

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И
АРХИТЕКТУРЫ»**

На правах рукописи

Воронова Ольга Сергеевна

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ
ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена в ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ», г. Макеевка.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Конопацкий Евгений Викторович,
ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И
АРХИТЕКТУРЫ» (г. Макеевка), доцент
кафедры специализированных
информационных технологий и систем

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 2020 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 1, ауд. 203
Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovets@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследования тепломассообменных процессов, являются одной из наиболее сложных и до конца не решенных прикладных задач моделирования физических явлений, особенностью которых является взаимосвязь факторов, влияющих на исследуемую функцию отклика. Для решения подобного класса задач используются методы многомерной интерполяции и аппроксимации, реализация которых невозможна без использования программных средств и современных компьютерных технологий. Большинство из существующих методов многомерной интерполяции основано на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для выбранного интерполянта. При этом с ростом количества исследуемых факторов, от которых зависит функция отклика, растёт количество уравнений системы. Например, для определения коэффициентов трилинейного интерполянта функции трёх переменных необходимо решить систему 8-ми линейных уравнений. А среди тепломассообменных процессов большинство не только являются нелинейными, но и носят крайне сложный функциональный характер. Одним из возможных вариантов совершенствования существующих методов многомерной интерполяции является использование геометрического моделирования многопараметрических нелинейных многообразий, инцидентных относительно исходных точек, координаты которых соответствуют исходной экспериментально-статистической информации. Тогда для создания вычислительного алгоритма и проведения вычислительного эксперимента необходимо аналитическое описание геометрической модели исследуемого многофакторного процесса, которое реализуется с помощью математического аппарата БН-исчисления (точечное исчисление Балюбы-Найдыша), основанного на инвариантах аффинной геометрии. Такой метод исключает необходимость составления и решения громоздких СЛАУ, поскольку исходная экспериментальная информация закладывается непосредственно на стадии определения искомой функциональной зависимости.

Исходя из вышеизложенного, совершенствование методов моделирования многофакторных тепломассообменных процессов, представленных с помощью геометрических интерполянтов, и разработка на их основе вычислительных алгоритмов и программных средств, является актуальной научной задачей, имеющей важное отраслевое значение.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической базой для проведения исследований стали работы ведущих учёных и их учеников:

– в области моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения: Александрова А.А., Бекетова В.Г., Белова Г.В., Вассермана А.А., Вукаловича М.П., Казавчинского Я.З.,

Очкова В.Ф., Рабиновича В.А., Сычева В.В., Цветкова О.Б., Шуршева В.Ф., Lemmon E.W., Jacobsen R.T. и др;

– в области моделирования и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик котлоагрегатов: Губаря В.Ф., Заворина А.С., Качана В.Н., Лукьянова А.В, Хаустова С.А. и др;

– в области численного решения дифференциальных уравнений в частных производных: Беднаржевского В.С., Дынниковой Г.Я., Ермолаева И.А., Кузнецова В.А., Мартыненко С.Н., Павлыша В.Н., Полежаева В. И., Федорова Ф.М., Cottrell J.A. и др.;

– в области многомерной интерполяции и аппроксимации: Бутырского Е.Ю., Голубинского А.Н., Добровольского Н. М., Квасова Б.И. и др.;

– в области геометрического моделирования и оптимизации многофакторных процессов и явлений: Аносова В.Я., Валькова К.И., Верещаги В.М., Вертинской Н.Д., Волкова В.Я., Гумен Н.С., Комяк В.М., Найдыша А.В., Радищева В.П., Сергейчука О.В. и др.;

– в области создания и развития математического аппарата БН-исчисления: Балюбы И.Г., Бездитного А.А., Бумаги А.И., Верещаги В.М., Горягина Б.Ф., Давыденко И.П., Конопацкого Е.В., Крысько А.А., Кучеренко В.В., Малютиной Т.П., Найдыша В.М., Полищука В.И., Скидана И.А., Чернышевой О.А. и др.;

Несмотря на значительный объем исследований и наличие широкого спектра программных продуктов в области моделирования и исследования тепломассообменных процессов, отсутствует единый подход к многомерной интерполяции и аппроксимации исходной экспериментальной информации для решения локальных задач инженерно-технического назначения.

Целью исследования является развитие методов многомерной интерполяции, обоснование вычислительных алгоритмов и разработка комплекса программных средств геометрического и компьютерного моделирования многофакторных тепломассообменных процессов.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Развитие геометрической теории обоснования вычислительных алгоритмов для интерпретации результатов натуральных экспериментов на основе математических моделей многофакторных тепломассообменных процессов.

2. Обоснование вычислительных алгоритмов геометрического моделирования дискретизированных двухфакторных тепломассообменных процессов на примере моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения.

3. Разработка алгоритмов и проведение вычислительных экспериментов по моделированию и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных котлоагрегатов (КА).

4. Разработка способа аппроксимации решения неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня с помощью геометрических интерполянтов.

5. Создание комплекса программ, реализующих вычислительные алгоритмы геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов.

6. Верификация результатов моделирования путём вычислительного эксперимента с использованием полученного комплекса программ.

Объект исследования – многофакторные тепломассообменные процессы.

Предмет исследования – вычислительные точечные алгоритмы и программные средства моделирования многофакторных тепломассообменных процессов с помощью многомерной интерполяции и аппроксимации.

Научная новизна полученных результатов:

1. Получила дальнейшее развитие геометрическая теория обоснования вычислительных алгоритмов интерпретации результатов натуральных экспериментов на основе математических моделей многофакторных тепломассообменных процессов.

2. Впервые обоснованы вычислительные алгоритмы геометрического моделирования дискретизированных двухфакторных тепломассообменных процессов и проведен вычислительный эксперимент на примере моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения с помощью многомерной интерполяции.

3. Впервые разработаны вычислительные алгоритмы и программные средства для проведения вычислительных экспериментов по моделированию и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных КА, что позволяет совершенствовать процесс их проектирования и эксплуатации.

4. Впервые предложен способ аппроксимации решения неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня с помощью геометрических интерполянтов.

Теоретическая значимость работы состоит в обосновании нового метода геометрического и компьютерного моделирования многофакторных тепломассообменных процессов, который может быть также эффективно использован для моделирования других многофакторных процессов и явлений. Отдельную теоретическую ценность составляет способ численного решения неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня путём аппроксимации геометрическими интерполянтами.

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках научно-исследовательской работы ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ» К-2-09-16 «Геометрическое и компьютерное моделирование факторов влияния на напряженно-деформированное состояние инженерных сооружений».

Практическая значимость полученных результатов заключается в

создании комплекса программ для реализации вычислительных алгоритмов моделирования многофакторных тепломассообменных процессов, в том числе:

– моделирование с помощью многомерной интерполяции параметров физического состояния теплоносителя различного технического назначения;

– моделирование 2-факторного процесса определения невязки теплового баланса, который позволяет оптимизировать конструктивные размеры конвективной части жаротрубного КА и найти оптимальное соотношение внутреннего диаметра конвективных труб и их количества с требуемым значением невязки теплового баланса;

– моделирование с помощью многомерной интерполяции тепломассообменных процессов, протекающих в жаротрубном КА, что позволяет совершенствовать процесс их проектирования с учетом конструктивных и эксплуатационных характеристик;

– апробация вычислительных алгоритмов решения неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня путём аппроксимации геометрическими интерполянтами, что создаёт предпосылки для совершенствования автоматизированной системы численного моделирования и расчета, многофакторных тепломассообменных процессов.

Практическая реализация результатов работы подтверждается справками о внедрении результатов исследований в практику проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха жилых и общественных зданий (справка о внедрении № 25 от 21.05.19 г. выдана ЧП «Гасикспецстрой») и в учебный процесс ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ» (справка № 02 от 16.04.19 г. принята к внедрению в учебный процесс при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Компьютерные технологии в науке и профессиональной деятельности» для подготовки магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» и практических занятий по дисциплине «Геометрическое моделирование многофакторных процессов и явлений» для подготовки аспирантов по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника»).

Методология и методы исследования. Предложенные в работе вычислительные алгоритмы геометрического и компьютерного моделирования многофакторных тепломассообменных процессов основываются на графических методах формообразования геометрических интерполянтов, аналитическое описание которых выполнено в рамках математического аппарата БН-исчисления, для которого точка представляется системой ее проекций на оси глобальной или локальной системы координат, что позволяет получать параллельные проекции геометрического объекта на подпространства и допускает покоординатный расчет геометрического интерполянта. Используются идеи и методы аффинной геометрии, математического анализа функции многих переменных и метод разделённых переменных для верификации результатов решения неоднородного уравнения

теплопроводности однородного стержня. Компьютерные методы расчета и визуализации полученных моделей выполнены с помощью программного пакета Maple.

Положения, выносимые на защиту:

– применение геометрической теории многомерной интерполяции позволяет исключить необходимость решения громоздких СЛАУ для выбранного интерполянта в процессе моделирования многофакторных тепломассообменных процессов;

– использование дискретизации геометрических объектов отклика, позволяет повысить точность моделирования многофакторных тепломассообменных процессов в случае большого количества экспериментальных данных;

– установлено, что способ аппроксимации решения неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня с помощью геометрических интерполянтов, позволяет получить требуемое решение на основе полиномиальных функций.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата БН-исчисления, который основан на инвариантах аффинной геометрии и позволяет моделировать мультипараметрические геометрические интерполянты непосредственно в том пространстве, в котором они находятся.

При использовании методов многомерной интерполяции и аппроксимации корректность аналитического описания моделей и вычислительных алгоритмов подтверждается большим количеством примеров и вычислительных экспериментов, выполненных в программном пакете Maple, для которых определялся коэффициент детерминации с учётом узловых и промежуточных точек интерполяции.

При решении неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня с помощью геометрических интерполянтов, выполнено сравнение результатов с решением этого же уравнения методом разделения переменных.

Полученные результаты, положения и выводы отвечают соответствующим требованиям паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), в частности: п.1 «Разработка новых математических моделей и методов компьютерного моделирования явлений, объектов, систем и процессов»; п.3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов»; п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента»; п.7 «Разработка новых

математических методов и алгоритмов интерпретации натуральных экспериментов на основе их математических моделей».

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VII Международной научно-практической Интернет-конференции КГП-2017 «Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации» (г. Пермь, 2017 г.); III Республиканской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительной-архитектурной отрасли» (г. Макеевка, 2017 г.); научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Графика. Вчера, сегодня, завтра» (г. Донецк, 2017 г.); IV крымской международной научно-практической конференции «Методология безопасности среды жизнедеятельности – 2017» (г. Симферополь 2017 г.); VIII Международной научно-практической конференции «Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики» (г. Томск, 2018 г.); IV Республиканской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительной-архитектурной отрасли» (г. Макеевка, 2018 г.); 28-й Международной конференция по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon 2018» (г. Томск, 2018 г.); V Республиканской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительной-архитектурной отрасли» (г. Макеевка, 2019 г.); X Международной научно-технической конференции (г. Донецк, 2019 г.).

Личный вклад. Основные научные результаты диссертации, которые включают вычислительные алгоритмы геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов, состоящие из моделировании параметров физического состояния теплоносителя различного технического назначения, моделирования и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных КА, решения неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня, а также комплекс проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов получены автором лично.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 11 научных изданиях: в том числе 5 – в рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в Российской Федерации и Донецкой Народной Республики; 3 – по материалам научных конференций; 3 – в других изданиях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов с выводами, заключения, списка литературы и 14 приложений. Общий объём

текста диссертации – 190 страниц, включая 35 рисунков, 8 таблиц, библиографический список из 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований. Показана научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первом разделе «Существующие способы моделирования и аналитического описания тепломассообменных процессов» выполнен анализ существующих методов моделирования многофакторных тепломассообменных процессов с помощью многомерной интерполяции и аппроксимации, который показал отсутствие единого подхода к многомерной интерполяции и аппроксимации применительно к решению широкого спектра практически ориентированных задач технической термодинамики и теплопередачи, расчёта и проектирования теплогенерирующих установок, систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Установлено, что основным недостатком методов многомерной интерполяции и аппроксимации является сложность обобщения существующих методов на многомерное пространство, для которого большое значение имеет не зрительная, а логическая наглядность, основанная на методах обобщения и аналогии.

На данный момент инструментарий многомерной интерполяции и аппроксимации включает большое количество как классических (интерполяция многочленом Лагранжа, полиномиальная рекурсивная интерполяция, рациональная интерполяция), так и инновационных методов (многомерная интерполяция и аппроксимация, основанные на теории случайных функций). Недостаток классических методов заключается в составлении и решении громоздких СЛАУ, количество уравнений которых напрямую зависит не только от вида интерполянта, но и от количества исследуемых факторов.

Кроме того широкое распространение получили методы многомерной интерполяции, основанные на использовании равномерных сеток, для которых возможным становится использование не только непрерывных, но и кусочных функций, например, многомерная сплайн-интерполяция. Причём существующие методы многомерной интерполяции на хаотических (нерегулярных) многомерных сетках предусматривают операцию перехода от хаотической сети точек к равномерной, что в значительной степени увеличивает объём вычислений. Каждому из рассмотренных методов многомерной интерполяции свойственны недостатки, которые приведены на рисунке 1.

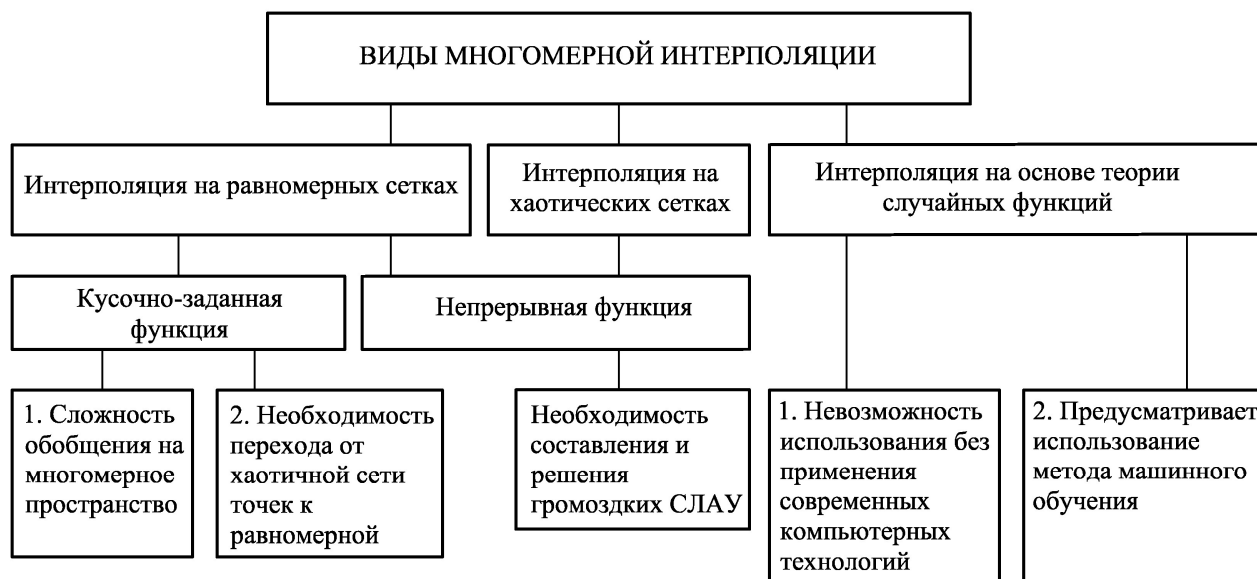


Рисунок 1 – Недостатки существующих методов многомерной интерполяции

В качестве математического аппарата для создания вычислительных алгоритмов и программных средств моделирования многофакторных теплообменных процессов выбран математический аппарат БН-исчисление, который позволяет совершенствовать существующие методы многомерной интерполяции и аппроксимации в сторону увеличения размерности пространства, и соответственно, количества взаимосвязанных факторов при создании математических методов и вычислительных алгоритмов интерпретации натуральных экспериментов на основе их математических моделей.

Второй раздел «Принципы обоснования вычислительных алгоритмов геометрического моделирования многофакторных теплообменных процессов» включает концепцию формирования дерева модели, как некоторой абстрактной геометрической схемы моделирования процесса, и аналитическое описание дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки. Под геометрическим моделированием многофакторных теплообменных процессов с помощью многомерной интерполяции следует понимать тот факт, что каждому процессу ставится в соответствие мультипараметрический геометрический интерполянт. Геометрический интерполянт – это параметризованный геометрический объект, проходящий через наперёд заданные точки, координаты которых соответствуют исходным экспериментально-статистическим данным.

Основная идея предложенного метода многомерной интерполяции заключается в том, что исследуемый массив исходных экспериментально-статистических данных разбивается пофакторно на подпроцессы (линии, для которых зафиксированы все факторы кроме одного), которые объединяются в глобальный процесс посредством образующих линий, формируя тем самым геометрические объекты отклика, аналитическое описание которых соответствует модели исследуемого многофакторного теплообменного

процесса. В соответствии с изложенной концепцией моделирования геометрической моделью 1-факторного процесса является 1-параметрическое множество точек или линия (Рисунок 2).

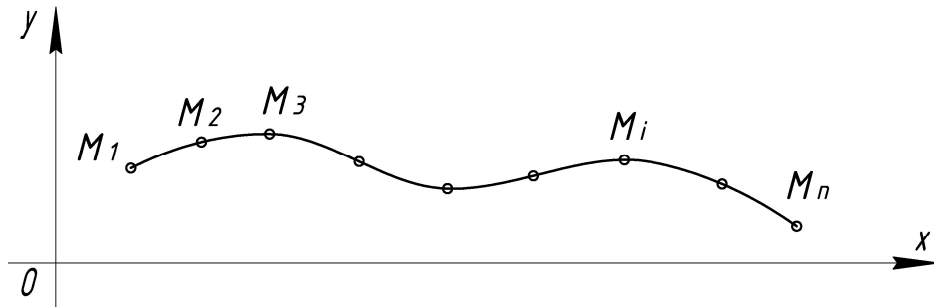


Рисунок 2 – Дерево геометрической модели 1-факторного процесса

Вычислительный алгоритм состоит из одного уравнения:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i p_i(u), \quad (1)$$

где M – текущая точка дуги кривой линии, проходящей через наперёд заданные точки;

M_i – исходные точки, через которые должна проходить дуга кривой;

$p_i(u)$ – функции от параметра u ;

u – текущий параметр, который изменяется от 0 до 1;

n – количество исходных точек дуги кривой линии, соответствующее количеству экспериментов;

i – порядковый номер исходной точки.

Геометрической моделью 2-факторного процесса является 2-параметрическое множество точек, которая представляет собой поверхность отклика 3-мерного пространства, проходящая через наперёд заданные точки (Рисунок 3).

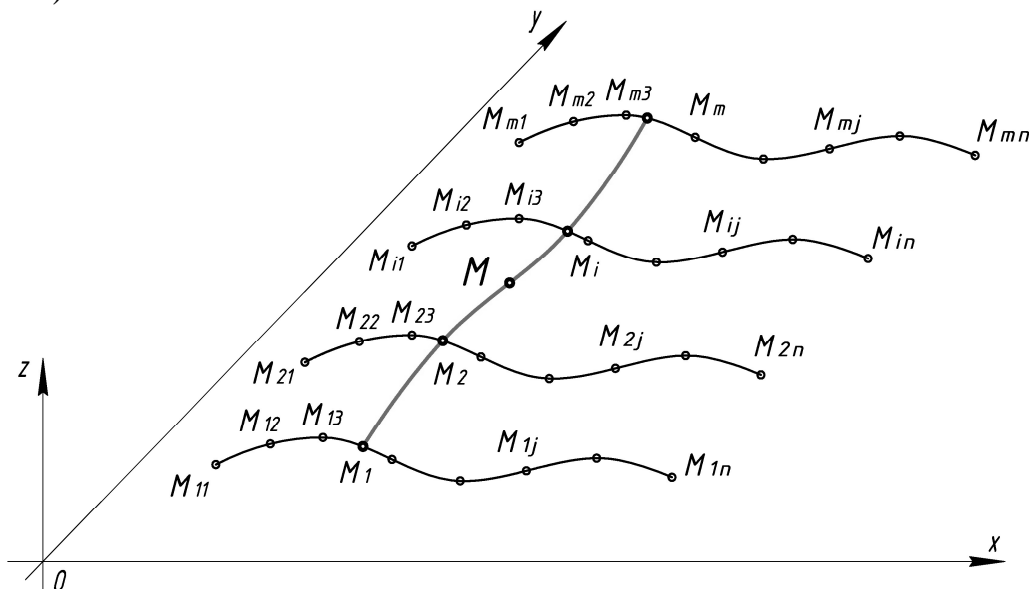


Рисунок 3 – Дерево геометрической модели 2-факторного процесса

Вычислительный алгоритм моделирования 2-факторного процесса состоит из двух этапов. Сначала необходимо определить множество 1-факторных процессов (т.е. множество опорных линий), потом объединить их в 2-факторный процесс с помощью образующей поверхности отклика:

$$\begin{cases}
 M_1 = \sum_{j=1}^n M_{1j} p_{1j}(u), \\
 \dots\dots\dots \\
 M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} p_{ij}(u), \\
 \dots\dots\dots \\
 M_m = \sum_{j=1}^n M_{mj} p_{mj}(u), \\
 M = \sum_{i=1}^m M_i q_i(v).
 \end{cases} \quad (2)$$

Обобщая, геометрическая модель 3-факторного процесса определяется 3-параметрическим множеством точек – гиперповерхностью отклика 4-мерного пространства, проходящей через наперёд заданные точки (Рисунок 4).

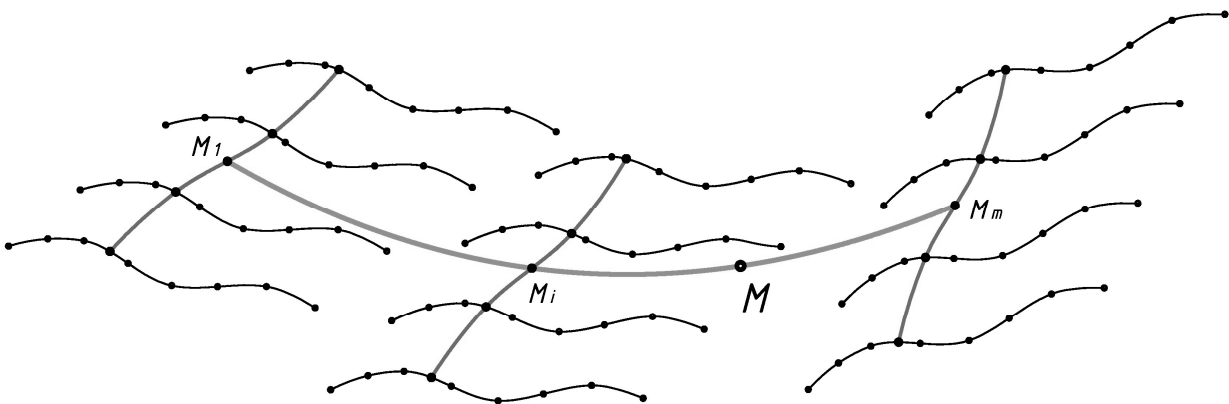


Рисунок 4 – Дерево геометрической модели 3-факторного процесса

Вычислительный алгоритм включает моделирование множества поверхностей отклика объединённых в 3-факторный процесс с помощью образующей гиперповерхности отклика:

$$\left[\begin{array}{l}
 M_{ij} = \sum_{k=1}^l M_{ijk} p_{ijk}(u), \\
 \dots\dots\dots \\
 M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} q_{ij}(v), \\
 \dots\dots\dots \\
 M = \sum_{i=1}^m M_i r_i(w).
 \end{array} \right. \quad (3)$$

Следует отметить, что точки, координаты которых соответствуют исходным экспериментально-статистическим данным, могут иметь абсолютно любое расположение в арифметическом пространстве, как структурированное, так и хаотичное, что обеспечивается использованием дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки, аналитическое описание которых получено на основе полиномов Бернштейна. Из них в работе использованы дуги алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки, 2-5 порядка, пример которых приводится ниже:

1. Дуга кривой 2-го порядка, проходящая через 3 наперед заданные точки:

$$M = M_1 \bar{u}(1 - 2u) + 4\bar{u}uM_2 + M_3 u(2u - 1).$$

2. Дуга кривой 3-го порядка, проходящая через 4 наперед заданные точки:

$$\begin{aligned}
 M = M_1 (\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + M_2 (9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\
 + M_3 (-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + M_4 (\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3).
 \end{aligned}$$

3. Дуга кривой 4-го порядка, проходящая через 5 наперед заданных точек:

$$\begin{aligned}
 M = M_1 \left(\bar{u}^4 - \frac{13}{3}\bar{u}^3u + \frac{13}{3}\bar{u}^2u^2 - \bar{u}u^3 \right) + M_2 \left(16\bar{u}^3u - \frac{64}{3}\bar{u}^2u^2 + \frac{16}{3}\bar{u}u^3 \right) + \\
 + M_3 \left(-12\bar{u}^3u + 40\bar{u}^2u^2 - 12\bar{u}u^3 \right) + M_4 \left(\frac{16}{3}\bar{u}^3u - \frac{64}{3}\bar{u}^2u^2 + 16\bar{u}u^3 \right) + \\
 + M_5 \left(-\bar{u}^3u + \frac{13}{3}\bar{u}^2u^2 - \frac{13}{3}\bar{u}u^3 + u^4 \right).
 \end{aligned}$$

В третьем разделе «Вычислительные алгоритмы геометрического моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения» представлено моделирование многофакторных процессов, связанных с физическим состоянием теплоносителя, которые являются неотъемлемой частью процесса проектирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако, учитывая сложную функциональную взаимозависимость физических величин, характеризующих физическое состояние теплоносителя, в проектной практике широкое распространение получили различного рода диаграммы и номограммы, что в значительной мере тормозит создание систем автоматизированного проектирования в

соответствующей отрасли. Для этого необходимо обеспечить возможность представления моделей физического состояния теплоносителя в виде некоторых уравнений или вычислительных алгоритмов с помощью многомерной интерполяции и аппроксимации. При этом в некоторых случаях исследуемый процесс можно представить единой моделью, которая описывается одним уравнением, а в некоторых возникает необходимость дискретизации его элементов, с учётом их взаимодействия. Тогда весь процесс, в пределах исследуемой области, разбивается на несколько стыкующихся между собой участков, каждый из которых описывается своим уравнением. Подобным образом получены геометрические модели физического состояния теплоносителя различного технического назначения (Рисунок 5).

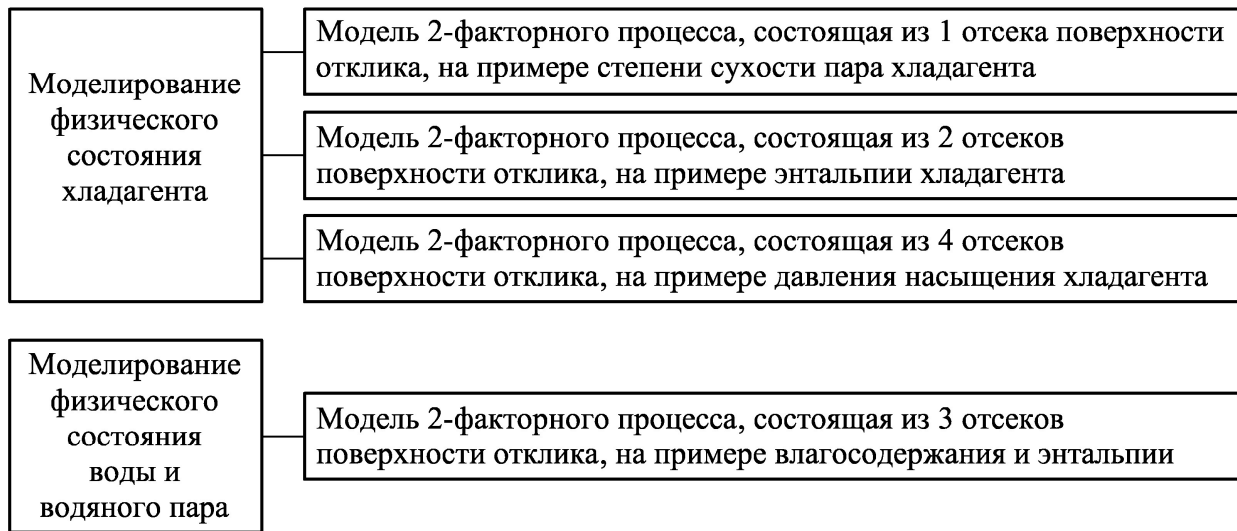


Рисунок 5 – Классификация полученных моделей по виду теплоносителя

В качестве примера рассмотрим модель 2-факторного процесса, состоящую из 4 отсеков поверхности отклика, которая описывает зависимость давления насыщения от температуры и удельного объема хладагента R407C. Исходными данными для моделирования послужила $p-h$ диаграмма хладагента, на основании которой разработана план-схема модели (Рисунок 6).

В результате анализа полученных моделей разработан принципиальный вычислительный алгоритм геометрического моделирования многофакторных процессов, состоящих из n отсеков (Рисунок 7).

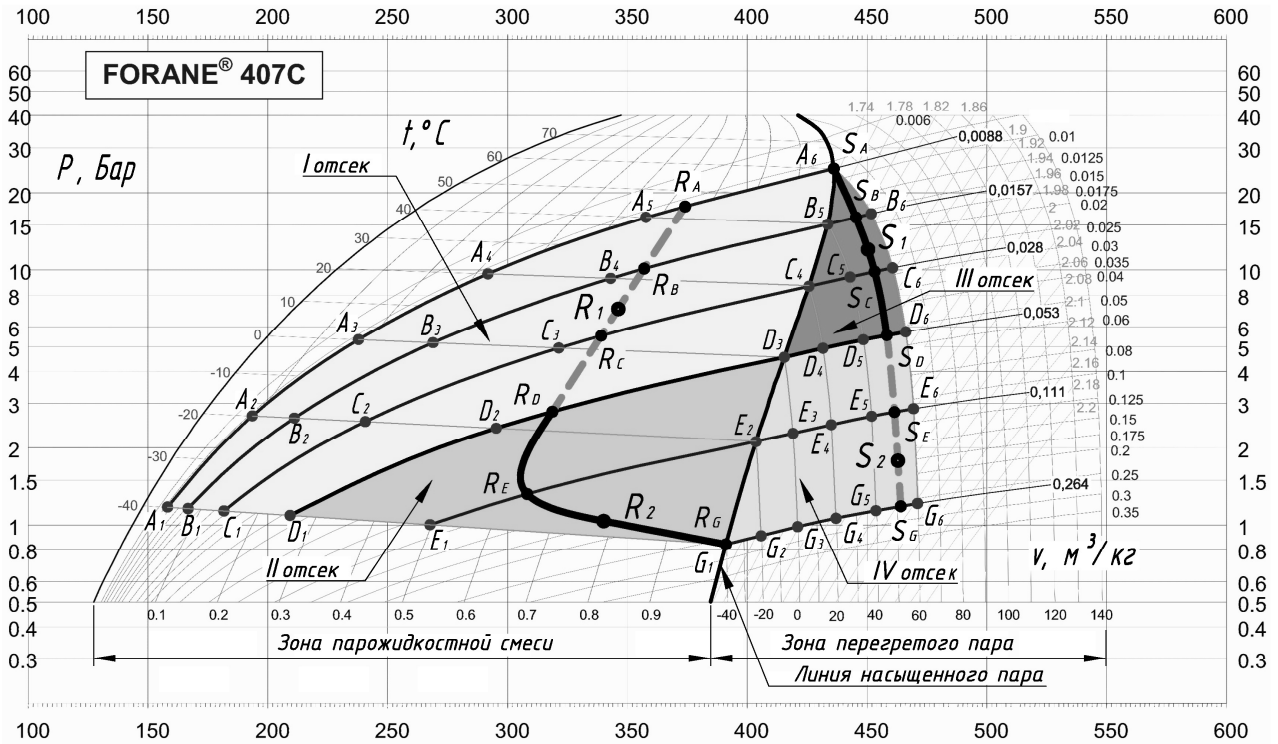


Рисунок 6 – План-схема модели 2-факторного процесса, состоящей из 4-х отсеков

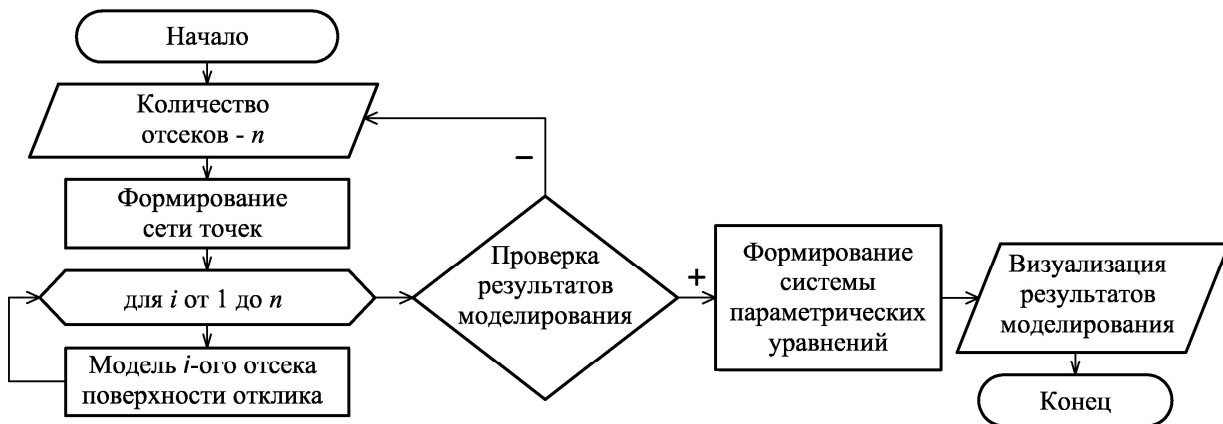


Рисунок 7 – Блок-схема вычислительного алгоритма моделирования процессов, состоящих из n отсеков

В четвертом разделе «Вычислительные алгоритмы моделирования и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных котлоагрегатов» с помощью вычислительных экспериментов исследовано влияние количества конвективных труб и их внутреннего диаметра на невязку теплового баланса ΔQ , которая должна быть в пределах 2%. На рисунке 8 представлена визуализация геометрической модели поверхности отклика.

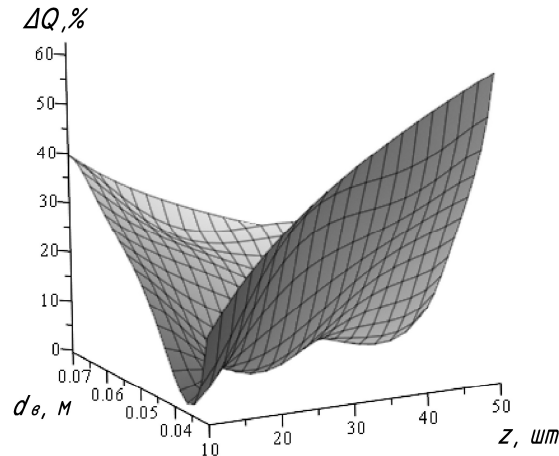


Рисунок 8 – Визуализация геометрической модели конструктивных характеристик жаротрубного КА

В результате анализа полученной модели, установлено, что в пределах исследуемой области требуемая невязка достигается 4 раза (Таблица 1). Это даёт возможность проектировщику выбрать наилучший вариант с учётом имеющихся материалов и технологий.

Таблица 1 – Анализ подбора оптимального соотношения количества конвективных труб и их внутреннего диаметра

№ п/п	z, шт	$d_{в}$, м	ΔQ , %
1	15	0,04	1,35
2	24	0,046	0,1
3	33	0,05	0,41
4	45	0,055	0,04

Разработан вычислительный алгоритм моделирования и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных КА. Получена модель 3-факторного процесса на примере зависимости теплоты от количества конвективных труб, их внутреннего диаметра и температурного напора теплоносителя. Геометрическая модель представлена в параметрическом виде, где каждой оси координат соответствуют 3 фактора (z , $d_{в}$ и Δt) и функция отклика Q . Тогда в пределах исследуемой области, получим:

$$\begin{cases} Q = f_1(u, v, w); \\ z = f_2(u, v, w); \\ d = f_3(u, v, w); \\ \Delta t = f_4(u, v, w); \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} z = \frac{u + 0,25}{0,025}; \\ d = \frac{v + 0,75}{25}; \\ \Delta t = \frac{w + 0,667}{0,033}; \end{cases} \Rightarrow Q = f(z, d, \Delta t).$$

Пятый раздел «Вычислительный алгоритм аппроксимации решения неоднородного уравнения теплопроводности с помощью геометрических интерполянтов» включает вычислительный алгоритм решения неоднородного уравнения теплопроводности в частных производных (Рисунок 9).

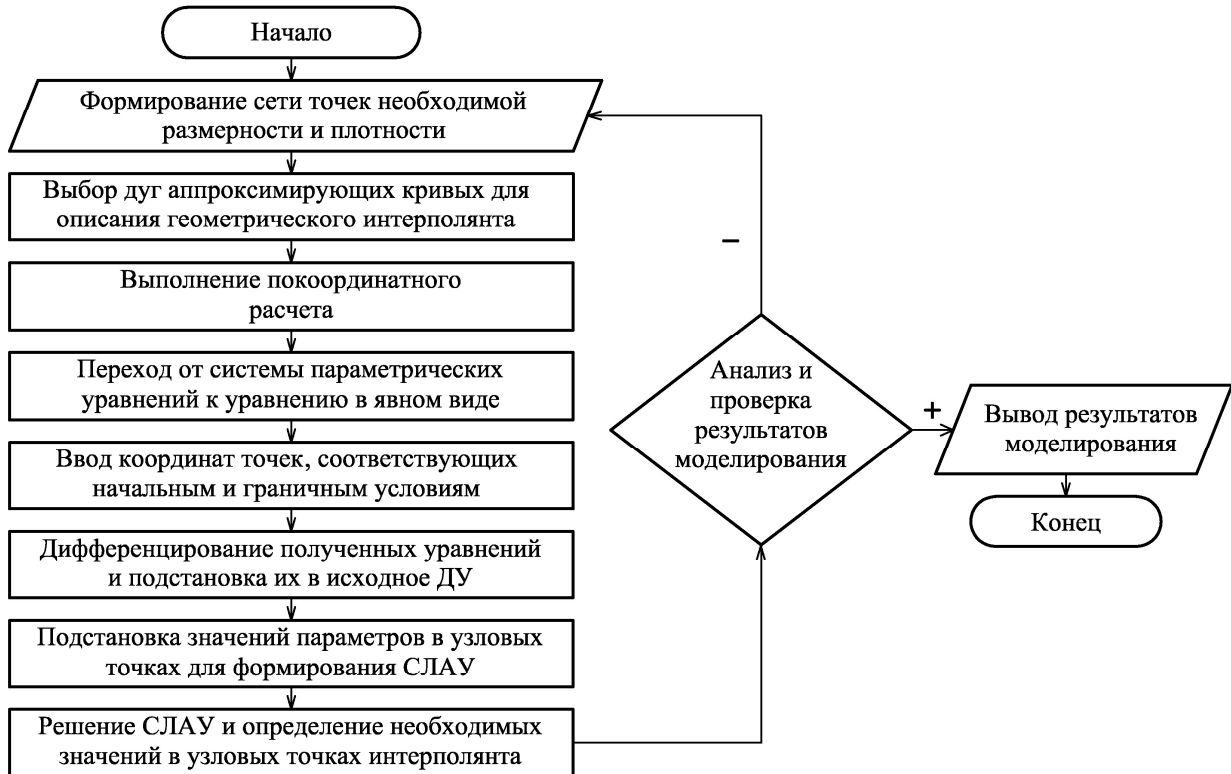


Рисунок 9 – Блок-схема вычислительного алгоритма аппроксимации решения неоднородного уравнения теплопроводности

Рассмотрим неоднородное уравнение теплопроводности, которое имеет следующий вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2x + 1,$$

$$0 < x < 1, \quad t > 0, \quad U(0, t) = 1, \quad U(1, t) = 2, \quad U(x, 0) = x + 1.$$

В данном случае $U = f(x, t)$. Следовательно, необходимо аппроксимировать решение уравнения двухпараметрическим множеством точек, которое представляет собой поверхность отклика. Выполнив приведенный выше вычислительный алгоритм и аппроксимировав решение регулярным 16-точечным отсеком поверхности, получим:

$$U = 1 + x - 0,608t^3x^3 + 1,212t^3x + 1,247t^2x^3 - 2,634t^2x - 0,785tx^3 + 1,783tx - 0,604t^3x^2 + 1,387t^2x^2 - 0,998tx^2.$$

Для сравнения результатов, решим это же уравнение методом разделения переменных:

$$U(x,t) = x + 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(6(-1)^{n+1} + 2)}{\pi n (\pi n a)^2} (1 - e^{-(\pi n a)^2 t}) \sin(\pi n x).$$

Представим результат сравнения в наглядном виде на рисунке 10, черным цветом показано эталонное решение, полученное методом разделения переменных.

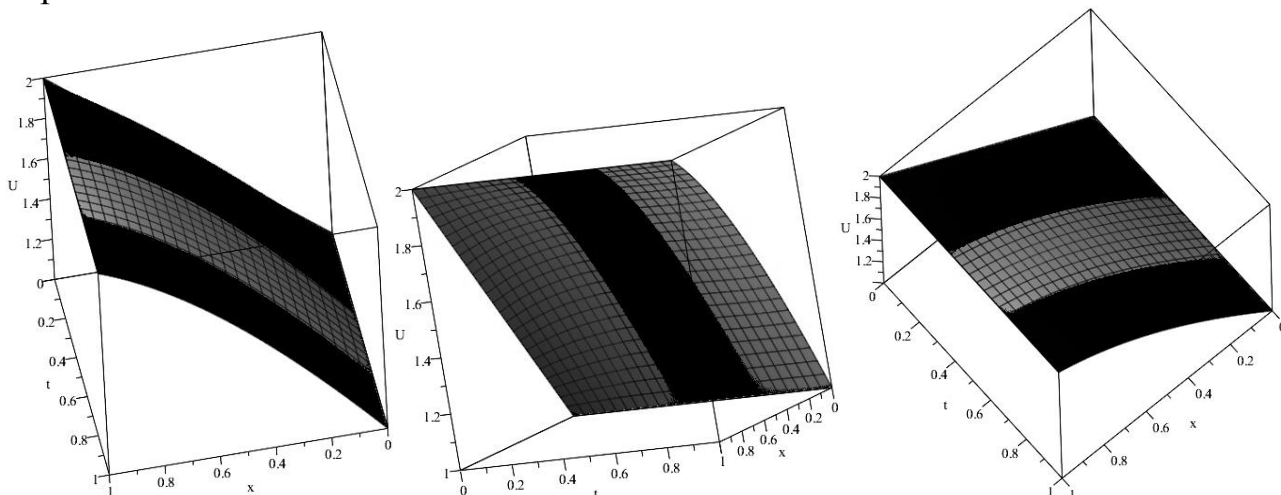


Рисунок 10 – Сравнение результатов решения неоднородного уравнения теплопроводности

Как видно из рисунка 10, с помощью 16-точечного отсека поверхности удалось достигнуть достаточно высокой степени совпадения с эталонным решением. Дальнейшее использование полученного полиномиального уравнения для инженерно-технических расчётов является более предпочтительным, по сравнению с уравнением, полученным методом разделения переменных. Следует отметить, что в случае необходимости количество узловых точек аппроксимирующей сети может быть практически любым и всегда может быть увеличено для достижения необходимой точности решения.

Получено обобщение предложенного решения неоднородного уравнения теплопроводности на многомерное пространство с использованием 3-х и 4-х параметрических гиперповерхностей отклика, для которых соответственно $U = f(x, y, t)$ и $U = f(x, y, z, t)$. Кроме того, в работе рассмотрена возможность использования предложенного метода численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрического интерполянта для моделирования физического состояния теплоносителей со сложной реологической структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой получено решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в развитии методов многомерной интерполяции и аппроксимации, обосновании вычислительных алгоритмов и разработке

комплекса программных средств геометрического и компьютерного моделирования многофакторных тепломассообменных процессов, что даёт возможность повысить эффективность решения инженерных задач технической термодинамики и теплопередачи.

Основные научные результаты и выводы, полученные при выполнении работы, состоят в следующем:

1. Проведен анализ существующих подходов моделирования многофакторных тепломассообменных процессов и выделены недостатки каждого из них, что подтверждает актуальность выбранной темы исследований и необходимость совершенствования существующих методов моделирования тепломассообменных процессов.

2. Получила дальнейшее развитие геометрическая теория обоснования вычислительных алгоритмов для интерпретации результатов натурных экспериментов на основе математических моделей многофакторных тепломассообменных процессов.

3. Обоснованы вычислительные алгоритмы геометрического моделирования дискретизированных двухфакторных тепломассообменных процессов с помощью многомерной интерполяции и аппроксимации. Выполнен вычислительный эксперимент по дискретизации отсеков поверхности отклика при моделировании параметров физического состояния хладагента. В результате установлено, что дискретизация геометрической модели даёт возможность получить более качественные результаты, если они необходимы для особо точных расчетов. Следует отметить универсальность полученных моделей, которые подразумевают, что при изменении исходных данных, вычислительный алгоритм остается без изменений.

4. Разработан вычислительный алгоритм моделирования физического состояния воды и водяного пара. Полученные аналитические взаимозависимости параметров влажного воздуха в виде точечных и параметрических уравнений, обеспечивают высокую точность инженерных расчетов при проектировании систем вентиляции и кондиционирования, процессов нагрева, охлаждения и осушки воздуха. А также позволяют быстро и максимально точно рассчитать все необходимые значения параметров физического состояния воды и водяного пара на компьютере.

5. Предложен вычислительный алгоритм моделирования зависимости невязки теплового баланса жаротрубного КА от количества конвективных труб и их внутреннего диаметра. Полученная модель позволяет оптимизировать конструктивные размеры конвективной части жаротрубного КА и найти оптимальное соотношение внутреннего диаметра конвективных труб и их количества с необходимым значением невязки теплового баланса.

6. Обоснован вычислительный алгоритм моделирования 3-факторного процесса на примере тепломассообменных процессов, протекающих в жаротрубном котлоагрегате. Разработанная модель конвективного тепломассообмена принадлежит 4-мерному пространству и аналитически

описана точечными уравнениями, которые представлены в параметрическом виде. Полученная модель дает возможность совершенствовать процесс проектирования жаротрубных КА с учетом конструктивных и эксплуатационных характеристик.

7. Предложен вычислительный алгоритм решения неоднородного уравнения теплопроводности в частных производных с помощью геометрических интерполянтов. Предложенный алгоритм легко обобщается на многомерное пространство и потому может быть использован для решения дифференциальных уравнений с большим количеством переменных по аналогии с геометрическим моделированием многофакторных тепломассообменных процессов. Проведен вычислительный эксперимент по решению неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня с помощью аппроксимирующей поверхности отклика, проходящей через 16 наперед заданных точек, подтверждающий достоверность результатов работы предложенного алгоритма. Такой подход может эффективно использоваться для численного моделирования физического состояния теплоносителей различного технического назначения, в том числе и тех, которые имеют сложную реологическую структуру.

8. Результаты исследований внедрены в практику проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха жилых и общественных зданий (справка о внедрении № 25 от 21.05.19 г. выдана ЧП «Гасикспецстрой») и в учебный процесс ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ» (справка № 02 от 16.04.19 г. принята к внедрению в учебный процесс при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Компьютерные технологии в науке и профессиональной деятельности» для подготовки магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» и практических занятий по дисциплине «Геометрическое моделирование многофакторных процессов и явлений» для подготовки аспирантов по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника»).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в Российской Федерации и Донецкой Народной Республике:

1. Воронова, О.С. Геометрическая модель взаимозависимости физических параметров хладагента R407C [Текст] / О.С. Воронова // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк: ГУ ИПИИ. – 2018. – №4 (11). – С. 52–61.

2. Воронова, О.С. Конструирование составных поверхностей отклика применительно к моделированию зависимости физических параметров

хладагента [Текст] / О. С. Воронова // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк: ГУ ИПИИ. – 2019. – №1 (12). – С. 52–63.

3. Конопацкий, Е.В. Геометрическое моделирование и оптимизация физико-механических свойств дегтеполимербетона [Текст] / Е.В. Конопацкий, А.И. Бумага, А.А. Крысько, **О.С. Воронова** // Информационные технологии в проектировании и производстве. – Москва: ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас». – 2019. – №1 (173). С. 20–24.

4. Воронова, О.С. Геометрическое моделирование параметров физического состояния воды и водяного пара [Текст] / О.С. Воронова, Е.В. Конопацкий // Вестник кибернетики. – Сургут: БУ ВО ХМАО–Югры «Сургутский государственный университет», 2019. – №1 (33). – С. 29-38.

5. Воронова, О.С. Математическое моделирование физических параметров хладагента на основе составных поверхностей отклика [Текст] / О. С. Воронова // Информатика и кибернетика – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 3(17)-2019. – С. 54-62.

– *публикации по материалам научных конференций:*

6. Геометрическое моделирование и оптимизация физико-механических свойств дегтеполимербетона [Текст] / Е.В. Конопацкий, А.И. Бумага, **О.С. Воронова**, А.А. Крысько // Программа и тезисы IV крымской международной научно-практической конференции МБСЖД-2017. – 25-29 сентября 2017 г. – Симферополь, 2017. – С. 45.

7. Воронова, О.С. Геометрическое моделирование физических параметров влажного воздуха [Текст] / О.С. Воронова, Е.В. Конопацкий // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: материалы VIII Международной научно-практической конференции, 13–15 марта 2018 г.: в 2 ч. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2018. – Ч.1. – С. 318-322.

8. Воронова, О.С. Геометрическое моделирование и оптимизация конструктивных характеристик котлоагрегата [Текст] / О.С. Воронова // Труды 28-й Международной конференция по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon 2018». – Томск: ТПУ, 2018. – С. 354-357.

– *публикации в других изданиях:*

9. Конопацкий, Е.В. Геометрическая модель процесса распределения прочностных характеристик в бетонной колонне [Текст] / Е.В. Конопацкий, **О.С. Воронова** // Прикладная математика и вопросы управления. – Пермь: ПНИПУ, 2017. – №1 – С. 37-44.

10. Воронова, О.С. Теоретические основы геометрического моделирования конвективного теплообмена [Текст] / О.С. Воронова // Инженерные системы и техногенная безопасность: Вестник ДонНАСА. – Макеевка: ДонНАСА, 2017. – Вып. 2017-5(127). – С. 26-32.

11. Конопацкий, Е.В. Теоретические основы геометрического моделирования тепломассообменных процессов [Текст] / Е.В. Конопацкий,

О.С. Воронова // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КФУ им. В.И. Вернадского, 2018. – № 12(64) – 2018. – С. 133-143.

АННОТАЦИЯ

Воронова Ольга Сергеевна. Вычислительные алгоритмы и программные средства геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2020 г.

Диссертация посвящена развитию методов многомерной интерполяции и аппроксимации при разработке вычислительных алгоритмов и программных средств геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов.

Ядром работы служит геометрическая теория многомерной интерполяции и аппроксимации, на основе которых разработан специальный комплекс программ, обеспечивающий новое решение инженерных задач технической термодинамики и теплопередачи. Решение данных задач реализовано с помощью вычислительных алгоритмов и программных средств, которые составляют комплекс программ моделирования многофакторных тепломассообменных процессов с применением вычислительных возможностей современной компьютерной техники. Геометрическое моделирование многофакторных тепломассообменных процессов включает определение физического состояния теплоносителя различного технического назначения, оптимизацию конструктивных размеров конвективной части жаротрубного котлоагрегата, совершенствование процесса проектирования жаротрубных котлоагрегатов с учетом конструктивных и эксплуатационных характеристик, решение неоднородных уравнений теплопроводности в частных производных.

Результаты исследований внедрены в практику проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха жилых и общественных зданий, а также в учебный процесс ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ».

Ключевые слова: вычислительные алгоритмы, геометрическое моделирование, многофакторные тепломассообменные процессы, поверхность отклика, многомерная интерполяция, многомерная аппроксимация.

ANNOTATION

Voronova Olga Sergeevna. Computational Algorithms and Software for Geometric Modeling the Multifactor Heat and Mass Transfer Processes – a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.18 – Mathematical modeling, numerical methods and software complexes

(technical science) – STATE HIGHER EDUCATION ESTABLISHMENT «DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY», Donetsk, 2020.

This thesis is devoted to the development of multidimensional interpolation and approximation methods in the development of computational algorithms and software for geometric modeling the multifactor heat and mass transfer processes.

The core of the work is the geometric theory multidimensional interpolation and approximation, on the basis of which a special set of programs has been developed that provides a new solution to engineering problems of technical thermodynamics and heat transfer. The solution of these problems is realized using computational algorithms and software, that constitute a complex programs for modeling multifactor heat and mass transfer processes using the computational capabilities of modern computer technology. Geometric modeling the multifactor heat and mass transfer processes includes determining the physical state of the coolant for various technical purposes, optimization design dimensions of the convective part the fire-tube boiler, improving the design process of fire-tube boilers taking into account structural and operational characteristics, solving inhomogeneous partial differential heat equations.

Keywords: computational algorithms, geometric modeling, multifactor heat and mass transfer processes, response surface, multidimensional interpolation, multidimensional approximation.