



УТВЕРЖДАЮ:
директор ИМП им. М.В. Келдыша РАН
чл.-корр. РАН М.В. Якобовский

« 24 » февраля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Метод численного бимформинга в вычислительном эксперименте в аэроакустике» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Плаксин Глеб Максимович с 2021 по 2025 обучался в очной аспирантуре Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук по направлению подготовки 01.06.01 - Математика и механика. В настоящее время работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности младшего научного сотрудника.

В 2018 г. он окончил бакалавриат федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению подготовки 01.03.02 Прикладная математика и информатика. В 2021 г. окончил магистратуру МГУ им. М.В. Ломоносова по направлению подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика. В 2025 г. окончил очную аспирантуру ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Козубская Татьяна Константиновна работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности главного научного сотрудника.

Научный консультант – доктор физико-математических наук Софронов Иван Львович работает в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в должности профессора. Необходимость привлечения научного консультанта обосновывается темой диссертационной работы, подразумевающей глубокие знания в новой области математического моделирования – идентификации и локализации акустических источников путем обработки данных, полученных численным моделированием. И.Л. Софронов является известным специалистом в области моделирования волновых процессов, включая методы бимформинга, где критически важным компонентом является постановка неотражающих граничных условий.

По итогам обсуждения диссертации «Метод численного бимформинга в вычислительном эксперименте в аэроакустике» **принято следующее заключение.**

Тема диссертации является актуальной, поскольку работа посвящена разработке численной модели, алгоритмов и программных кодов для решения задач аэроакустики, имеющих теоретическое и прикладное значение. Диссертационная работа содержит новые результаты в

области постановки и решения обратных задач, возникающих при анализе данных вычислительного эксперимента. Автором предложена новая математическая модель для описания акустических источников, возникающих при численном решении уравнений Навье-Стокса в задачах турбулентного обтекания, а также разработаны вычислительные алгоритмы и выполнена программная реализация, которая может быть использована для решения конкретных прикладных задач.

Целью диссертационной работы является разработка, верификация и валидация метода численного бимформинга для идентификации акустических источников на основании данных, полученных в ходе проведения вычислительного эксперимента.

Для достижения цели работы решаются следующие **задачи**.

1. Разработка модели распределенного акустического источника, формирующегося при турбулентном обтекании различных тел. Формулирование математической задачи по идентификации источника.
2. Разработка численного метода для решения сформулированной задачи, его верификация на задачах с синтетическими данными.
3. Реализация метода в составе программного комплекса NOISEtte.
4. Проведение расчетов для промышленно-ориентированной тестовой задачи, проверка корректности получаемых результатов, сопоставление результатов с экспериментальными данными.
5. Численное решение задачи идентификации акустического источника, возникающего при турбулентном обтекании крыла модели прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки.

Основные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель распределенного акустического источника, возникающего при турбулентном обтекании летательного аппарата и его конструктивных элементов. Модель представляет собой обратную задачу по поиску плотности простого слоя или плотностей простого и двойного слоя (в случаях монопольного и дипольного источника соответственно) в правых частях уравнения Гельмгольца. Особенностью модели является возможность использования большого объема данных вычислительного эксперимента, что позволяет отказаться от предположения о некоррелированности источника.
2. На основе конечно-элементного представления сформулирована дискретная задача численного бимформинга. Для обеспечения корректности постановки предложен физически обусловленный способ снижения числа обусловленности используемой матрицы.
3. Разработанный метод численного бимформинга реализован в модуле NumBeamForm в составе программного комплекса NOISEtte
4. Работоспособность и эффективность метода численного бимформинга продемонстрированы применительно к промышленно-ориентированной тестовой задаче по идентификации акустического источника на сегменте прямого крыла с выпущенной механизацией
5. С помощью метода численного бимформинга выявлены акустические источники на крыле модели прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки.

Все результаты диссертации получены лично соискателем при научном руководстве Козубской Татьяны Константиновны и научных консультаций Софронова Ивана Львовича.

Научная новизна работы включает комплекс решений (математических, алгоритмических и программных), а также результаты расчетов, обеспечивающих достижение цели работы.

Созданный подход применим для прикладных научных исследований и позволяет проводить оптимизацию акустических характеристик летательных аппаратов. В отличие от существующих подходов бимформинга подход, предложенный автором,

- 1) учитывает особенности вычислительного эксперимента в виде наличия большого массива получаемых данных;
- 2) не использует предположения о некоррелированности источника при формулировании задачи, что подразумевает более общую постановку;
- 3) для обеспечения устойчивости использует конечно-элементное представление решения, а также ограничения на дискретизацию областей источника и микрофонов, что приводит к возможности решать рассматриваемые задачи без использования регуляризации в явном виде.

Научная и практическая ценность работы заключается в том, что решение задачи идентификации акустических источников на основании данных вычислительного эксперимента представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Применение подходов натурального бимформинга не позволяет раскрыть весь потенциал анализа результирующих данных численного моделирования, в то время как численный бимформинг остается малоизученным. Представленный в работе подход и его программная реализация позволяют получить современный инструмент для проведения прикладных вычислительных исследований в области исследования акустических источников, возникающих при турбулентном обтекании летательных аппаратов.

Достоверность результатов, получаемых с использованием разработанного в рамках диссертационной работы подхода, обеспечивается результатами моделирования на ЭВМ модельных тестовых задач и сопоставлением полученных решений с точными аналитическими и экспериментальными данными.

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах:

1. Г.М. Плаксин, Т.К. Козубская, И.Л. Софронов. Постановка и метод решения задачи бимформинга для локализации акустического источника на основе данных вычислительного эксперимента // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2021, том 61, стр. 1904-1926// Comput. Math. Math. Phys. 2021, 61(11), pp. 1864–1885. [WOS, SCOPUS]
2. A. Karakulev, T. Kozubskaya, G. Plaksin, I. Sofronov. FfowcsWilliams –Hawkings analogy for near-field acoustic sources analysis // Int. J. Aeroacoustics. 2022, 21(5-7), pp. 457–475 [WOS, SCOPUS]
3. T.K. Kozubskaya, G.M. Plaksin, I.L. Sofronov. On Numerical Beamforming for Correlated Dipole-Type Sources // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2023, Vol. 63, No. 11, pp. 2162–2175 [WOS, SCOPUS]
4. Г.М. Плаксин, Т.К. Козубская, И.Л. Софронов. О численном бимформинге для идентификации акустического источника по данным суперкомпьютерного моделирования / Доклады российской академии наук Раздел (Математика, Информатика, Процессы управления), 2024, том 64, с. 52–59// Doklady Mathematics, 2024, Vol. 110, No. 2, pp. 435–441 [WOS, SCOPUS]
5. T.K. Kozubskaya, G.M. Plaksin, I.L. Sofronov, P.V. Rodionov. Numerical Study of Noise Sources Generated by Wing of Supersonic Business Jet in Landing Mode // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2025, 12(1), pp. 112–132. [SCOPUS]

6. Г.М. Плаксин. Реализация метода численного бимформинга в программном комплексе NOISEtte //Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2025. № 79. 16 с. EDN: TJIWXT <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2025-79>

Личный вклад соискателя заключается в том, что все численные исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично автором в процессе его научной деятельности. Материалы из совместных публикаций, использованные в работе, содержат оригинальные результаты автора. Автор внес вклад в построение модели источника, в формулирование постановок рассматриваемых задач, а также в разработку численного метода. Автором был реализован программный модуль, значительно дополняющий функционал программного комплекса NOISEtte.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в частности, пунктам:

- п. 1 Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;
- п. 2 Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;
- п. 3 Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;
- п. 8 Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

На основании полученного в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН экспертного заключения, диссертация Плаксина Г.М. не содержит информации ограниченного доступа и может быть опубликована в открытой печати.

Диссертация «Метод численного бимформинга в вычислительном эксперименте в аэроакустике» Плаксина Глеба Максимовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании научного семинара “Новые методы решения задач прикладной математики” им. К.И. Бабенко ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Присутствовало 15 чел.

Выступили с положительной оценкой диссертации: В.Т. Жуков, Т.К. Козубская, И.С. Меньшов.

Результаты голосования: "за" – 15 чел., "против" – нет, "воздержалось" – нет, протокол № 1 от 20.11.2025 г.

Руководители

Жуков Виктор Тимофеевич
доктор физ.-мат. наук, гл. н. с., и.о. зав. отд. №8

Рыков Юрий Германович
доктор математических наук, ст. н. с. отд. №4

Ученый секретарь

Борисов Виталий Евгеньевич
кандидат физ.-мат. наук, ст. н. с., отд. № 11