

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Попова Андрея Игоревича на тему «Разработка методов математического моделирования процессов тепломассопереноса в материалах с упорядоченной макроструктурой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **Актуальность темы.**

В настоящее время в связи с повышением требований к энергоэффективности и надежности теплотехнического оборудования критически важным становится корректное описание процессов тепломассопереноса. Особого внимания, заслуживают процессы переноса в пористых материалах, которые широко распространены в энергетике, медицине, строительстве и т.д.

Большинство существующих моделей тепло и массопереноса предназначены для описания соответствующих процессов в пористых материалах со случайным распределением пор. Однако существует явный недостаток математических моделей, способных адекватно описать процессы теплопроводности или течения в пористых материалах с упорядоченной макроструктурой, в особенности, когда речь идет об особом классе пористых материалов, структура которых основана на трижды периодических минимальных поверхностях (ТПМП).

В связи с этим цель работы, связанная с разработкой новых методов математического моделирования процессов тепломассопереноса в пористых материалах с упорядоченной макроструктурой является актуальной.

### **Научная новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан метод математического моделирования теплопроводности и фильтрации в пористых материалах, структура которых основана на трижды периодических минимальных поверхностях. Особенностью предложенного метода является использование оригинального способа гомогенизации исследуемого материала, а также определение эффективных коэффициентов переноса на основе интерпретации результатов вычислительных и натурных экспериментов.

2. Разработана модифицированная модель теплопроводности в пористых ТПМП-материалах, которая, в отличие от известных, позволяет учитывать геометрические и структурные параметры трижды периодических минимальных поверхностей (размер элементарной ячейки, толщина стенки ячейки, пористость и др.).

С отзывом ознакомлен 10.06.2024г.  
Попов АИ

ФГБОУ ВО "СамГТУ"
" 10 " 06, 2024
Вход. № 8/4

3. Выполнена постановка и получено решение краевой задачи теплопроводности в бесконечно протяженной пористой пластине. Решение задачи осуществлялось методом, основанном на совместном использовании метода разделения переменных и ортогональных методов взвешенных невязок, а также метода коллокаций. Особенность предложенного метода заключается в точном удовлетворении дифференциального уравнения краевой задачи Штурма-Лиувилля в заданном наборе точек пространственной переменной.

4. Получено приближенно-аналитическое решение задачи теплопроводности в бесконечно протяженной пористой пластине с ТПМП структурой при равномерно распределенных внутренних источниках теплоты. Решение выполнено на основе совместного применения метода введения дополнительной искомой функции и дополнительных граничных характеристик, а также интегрального метода теплового баланса.

5. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для ЭВМ, в которых реализованы примененные в диссертации приближенные методы в программной среде MathCAD 15.0.

6. Разработан алгоритм реализации численного метода (метода конечных элементов), основанный на использовании новой дискретной модели теплопроводности с учетом пространственно-временной нелокальности. Данный алгоритм представлен в виде блок-схемы, а также расширения для модуля Thermal программного комплекса ANSYS.

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

Кроме того стоит отметить соответствие диссертационной работы пунктам паспорта научной специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а именно: 1) Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; 2) Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; 3) Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; 8) Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента; 9) Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность содержащихся в работе научных положений и выводов подтверждается их непротиворечивостью современным представлениям о закономерностях переноса тепла и массы, а также сопоставлением с результатами вычислительных и натуральных экспериментов, выполненных с использованием специализированного программного обеспечения и на сертифицированном оборудовании.

### **Значимость для науки и производства полученных автором результатов.**

Научная значимость полученных автором результатов определяется новыми разработанными методами математического моделирования теплопроводности и фильтрации, которые, по сравнению с известными, позволяют учитывать характеристики пористых материалов, структура которых основана на трижды периодических минимальных поверхностях. Новизна также содержится в постановке и решении соответствующих краевых задач. Представленные в работе простые по форме приближенные решения нестационарных задач теплопроводности позволяют с требуемой точностью определить распределение температуры и плотности теплового потока в пористых материалах, структура которых основана на ТПМП.

Практическая значимость работы состоит в разработке программного обеспечения для реализации алгоритмов решения краевых задач в соответствии с примененными в диссертации методами, а также APDL – алгоритма для решения трехмерных задач теплопроводности с учетом пространственно-временной нелокальности в ANSYS Thermal. Результаты работы используются в расчетной практике ООО «ТСК Волгаэнергопром» и ООО «Инженерное бюро Пульсар» г. Самара.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа, изложенная на 134 страницах основного машинописного текста, содержит 60 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулирована научная новизна, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации выполнен обзор литературы по теме исследования. Отмечены недостатки известных моделей теплопроводности и фильтрации в пористых средах.

Во **второй главе** представлены результаты разработки метода математического моделирования теплопроводности в пористых материалах, структура которых основана на трижды периодических минимальных поверхностях. Разработана новая математическая модель теплопроводности в пористых ТПМП-

материалах, которая позволяет учитывать характерные геометрические и структурные параметры трижды периодических минимальных поверхностей. Сформулированы и решены краевые задачи теплопроводности в пористых бесконечно протяженных пористых пластинах, в том числе с учетом внутренних источников теплоты. Для решения задач применены приближенно-аналитический и численно-аналитический методы, которые позволили получить простые по форме решения.

В **третьей главе** диссертации приводятся результаты исследования гидродинамики пористых материалов с ТПМП структурой. В частности, на основе интерпретации результатов вычислительных экспериментов в ANSYS Fluent определена зависимость коэффициента проницаемости от пористости ТПМП-материала в соответствии с моделью фильтрационного течения Бринкмана. Поставлена и решена краевая задача фильтрационного течения в пористом ТПМП-канале. Предложен вариант компоновки и выполнено численное моделирование теплообменного устройства, основанного на ТПМП.

В **четвертой главе** представлены результаты разработки APDL – алгоритма для решения трехмерных задач теплопроводности с учетом пространственно-временной нелокальности методом конечных элементов в ANSYS Thermal. При помощи данного алгоритма впервые решена трехмерная задача теплопроводности в элементарной ячейке ТПМП Шварца Р с учетом запаздывания изменения температуры как по координате, так и во времени.

В **пятой главе** приведены алгоритмы, реализующие примененные в диссертации численно-аналитический и приближенный аналитический методы решения нестационарных задач теплопроводности в пористых материалах со структурой, основанной на ТПМП. Представлен APDL – алгоритм, оформленный в виде блок-схемы и программного расширения «ThermalRelax» для ANSYS, предназначенный для определения температурных полей в телах со сложной геометрической формой с учетом конечной скорости распространения тепла.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях ООО «ТСК Волгаэнергопром» (г. Самара) и ООО «Инженерное бюро Пульсар» (г. Самара). Кроме того, по мнению оппонента, результаты также могут быть использованы на предприятии ООО «Татнефть-Пресскомполит», а также в учебном процессе при изучении дисциплины «Тепломассообмен».

#### **Замечания к диссертации.**

1. В третьей главе диссертации в п. 3.3 в постановке краевой задачи

фильтрационного течения в пористом канале не явно выражена зависимость коэффициента проницаемости от пористости ТПМП-материала. Автору следовало более конкретно показать, что в дифференциальном уравнении фильтрационного течения Бринкмана используется не константа  $k$ , а функция  $k(\phi)$ , определяющая зависимость коэффициента проницаемости от пористости материала со структурой ТПМП, чтобы при прочтении текста была очевидна новизна в модели.

2. В работе несколько раз упоминается термин «оптимальное число ячеек» при решении задач методом конечных элементов в ANSYS. Однако нигде нет разъяснений по какому именно критерию определялась оптимальность.

3. Какие условия были заданы для моделирования процесса теплопроводности в Ansys?

4. Почему в Ansys не решался симметричный вариант задачи переноса тепла при моделировании элементарной ячейки?

5. В расчётах не был учтён перенос тепла конвекцией. Какова роль конвекции в процессе переноса тепла?

6. При изготовлении пластиковых пластин в них могут образовываться пустоты. Как учитывали влияние этих пустот на теплопроводность в ходе экспериментальных исследований?

7. При решении задачи переноса тепла в канале квадратного сечения температура стенки была задана как  $427^{\circ}\text{C}$ . Возникали ли в каких-либо областях условия для кипения жидкости и учитывались ли эти условия в расчётах?

8. В ходе численного моделирования процесса теплообмена температура текучей среды варьировалась от  $92^{\circ}\text{C}$  до  $32^{\circ}\text{C}$ . При таком изменении температуры существенно меняются вязкость и другие теплофизические свойства вещества. Как это учитывалось в расчётах?

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

#### **Общая характеристика работы.**

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа выполнена на хорошем научно-техническом уровне и содержит новые научные результаты в области математического моделирования процессов тепломассопереноса в пористых материалах.

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

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В виду актуальности темы исследования, соответствия результатов

поставленным целям, научной новизны и практической значимости работы, а также личного вклада автора диссертация полностью соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в последней редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор диссертации «Разработка методов математического моделирования процессов тепломассопереноса в материалах с упорядоченной макроструктурой» Попов Андрей Игоревич полностью заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с работой диссертационного совета 24.2.377.02.

Заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» института теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», д.т.н., доцент



А.В. Дмитриев

«05» 06 2024 г.

Докторская диссертация Дмитриева А.В. защищена по специальности 05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий (2012 г.).

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51;  
тел.: 8 (843) 519-42-02, 562-43-25  
e-mail: ieremiada@gmail.com

Подпись Дмитриева А.В. заверяю:  
*Дмитриева Андрей Владимирович*



*Дмитриева А.В.*  
подпись заверяю  
Специалист ОК *М.А. Крайкова*