Заключение диссертационного совета 24.1.047.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, по диссертации на соискание учёной степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 13.10.2026 № 6

О присуждении гражданину РФ Саразову Алексею Владимировичу степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эффективные численные методы и алгоритмы решения задач аэродинамики с подвижными объектами на неструктурированных сетках» по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 21.04.2026 (протокол заседания) № 3) диссертационным советом 24.1.047.01 созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН), утверждён приказом Минобрнауки России №105/нк от 11.04.2012 г., 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6.

Соискатель Саразов Алексей Владимирович «15» февраля 1983 года рождения. В 2006 году соискатель окончил Арзамасский политехнический институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (АПИ НГТУ) по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2008 г. окончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Алексеева») по направлению Математика и механика (код 01.06.01), специальность 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Работает старшим научным сотрудником в Институте теоретической и математической физики Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» г. Саров._Ведомственная принадлежность Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом».

Диссертация выполнена в Институте теоретической и математической физики Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» г. Саров. Ведомственная принадлежность Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Козелков Андрей Сергеевич, Институт теоретической и математической физики Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», начальник отдела.

Официальные оппоненты:

- Бойко Андрей Владиславович, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», главный научный сотрудник, заведующий лабораторией физико-математического моделирования неоднородных течений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт

теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), г. Новосибирск.

– Исаев Сергей Александрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией фундаментальных исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова» (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А. А. Новикова), г. Санкт-Петербург.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ, Московский авиационный институт), г. Москва, в своём положительном отзыве, подписанном Ивановым Андреем Владимировичем, доктором технических наук, проректором по научной работе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ, Московский авиационный институт), указала, что диссертация полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Научные результаты, полученные в работе, соответствуют паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор, Саразов Алексей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 11 **опубликованных работ**, в том числе **по теме диссертации опубликовано 11 работ**, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 11 работ. Работы представляют собой научные публикации, среди которых 6 статей опубликованы в научных журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 7 статей – в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS/Web of Science, из них 3 – в журналах, входящих в Q1 в области численной аэродинамики; при этом 7 статей опубликованы в научных журналах, входящих в Единый государственный перечень научных изданий («Белый список»), в том числе 3 статьи уровня 1, остальные – уровней 2-4. Получено 13 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. В публикациях изложены все основные результаты диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах. Все выносимые на защиту результаты получены автором лично. У соискателя с соавторами работ отсутствует конфликт интересов относительно результатов выносимых на защиту.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Betelin V. B., Shagaliev R. M., Aksenov S. V., Belyakov I. M., Deryugin Yu. N., Korchazhkin D. A., Kozelkov A. S., **Sarazov A. V.**, Zelenskiy D. K., Nikitin V. F. Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using Logos code // Acta Astronautica. – 2014. – Vol. 96, № 1. – PP. 53–64.

Соискателем проведена верификация пакета программ «Логос» на задаче моделирования горения кислород-водородной смеси. Построение сеточных моделей. Проведение численных рáсчётов.

2. Дерюгин Ю. Н., Жучков Р. Н., Зеленский Д. К., Козелков А. С., **Саразов А. В.**, Кудимов Н. Ф., Липницкий Ю. М., Панасенко А. В., Сафронов А. В. Результаты валидации многофункционального пакета программ ЛОГОС при решении задач аэрогазодинамики старта и полета ракет-носителей // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 9. – С. 83–95.

Соискателем проведена валидация математических моделей пакета программ «Логос» применительно к задачам космической промышленности. Построение сеточных моделей. Проведение численных расчётов.

3. Дерюгин Ю. Н., **Саразов А. В.**, Жучков Р. Н. Особенности построения методики расчёта на сетках типа «Химера» для неструктурированных сеток // Математическое моделирование. – 2017. – Т. 29, № 2. – С. 106–118.

Соискателем проведено построение алгоритма маркировки с учётом минимизации зон перекрытия расчётных ячеек для произвольных неструктурированных сеток с перекрытием. Проведено исследование применимости технологии расчёта на сетках с перекрытиями для задач отделения.

4. Стручков А. В., Козелков А. С., Жучков Р. Н., Уткина А. А., **Саразов А. В.** Численное моделирование задач аэродинамики со статической адаптацией сетки под особенности решения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2019. – Т. 2. – С. 55–67.

Соискателем проведен анализ применимости реализованных схем расчёта конвективных потоков при трансзвуковом обтекании летательных аппаратов.

5. Struchkov A. V., Kozelkov A. S., Volkov K., Kurkin A. A., Zhuchkov R. N., **Sarazov A. V.** Numerical simulation of aerodynamic problems based on adaptive mesh refinement method // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 172. – PP. 7–15. – DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.03.019.

Соискателем проведено исследование методов расчёта на изменяемых расчётных сетках к решению задач сверхзвукового течения. Проведение численных расчётов.

6. **Саразов А. В.**, Козелков А. С., Уткина А. А., Корнев А. В. Моделирование динамики полёта летательного аппарата с учётом работы силовой установки и органов управления // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 203–204.

Соискатель провёл исследование метода расчёта на деформируемых сетках и сетках с перекрытиями для моделирования различных сценариев эксплуатации летательного аппарата.

7. **Sarazov A. V.**, Kozelkov A. S., Strelets D. Yu., Zhuchkov R. N. Modeling Object Motion on Arbitrary Unstructured Grids Using an Invariant Principle of Computational Domain Topology: Key Features // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, Issue 2081. – PP. 1–19. – DOI: 10.3390/sym15112081.

Соискатель провёл исследования повышения точности моделирования для задач с изменяемой геометрией на неструктурированных сетках.

8. **Саразов А. В.** Особенности вычисления конвективных потоков для задач аэродинамики при использовании сеток с подвижными узлами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2023. – Т. 3. – С. 55–66.

Соискателем проведено исследование в целях сохранения консервативности схемы расчёта для задач обтекания тел с подвижными границами.

9. **Саразов А. В.**, Козелков А. С. Модификация IDW метода для численного решения задач аэродинамики на сетках большой размерности // Сибирские электронные математические известия. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 591–620.

Соискателем проведено исследование в части повышения вычислительной эффективности алгоритма морфинга для решения задач аэродинамики с подвижными границами на неструктурированных деформируемых сетках.

10. **Саразов А. В.**, Козелков А. С. Повышение точности CAE-моделирования задач аэродинамики с использованием технологии расчёта на трёхмерных неструктурированных сетках с перекрытиями // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2024. – Т. 2. – С. 43–58.

Соискателем проведено исследование по построению методов интерполяции повышенной точности для задач на неструктурированных сетках с перекрытиями.

11. **Sarazov A. V.**, Kozelkov A. S. Improving accuracy of relative motion simulation of objects using three-dimensional unstructured overset grids // Aerospace Systems. – 2026. – DOI: 10.1007/s42401-026-00471-4.

Соискателем проведено исследование по сеточной сходимости разработанных численных схем для задач на основе сеток с перекрытиями.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Отзыв на автореферат** представил профессор кафедры информационных технологий и систем управления Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ИРИТ-РТФ), доктор физико-математических наук, доцент, Евгений Юрьевич Просвиряков. **Отзыв положительный** и содержит следующие вопросы:

- Как были выбраны весовые функции и определены весовые коэффициенты «*a*» формул (3) и (4), приведённых на странице 10 автореферата?
- Как исследовалась устойчивость численных алгоритмов, разработанных при подготовке диссертационного исследования?

2. **Отзыв на автореферат** представил кандидат технических наук, начальник отделения математического моделирования и суперкомпьютерных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр судостроения имени академика А.Н. Крылова» (ФГБУ «НИЦ имени А.Н. Крылова»), Андрей Евгеньевич Таранов. **Отзыв положительный** и содержит следующие замечания:

- Несмотря на название работы и положения, выносимые на защиту, в тексте автореферата отсутствуют примеры разработанных расчетных сеток для тел с изменяемыми границами и для группы тел, в том числе с учетом возможного контакта.
- В описании главы 3 отсутствуют какие-либо сведения о валидации разработанных методов и алгоритмов применительно к летательным аппаратам (фигура «Кобра», выход из «Петли», сброс груза и т.д.).

3. **Отзыв на автореферат** представил кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», НГТУ), Екатерина Александровна Рувинская. **Отзыв положительный** и содержит следующие замечания:

- На стр. 8 автор приводит формулу (2) для вычисления вектора скорости грани, однако в тексте не уточняется, как именно обеспечивается вычислительная устойчивость в случае сильной деформации ячеек.
- В параграфе 2.6, посвящённом интерполяции повышенной точности, хотелось бы видеть более детальное сравнение предложенных методов с классической трилинейной интерполяцией не только по точности, но и по затратам машинного времени.

4. **Отзыв на автореферат** представили Главный конструктор по аэродинамике, кандидат технических наук, Алексей Захарович Тарасов, и Заместитель учёного секретаря Отделения Научно-технического совета, Руководитель Научно-технического сектора Совета МС ОКБ Сухого, кандидат технических наук, Фёдор Андреевич Насонов, Филиала Публичного акционерного общества «Объединённая авиастроительная корпорация» – Оперативно-тактическая авиация Опытно-конструкторское бюро Сухого (Филиал ПАО

«ОАК» – ОТА ОКБ Сухого). **Отзыв положительный** и содержит следующие замечания рекомендательного характера:

- В автореферате следовало бы более подробно описать ограничения предложенного подхода при сильных искажениях сетки.
- Диссертант недостаточно детально привёл в автореферате предложенный им алгоритм маркировки ячеек.

5. **Отзыв на автореферат** представил старший научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), кандидат физико-математических наук, Наталья Сергеевна Жданова. **Отзыв положительный** и содержит следующие замечания:

- Для метода интерполяции на основе четырехточечного шаблона (формула 4) не приведено описание выбора весов и условий их нормировки. Хотя в тексте сказано, что это повышает точность, без пояснений сложно оценить универсальность подхода.
- В главе 3, посвященной практическим приложениям, результаты представлены в основном графически, но количественные оценки погрешностей или сравнения с экспериментальными данными для полетных сценариев не приведены. Это несколько снижает наглядность и убедительность проведенной валидации.
- Не описано содержание первых параграфов каждой из глав. Видимо имеет место ошибка в нумерации.
- В заключительной части автореферата указывается, что «в параграфе 3.6 представлены результаты третьей главы». Однако непосредственно перед этим, в параграфе 3.5, также приведены результаты моделирования (отделение груза). Возможно, следовало бы пояснить, о каких именно результатах идёт речь в параграфе 3.6.

6. **Отзыв на автореферат** представил декан факультета математики и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (МГУ им. Н.П. Огарёва), доктор физико-математических наук, доцент, Елизавета Евгеньевна Пескова. **Отзыв положительный** и содержит следующие замечания:

- На стр.9 автор пишет о существенном сокращении вычислительной сложности, но в тексте отсутствуют количественные оценки: во сколько раз ускорился алгоритм по сравнению с классическим подходом, как меняется время деформирования сетки при увеличении числа узлов.
- При описании интерполяции повышенной точности (формулы (3) и (4) на стр. 10) не указано, как выбираются веса в четырехточечном шаблоне и как метод ведет себя в областях с большими градиентами параметров.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области математического моделирования течения сжимаемых газов, численных схем расчёта, наличием у них публикаций в рецензируемых изданиях по теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан:

- программный модуль расчёта задач аэродинамики с подвижными объектами с использованием неструктурированных деформируемых сеток и сеток с перекрытиями;
- метод расчёта скорости движения грани, позволяющий сохранить консервативность численных схем для произвольных неструктурированных сеток;
- методы интерполяции повышенной точности для решения задач на перекрывающихся расчётных сетках;

предложен:

– модификации метода деформирования расчётной сетки с сохранением топологии, позволяющие снизить время выполнения этапа морфинга, а именно: построение иерархических структур данных для подвижных границ, использование идей быстрых мультиполей и распределение вычислительной нагрузки по вычислительным ядрам;

– метод маркировки, минимизирующий зоны перекрытия ячеек расчётной сетки, на основе булевой алгебры и применения иерархических структур данных для ячеек сетки с перекрытием;

доказана применимость разработанных численных схем и алгоритмов для решения реальных промышленных задач на высокопараллельных ЭВМ;

введены ключевые элементы для подготовки и решения задач моделирования типичных полётных сценариев современных летательных аппаратов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана консервативность разработанных численных схем и алгоритмов расчёта задач аэродинамики с подвижными элементами конструкции для произвольных неструктурированных сеток;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы модифицированные методы деформирования расчётной сетки на базе построения иерархических структур данных для подвижных границ, использования идей быстрых мультиполей и распределения вычислительной нагрузки по вычислительным ядрам, а также методика определения и обработки зон контакта непроницаемых поверхностей на базе построения иерархических структур данных для подвижных границ и топологии расчётной сетки.

раскрыт алгоритм кодирования ячеек расчётной сетки с перекрытиями для алгоритма маркировки расчётных ячеек, позволяющий минимизировать зону перекрытия, что положительно влияет на устойчивость итерационного процесса;

изучены:

– метод численного моделирования нестационарных процессов с подвижными границами на неструктурированных сетках;

– подход для обеспечения консервативности численных схем для моделирования задач аэродинамики на неструктурированных сетках с подвижными границами;

– иерархические структуры данных для построения более оптимизированных методов изменения расчётной сетки с сохранением топологии;

– методы интерполяции повышенной точности и показана их роль в снижении погрешности результатов численного решения характерных задач авиационной промышленности;

проведены исследования точности моделирования на произвольных сетках с перекрытиями для различных методов интерполяции.

изложены методические рекомендации для повышения точности результатов моделирования в случае контакта непроницаемых границ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в пакет программ ЛОГОС методы расчёта задач численной аэродинамики с подвижными границами. Это подтверждается полученными результатами в следующих российских исследовательских проектах:

– проект «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий» (2010 – 2012 гг.), одобренный на заседании Комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики;

– проект «Разработка отечественного программного обеспечения», утверждённый постановлением Правительства Российской Федерации №993 от 30.09.2016;

– проект «Создание единой виртуальной модели функционирования боевого манёвренного самолета», утверждённый постановлением Правительства Российской Федерации №707. Зарегистрирован модуль № 2021662027;

– проект «Разработка технологии суперкомпьютерного моделирования процессов функционирования управляемого реактивного снаряда с использованием комплексных суперкомпьютерных моделей». Зарегистрирован модуль № 2023683912;

– проект «Разработка программного модуля расчёта аэродинамических характеристик военно-транспортных самолётов в естественных условиях обледенения». Зарегистрирован модуль № 2021661198;

– национальный проект «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодёжных лабораторий № FSWE-2021-0009 (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания гидродинамических характеристик жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования индустриальных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах петафлопсного класса»);

– СЧ ОКР «Разработка связанной виртуальной математической модели изделия С-70» в рамках совместных работ с ПАО ОАК «ОКБ Сухого».

определены ключевые положения для построения дискретной модели для каждого класса задач, для которых целесообразно использовать предложенные методы расчёта;

созданы численные реализации разработанных методов в виде программного модуля расчёта, который обеспечивает широкие возможности моделирования реальных сценариев эксплуатации современных летательных аппаратов;

представлены физико-математические модели для численного моделирования выполнения современным манёвренным летательным аппаратом фигур высшего пилотажа.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты воспроизводятся для различных постановок реальных задач и международных тестов;

теория построена на основе широко известного метода конечных объёмов и условия геометрической консервативности;

идея базируется на анализе и обобщении таких методов, как метод обратных взвешенных расстояний, технология расчёта на перекрывающихся сетках (Химера), методы интерполяции газодинамических полей (трилинейная и IDW), метод вычисления вектора скорости грани на основе условия геометрической консервативности, а также базовые принципы построения сеток с перекрытиями, их модификациях и адаптациях применительно к решению практических задач.;

использованы сравнения результатов моделирования в пакете программ ЛОГОС с доступными в открытых источниках референсными данными;

установлено качественное и количественное соответствие результатов численных расчётов с результатами натурных экспериментов;

использованы иерархические структуры данных, современные подходы к построению вычислительных алгоритмов для высокопараллельных ЭВМ.

Личный вклад соискателя состоит в:

- разработке и реализации численной схемы расчёта конвективных потоков для задач с подвижными границами;
- разработке и реализации метода расчёта вектора скорости грани;

– разработке и реализации модифицированного алгоритма деформирования расчётной сетки с сохранением топологии связи на основе метода обратных взвешенных расстояний;

– разработке и реализации методов и алгоритмов расчёта на неструктурированных сетках с перекрытиями, а именно: алгоритм маркировки с минимизацией зон перекрытия, методы расчёта задач с контактом непроницаемых границ;

– разработке и реализации методов интерполяции повышенной точности на основе четырёхточечного шаблона и с применением градиентов для расчёта полей на интерфейсах;

– проведении совместно с соавторами верификации и адаптации предложенных численных методов и алгоритмов к промышленным задачам авиационной промышленности.

В ходе защиты диссертации критических замечаний не поступило.

Соискатель Саразов А.В. **ответил** на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию.

На заседании 13 октября 2026 диссертационный совет принял решение за решение научной задачи, имеющей значение для развития методов моделирования аэродинамики с подвижными объектами **присудить** Саразову Алексею Владимировичу учёную степень **кандидата физико-математических наук.**

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 13 докторов наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 3 доктора наук по специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали за 16, против 0, недействительных бюллетеней 0.

И.о. председателя диссертационного совета 24.1.047.01 доктор технических наук, профессор — Ельцов Игорь Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета 24.1.047.01 доктор физико-математических наук, доцент — Сорокин Сергей Борисович

13 октября 2026 г.