

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Вороновой Ольги Сергеевны на тему: «Вычислительные алгоритмы и программные средства геометрического моделирования многофакторных теплообменных процессов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

### Актуальность выбранной темы

Исследования, проведенные соискателем, посвящены развитию методов многомерной интерполяции и аппроксимации применительно к моделированию многофакторных теплообменных процессов. Многомерная интерполяция не является чем-то новым, но очень важным инструментом математического моделирования, обработки, анализа и оптимизации экспериментально-статистических данных. Кроме того, важность многомерной интерполяции подчёркивается применительно к использованию для расчетов сложных структур с получением многомерных таблиц практически любой размерности в вычислительной химии, физике и технике, примерами которых могут служить таблицы физического состояния воды и водяного пара, различных хладагентов и т.п. С появлением современных вычислительных машин, способных оперировать большими объёмами информации, использование таких таблиц, а вместе с ними и многомерной интерполяции, вышла на качественно новый уровень. Вместе с тем возникла потребность в разработке эффективных и высокоскоростных методов многомерной интерполяции, способных оперировать огромным количеством экспериментально-статистических данных. Применение же многомерной интерполяции для численного решения уравнений математической физики, к которым относится и неоднородное уравнение

теплопроводности, позволяет расширить возможности их практического использования, что является особенно актуальным для проведения численных экспериментов над теплоносителями со сложной реологической структурой.

### **Обоснованность научных положений, выводы и рекомендации**

Представленная к защите диссертация состоит из введения, пяти разделов с выводами, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём работы составляет 190 страниц печатного текста, включая: 35 рисунков, 8 таблиц, библиографический список из 130 наименований и 14 приложений.

Во введении автором обоснована актуальность задачи совершенствования методов многомерной интерполяции и аппроксимации для моделирования многофакторных тепломассообменных процессов. Сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, методы исследования, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертационной работы проведен анализ существующих методов моделирования многофакторных тепломассообменных процессов с помощью многомерной интерполяции и аппроксимации. Исследованы существующие подходы моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения. Выполнен анализ существующих подходов к решению задач моделирования и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных котлоагрегатов. Предложена классификация существующих подходов к моделированию тепломассообменных процессов жаротрубных котлоагрегатов, а также выявлены недостатки каждого из них, которые подтверждают необходимость проведения дальнейших научных исследований в данном направлении.

Во втором разделе разработаны принципы определения геометрических интерполянтов, которые используются для разработки вычислительных алгоритмов геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов и программных средств на их основе. Представлен вычислительный алгоритм моделирования дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки, и компьютерная программа, которая позволяет автоматизировать процесс моделирования дуг таких алгебраических кривых. Получен принципиальный вычислительный алгоритм геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов, который позволяет получить аналитические зависимости в виде последовательности точечных уравнений, которые, в перспективе, сводятся к параметрическим.

В третьем разделе разработаны вычислительные алгоритмы геометрического моделирования параметров физического состояния теплоносителей различного технического назначения. А именно:

- модель 2-факторного процесса, состоящая из 1-го отсека поверхности отклика, на примере степени сухости пара хладагента;
- модель 2-факторного процесса, состоящая из 2-х отсеков поверхности отклика, на примере энтальпии хладагента;
- модель 2-факторного процесса, состоящая из 3-х отсеков поверхности отклика, на примере физического состояния воды и водяного пара;
- модель 2-факторного процесса, состоящая из 4-х отсеков поверхности отклика, на примере давления насыщения хладагента.

Кроме того, на примере двухфакторных моделей, обоснована необходимость дискретизации многофакторных тепломассообменных процессов, проведен анализ полученных результатов моделирования и предложен вычислительный алгоритм геометрического моделирования

дискретизированных тепломассообменных процессов с помощью многомерной интерполяции.

**В четвертом разделе** разработан вычислительный алгоритм моделирования зависимости невязки теплового баланса жаротрубного котлоагрегата от количества конвективных труб и их внутреннего диаметра. С помощью полученной модели выполнена оптимизация конструктивных размеров конвективной части жаротрубных котлоагрегатов, которая заключается в определении оптимального соотношения внутреннего диаметра конвективных труб и их количества с необходимым значением невязки теплового баланса котлоагрегата.

Разработан вычислительный алгоритм моделирования 3-факторного процесса на примере тепломассообменных процессов, протекающих в жаротрубном котлоагрегате. В результате получена модель конвективного тепломассообмена в виде 3-параметрической гиперповерхности отклика, принадлежащей 4-мерному пространству.

**В пятом разделе** разработан вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений математической физики с помощью геометрических моделей многофакторных тепломассообменных процессов. Выполнен вычислительный эксперимент по решению неоднородного уравнения теплопроводности однородного стержня с помощью 16-точечного геометрического интерполянта, подтверждающий достоверность результатов предложенного вычислительного алгоритма.

Выполнено обобщение разработанного метода численного решения дифференциального уравнения теплопроводности на многомерное пространство, что может иметь широкое применение для численного моделирования физического состояния теплоносителей различного технического назначения, включая теплоносители со сложной реологической структурой.

**В приложениях** приведены документы об апробации и внедрении результатов исследования, описан программный код разработанного комплекса и приведен анализ результатов моделирования.

На основании всего вышеизложенного, можно считать, что в рассмотренных разделах диссертации дано обоснование основных научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации.

#### **Достоверность научных положений и выводов**

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректным использованием методов исследований и подтверждается результатами проведенной экспериментальной проверки и эксплуатации разработанных и внедрённых результатов диссертации в различных организациях, а также результатами практического внедрения и использования.

Все научные результаты являются в достаточной мере обоснованными, достоверными и соответствуют пунктам областей исследований, определённым паспортом специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) и заявленным в автореферате и тексте диссертации.

#### **Научная новизна работы**

Сущность предложенного автором решения актуальной научной задачи моделирования многофакторных тепломассообменных процессов относится к теории многомерной интерполяции и аппроксимации. При этом наиболее важными результатами диссертационных исследований, обладающих **научной новизной**, являются:

– Развитие геометрической теории разработки вычислительных алгоритмов интерпретации результатов натуральных экспериментов на основе математических моделей многофакторных тепломассообменных процессов.

– Разработка вычислительных алгоритмов геометрического моделирования дискретизированных двухфакторных тепломассообменных процессов и проведение вычислительных экспериментов на примере моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения с помощью многомерной интерполяции.

– Разработка вычислительных алгоритмов и программных средств для проведения вычислительных экспериментов по моделированию и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубных котлоагрегатов, что позволяет совершенствовать процесс их проектирования и эксплуатации.

– Разработка вычислительных алгоритмов аппроксимации решения неоднородного уравнения теплопроводности для лапласианов различной размерности с помощью геометрических интерполянтов.

### **Практическая значимость полученных результатов**

**Практическое значение** 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 котлоагрегата 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

котлоагрегате, 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.

Кроме того, практическая ценность исследований подтверждается внедрением 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»). Справки представлены в приложении диссертации.

#### **Замечания по работе:**

1. В тексте автореферата при пояснении величин, входящих в соотношение (1) для 1-факторного процесса, следовало бы указать какие из этих величин зависят от переменной  $x$ , как это сделано в тексте диссертационной работы. Это же относится и к соответствующим соотношениям для 2-факторного и 3-факторного процессов.

2. В тексте работе следовало бы дать более четкие рекомендации по выбору количества и взаимного положения экспериментальных точек для моделирования физического состояния теплоносителя различного технического назначения. От этого в некоторой степени зависит количество дискретизирующих отсеков поверхности отклика.

3. При описании процесса оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик жаротрубного котлоагрегата желательно более четко выделить целевую функцию и параметры оптимизации в силу их представления в параметрической форме.

4. Было бы желательно осуществить проверку адекватности, полученных в разделах 3 и 4 моделей, не только с использованием данных натурального эксперимента, но и путём сравнения с другими моделями. Научная значимость работы от того несомненно увеличилась.

5. Следовало бы привести более подробную информацию об оценке эффективности (в том числе и экономической) предложенных в работе вычислительных алгоритмов моделирования многофакторных тепломассообменных процессов.

Приведенные выше замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не нарушают целостность научного исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированы в диссертационной работе достаточно четко и убедительно, текст автореферата адекватно отражает основные положения работы, используемые методы и подходы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Вороновой О.С. является законченной научно-исследовательской работой, в которой получено решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в развитии методов многомерной интерполяции и аппроксимации, разработки 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.

Согласно вышеизложенному, считаю, что диссертационная работа «Вычислительные алгоритмы и программные средства геометрического моделирования многофакторных тепломассообменных процессов», соответствует научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), полностью отвечает требованиям п.2.2 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Воронова Ольга Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

**Официальный оппонент:**

Д-р физ.-мат. наук, доцент,  
профессор кафедры уравнений в  
частных производных и теории  
вероятностей ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
университет»



(подпись)

В.В. Провоторов

Адрес: 394018, Россия, Воронежская область, г. Воронеж,  
Университетская площадь, д. 1, тел.: +7 (473) 220-75-21, факс: +7 (473)  
220-87-55, e-mail: wwprov@mail.ru

Я, Вячеслав Васильевич Провоторов,  
даю согласие на автоматизированную  
обработку моих персональных данных



(подпись)

В.В. Провоторов

Подпись д-ра физ.-мат. наук, доцента  
В.В. Провоторова удостоверяю:  
Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
университет»



(подпись)

О.И. Зверева