

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.04

**Соискатель:** Морозов Александр Юрьевич

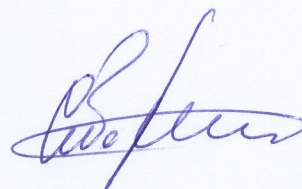
**Тема диссертации:** Алгоритмы адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами

**Специальность:** 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Решение диссертационного совета по результатам защиты:** На заседании 29 марта 2019 года (протокол № 71) диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Морозова А. Ю. «Алгоритмы адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Морозову Александру Юрьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Присутствовали:** Наумов А. В. – *председатель*, Северина Н. С. – *ученый секретарь*, а также члены диссертационного совета: Бардин Б. С., Борисов А. В., Бортаковский А. С., Босов А. В., Грумондз В. Т., Денисова И. П., Кан Ю. С., Колесник С. А., Короткова Т. И., Котельников М. В., Красинский А. Я., Кузнецов Е. Б., Кузнецова Е. Л., Кулагин Н. Е., Куравский Л. С., Липатов И. И., Пантелеев А. В., Ревизников Д. Л., Семенихин К. В., Формалев В. Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.04, к.ф.-м.н., доцент



И.о. начальника отдела  
Т.А. Аникина



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.04,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 29.03.2019 № 71

О присуждении Морозову Александру Юрьевичу, гражданину РФ,  
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Алгоритмы адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами» по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 20 декабря 2018 года (протокол заседания № 70), диссертационным советом Д 212.125.04, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство науки и высшего образования РФ, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, приказы: о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012, об изменении состава диссертационного совета № 628/нк от 07.10.2013, № 574/нк от 15.10.2014, № 1339/нк от 29.10.2015, № 710/нк от 21.06.2016, № 1403/нк от 01.11.2016, № 1017/нк от 20.10.2017.

Соискатель Морозов Александр Юрьевич, 1991 года рождения, в 2015 году окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" по специальности «Прикладная математика и информатика», в 2018 году окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», с

2017 года по настоящее время работает инженером-программистом в АО «ИнфоРус» и с 2018 года по настоящее время работает по совместительству инженером в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете), Министерства науки и высшего образования РФ.

Диссертация выполнена на кафедре № 806 «Вычислительная математика и программирование» факультета «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Министерства науки и высшего образования РФ.

**Научный руководитель** — доктор физико-математических наук, Ревизников Дмитрий Леонидович, профессор кафедры № 806 «Вычислительная математика и программирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Официальные оппоненты:**

1. Мартыненко Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, научный сотрудник отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология» ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».
2. Рогалев Алексей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «Вычислительной математики» Института вычислительного моделирования СО РАН.

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Мухиным Сергеем Ивановичем, доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры «Вычислительные методы» факультета «Вычислительная математика и кибернетика», указала, что диссертационная работа Морозова А. Ю. представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в ней содержится новый подход к моделированию динамических систем с интервальными параметрами. Автореферат соответствует содержанию текста диссертации. Диссертационная работа

удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор, Морозов Александр Юрьевич, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Соискатель имеет 24 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 15 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы и зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Содержание данных работ в полной мере отражает содержание диссертационной работы, в которой отсутствуют некорректные и недостоверные ссылки. Все основные результаты, которые опубликованы в соавторстве, получены лично Морозовым А. Ю.

**Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:**

1. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Модификация методов решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными параметрами // Труды МАИ. 2016. № 89. С. 1–20.
2. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для численного интегрирования систем ОДУ с интервальными начальными условиями // Дифференциальные уравнения. 2018. Т. 54. № 7. С. 963–974. (WoS, Scopus)
3. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л., Гидаспов В. Ю. Алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для решения задач химической кинетики с интервальными параметрами // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 12. С. 129–144. (Scopus)

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:**

1. **Отзыв официального оппонента, д. ф.-м. н. Мартыненко Сергея Ивановича на диссертацию.**

Отзыв положительный. Замечания по диссертационной работе:

- 1) На стр. 14 сказано, что «эффект обертывания, который возникает при использовании интервальных методов, является следствием из основной теоремы», и приведен соответствующий иллюстративный пример (1.2). Из текста непонятно, является ли эффект обертывания «следствием из основной

теоремы» или свойством самой задачи? В самом деле, давно известно, что итерационный метод вида  $x^{(k+1)} = Ax^{(k)}$  будет сходиться к неподвижной точке  $x = Ax$  с произвольно выбранного начального приближения  $x^{(0)}$  тогда и только тогда, когда собственные значения матрицы перехода  $A$  по модулю меньше единицы. В рассмотренном примере 1.2 одно из собственных значений больше единицы. Как влияет спектр матрицы перехода на эффект обертывания?

2) На стр. 17:

Обозначим через  $y_k = y(y_0, t_k)$  решение системы (1.3) в момент  $t_k$ . Над пространством, образованным интервальными начальными условиями, построим равномерную регулярную интерполяционную сетку  $G_k^0$ , соответствующую корневой вершине дерева и представляющую собой табличную функцию:

а) Справедливо ли утверждение, что интервальные начальные условия образуют функциональное пространство? Если да, то какое?

б) Что такое интерполяционная сетка?

в) Чем обусловлен выбор типа и порядка интерполяционного полинома?

3) Классическая оценка погрешности интерполяции включает в себя старшие производные интерполируемой функции, поэтому непонятно их отсутствие в оценке (1.5).

4) Раздел 1.6 озаглавлен «Построение интервальной оценки решения», однако сама интервальная оценка решения не приведена.

5) В доказательстве Утверждения 1 использована кусочно-полиномиальная интерполяция. Из текста неясно, должны ли быть интерполяционные полиномы согласованы между собой или на границах областей? Какова должна быть гладкость составной интерполяционной функции? Не вполне ясно, как перекликается Утверждение 1 и теорема Вейерштрасса о равномерном приближении непрерывной на отрезке функции многочленами.

6) Стр. 66: Выводы к главе 2. Утверждение: «В целом при проведении расчетов даже с использованием не самой современной видеокарты получено ускорение вычислений практически на два порядка по сравнению с вычислениями на центральном процессоре» — не вполне корректно. Параллельные алгоритмы характеризуют традиционными мерами параллелизма: ускорением и эффективностью. Поэтому результаты вычислительных экспериментов лучше представить в традиционном виде: количество независимых вычислителей ( $p$ ), ускорение параллельного алгоритма ( $S$ ) и его эффективность ( $E$ ). Практический интерес также представляет зависимость ускорения и эффективности от количества независимых вычислителей и размерности задачи.

## **2. Отзыв официального оппонента, к. ф.-м. н. Рогалева Алексея Николаевича на диссертацию.**

Отзыв положительный. Замечания по диссертационной работе:

- 1) В первой главе, при описании алгоритма адаптивной интерполяции, отсутствуют рекомендации по выбору шага дискретизации, через который выполняется перестроение дерева.
- 2) В третьей главе, в третьем разделе, при сравнении разработанного алгоритма и его реализации с существующими программными средствами, для системы ОДУ (3.3) не была применена библиотека RiOT, в отличие от систем (3.1) и (3.2). Также стоит отметить, что для некоторых приведенных примеров достаточно рассмотреть только границу множества решений.
- 3) В четвертой главе не для всех задач указаны параметры, при которых выполнялись расчеты.

## **3. Отзыв ведущей организации на диссертацию.**

Ведущая организация дала положительный отзыв на диссертацию. Замечания по диссертации:

- 1) На стр. 85 в системе ОДУ (4.1) допущена опечатка в уравнении  $y' = (\lambda - x^2)y + x$ : вместо знака плюс должен быть знак минус —  $y' = (\lambda - x^2)y - x$ .
- 2) В главах 1 и 4 целесообразно было бы учесть стохастические характеристики в распределении параметров на интервалах. Данное замечание является скорее пожеланием.
- 3) Во второй главе, посвященной распараллеливанию алгоритма, следовало бы исследовать проблему масштабирования.
- 4) В четвертой главе, при решении задач химической кинетики и газовой динамики, не везде обоснованы значения неопределенностей, которые были добавлены в кинетические механизмы.

## **4. Отзыв ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» на автореферат.**

Отзыв подписан доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией фундаментальных исследований Санкт-

Петербургского государственного университета гражданской авиации Исаевым Сергеем Александровичем. Отзыв положительный. Замечания к автореферату:

- 1) Насколько предпочтителен новый метод моделирования динамических систем с интервальными параметрами по сравнению с ранее развитыми?
- 2) Имеются ли прорывные результаты при использовании методов моделирования химических неравновесных течений с учетом неопределенности значений констант скоростей реакций?
- 3) Не указаны пределы применимости теоретических разработок.

#### **5. Отзыв ФИЦ «Информатика и управление» РАН на автореферат.**

Отзыв подписан кандидатом физико-математических наук, научным сотрудником ФИЦ ИУ РАН Колбиным Ильей Сергеевичем. Отзыв положительный. Замечание к автореферату:

- 1) Отсутствие примеров дискретных динамических систем с интервальными параметрами.

#### **6. Отзыв ГНЦ РФ ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша» на автореферат.**

Отзыв подписан кандидатом физико-математических наук, начальником сектора ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» Лаптевым Игорем Вячеславовичем. Отзыв положительный. Замечания к автореферату:

- 1) Разработанный алгоритм адаптивной интерполяции применяется для решения системы ОДУ. При этом не вполне понятна применимость его для физических моделей, не сводящихся к таким системам, в частности, при решении стационарных задач гидродинамики.
- 2) Предложенный алгоритм интерполяции должен работать «в связке» с моделями, описывающими динамику физических систем. Реализация распараллеливания алгоритма с ориентацией только на технологию CUDA может существенно ограничить область применения предложенного подхода.
- 3) В тексте автореферата при обозначении сетки используются нижний и верхний индексы ( $G_k^i$ ). При этом смысл индексов в тексте и на рис. 1 имеет противоположные значения.

## 7. Отзыв ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на автореферат.

Отзыв подписан доктором физико-математических наук, доцентом, заведующим научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса Томского государственного университета Шереметом Михаилом Александровичем. Отзыв положительный.

Замечания к автореферату:

- 1) Из автореферата не ясно, при создании алгоритма адаптивной интерполяции рассматривалась ли возможность использования в качестве интерполяционного многочлена не только полиномов Лагранжа.
- 2) При решении прикладных задач желательно сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными. Возможно ли проведение такого сравнения в рамках рассматриваемого класса задач?

## 8. Отзыв ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» на автореферат.

Отзыв подписан доктором технических наук, профессором кафедры теории летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени С. П. Королева Шустовым Станиславом Алексеевичем. Отзыв положительный. Замечания к автореферату:

- 1) В автореферате не показана возможность использования разработанных в диссертации методов для учета неопределенностей в константах скоростей реакций при определении состава продуктов и удельного импульса тяги жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) разгонных блоков и ЖРД малой тяги для управления пространственным положением космических аппаратов, в которых неравновесные процессы играют существенную роль.

**Выбор официальных оппонентов** обосновывается их компетентностью в области тем, затрагиваемых в диссертационном исследовании.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук Мартыненко Сергей Иванович работает научным сотрудником отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология» ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Область научных интересов — математическое



моделирование, параллельные многосеточные методы, гидроаэродинамика и химическая кинетика. Автор более 60 научных работ.

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, доцент Рогалев Алексей Николаевич — старший научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск). Область научных интересов — математическое моделирование, гарантированные и символьно-интервальные методы. Автор более 60 научных работ.

**Выбор ведущей организации** — федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» — обусловлен широким кругом проводимых научных исследований в области вычислительных методов. Направления научной деятельности ФГБОУ ВО МГУ имени М. В. Ломоносова и непосредственно факультета вычислительной математики и кибернетики включают исследования динамических систем, сеточные методы, а также задачи газовой динамики и химической кинетики.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– Предложен новый подход к моделированию динамических систем с интервальными параметрами, основанный на адаптивном разбиении области неопределенности в пространстве параметров. Предложен способ идентификации режимов, возникающих в динамической системе, по качественному изменению структуры адаптивной сетки.

– Разработан и обоснован алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева, который позволяет за приемлемое время находить интервальную оценку решений с контролируемой точностью, не подвержен эффекту обертывания, имеет высокую степень распараллеливания и справляется с «большими» интервалами.

– Сформулированы и доказаны утверждения относительно условий применимости, сходимости и погрешности алгоритма адаптивной интерполяции. Показано, что оценка глобальной погрешности прямо пропорциональна высоте kd-дерева.

– Разработан программный комплекс с использованием технологии CUDA, включающий реализацию алгоритма адаптивной интерполяции, развитые средства визуализации, а также программную реализацию классических интервальных методов. При проведении расчетов даже с использованием не самой современной видеокарты получено стократное ускорение по сравнению с вычислениями на центральном процессоре. Проведено сравнение результатов, полученных в работе, с результатами, полученными сторонними библиотеками COSY Infinity, AWA, VNODE-LP, RiOT, verifyode и FlowStar. Сравнительный анализ показал превосходство предложенного в диссертации алгоритма и его реализации с точки зрения точности и вычислительных затрат.

– Разработаны методы математического моделирования химических неравновесных течений с учетом неопределенности значений констант скоростей реакций. С использованием разработанного программного комплекса проведены численные исследования влияния неопределенностей на структуру детонационной волны, а также на параметры установившегося течения, такие как время задержки воспламенения и концентрация вредных веществ на выходе из сопла.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что разработан алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева, а также сформулированы и доказаны утверждения относительно условий его применимости, сходимости и погрешности.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что на основе предложенного алгоритма разработан программный комплекс, включающий реализацию параллельного алгоритма адаптивной интерполяции, развитые средства визуализации, а также программную реализацию классических интервальных методов. С его помощью проведено моделирование химических неравновесных течений с неопределенностями в константах скоростей реакций, а также моделирование динамических систем, в которых имеют место бифуркации и хаос.

**Достоверность и обоснованность** результатов, полученных в ходе диссертационной работы, обеспечивается согласованностью результатов

проведенных вычислительных экспериментов с результатами, полученными с использованием других методов и программных комплексов, на представительном наборе как тестовых, так и прикладных задач.

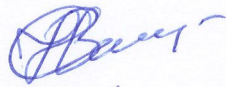
**Личный вклад** соискателя состоит в разработке алгоритма адаптивной интерполяции на основе kd-дерева, формулировке и доказательстве утверждений, касающихся условий применимости, сходимости и погрешности алгоритма, разработке соответствующего программного комплекса и проведении вычислительных экспериментов с последующим анализом полученных результатов.

Диссертационный совет считает, что диссертационная работа Морозова Александра Юрьевича является самостоятельно выполненной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены важные результаты в области численных методов, алгоритмов моделирования динамических систем с интервальными параметрами, вычислительных алгоритмов и программных комплексов. **Диссертация удовлетворяет пункту 9 Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней».**

На заседании 29 марта 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Морозову А. Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 7 докторов наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за — 22, против — 0, недействительных бюллетеней — 0.

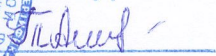
Председатель диссертационного совета  
Д 212.125.04, д. ф.-м. н., доцент

  
А. В. Наумов

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.125.04, к. ф.-м. н., доцент

  
Н. С. Северина



  
29 марта 2019 г.