



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИВМ РАН

Академик РАН

Тыртышников Е.Е.

« 05 » октября 2020г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Холодова Ярослава Александровича «Разработка сетевых вычислительных моделей для исследования нелинейных волновых процессов на графах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### Актуальность темы диссертации

Диссертация посвящена разработке подхода к построению численных моделей процессов на графах, описываемых уравнениями в частных производных гиперболического типа на ребрах графов с краевыми условиями в узлах графов. Подход включает различные численные методы и математические алгоритмы, в том числе алгоритм построения систем уравнений в узлах графа, обеспечивающий непрерывную связь моделируемых величин вдоль всего графа. Новизна работы заключается в том, что в ней проблема задания корректных краевых условий решается по всему многосвязному графу со всеми его узлами и ребрами, вдоль каждого из которых используется своя одномерная система уравнений. При этом сам узел, как правило, имеет сложную структуру, обладает собственной двумерной или трехмерной системой уравнений. Задача корректного сопряжения краевых условий для систем уравнений различной размерности внутри и снаружи узла является актуальной, поскольку понижение размерности моделируемой задачи приводит к уменьшению вычислительных операций и упрощению численных алгоритмов, используемых при её решении.

### Краткий анализ содержания работы

Структура диссертации включает введение, пять глав, заключение и список литературы.

Во введении дается общая характеристика выполненной работы, обосновывается актуальность темы исследований, дается краткий обзор работ других авторов по выбранной теме, определяются цели и задачи диссертации, формулируются положения, выносимые автором на защиту, и перечисляются публикации, сделанные по теме работы. В первой главе сформулирован общий подход к численному решению задач, описываемых нелинейными уравнениями в частных производных гиперболического типа на графах. Во второй главе на основе характеристического критерия монотонности разработан универсальный алгоритм построения монотонных схем высокого порядка аппроксимации

на основе их анализа в пространстве неопределённых коэффициентов. Приводятся результаты тестирования построенных разностных схем высокого порядка аппроксимации для нелинейных систем уравнений гиперболического типа в различных модельных постановках. В третьей главе предложена модель движения трафика в городской транспортной сети. При решении данной задачи использовался макроскопический подход, при котором транспортный поток описывается нелинейной системой гиперболических уравнений второго порядка. Полученные автором результаты показали, что разработанная в рамках предложенного подхода оригинальная макроскопическая модель хорошо воспроизводит реальную ситуацию на различных участках городских транспортных сетей, а также может быть использована для выбора оптимальной стратегии организации движения трафика в городе. В четвертой главе предложена новая модель интенсивных потоков данных в компьютерных сетях. Потоки данных в пакетной сети передачи данных представляются в виде несмешивающихся потоков сплошной среды. При сравнении с системой имитационного моделирования сети NS-2 разработанная потоковая модель демонстрирует значительную экономию вычислительных ресурсов, обеспечивая при этом хорошую степень подобия как пиковых, так и усредненных характеристик, и позволяет моделировать поведение сложных глобально распределенных IP – сетей передачи данных. Пятая глава диссертации посвящена моделированию распространения газовых примесей в вентиляционных сетях. Разработана оригинальная вычислительная математическая модель распространения мелкодисперсных или газовых примесей в вентиляционных сетях с использованием уравнений газовой динамики путем численного сопряжения областей разной размерности, что уменьшает вычислительную сложность расчетов. Проведенные расчеты показали, что модель с хорошей точностью позволяет определять распределение газодинамических параметров в трубопроводной сети и решать задачи динамического управления вентиляцией. В заключении диссертации в кратком виде сформулированы основные результаты работы. Завершается диссертация списком литературы.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность результатов диссертации и выносимых на защиту положений обеспечивается следующим. При разработке математических моделей и методов автор применяет обоснованные теоретические выводы, строгий математический аппарат и тщательную верификацию. Верификация проводится путем сопоставления результатов расчетов с известными аналитическими и эталонными решениями тестовых задач, с расчетами других авторов, а также с экспериментальными данными. Результаты работы представлены в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, в том числе в международные системы научного цитирования WOS и Scopus, а также доложены на международных научных конференциях.

### **Оценка новизны, научной и практической значимости проведенных исследований**

Новыми научными результатами являются следующие:

Предложен подход к построению численных моделей процессов на графах, описываемых уравнениями в частных производных гиперболического типа на ребрах графов с краевыми условиями в узлах графов. В рамках подхода проблема задания корректных краевых условий решается по всему многосвязному графу со всеми его узлами и ребрами. Для численного решения нелинейных гиперболических уравнений предложен оригинальный алгоритм построения монотонных схем высокого порядка аппроксимации на основе их

анализа в пространстве неопределённых коэффициентов. В качестве исследуемых приложений для применения данного подхода были выбраны три различные по своей физической постановке задачи, каждая из которых имеет большую практическую значимость.

Первая – моделирование дорожного движения (трафика) в городской транспортной сети. Проведенные расчеты и полученные результаты показали, что разработанная в рамках предложенного подхода оригинальная модель хорошо воспроизводит реальную ситуацию на различных участках городских транспортных сетей, а также может быть использована для построения краткосрочных прогнозов в городских центрах организации дорожного движения с целью выбора оптимальной стратегии управления трафиком в городе, например Центром организации дорожного движения Правительства Москвы или Автоматизированной системой управления дорожным движением г. Казани.

Вторая – моделирование интенсивных потоков данных в компьютерных сетях. Предложенная модель оказалась гораздо более эффективна в вычислительном плане, чем система имитационного моделирования сети NS-2.

Третья – моделирование распространения газовых примесей в вентиляционных сетях. Проведенные расчеты показали, что модель с хорошей точностью позволяет определять распределение газодинамических параметров в трубопроводной сети и решать задачи динамического управления вентиляцией сети выработок угольной шахты с целью нормализации концентрации метана в ней, возникающих в работах института угля СО РАН.

#### **Полнота опубликования и апробация результатов исследования**

Результаты диссертации достаточно хорошо представлены в высокорейтинговых научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов докторских диссертаций, в том числе входящих в реферативные базы WoS и Scopus. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских научных конференциях. Автором было получено четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, необходимых для численного решения прикладных научных задач, представленных в работе.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. Ряд выражений, используемых в диссертации, включая ключевые положения, являются жаргонизмами. Например, используется «модель решения краевых задач» вместо «подход к решению краевых задач», «моделирование уравнений» вместо «решение уравнений».
2. Не указан личный вклад во все 30 совместных публикаций. Только одна публикация из авторского списка имеет одного автора, и к ней вопроса о личном вкладе не возникает.
3. Монотонные схемы второго порядка аппроксимации и схемы третьего порядка аппроксимации рассматриваются на ребрах графа, однако в узлах графа вопрос построения аппроксимаций повышенного порядка не рассматривается. В частности, это касается условий совместности.
4. Использование схемы повышенного порядка аппроксимации имеет смысл для поиска гладких решений. Известно ли что-нибудь о гладкости решений систем уравнений гиперболического типа на графах в окрестности узлов графов?

## Заключение

В целом, диссертационная работа Холодова Я.А. представляется законченным научным исследованием на актуальную тему. Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Основные результаты работы и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация показывает, что автор имеет высокую математическую культуру и может самостоятельно проводить полномасштабное научное исследование от анализа проблемы и постановки математических задач до разработки численных методов их решения, построения алгоритмов, реализации их в виде программ, проведения объемного вычислительного эксперимента, сопоставления результатов расчета с эмпирическими данными. Анализ диссертации, автореферата и публикаций автора, соответствующих основному содержанию диссертации, позволяет сделать вывод, что в работе Холодова Я.А. создан хороший научный задел по направлению «Решение сетевых вычислительных моделей для исследования нелинейных волновых процессов на графах». Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как серьезное научное и практическое достижение в области математического моделирования. Работа отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Холодов Ярослав Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре «Вычислительная математика и приложения» ИВМ РАН, протокол № 1 от 5 октября 2020 г.

Подпись:  /Богатырев А.Б./  
Секретарь семинара, Д.ф.-м.н., В.н.с. ИВМ РАН, Проф. РАН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

Адрес: 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Губкина, 8.

E-mail: [director@inm.ras.ru](mailto:director@inm.ras.ru)

Тел.: +7 495 984-81-20

Веб-сайт: <http://www.inm.ras.ru>

Подпись Богатырева А.Б.  Заверяю,  
Ученый секретарь ИВМ РАН



Шутяев В.П.