled battery thermal management system with variable heat transfer path //Applied Thermal Engineering. – 2024. – T. 239. – C. 122107.

134. Duernhofer C. et al. Surface Heat Flux Measurements Based on the Non-Integer System Identification Method Using Surface Temperature Data //Heat Transfer Engineering. – 2024. – T. 45. – №. 12–13. – C. 1098–1105.

135. Peng C. C., Tsai M. C. Analysis of an Electronic Heating Device: System Modeling, Identification and Control //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2024.

136. Vahidhosseini S. M. et al. Integration of solar thermal collectors and heat pumps with thermal energy storage systems for building energy demand

reduction: A comprehensive review //Journal of Energy Storage. – 2024. – T. 95. – C. 112568.

137. Qureshi Z. A. et al. Using triply periodic minimal surfaces (TPMS)-based metal foams structures as skeleton for metal-foam-PCM composites for thermal energy storage and energy management applications //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – T. 124. – C. 105265.

138. Yaple J. et al. Design and Additive Manufacturing of Bio-Inspired Copper Heat Sinks for Microelectronics Cooling. – 2022.

139. Chi Z. P., Yang G. H., Wang Q. H. Multi-morphological design of TPMS-based microchannels for thermal performance optimization //Applied Thermal Engineering. – 2024. – T. 255. – C. 124050.

140. Khan F. et al. Advances of composite materials in automobile applications-A review //Journal of Engineering Research. – 2024.

141. Nurazzi, N.M., Asyraf, M.R.M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H.A., Rafiqah, S.A., Sabaruddin, F.A., Kamarudin, S.H., Norraahim, M.N.F., Ilyas, R.A., Sapuan, S.M. A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications //Polymers. – 2021. – T. 13. – №. 4. – C. 646.

142. Megahed, M., Fathy, A., Morsy, D., Shehata, F.. Mechanical performance of glass/epoxy composites enhanced by micro-and nanosized aluminum particles //Journal of Industrial Textiles. – 2019. – pp. 68–92

143. Ozturk F., Cobanoglu M., Ece R. E. Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry //Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2024. – T. 37. – №. 9. – C. 3084–3116.

144. Huang C. et al. Enhanced tough recyclable hemiaminal dynamic covalent network with boron nitride composites material with high thermal conductivity at low filler content //Journal of Cleaner Production. – 2024. – T. 448. – C. 141657.

145. Федоров А. А., Кораблев В. А., Федоров А. В., Ковальский И. С., Волков С. М., Андреева А. Метод нагреваемой нити для измерения

теплопроводности вязких жидкостей // Вестник Международной академии холода. 2022. № 3. С. 66–73.

146. Корнилов Т. А., Эверстова В. Н. Оценка теплозащитных свойств наружных стен из полистиролбетонных блоков каркасно–монолитного здания //Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – №. 3. – С. 137–144.

147. Chen D. et al. Interface structure of the dark conglomerate liquid crystal phase //Soft Matter. – 2011. – Т. 7. – №. 5. – С. 1879–1883.

148. Kanit T. et al. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach //International Journal of solids and structures. – 2003. – Т. 40. – №. 13–14. – С. 3647–3679.

149. Mechtcherine V. et al. Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework //Cement and Concrete Composites. – 2021. – С. 103964.

150. Fanaradelli T., Rousakis T. Assessment of analytical stress and strain at peak and at ultimate conditions for fiber-reinforcement polymer-confined reinforced concrete columns of rectangular sections under axial cyclic loading //Structural Concrete. – 2021. – Т. 22. – №. 1. – С. 95–108.

151. Ma S. et al. Manufacturability, mechanical properties, mass–transport properties and biocompatibility of triply periodic minimal surface (TPMS) porous scaffolds fabricated by selective laser melting //Materials & Design. – 2020. – Т. 195. – С. 109034.

152. M.R. Karamooz–Ravari, M. Taheri Andani. Prediction of the elastic response of TPMS cellular lattice structures using finite element method. Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, 2017, pp. 2060

153. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука,1964. – 488 с.

154. Stallard S. et al. Exploring the design space of the effective thermal conductivity, permeability, and stiffness of high-porosity foams //Materials & Design. – 2023. – Т. 231. – С. 112027.

155. Fok P. J. Y. et al. Enhancing the performance of composite phase change materials using novel triply periodic minimal surface structures //Chemical Engineering Journal. – 2023. – Т. 476. – С. 146352.

156. Бальзамов Д. С., Бронская В. В. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2025. – Т. 27. – №. 1. – С. 103–115.

157. Васнев И. Р., Федорова Н. Н. Влияние мощности теплового источника на структуру высокоскоростного потока и теплообмен со стенками канала //Прикладная механика и техническая физика. – 2025. – Т. 66. – №. 5. – С. 117–127.

158. Головской В. А., Винокуров А. В. Модель подсистемы выработки криптографических ключей системы защиты информации киберфизической системы //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2025. – №. 2 (244). – С. 202–211.

159. Ряжских А. В. Оценка тепловой эффективности пластинчатого теплообменника по критерию компактности //Вестник Донецкого университета. Серия 04. Технические науки. – 2025. – №. 2. – С. 153–158.

160. Сайфетдинов А. Г., Фирсова Ю. А., Дюжин Д. Д. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ //Вестник технологического университета. – 2025. – Т. 28. – №. 7. – С. 621.565.

161. Жуков В. Е., Мезенцева Н. Н. Теплоотдача и гидравлические потери в канале со сферическими интенсификаторами при циркуляции неazeотропной спирто-водяной смеси //Теплофизика и аэромеханика. – 2025. – Т. 32. – №. 3.

162. Нишандар С., Пайс А., Багаде П. Численное и экспериментальное исследование интенсификации теплообмена в трубах с шероховатой поверхностью //Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2025. – Т. 27. – №. 3. – С. 87–107.

163. Хайруллин А. Р., Хайбуллина А. И. Экспериментальное исследование теплогидравлической эффективности коридорного пучка труб при возвратно–поступательных пульсациях потока //Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2025. – Т. 25. – №. 2. – С. 87–99.

164. Бадретдинова Г. Р. и др. Численное моделирование конденсации парогазовой смеси на поверхности спирально–навивной оребренной трубы //Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2025. – Т. 25. – №. 2. – С. 77–86.

165. Лобанов И. Е. Моделирование интенсифицированного теплообмена в каналах с диафрагмами в ламинарной, переходной и турбулентной областях для перспективных теплообменников ракетно–космической техники //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – Т. 52. – №. 1. – С. 6–12.

166. Лаптев А. Г., Ахмитшин А. А. Определение эффективности пластинчатых и трубчатых теплообменников с интенсификаторами с учетом структуры потоков //Теплофизика и аэромеханика. – 2025. – Т. 32. – №. 3.

167. Плотников Л. В. и др. Газодинамика и теплообмен стационарных и пульсирующих потоков воздуха в круглой и треугольной прямолинейных трубопроводах при разной степени турбулентности //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2025. – Т. 27. – №. 1. – С. 88–102.

168. Гараев К. Г., Мухаметзянов И. Р. Оптимально управляемые турбулентные пограничные слои в сверхзвуковых потоках газа //Математическое моделирование. – 2023. – Т. 35. – №. 7. – С. 28–40.

169. Wu Y. et al. BN nanosheet/polymer films with highly anisotropic thermal conductivity for thermal management applications //ACS applied materials & interfaces. – 2017. – Т. 9. – №. 49. – С. 43163–43170.

170. Amara K., Saghir M. Z., Abdeljabar R. Review of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Structures for Cooling Heat Sinks //Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 18. – С. 4920.

171. Wang J. et al. Investigations on the heat transfer performance of phase change material (PCM)–based heat sink with triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 234. – С. 126078.

172. Chouhan G. et al. Heat transfer performance of compact TPMS lattice heat sinks via metal additive manufacturing //Progress in Additive Manufacturing. – 2025. – С. 1–18.

173. Men Z. et al. Topology optimization of the IWP triply periodic minimal surfaces (TPMS) heat sink based on porous media effective model //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Т. 240. – С. 126657.

174. Qin K. et al. Gyroid–type TPMS structure optimization based on mathematical function control and its convective heat transfer performance study //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2025. – Т. 162. – С. 108682.

175. Gado M. G. Thermal management and heat transfer enhancement of electronic devices using integrative phase change material (PCM) and triply periodic minimal surface (TPMS) heat sinks //Applied Thermal Engineering. 2024. С. 124504. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124504

176. Попов А.И., Еремин А.В., Кечин Н.Н. Исследование тепломассопереноса в канале с оребрением на основе трижды периодической

минимальной поверхности // Градостроительство и архитектура 2023. Т. 13, №4 С.49–56 DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.07.

177. Курганова О.Ю., Кудинов И.В., Клеблеев Р.М., Стефанюк Е.В., Гаврилова Т.Е. Аналитический метод определения толщины отложений на внутренних поверхностях теплообменников // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, No 1. С. 20–24. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.4.

178. Marcinkowski M. et al. Advancements in analyzing air–side heat transfer coefficient on the individual tube rows in finned heat exchangers: Comparative study of three CFD methods //Energy. 2024. Т. 307. С. 132754. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132754

179. Yeranee K. et al. Turbulent Flow Heat Transfer and Thermal Stress Improvement of Gas Turbine Blade Trailing Edge Cooling with Diamond–Type TPMS Structure //Aerospace. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 37. doi.org/10.3390/aerospace11010037

180. Torregrosa A. J. et al. Local flow measurements in a turbocharger compressor inlet //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – Т. 88. – С. 542–553.

181. Fan Z., Gao R., Liu S. Thermal conductivity enhancement and thermal saturation elimination designs of battery thermal management system for phase change materials based on triply periodic minimal surface //Energy. – 2022. – Т. 259. – С. 125091.

182. Соловьева О. В., Яфизов Р. Р., Соловьев С. А. Определение эффективной длины пористой структуры при конвективном теплообмене //Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12. – №. 3 (47). – С. 113–122.

183. Фарахов Т. М., Лаптев А. Г. Моделирование температурных профилей и эффективности теплообменных аппаратов с интенсификаторами //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2020. – Т. 22. – №. 2. – С. 12–18.

184. Lan T. et al. Direct prediction of fluid-fluid displacement efficiency in ordered porous media using the pore structure //Water Resources Research. – 2022. – Т. 58. – №. 7. – С. e2021WR031875.

185. Тиунов С. В. и др. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла //Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 138–150.

186. Кузнецова Е. Л., Колесник С. А. Моделирование тепломассопереноса в композиционных теплозащитных материалах в условиях высоких температур //Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2012. – №. 1. – С. 31–35.

187. Попов И. А. и др. Интенсификация теплообмена–рациональный способ повышения эффективности газотрубных котлоагрегатов //Энергетика Татарстана. – 2010. – №. 4. – С. 8–15.

188. Исаев С. А. и др. Интенсификация теплообмена в облуненном узком канале при трансформации отрывного турбулентного течения с ростом угла уклона уединенной конической лунки //Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – №. 2. – С. 235–241.

189. Скрыпник А. Н. и др. Теплогидравлическая эффективность труб с внутренним спиральным оребрением //Инженерно–физический журнал. – 2018. – Т. 91. – №. 1. – С. 58–69.

190. Попов И. А. и др. Перспективные методы интенсификации теплообмена для теплоэнергетического оборудования //Энергетика Татарстана. – 2011. – №. 1. – С. 25–29.

191. Исаев С. А., Никущенко Д. В. Энергоэффективные структурированные поверхности: от сферических лунок к наклонным канавкам //Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. – 2023. – С. 157–158.

192. Карташов Э. М., Поляков С. В. Обобщенные модельные представления теории теплового удара для локально–неравновесных процессов теплообмена //Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2022. – №. 0. – С. 100–28.

193. Колесник С. А., Кузнецова Е. Л. Моделирование сопряженного теплообмена на границе анизотропных тел с использованием аналитических решений //Вестник Московского авиационного института. – 2010. – Т. 17. – №. 2. – С. 17–17.

194. Халатов А. А. и др. Фактор аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различного типа //Известия Российской академии наук. сер. Энергетика. – 2011. – №. 4–С. – С. 109–116.

195. Lanetc Z. et al. Coupling of pore network modelling and volume of fluid methods for multiphase flow in fractured media //Fuel. – 2022. – Т. 319. – С. 123563.

196. Sankar D. S. et al. Theoretical study on Poiseuille flow of Herschel–Bulkley fluid in porous media //Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2021.

197. Wu J., Yu B., Yun M. A resistance model for flow through porous media //Transport in Porous Media. – 2008. – Т. 71. – №. 3. – С. 331–343.

198. Sabharwall P. et al. Advanced heat exchanger development for molten salts //Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Т. 280. – С. 42–56.

199. Da Silva R. P. P. et al. Discretized and experimental investigation of thermo–hydraulic behavior in a compact heat exchanger manufactured via SLM process //Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – Т. 46. – С. 102184.

200. Liao J. et al. Effect of operating conditions on the output performance of a compact TEG for low–grade geothermal energy utilization //Applied Thermal Engineering. – 2024. – Т. 236. – С. 121878.

201. Gürel B. et al. Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern //Applied Thermal Engineering. – 2020. – Т. 175. – С. 115309.

202. Кирсанов Ю. А., Иванова Е. И. Тепловой расчет пластинчатого теплообменника с пористыми вставками //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – №. 5. – С. 80–89.

203. Леонтьев А. И., Олимпиев В. В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – №. 1. – С. 7–31.

204. Gu X. et al. Detailed characteristics of fluid flow and its effect on heat transfer in shell sides of typical shell-and-tube heat exchangers //International Journal of Thermal Sciences. – 2022. – Т. 173. – С. 107381

205. Balaji T. et al. Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 117. – С. 104716.

206. Mahmoud D. et al. Enhancement of heat exchanger performance using additive manufacturing of gyroid lattice structures //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Т. 126. – №. 9. – С. 4021–4036.

207. Исаев С. А. УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРАМИ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА //Енисейская теплофизика. – 2023. – С. 171–173.

208. Reynolds B. W. et al. Characterisation of heat transfer within 3D printed TPMS heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – Т. 212. – С. 124264.

209. Wang J. et al. Assessment of flow and heat transfer of triply periodic minimal surface based heat exchangers //Energy. – 2023. – Т. 282. – С. 128806.

210. Wang J. et al. Numerical and experimental investigation of additive manufactured heat exchanger using triply periodic minimal surfaces (TPMS) //Thermal Science and Engineering Progress. – 2024. – Т. 55. – С. 103007.

211. Э. М. Карташов, С. С. Крылов Модельные представления теории теплового удара вязкоупругих тел // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2024. – № 5. – С. 59–73.
212. Б. М. Каганович, Н. И. Воропай, В. А. Стенников Проблема незамкнутости термодинамики в системном энергетическом анализе // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – № 5. – С. 57–66.
213. Vidin Y. V., Kazakov R. V. Heat Transfer under Laminar Flow of Liquid in a Round Pipe // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2024. – №. 1. – С. 47–53.
214. Zeng C., Wang W. Modeling method for variable and isotropic permeability design of porous material based on TPMS lattices //Tribology International. – 2022. – Т. 176. – С. 107913
215. Xu H. et al. Flow and heat transfer performance of bionic heat transfer structures with hybrid triply periodic minimal surfaces //Applied Energy. – 2023. – Т. 351. – С. 121847.
216. Zhang W. et al. DualMS: Implicit Dual-Channel Minimal Surface Optimization for Heat Exchanger Design //Proceedings of the Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Conference Papers. – 2025. – С. 1–10
217. Dittus F. W., Boelter L. M. K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type //International communications in heat and mass transfer. – 1985. – Т. 12. – №. 1. – С. 3–22.
218. Bird, R.B., Stewart, W.E. and E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2002.
219. Mao S. et al. Correlation studies of hydrodynamics and heat transfer in metal foam heat exchangers //Applied thermal engineering. – 2014. – Т. 71. – №. 1. – С. 104–118.
220. Calmidi V. V., Mahajan R. L. Forced convection in high porosity metal foams //J. Heat Transfer. – 2000. – Т. 122. – №. 3. – С. 557–565.

221. Reynolds B., Lecarpentier F., Holland D. Heat transfer and topological characterisation of TPMS structures using 3D printed materials //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – T. 245. – C. 126992.

222. Hu, M., Wu, X., Xu, Y., Huang, X., Lu, D., & Pei, B. (2025). Investigation of functionally graded triply periodic minimal surfaces with graphene–reinforced AlSi10Mg powder: Design, fabrication and impact resistance. *Materials & Design*, 250, 113586.

223. Wang J. et al. Experimental and numerical analysis of functionally graded hybrid TPMS heat exchangers for enhanced flow and thermal performance //Applied Thermal Engineering. – 2025. – T. 264. – C. 125528.

224. Rathjen K. et al. Additive Manufacturing of Surface–based Structures for Studying Fluid Flow in Heat Sinks with High–Speed Imaging. – 2024.

Основные публикации автора диссертационной работы

225. 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. V. 231. P. 125863

226. 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.

227. Bragin D., Karpilov I., Pashchenko D. Flow dynamics through cellular material based on a structure with triply periodic minimal surface // Chemical Engineering Science. 2024. C. 120291.

228. 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.

229. Eremin A. V. et al. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces //Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2024. – T. 31. – №. 29. – C. 11320–11336.

230. 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.

231. 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.

232. 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.

233. 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

234. 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.

235. 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.

236. Брагин Д. М., Еремин А. В. Исследование тепловых свойств пористых полимерных материалов на основе минимальных поверхностей Шварца //Инженерный вестник Дона. 2023. №. 9 (105). С. 36.

237. Брагин Д. М. и др. 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.

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

239. 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

240. 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

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
«Определение коэффициента эффективной теплопроводности пористых
материалов с упорядоченной структурой на основе экспериментальных
данных»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616948

**Определение коэффициента эффективной
теплопроводности пористых материалов с
упорядоченной структурой на основе
экспериментальных данных**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Попов Андрей Игоревич (RU), Брагин Дмитрий Михайлович (RU), Еремин Антон Владимирович (RU), Зинина Софья Алексеевна (RU), Олатуйи Олувапелуми Джонсон (NG), Мустафин Равиль Мансурович (RU), Карпилов Игорь Дмитриевич (RU)*



Заявка № 2023615531

Дата поступления 27 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов
Исполнительный директор
Федеральной службы по интеллектуальной собственности
г. Москва, ул. Садовая-Кавказская, д. 19/1
Тел: +7 (495) 793-7000

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
«Приближенно-аналитический метод решения задачи теплопроводности
в пористой пластине, структура которой основана на трижды
периодических поверхностях минимальной энергии»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023684550

Приближенно-аналитический метод решения задачи теплопроводности в пористой пластине, структура которой основана на трижды периодических поверхностях минимальной энергии

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Зинина Софья Алексеевна (RU), Попов Андрей Игоревич (RU), Еремин Антон Владимирович (RU), Брагин Дмитрий Михайлович (RU), Мустафин Равиль Мансурович (RU), Кечин Никита Николаевич (RU)*



Заявка № 2023683893

Дата поступления 13 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b5401671813642e795183b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.08.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
«Программа, реализующая алгоритм решения TPMS структур на основе
трехмерной координатной сетки»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024684779

Программа, реализующая алгоритм решения ТМПП структур на основе трехмерной координатной сетки

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Шадымов Никита Алексеевич (RU), Шадымова Алина Олеговна (RU), Еремин Антон Владимирович (RU), Брагин Дмитрий Михайлович (RU), Зинина Софья Алексеевна (RU)*



Заявка № 2024682776

Дата поступления 03 октября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 октября 2024 г.

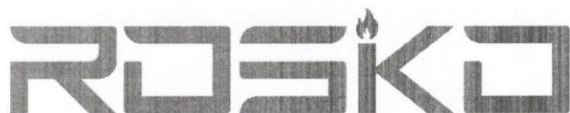
*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат: 0492e780c30c3c520401070b0a2006
Владелец: *Зубов Юлий Сергеевич*
Действителен с 10.01.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.

**Акт о внедрении результатов научно - исследовательской работы в
расчетную и проектную практику ООО «РосКо»**



Rosko06@mail.ru
 +7 (846) 359-13-43; +7 927 709-45-00
 443070, г. Самара, ул. Аэродромная 45, оф. 205

УТВЕРЖДАЮ



Директор ООО «РосКо»

Щеглов В.С.
 2026 г.

АКТ

**О внедрении результатов диссертационной работы
 Брагина Дмитрия Михайловича
 «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств
 пористых материалов с упорядоченной макроструктурой»**

Комиссия в составе:

1. Директор ООО «РосКо» Щеглов В.С.
2. Заместитель главного инженера Клименко А.Г.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Брагина Д.М. на тему «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой», а именно:

- подходы к численному моделированию и САД-проектированию элементов энергетического оборудования с использованием упорядоченных пористых структур, внедряемые в инженерную практику для сокращения сроков разработки, повышения точности расчётов и создания оборудования с заданными эксплуатационными характеристиками;
- обобщённые зависимости эффективных свойств (теплопроводности, гидравлического сопротивления) пористых структур от их геометрических параметров, применяемые в расчётно-проектной практике при выборе конструктивных решений и повышении энергоэффективности теплоиспользующих установок;
- методы определения и инженерного прогнозирования теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, используемые при разработке и оптимизации теплообменных аппаратов, систем терморегулирования и энергетического оборудования различного назначения

внедрены в расчетную и проектную практику ООО «РосКо»

Заместитель главного
 Инженера ООО «РосКо»

Клименко А.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5.

**Акт о внедрении результатов научно - исследовательской работы в
расчетно-проектную практику ООО «Котел Маркет»**



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Котел Маркет»

Кечин Н.Н.

2026 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой» Брагина Дмитрия Михаловича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой» Брагина Дмитрия Михайловича внедрены в расчетно-проектную практику компании. В частности, используются:

1. методы расчёта и прогнозирования теплофизических и гидродинамических характеристик пористых материалов с упорядоченной макроструктурой, применяемые при разработке и модернизации теплообменных поверхностей котельного оборудования с целью повышения эффективности теплообмена и снижения удельных потерь энергии;
2. подходы к разработке компактного теплообменного оборудования на основе упорядоченных пористых структур (в том числе TPMS), обеспечивающие повышение удельной поверхности теплообмена при ограниченных габаритах и внедряемые при проектировании высокоэффективных теплообменных узлов котельных установок;
3. подходы к разработке компактного теплообменного оборудования на основе упорядоченных пористых структур, обеспечивающие повышение удельной поверхности теплообмена при ограниченных габаритах и внедряемые при проектировании высокоэффективных теплообменных узлов котельных установок.

Руководитель сервисной службы
ООО «Котел Маркет»

Мацаков С.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.

**Акт о внедрении результатов научно - исследовательской работы в
учебный процесс**



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)



УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор – проректор
по учебной работе
Овчинников Д.Е.
«15» мая 2026 г.

**о внедрении результатов диссертационного исследования
Брагина Дмитрия Михайловича
по теме «Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств
пористых материалов с упорядоченной макроструктурой»
в учебный процесс и практическую деятельность**

Комиссия в составе: декан теплоэнергетического факультета, к.э.н. доцент Трубицын К.В.; доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», к.т.н., доцент Горшенин А.С.; доцент кафедры «Тепловые электрические станции», к.т.н., доцент Ткачев В.К. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования Брагина Д.М. на тему ««Разработка методов расчета и прогнозирования переносных свойств пористых материалов с упорядоченной макроструктурой», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника», внедрены в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» в образовательную практику учебных модулей «Холодильные установки промышленных предприятий» и «САД-моделирование в теплоэнергетике и теплотехнике» по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Состав комиссии:


Декан ТЭФ,
к.э.н., доцент

 К.В. Трубицын

Доцент кафедры ПТЭ
к.т.н., доцент

 А. С. Горшенин

Доцент кафедры ТЭС
к.т.н., доцент

 В.К. Ткачев