

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.01,
созданного на базе Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук», по диссертации
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 16 апреля 2024 №5

О присуждении Морозову Александру Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование динамических систем с интервальными параметрами» по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 11 января 2024 г., протокол № 1, диссертационным советом 24.1.224.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 747/нк от 22 июня 2016 г.

Соискатель Морозов Александр Юрьевич, 1991 года рождения, в 2015 году с отличием окончил Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) по специальности «Прикладная математика и информатика». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Алгоритмы адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами» защитил в 2019 году в диссертационном совете, созданном на базе Московского авиационного института. С 2019 года по настоящее время работает в ФИЦ ИУ РАН в должности научного сотрудника.

Диссертация выполнена в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук, в отделе № 27 «Математическое моделирование гетерогенных систем» отделения № 2.

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

Официальные оппоненты:

1. Шарый Сергей Петрович, доктор физико-математических наук, без звания, ведущий научный сотрудник отдела вычислительных технологий Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий».

Отзыв оппонента **положительный**. Про недостатки диссертации оппонент пишет следующее:

Прежде всего, отмечу тот странный факт, что система обозначений диссертации А. Ю. Морозова, посвящённой методам интервального анализа, не соответствует неофициальному стандарту на обозначения в интервальном анализе, который был выработан уже 20 лет назад и вполне признан международным сообществом специалистов.

Кроме того, хочу посоветовать А. Ю. Морозову сменить неоднозначный термин «область неопределённости параметров», который используется в диссертации в нескольких значениях, на более короткий и ёмкий термин «информационное множество» в применении к области параметров, которые совместны (согласованы и пр.) с интервальными данными задачи. В настоящее время «информационное множество» вполне апробировано и является более предпочтительным вариантом словоупотребления.

Главный недостаток диссертации А. Ю. Морозова — недостаточная проработка ряда тонких методических вопросов интервальных вычислений, которая выливается в неполноту развиваемых им вычислительных технологий. Более точно, это не критичное смешение различных типов данных, вещественных (точечных) и интервальных, а также соответствующих им уровней рассмотрения предмета.

Для полноценного и корректного решения задачи нужно уметь сначала подняться с уровня точечных постановок задач (которые только и имеют смысл в силу существующей физической картины мира) на уровень интервальный, а потом, получив нечто в виде решения интервальными методами, суметь опуститься, с сохранением содержательного смысла, обратно в эти самые точечные постановки. К сожалению, второй этап в некоторых местах работы А. Ю. Морозова «завален». Соискатель как будто считает его самоочевидным, но это далеко не так.

Рассмотрим, к примеру, главу 5 диссертации, посвящённую идентификации параметров динамических систем. В разделе 5.2 соискатель рассматривает параметрическую идентификацию на основе внешних интервальных оценок фазовых переменных. Для нахождения «интервальных оценок» параметров сразу же выписывается условие минимизации функционалов качества (5.4), (5.20) и (5.43), в котором с самого начала фигурируют «интервалы оценок». Вопрос: откуда следует, что эти полученные в

результате минимизации функционалов (5.4), (5.20) и (5.43) интервалы в самом деле содержат точечные значения параметров, совместные (согласующиеся и т. п.) с интервальными данными?

То, что множество всех значений параметров системы, совместных (согласующихся и т. п.) с интервальными экспериментальными данными (т. е. информационное множество задачи), не вполне совпадает с получаемыми в диссертации интервальными оценками, следует хотя бы из несовпадения их форм. В этих условиях естественно спросить: в каком же отношении полученный брус интервальной оценки находится к информационному множеству? Может быть, кто-то в кого-то включается, или это верно для интервальных оболочек рассматриваемых множеств и т. п.? Это важнейшие вопросы, которые в диссертации никак не рассматриваются, и неочевидный ответ на них даётся как бы по умолчанию.

В современном интервальном анализе связь результатов интервальных методов с результатами решения точечных задач, имеющих данные в пределах рассматриваемых интервалов, либо является следствием монотонности по включению в интервальных арифметиках, либо устанавливается отдельными предложениями об интерпретации, как, например, это делается в формально-алгебраическом подходе. Чего-то аналогичного не хватает исследованиям А. Ю. Морозова.

Ещё один способ придать осмысленность конструкциям главы 5 может состоять в том, чтобы объявить интервальные данные ненакрывающими и, как следствие, не ожидать от результатов их обработки каких-либо гарантированных отношений с информационным множеством.

Этот второй способ является, на мой взгляд, даже более предпочтительным, так как совершенно отвечает духу и букве построений А. Ю. Морозова в диссертационной работе. Так или иначе, у меня также сложилось впечатление, что получаемые А. Ю. Морозовым в главе 5 диссертации вполне разумные результаты идентификации по интервальным данным обязаны тому факту, что построенные численные процедуры удовлетворяют «принципу соответствия» — расширенному варианту знаменитого боровского принципа. При более тонком анализе задач идентификации, решаемых соискателем можно ожидать, что неизбежно выявятся отличия в результатах с подходами, существенно эксплуатирующими накрывающий характер обрабатываемых данных.

Наконец, последнее. Форма целевых функционалов качества (5.4), (5.20) и (5.43), которые применяются соискателем в главе 5 для решения задач идентификации параметров, весьма невыгодны, так как для них характерны плато нулевого уровня. Конфигурация целевой функции, когда экстремум не находится на плато и отделён от нуля,

гораздо более выгодна и даже более информативна при решении различных задач. Она позволяет надёжнее выявить точки информационного множества, позволяет с помощью знака и абсолютной величины значений целевого функционала различать эти точки по «степени принадлежности» информационному множеству. При благоприятных условиях она помогает даже различать точки границы и внутренности информационного множества.

2. Алексеев Алексей Кириллович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела аэрогазодинамики публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва».

Отзыв оппонента **положительный**, имеются следующие замечания по диссертации:

- 1) В заключении (п. 2) говорится, что алгоритмы адаптивной интерполяции на основе тензорных поездов позволяют преодолеть «проклятие размерности». Это не совсем точно, так как используемая в работе для построения тензорного поезда крестовая аппроксимация позволяет ослабить «проклятие размерности», но полностью его не преодолевает, так как использует матризацию многомерного тензора. Для полной реализации возможностей тензорного поезда необходима разработка других алгоритмов.
- 2) Часть используемых обозначений является недостаточно удобной. Например, в уравнениях (1.3), (5.1) один и тот же индекс i использован в двух разных смыслах, что затрудняет чтение.

3. Мартыненко Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, без звания, ведущий научный сотрудник лаборатории № 8 — физического моделирования двухфазных течений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Отзыв оппонента **положительный**, имеются следующие замечания по диссертации:

- 1) В работе отсутствует чёткое определение разрабатываемого алгоритма. В частности, на странице 9 диссертации сказано: «Ранее соискателем был разработан и теоретически обоснован алгоритм адаптивной интерполяции [89–91], который предназначен для моделирования динамических систем с интервальными неопределенностями и удовлетворяет большинству вышеперечисленных требований». Необходимо явно указать классы решаемых задач, сформулировать количественные требования к разрабатываемым алгоритмам и указать их ожидаемые свойства. Цель работы, определённая на странице 11 как «разработка эффективных алгоритмов и их соответствующих программных реализаций для задач моделирования и параметрической идентификации динамических систем с интервальными параметрами», является

слишком расплывчатой и затрудняет сравнительный анализ полученных результатов. Как следствие, выводы носят сугубо качественный характер и затрудняют позиционирование диссертационной работы относительно других работ в данной проблемной области. Например, основные положения, выносимые на защиту (пункт 5, страница 29 автореферата): «Разработан алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров, который позволяет избежать разрастания границ решения». Есть ли аналоги у данного алгоритма, предложенные другими авторами? В чём состоят преимущества алгоритма подвижного окна, представленного в диссертации, по сравнению с аналогичными алгоритмами других авторов? Есть ли количественные оценки?

- 2) Термины «эффективность алгоритма» и «сложность алгоритма» в работе использованы без предварительного определения. Например, п 1.7 диссертации «Оценка сложности многомерной интерполяции» (страница 49) заканчивается словами «Полученные в этом разделе оценки (1.16), (1.17) и (1.18) понадобятся далее для оценки количества операций в алгоритме адаптивной интерполяции». Когда речь заходит о подсчёте элементарных арифметических операций уместнее говорить о трудоёмкости алгоритма.
- 3) Помимо задачи о моделировании одномерного химически неравновесного течения в сопле жидкостного ракетного двигателя, интересно рассмотреть моделирование турбулентности в приближении RANS с многопараметрическим замыканием и интервальным заданием констант модели турбулентности.
- 4) В представленных алгоритмах адаптивной интерполяции используется кусочно-полиномиальная интерполяция. Каковы требования к гладкости глобального интерполянта? Что в исходной задаче влияет на выбор и свойства глобального интерполянта?
- 5) Можно ли в алгоритме адаптивной интерполяции, описанном в первой главе, использовать адаптивные сетки, отличные от прямоугольных?

Ведущая организация — Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) — в своем положительном заключении, подписанном Галаниным Михаилом Павловичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником, и. о. заведующего отделом № 11, а также Веденяпиным Виктором Валентиновичем, доктором физико-

математических наук, профессором, ведущим научным сотрудником, и утвержденном Аптекаревым Александром Ивановичем, доктором физико-математических наук, профессором, членом-корреспондентом Российской академии наук, директором ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, указала:

«Диссертация Морозова А. Ю. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном и профессиональном уровне, а ее результаты имеют практическую значимость и в совокупности представляют собой крупное научное достижение в области моделирования динамических систем с интервальными параметрами. Диссертант является автором 46 публикаций, из которых 21 представлена в журналах из перечня ВАК (включая 14 в изданиях, индексируемых в БД WoS или Scopus), 1 рецензируемая монография, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Основные результаты работы доложены и обсуждены на профильных международных конференциях и семинарах. Положения, выносимые на защиту, полностью отражены в публикациях. Автореферат в точности соответствует содержанию текста диссертации.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы к использованию в авиационной, ракетно-космической и микроэлектронной отраслях для решения соответствующих практических и актуальных задач, а также в организациях, проводящих исследования в области прикладной математики и математического моделирования.

Диссертационная работа Морозова Александра Юрьевича на тему «Моделирование динамических систем с интервальными параметрами» соответствует пунктам 1, 2, 3 и 8 паспорта специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и полностью удовлетворяет требованиям к докторским диссертациям, установленным действующим Положением о порядке присуждении ученых степеней № 842. Морозов Александр Юрьевич несомненно заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и утвержден на общепрофессиональном семинаре Федерального исследовательского центра Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук 22.02.2024 г., протокол № 1».

Замечания:

- 1) Автор использует лишь последовательную лагранжеву полиномиальную интерполяцию на прямоугольных сетках, обладающую рядом недостатков. Применение других способов интерполирования, возможно, улучшит результаты работы.

- 2) Автор мало внимания уделяет таким важным вопросам теории и практики решения обратных задач, как единственность и непрерывность искомых параметров.
- 3) Желательно распространить подходы Автора на решение задач для уравнений в частных производных. Начало этой работы уже представлено в диссертации.
- 4) Текст работы написан на хорошем русском математическом языке. Тем не менее и в нем имеется ряд описок (стр. 85) и жаргонизмов («наиболее оптимальный вариант» на стр. 39, «густота сетки» на стр. 61, функция, «заданная в виде задачи Коши» на стр. 223, 232).
- 5) Теорема 1 украшает главу, но желательна ее более точная проверка и иллюстрация примерами. В формулировке содержится утверждение о существовании оптимальной степени, но не сказано, существует ли сам оптимальный полином. Формулировки могут упроститься при использовании соответствующего уравнения Лиувилля — адекватного языка в данной ситуации. Можно сказать, что строгой формулировки без использования уравнения Лиувилля получить не удастся.
- 6) Очень интересен пример 1.2 линейного отображения с матрицей 2×2 с единичным определителем. На этом примере высвечены все трудности метода. Здесь так же уместен был бы пример с дискретным временем и матрицей академика Д. В. Аносова 2 и 1 по диагонали и 1 вне диагонали. Эта матрица тоже имеет единичный определитель, но является целочисленной. Она на торе дает классический пример систем Аносова с хаотическим поведением.
- 7) Интересна теорема 2, но (3.1), строго говоря, не задача Коши, а m -интервальная задача Коши. При чтении теоремы 2 читатель недоумевает: одна и та же функция в (3.1) зависит только от времени, а в теореме 2 — уже от m переменных. Равенство (3.11) в теореме 2 призвано прояснить ситуацию, там есть индексы, но при этом не указано, о какой асимптотике идет речь, куда что стремится. Снова все может упроститься при использовании уравнения Лиувилля, где в качестве начальных условий берутся характеристические функции интервальных множеств: по сути это и делается, но неявно.
- 8) Первый пример одного уравнения (стр. 269–271) требует более ясного изложения: восприятие рисунков 6.2 и 6.3 вызывает затруднение. Задача является точно решаемой: корни находятся из биквадратного уравнения, точно можно определить, какой нуль правой части устойчив, какой нет. Это было бы благодатным материалом для иллюстрации метода, но рис. 6.2 и 6.3 (стр. 271)

этого не содержат. Фраза на стр. 270 «На рис. 6.2 представлена бифуркационная диаграмма. На ней состояния, в которых происходит жесткая потеря устойчивости, обозначены пунктирными линиями» — вызывает недоумение читателя. Рис. 6.2 очень хорош и нагляден: нули правой части в зависимости от параметра λ . Пунктирные линии тоже хороши, но показывают не то: они показывают неустойчивые равновесные решения, а потеря устойчивости только одной точки $x = 0$ происходит при переходе параметра λ через точку нуль при движении на рис. 6.2 слева направо. Это и должно было быть написано. При чем тут «жесткая потеря устойчивости» в остальных неустойчивых точках? Так что иногда читать трудно. Фраза не отражает ситуации. Но пример весьма интересен и заслуживает более тщательного рассмотрения.

Соискатель имеет более 65 опубликованных научных работ. По теме диссертации соискателем опубликовано 46 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, опубликована 21 работа (включая 6 в изданиях, отнесенных к категории К-2, и 14 в изданиях, индексируемых в БД WoS или Scopus), 1 рецензируемая монография, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, в диссертации отсутствуют. Диссертация не нарушает п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Автор подробно указал личный вклад в опубликованные с соавторами работы.

Наиболее значимые работы:

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. (К-2)
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. DOI: 10.1134/S0374064118070130. (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. DOI: 10.31857/S023408790001940-8. (Scopus)
4. Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Modelling of Dynamic Systems with Interval Parameters on Graphic Processors // Programmnaya Ingeneria. 2019. Vol. 10. № 2. P. 69–76. DOI: 10.17587/prin.10.69-76. (К-2)

5. Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Modeling of Dynamic Systems with Interval Parameters in the Presence of Singularities // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2020. Vol. 16. № 3. P. 479–490. DOI: 10.20537/nd200306. (Scopus)
6. Морозов А. Ю., Журавлев А. А., Ревизников Д. Л. Анализ и оптимизация алгоритма адаптивной интерполяции численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными параметрами // Дифференциальные уравнения. 2020. Т. 56. № 7. С. 960–974. DOI: 10.1134/S0374064120070122. (WoS, Scopus)
7. Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Adaptive Interpolation, TT-Decomposition and Sparse Grids for Modeling Dynamic Systems with Interval Parameters. Chapter 19 in book Applied Mathematics and Computational Mechanics for Smart Applications. Proceedings of AMMAI 2020. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 217. Springer. P. 271–286. DOI: 10.1007/978-981-33-4826-4_19. (Scopus)
8. Morozov A. Yu., Zhuravlev A. A., Reviznikov D. L. Sparse Grid Adaptive Interpolation in Problems of Modeling Dynamic Systems with Interval Parameters // Mathematics. 2021. Vol. 9. № 4. Article 298. DOI: 10.3390/math9040298. (WoS, Scopus)
9. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции на разреженных сетках для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными неопределенностями // Дифференциальные уравнения. 2021. Т. 57. № 7. С. 976–987. DOI: 10.31857/S0374064121070104. (WoS, Scopus)
10. Морозов А. Ю. Параллельный алгоритм адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток для моделирования динамических систем с интервальными параметрами // Программная инженерия. 2021. Т. 12. № 8. С. 395–403. DOI: 10.17587/prin.12.395-403. (К-2, RSCI)
11. Гидаспов В. Ю., Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции с использованием ТТ-разложения для моделирования динамических систем с интервальными параметрами // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2021. Т. 6. № 9. С. 1416–1430. DOI: 10.31857/S0044466921090106. (WoS, Scopus)
12. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Интервальный подход к решению задач параметрической идентификации динамических систем // Дифференциальные уравнения. 2022. Т. 58. № 7. С. 962–976. DOI: 10.31857/S0374064122070081. (WoS, Scopus)

13. Морозов А. Ю. Параллельный алгоритм параметрической идентификации динамических систем с интервальными параметрами // Программная инженерия. 2022. Т. 13. № 10. С. 497–507. DOI: 10.17587/prin.13.497-507. (K-2, RSCI)
14. Капралов Н. С., Морозов А. Ю., Никулин С. П. Параллельная аппроксимация многомерных тензоров с использованием графических процессоров // Программная инженерия. 2022. Т. 13. № 2. С. 94–101. DOI: 10.17587/prin.13.94-101. (Scopus)
15. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Interval Model of a Memristor Crossbar Network // Physica status solidi (b). 2022. Vol. 269. № 11. 2200150. DOI: 10.1002/pssb.202200150. (WoS, Scopus)
16. Морозов А. Ю., Абгарян К. К., Ревизников Д. Л. Имитационное моделирование аналоговой импульсной нейронной сети на основе мемристорного кроссбара с использованием параллельных вычислительных технологий // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25. № 4. С. 288–297. DOI: 10.17073/1609-3577-2022-4-288-297. (Scopus)
17. Морозов А. Ю. Алгоритм адаптивной интерполяции для решения задач небесной механики с интервальными неопределенностями // Труды МАИ. 2022. № 123. С. 1–23. DOI: 10.34759/trd-2022-123-24. (K-2)
18. Морозов А. Ю. Интерполяционный подход в задачах моделирования динамических систем с эллипсоидными оценками параметров // Труды МАИ. 2022. № 124. С. 1–24. DOI: 10.34759/trd-2022-124-24. (K-2)
19. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров // Дифференциальные уравнения. 2023. Т. 59. № 6. С. 814–827. DOI: 10.31857/S0374064123060110. (WoS, Scopus)
20. Морозов А. Ю. Идентификация интервальных констант скоростей химической реакции окисления нафталина // Моделирование и анализ данных. 2023. Т. 13. № 3. С. 66–78. DOI: 10.17759/mda.2023130305.
21. Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Adaptive sparse grids with nonlinear basis in interval problems for dynamical systems // Computation. 2023. Vol. 11. № 8. Article 149. DOI: 10.3390/computation11080149. (WoS, Scopus)
22. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Методы компьютерного моделирования динамических систем с интервальными параметрами. М.: Изд-во МАИ, 2019. 160 с.
23. Морозов А. Ю. Программа для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными начальными

условиями // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664623 от 20 ноября 2018 г.

24. Морозов А. Ю. Программа для интервальной параметрической идентификации динамических систем // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668591 от 10 октября 2022 г.

На автореферат поступило восемь положительных отзывов, которые подписали:

1. Егоров Иван Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского. В отзыве имеются следующие вопросы:

- 1) В третьей главе рассматриваются разреженные сетки с линейным, квадратичным базисом и базисом четвертой степени. Можно ли обобщить сформулированную теорему 2 на стр. 16 на базис произвольной степени?
- 2) При программной реализации разработанных алгоритмов используются CUDA и OpenMP. С учетом распараллеливания, сколько вычислительного времени потребовалось на решение задач газовой динамики?

2. Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией фундаментальных исследований ФГБУН «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации». В качестве замечания отмечено: «хотелось выделить прорывные результаты работы, которые носят количественный характер».

3. Бабенко Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой вычислительной математики и кибернетики ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». По тексту автореферата имеются следующие вопросы:

- 1) Исследовалась ли возможность определения сценария перехода динамической системы к хаосу с помощью разработанных алгоритмов адаптивной интерполяции?
- 2) Рассматривалась ли возможность использования в алгоритме адаптивной интерполяции интерполяционной сетки на основе узлов Чебышева?

4. Чеботарёв Александр Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор департамента математического и компьютерного моделирования ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». Имеются следующие вопросы:

- 1) В конце автореферата рассматривается задача моделирования процесса аномальной диффузии, который описывается дробно-дифференциальным уравнением. Возможно ли применение разработанных алгоритмов для случая ненулевого начального условия и ненулевого краевого левого условия?
- 2) В пятой главе задача параметрической идентификации сводится к задаче минимизации определенной целевой функции. Методы, которые используются для оптимизации данной функции, могут приводить к появлению локальных минимумов (методы неглобальной оптимизации). Каким образом обходится данная проблема?

5. Куравский Лев Семенович, доктор технических наук, профессор, декан факультета «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Московский государственный психолого-педагогический университет». В качестве замечания отмечено, что в работе не рассматриваются математические модели динамических систем с запаздыванием.

6. Масловская Анна Геннадьевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Математический анализ и моделирование», главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования сложных физических и биологических систем ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет». В качестве замечания указано:

«К сожалению, требование к краткости изложения автореферата привело к смещению акцентов в части представления результатов в область методов моделирования. Описанию структуры и функционала разработанного программного обеспечения уделено мало внимания — элементы даже простейшей стандартной спецификации отсутствуют (платформа разработки, язык программирования, системные требования, входные/выходные данные, режимы работы и пр.). При представлении результатов программной реализации не указано, разработан ли автором обобщенный солвер-решатель и, если разработан, то для каких классов задач (порядков и видов уравнений, позиций и значений интервальных параметров в уравнениях и начальных условиях). Или под программным комплексом автор понимает набор прикладных программ, написанных для решения конкретных частных задач? Какая концепция объединяет все программы в единый комплекс?»

7. Черкасов Сергей Гелиевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Лаптев Игорь Вячеславович, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории математического моделирования ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». В качестве замечания отмечено отсутствие

исследования по влиянию неопределенностей в константах скоростей химических реакций на такие важные параметры ракетных двигателей, как тяга и удельный импульс.

8. Шеремет Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса Томского государственного университета (ТГУ), Мирошниченко Игорь Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики ТГУ. По содержанию автореферата имеются следующие замечания:

- 1) Из автореферата не совсем ясно, что представляет из себя «разработанный программный комплекс». На каком языке программирования он был реализован? На какой платформе? Каким образом происходила визуализация полученных результатов?
- 2) В четвертой главе автор описывает реализацию алгоритма адаптивной интерполяции с применением технологии CUDA. В качестве одного из выводов приводится ускорение расчетов на GPU (в сравнении с CPU) почти в 100 раз. Однако не ясно для какой конкретно задачи проводилось сравнение, какие методы были использованы для решения систем ОДУ. В автореферате также не указаны характеристики GPU и CPU.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области интервальных вычислений, компьютерного моделирования, вычислительной математики и многосеточных методов, что подтверждается их исследованиями и публикациями в высокорейтинговых научных журналах. **Выбор ведущей организации** основан на том, что ИПМ им. М. В. Келдыша РАН является головной организацией по ряду ведущих направлений прикладной математики, в которой работают специалисты в области математического моделирования, численных методов и разработки прикладного программного обеспечения с применением высокопроизводительных вычислений.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработаны** алгоритмы адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток и тензорных поездов, которые с использованием древовидных структур данных позволяют существенно ослабить проклятие размерности при решении задач с большим количеством интервальных параметров. Данные алгоритмы за приемлемое время способны находить интервальную оценку решений с управляемой погрешностью, не подвержены эффекту обертывания и обладают высоким потенциалом распараллеливания;

– **предложен** интервальный метод решения задач параметрической идентификации динамических систем, основанный на нахождении прообраза экспериментальных данных в пространстве параметров;

– **разработан** алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров, который позволяет избежать разрастания границ решения;

– **создан** программный комплекс, включающий в себя последовательную и параллельную реализации разработанных алгоритмов решения задач моделирования и параметрической идентификации динамических систем с интервальными параметрами на многоядерных CPU и графических процессорах. На основе сравнительного анализа с доступными библиотеками программ гарантированных вычислений AWA, VNODE-LP, COSY Infinity, RiOT, FlowStar, Verifyode (INTLAB) показана высокая эффективность разработанных программно-алгоритмических средств;

– **разработаны** методы математического моделирования химических превращений с учетом неопределенности значений констант скоростей реакций. Выполнено совместное решение интервальных уравнений химической кинетики и газовой динамики. Показано, что неопределенности оказывают влияние на ключевые характеристики неравновесных смесей;

– **представлены** интервальные модели элементов энергонезависимой памяти (мемристоров). По экспериментальным данным для мемристивных элементов на основе оксида гафния и ниобата лития выполнена интервальная параметрическая идентификация построенных моделей;

– **разработан** вычислительный алгоритм решения дробно-дифференциальных уравнений с интервальными параметрами в показателях производных, являющийся комбинацией интерполяционного подхода с конечно-разностными схемами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **разработан** интерполяционный подход к моделированию динамических систем с интервальными параметрами, который в сочетании с адаптивным разбиением области неопределенности позволяет получить параметрическое множество решений в явном виде с контролируемой точностью;

– **сформулированы и доказаны** утверждения относительно сходимости и погрешности алгоритмов. Показано, что оценка глобальной погрешности прямо пропорциональна высоте полученных в вычислительном процессе деревьев. Предложен практический способ определения бифуркаций и хаоса в динамических системах с интервальными параметрами по нарастающей плотности адаптивной сетки;

– **сформулированы** постановки задач параметрической идентификации динамических систем, в которых экспериментальные данные являются точечными и интервальными. **Доказаны** две теоремы: о ширине получаемых интервальных оценок параметров и о переходе от интервальных экспериментальных данных к точечным;

– **построены** интервальные вычислительные модели, которые позволяют решить ряд задач из области вычислительного материаловедения, химической кинетики, небесной механики, микроэлектроники и др.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанные подходы и алгоритмы на их основе, а также созданный программный комплекс могут использоваться для решения ряда актуальных практических и исследовательских задач из области вычислительного материаловедения, химической кинетики, газовой динамики, небесной механики и микроэлектроники, в том числе для решения задач, содержащих дробно-дифференциальные уравнения, и задач моделирования динамических систем, в которых имеют место бифуркации и динамический хаос. Разработанный математический аппарат применен для решения задач вычислительного материаловедения в рамках проекта 075-15-2020-799 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Методы построения и моделирования сложных систем на основе интеллектуальных и суперкомпьютерных технологий, направленные на преодоление больших вызовов».

Достоверность исследования подтверждается строгостью математических постановок и выкладок, тестированием вычислительных алгоритмов и реализующего их программного обеспечения, согласованностью результатов проведенных вычислительных экспериментов с результатами, полученными с использованием других методов и программных комплексов, на представительном наборе как тестовых, так и прикладных задач. Результаты прошли всестороннюю апробацию на профильных научных конференциях и семинарах.

В работах, опубликованных в соавторстве, **личный вклад** соискателя является определяющим. Соискателю принадлежит разработка эффективных подходов и алгоритмов для решения задач моделирования и параметрической идентификации динамических систем с интервальными параметрами, формулировка и доказательство сопутствующих утверждений и теорем, разработка соответствующего программного комплекса и проведение вычислительных экспериментов с последующим анализом полученных результатов.

Соискатель Морозов А. Ю. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию, удовлетворившую авторов вопросов.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 26 человек, из них 7 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвующих в заседании, из 36 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени — 26, против присуждения ученой степени — 0, недействительных бюллетеней — 0.

Completed

И. В. Смирнов