МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 978-13-14 Факс 8 (499) 972-07-37 https://keldysh.ru e-mail: office@keldysh.ru
ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

01.10.2026 № 11103-9422/879

На № _____

Отзыв ведущей организации

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН
Михаил Владимирович Якобовский

_____
01 октября 2026 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертацию Рыбакова Алексея Анатольевича «Методы и средства повышения производительности программ для моделирования объектов со сложной геометрией», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 - математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

Актуальность темы

В настоящее время компьютерное моделирование активно используется для проектирования современной техники, постоянно повышается точность моделей проектируемых изделий, наблюдается плавное смещение акцента в разработке в сторону цифровых испытаний, которые призваны рано или поздно свести к минимуму натурные испытания. В таких условиях крайне актуальной задачей является не только моделирование объектов, обладающих сложной геометрией, но также важно учитывать особенности изменения геометрии вследствие протекания

природных процессов или условий эксплуатации, как это показано в работе на примере моделирования процесса обледенения поверхности. Выполнение компьютерного моделирования многочисленных связанных физических процессов в мультифизической постановке с учетом сложной изменяющейся геометрии связано с высокими вычислительными затратами. Для выполнения таких расчетов требуется использование современных суперкомпьютерных систем, разработка методов распараллеливания вычислений для которых является крайне актуальной ввиду высокой востребованности и стоимости таких систем. Работа Рыбакова Алексея Анатольевича является актуальной, так как решает задачи повышения производительности программ на разных уровнях распараллеливания и демонстрирует применимость разработанных решений на примере задачи моделирования обледенения поверхности, актуальной для разработки современных летательных аппаратов. Отдельно следует отметить актуальность работы в части исследований, направленных на повышение производительности программного кода с помощью векторизации вычислений, ввиду сохраняющейся тенденции по развитию возможностей векторных инструкций в современных микропроцессорах.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их научная новизна

Полученные в работе новые результаты обладают теоретической значимостью. Предложенный метод окрестностей перестроения поверхностной неструктурированной сетки, в отличие от существующих методов перестроения, обладает способностью сглаживания локальных дефектов, получены аналитические зависимости, подтверждающие это. Предложенный метод удаления самопересечений поверхностных сеток гарантированно обеспечивает получение корректного результата, разработан и реализован алгоритм удаления самопересечений. Представлены формулы аппроксимации скалярных и векторных газодинамических величин в фиктивных ячейках при проведении расчетов обтекания тел со сложной границей в трехмерной постановке. Разработаны алгоритмы распределения блоков расчетной сетки между вычислительными процессами с использованием дробления блоков, снижающие простой вычислительных ресурсов при распараллеливании вычислений на высокопроизводительном вычислительном кластере, обоснована сложность работы этих алгоритмов. Разработан алгоритм сглаживания границ между доменами поверхностной неструктурированной сетки, теоретически обоснована

оптимальность сглаживания в поставленных условиях при использовании локальных шаблонов сглаживания. Проанализирована проблема векторизации вычислений с помощью векторных команд, использующих векторные маски; выделена специальная программная конструкция - плоский цикл с телом произвольного вида, для которой предложены методы векторизации и приведено их теоретическое обоснование, эффективность полученных методов подтверждена результатами запусков на микропроцессорах с поддержкой инструкций AVX-512. Все полученные в работе результаты имеют практическую значимость, так как реализованы в конкретных программных инструментах, в частности в программном комплексе моделирования процесса обледенения «Кристалл», который является законченным программным продуктом и используется при проектировании современных летательных аппаратов.

Степень обоснованности научных положений и достоверность результатов

Разработанные в рамках диссертации новые методы и алгоритмы повышения производительности программ для моделирования объектов со сложной геометрией теоретически обоснованы, протестированы и реализованы в программных кодах как самостоятельные решения. Однако, вместе с тем в совокупности они представляют собой единый математический и программный комплекс «Кристалл», имеющий конкретное практическое применение и направленный на решение актуальной задачи моделирования процесса обледенения летательных аппаратов. Достоверность полученных результатов подтверждена согласованностью данных проведенных соискателем численных экспериментов с теоретическими оценками, практикой применения разработанных программных инструментов для решения практических задач в НИЦ «Курчатовский институт» и организациях, занимающихся проектированием образцов авиационной техники: ЦИАМ им. П. И. Баранова, Национальный центр вертолетостроения имени М. Л. Миля и Н. И. Камова.

Апробация результатов работы и общая характеристика публикаций автора

Основные положения диссертационной работы представлены в 42 публикациях, из которых 30 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Из 30 основных публикаций по теме исследования 10 выполнены без соавторов. Также по результатам работы были созданы программные инструменты, на которые получено 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ (2 без соавторов).

Структура и содержание диссертации

В состав диссертации входят: введение, пять глав, заключение, перечень сокращений и список литературы из 383 позиций. Общий объем - 337 страниц, включая 126 рисунков, 9 таблиц и 17 листингов.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель и задачи, приводится новизна полученных результатов. Формулируются выносимые на защиту положения и обосновывается их теоретическая и практическая значимость. Приведены сведения об апробации и публикациях по теме работы.

В первой главе приводится подробный обзор решаемой проблемы: обзор задач, в которых возникает моделирование объектов со сложной геометрией, используемые в таких задачах расчетные сетки, проблемы распараллеливания вычислений на таких сетках, задачи перестроения сеток при изменении геометрии, проблемы надежности перестроения, качества сеток, использование искусственного интеллекта в таких задачах. В качестве представителя задач, в которых возникает моделирование тел со сложной геометрией, формулируется задача моделирования процесса обледенения и приводится описание программного комплекса «Кристалл», в котором полученные в работе результаты нашли отражение и прошли практическую апробацию.

Вторая глава содержит все затрагиваемые в работе вопросы, касающиеся работы с геометрией сеток.

Главы с третьей по пятую посвящены распараллеливанию вычислений в задачах моделирования тел со сложной геометрией, выполняемому на разных уровнях распараллеливания. Третья глава относится к распараллеливанию вычислений на блочно-структурированной сетке на распределенной памяти. Четвертая глава относится к вычислениям на поверхностной неструктурированной сетке: декомпозиция сетки, уменьшение длины границ между доменами, масштабирование вычислений, распараллеливание в многопоточном режиме. Пятая глава относится к ускорению программного кода с помощью векторизации.

В заключении перечислены полученные результаты, представляющие собой комплекс математических методов и алгоритмов, реализованный в программном коде. Указано применение разработанных инструментов для решения важных практических задач.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы - этого достаточно, чтобы оценить главные результаты и проверить, насколько они обоснованы и достоверны.

Замечания

К работе имеются следующие замечания.

1) Для выполнения вычислений в расчетной области со сложной границей существует множество программных комплексов. В главе 1 диссертации они упоминаются, но в дальнейшем сравнение производительности разработанных методов с этими и другими комплексами не приводится.
2) Для ряда методов (например, метода окрестностей перестроения поверхностной сетки, метода удаления самопересечений, метода погруженной границы с фиктивными ячейками) не сформулированы границы их применимости.
3) Методы распределения блоков сетки с использованием алгоритма дробления блоков и метод сглаживания границ между доменами описаны без детального анализа сопутствующих накладных расходов.
4) Результаты экспериментальных исследований разработанных методов приводятся с использованием умеренного количества расчетных ядер (порядка 100). Однако остается вопрос -- сохраняется ли заявленный рост производительности при увеличении числа ядер до тысячи и более, а также при использовании графических ускорителей.
5) Разработанная методика векторизации программного кода не учитывает ряд факторов, которые могут привести к деградации производительности. Например, использование нескольких ядер с векторизацией AVX-512 может полностью исчерпать пропускную способность контроллера памяти DRAM. В этом случае распараллеливание программы с помощью технологии OpenMP будет малоэффективным.
6) В автореферате утверждается, что достоверность результатов диссертации обеспечивается «строгим применением математического аппарата» и «согласованностью с известными из научной литературы результатами», но не приводятся конкретные данные, подтверждающие это утверждение.

Выявленные недостатки не умаляют достоинств работы и не меняют ее общей положительной оценки.

Заключение

Диссертация Рыбакова Алексея Анатольевича, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, обладает внутренней целостностью, научной новизной, теоретической и практической значимостью и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании

выполненных исследований созданы математические методы и алгоритмы, реализованные в востребованном программном комплексе. Решенная в работе Рыбакова Алексея Анатольевича научная проблема повышения производительности программ для суперкомпьютерного моделирования объектов со сложной геометрией имеет важное хозяйственное значение и, в первую очередь, для наукоёмких отраслей промышленности.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Рыбакова Алексея Анатольевича удовлетворяет требованиям п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Рыбаков Алексей Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании семинара Института (Протокол № 01-26 от 09.06.2026 г.). На семинаре присутствовало 23 чел. В голосовании участвовало 23 чел. Результаты голосования: «За» – 23; «Против» – «нет»; «Воздержались» – «нет».

Отзыв составили:

Поляков Сергей Владимирович 01.10.2026
(Ф.И.О.) (дата) (подпись)
заместитель директора по научной работе, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.

Бахтин Владимир Александрович 01.10.2026
(Ф.И.О.) (дата) (подпись)
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Данные организации

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)
Адрес: 125047, г. Москва, Миусская пл., д.4
Телефон: +7(499)972-37-14, Факс: +7(499)972-07-37
Сайт: https://www.keldysh.ru
Адрес электронной почты: office@keldysh.ru