

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова, доктор
физико-математических наук, профессор
Федянин А.А.



_____ 2019г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» факультета вычислительной математики и кибернетики

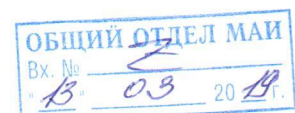
кафедры вычислительных методов

на диссертацию Морозова Александра Юрьевича на тему «Алгоритмы адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность

При решении ряда задач механики, газовой динамики, химической кинетики и многих других, значения входных параметров задачи характеризуются лишь интервалами, к которым могут принадлежать эти значения. В связи с этим, возникает проблема нахождения интервальных оценок решений. Обычно задача получения интервальных оценок ставится как интервальная задача Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. К настоящему времени разработаны методы, в том числе и стохастические, которые решают, с разной степенью эффективности, эту проблему для определенных классов задач. Тем не менее, в целом задача далека от окончательного разрешения, хотя она все чаще встречается как в фундаментальных, так и прикладных исследованиях.

Диссертация Морозова А. Ю. посвящена разработке эффективных алгоритмов моделирования динамических систем с интервальными параметрами достаточно общего вида. В работе рассматриваются системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с интервальными начальными условиями без ограничения общности. В общем случае, существующие методы не всегда способны находить интервальную оценку решений требуемого качества. Классические интервальные методы имеют тенденцию к получению чрезмерно завышенных интервальных оценок и эффективны в основном в задачах, где нелинейность проявляется слабо или интервальные неопределенности не



очень велики. Стохастические методы, такие как методы Монте-Карло, дают грубые оценки и для достижения желаемой точности требуют существенных вычислительных затрат. Символьно-интервальные методы более универсальны и пригодны для решения достаточно широкого класса задач, но имеют большую вычислительную сложность, и при этом трудны для распараллеливания. Поэтому существует потребность в робастных и параллельных алгоритмах для моделирования динамических систем с интервальными параметрами, и актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Содержание работы

Диссертация изложена на 130 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 108 наименований.

Во введении сформулирована цель работы, аргументирована ее актуальность, научная новизна и практическая ценность, проведен обзор известных методов по теме диссертационного исследования. Дано краткое описание программных библиотек и программных комплексов, в которых реализованы существующие методы.

В первой главе работы предложен алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для интегрирования систем ОДУ с интервальными начальными условиями. Доказаны утверждения относительно условий применимости, сходимости и погрешности алгоритма. Выполнена апробация алгоритма на представительном ряде модельных задач, содержащих различное количество интервальных параметров. Выполнено сравнение с методом Монте-Карло.

Во второй главе разработан программный комплекс с использованием технологии CUDA, которая позволяет использовать графические процессоры для общих вычислений и задействовать в полной мере все имеющиеся в них тысячи ядер. Программный комплекс содержит реализацию алгоритма адаптивной интерполяции, развитые средства визуализации и реализации классических интервальных методов. На нескольких модельных задачах выполнена оценка эффективности распараллеливания вычислений.

В третьей главе приведен детальный обзор существующих методов и их программных реализаций. Среди реализаций классических интервальных методов рассмотрены две: AWA и VNODE-LP; среди реализаций символьно-интервальных методов — три: COSY Infinity, RiOT, FlowStar. На представительном наборе задач выполнено сравнение разработанного алгоритма адаптивной интерполяции и его реализации с существующими методами.

Четвертая глава посвящена решению различных прикладных и исследовательских задач. В первом разделе рассматриваются динамические системы, в которых имеют место бифуркации и хаос: осциллятор Ван дер Поля, осциллятор Дуффинга и модель Лоренца. По качественному изменению адаптивной сетки определяются особенности, которые возникают в динамических системах. Во втором разделе выполняется моделирование движения астероида FX11 в условии неопределенности его начальной позиции и скорости. Полученные результаты

сравниваются с результатами, приведенными в доступных источниках. В третьем разделе моделируются газофазные химические превращения при наличии неопределенностей в константах скоростей химических реакций. В параграфе 4.3.1 рассматривается модель адиабатической реакции. В параграфе 4.3.2 моделируется химическое неравновесное течение в сопле Лавала. Исследуется влияние неопределенностей на выброс вредных веществ из сопла. В параграфе 4.3.3 рассматривается стоячая детонационная волна и изменение ее структуры при наличии неоднозначностей в константах скоростей химических реакций.

В заключении сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

Каждая глава заканчивается краткой формулировкой полученных в ней результатов.

Наиболее существенные результаты, полученные соискателем:

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

Разработан и обоснован новый, не подверженный эффекту обертывания и с высокой степенью распараллеливания, алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-деревьев, который позволяет находить интервальную оценку решений с контролируемой точностью, доказаны утверждения относительно условий применимости и сходимости метода.

Разработан программный комплекс с использованием технологии CUDA, включающий в себя как реализацию предложенного алгоритма адаптивной интерполяции, так и классических интервальных методов. На основе сравнения результатов, полученных по разработанным автором методам с рядом известных пакетов, показаны преимущества приведенных в диссертации алгоритмов в точности и вычислительной эффективности.

Разработанные методы и программное обеспечение использованы для построения математических моделей и решения ряда задач, в том числе: расчет оценки траекторий для астероида FX11 в условиях неопределенности положения астероида и его скорости; математического моделирования химических неравновесных течений с учётом неопределенности значений констант скоростей реакций; численные исследования влияния неопределенностей на структуру детонационной волны и параметров установившегося течения в сопле.

Практическая и научная ценность результатов

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный алгоритм и программный комплекс может успешно применяться для решения актуальных задач авиационной и ракетно-космической отрасли.

Научная ценность состоит в разработке алгоритма адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами.

Новизна полученных результатов

Предложен новый подход к моделированию динамических систем с интервальными параметрами, основанный на иерархическом разбиении области неопределенности параметров. Предложен способ идентификации режимов, возникающих в динамической системе, с помощью анализа динамики перестроения адаптивного разбиения. Разработан, обоснован и апробирован алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для моделирования динамических систем с интервальными параметрами. Доказаны утверждения относительно области применимости, сходимости и погрешности алгоритма. Получена линейная зависимость оценки погрешности алгоритма от высоты дерева. Разработан параллельный алгоритм адаптивной интерполяции для графических процессоров, реализованный в созданном программном комплексе. Разработана математическая модель для расчетов и исследования химических неравновесных течений с неопределенностями в константах скоростей реакций.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов диссертации обусловлена использованием современного математического аппарата, строгим обоснованием основных теоретических результатов, сравнением результатов численных расчетов с расчетами по известным моделям и пакетам программ.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты диссертации Морозова А. Ю. могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в МГУ имени М.В.Ломоносова, МАИ, МФТИ, ЦАГИ, ЦИАМ им. П. И. Баранова, МГТУ им. Н.Э.Баумана и других организациях и учреждениях, занимающихся решением практических и актуальных задач авиационной и ракетно-космической отрасли.

Замечания по диссертационной работе:

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 — $y' = (\lambda - x^2)y - x$.

В главах 1 и 4 целесообразно было бы учесть стохастические характеристики в распределения параметров на интервалах. Данное замечание является скорее пожеланием.

Во второй главе, посвященной распараллеливанию алгоритма, следовало бы исследовать проблему масштабирования.

В четвертой главе, при решении задач химической кинетики и газовой динамики, не везде обоснованы значения неопределенностей, которые были добавлены в кинетические механизмы.

Данные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе. Диссертация Морозова А. Ю. представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в ней содержится новый подход к моделированию динамических систем с интервальными параметрами. Результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из них три статьи опубликованы в

журналах из списка научных журналов, рекомендованных ВАК, две из статей входят в базы данных WoS и Scopus. 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.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры вычислительных методов, Мухиным Сергеем Ивановичем.

Работа обсуждена на научном семинаре кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова. Отзыв утвержден на научном семинаре кафедры вычислительных методов 27.02.2019 г., протокол № 2.

Профессор кафедры

вычислительных методов факультета ВМК МГУ имени
М.В.Ломоносова, д.ф-м.н.

Мухин С. И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», факультет вычислительной математики и кибернетики
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, факультет ВМК
Тел. 8 (495) 939-30-10
e-mail: cmc@cs.msu.su, <http://www.cs.msu.su/>



Подпись удостоверяю
Ведущий специалист по кадрам

Т.Г. Коваленко