

УТВЕРЖДАЮ



Управляющий директор
ПАО «Яковлев»

В.Б. Прутковский

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Диссертация Плаксина Глеба Максимовича посвящена методу численного бимформинга, то есть методу идентификации акустических источников, возникающих при турбулентном обтекании твердого тела воздушным потоком, в применении к данным, полученным в результате проведения вычислительного эксперимента.

Актуальность темы

Снижение уровня шумового загрязнения, производимого летательными аппаратами, является одной из определяющих проблем при конструировании новых самолетов. Такое шумовое загрязнение может негативно сказываться на качестве жизни проживающих вблизи аэропортов людей. Поэтому существуют нормативы, определяемые Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) по шуму, производимому самолетами на местности. В авиационной отрасли существует потребность в разработке технологий, позволяющих впоследствии снижать интенсивность акустических источников, возникающих на режиме взлета и посадки самолета.

При растущей роли вычислительного эксперимента, а именно Computational Fluid Dynamics (CFD) моделирования в авиационных приложениях, возникает запрос на способы обработки и анализа больших массивов результирующих данных. Такие данные могут содержать информацию об аэроакустических свойствах изучаемого объекта, в частности, о возникающих в результате турбулентного обтекания акустических источниках. Подходы для идентификации таких источников называются подходами бимформинга. В применении к данным физических экспериментов они являются хорошо изученными, им посвящено множество работ и практических исследований. Однако в случае вычислительного эксперимента в научной литературе присутствует дефицит подобных техник. Это обуславливает актуальность разработки такого подхода с точки зрения анализа данных, полученных в ходе CFD-моделирования.

Научная новизна

В диссертационной работе Плаксина Г.М. в качестве модели акустических источников, формируемых при обтекании элементов компоновки летательного аппарата, предложено использовать решение обратной задачи по восстановлению непрерывной функции источника в правой части в уравнении Гельмгольца. В свою очередь, в существующих подходах бимформинга распределенный источник, как правило, представляется в виде набора некоррелированных излучателей. В случае физического эксперимента такое ограничение является вполне оправданным, однако в случае накопления данных в ходе проведения вычислительного эксперимента допускается постановка задачи и для коррелированных источников. Предложенная конечно-элементная аппроксимация функции источника в совокупности с физически обусловленными ограничениями на параметры дискретизации позволяют решать дискретную задачу, сводящуюся к системе линейных алгебраических уравнений с хорошо обусловленной матрицей, даже без использования явно заданной регуляризации. Построенный численный метод был реализован автором в качестве программного модуля комплекса NOISEtte и существенно расширил его функционал.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается верификацией численного метода на тестовых задачах, высоким уровнем согласования получаемых решений для промышленно-ориентированных задач с экспериментальными данными и с известными теоретическими предположениями о механизмах генерации шума, сравнением решения прямой и обратной задач аэроакустики.

Практическая значимость

Предложенный метод численного бимформинга потенциально может быть использован на этапе проектирования летательных аппаратов, позволяя выявлять локализацию наиболее интенсивных акустических источников и путем внесения изменений в конструктивные особенности элементов компоновки отслеживать изменение интенсивности таких источников. Такая технология в перспективе может быть использована для снижения уровня производимого самолетом шума, а также для исследования механизмов его генерации.

В дополнении к физическому эксперименту, совместное применение натурного и численного бимформинга может предоставить более целостную картину изучаемых процессов.

В программный модуль в составе комплекса NOISEtte реализован параллельный алгоритм, в том числе, для расчетов на графических процессорах. Это позволяет быстро проводить массовые расчеты и получать в результате распределение интенсивности акустических источников по полосам частот.

Апробация

Материалы, представленные в диссертации, представлялись на десяти международных и российских конференциях. По теме диссертации опубликовано шесть работ в рецензируемых журналах. Из них 4 статьи входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 4 индексируются в базе Web of Science (WoS) и 5 — в базе Scopus.

Соответствие паспорту специальности ВАК

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности ВАК 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», в частности, пунктам:

п. 1 Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки).

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.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка источников литературы. Полный объем диссертации составляет 125 страниц. Список источников литературы содержит 63 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, научная новизна диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, проведен обзор существующих подходов бимформинга и решения подобных обратных задач, обосновывается практическая значимость работы и достоверность результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается прямая и обратная задачи акустики. Формулируется задача численного бимформинга в виде обратной задачи по восстановлению непрерывной правой части в уравнении Гельмгольца для подвижной среды для источников монопольного, дипольного типа и смешанного типов. Рассматриваются допустимые постановки с единственным решением задачи.

Во второй главе предлагается дискретная формулировка задачи численного бимформинга для источников монопольного, дипольного и смешанного типов на основе конечно-элементной аппроксимации непрерывной функции источника и физически обусловленные ограничения на параметры дискретизации, которые позволяют свести исходную задачу к решению системы линейных алгебраических уравнений с хорошо обусловленной матрицей. Приводятся результаты верификации метода как для монопольных, так и дипольных и смешанных источников. Восстановление референсных функций в тестовых задачах происходит с высокой точностью.

Глава 3 посвящена программной реализации метода численного бимформинга. Освещается основной алгоритм, рассматриваются детали предложенной параллельной реализации, в том числе, для проведения расчетов на графических процессорах.

В четвертой главе приводится методика расчета по алгоритму численного бимформинга на примере модельной задачи по идентификации акустических источников в применении к результирующим данным CFD-моделирования турбулентного обтекания трехкомпонентного прямого крыла 30P30N с

выпущенной механизацией. В качестве первого шага предложено выбрать геометрическую конфигурацию линии источника и микрофонов, доставляющую устойчивость решения. Для каждого типа источника предложено использовать свою конфигурацию. Далее для выбранных конфигураций предложено проводить расчеты по методу численного бимформинга. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными и с результатами анализа ближнего поля, проведенными другими авторами. Выявлен высокий уровень согласования. Также рассматривается постановка для составного источника с точечными и распределенными компонентами. Достигается низкая относительная невязка и высокий уровень согласования исходных и восстановленных данных на микрофонах.

В пятой главе приводятся результаты расчетов по методу численного бимформинга для промышленно-ориентированной задачи по идентификации источника на крыле сверхзвукового пассажирского самолета (СПС) на режиме посадки. Полученные результаты для источников монопольного и дипольного типа хорошо согласуются с теоретическими представлениями о механизмах генерации шума для подобного типа крыльев. Проведена проверка корректности полученных результатов путем сравнения сигналов в среднем поле, полученных при помощи акустической аналогии Фокса Уильямса – Хокинга и восстановленных с помощью численного бимформинга. Достигается высокий уровень согласования таких сигналов, что говорит о том, что обратная задача решена корректно.

В заключении приводятся основные результаты работы.

По содержанию автореферата можно сделать следующие замечания:

1. В Главе 4 при идентификации источников монопольного, дипольного и смешанного типов на крыле 30P-30N относительная невязка принимает значения порядка 1, что может говорить о недостаточной точности получаемых результатов.
2. В Главе 4 у найденного источника монопольного типа в отличие от экспериментальных данных возникают пики на закрылке. Не дано объяснение возникновения этих пиков.
3. В Главе 5 при идентификации источника на крыле сверхзвукового пассажирского самолёта на режиме посадки найден источник, смещённый от задней кромки вниз по потоку. Общеизвестно, что на задней кромке крыла на таком режиме действительно образуется дипольный источник. Не объяснено его смещение вниз по потоку.

Отмеченные недостатки не влияют на научный уровень и практическую значимость представленной диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и раскрывает её основные положения. Рассмотрение диссертации позволяет сделать заключение, что диссертация Плаксина Г.М. является завершённой научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор - Плаксин Глеб Максимович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по

специальности: 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании НИО аэродинамики, состоявшемся 14 мая 2026 года.

Начальник НИО –
заместитель Главного конструктора
по аэродинамике
Филиала ПАО «Яковлев»
«Региональные самолеты»

Бабулин Андрей Александрович

Начальник департамента
аэродинамических характеристик
Филиала ПАО «Яковлев»
«Региональные самолеты»
доктор технических наук (специальность
05.07.01 -
«Аэродинамика и процессы
теплообмена
летательных аппаратов»)

Шевяков Владимир Иванович

Главный специалист департамента
аэродинамических характеристик
Филиала ПАО «Яковлев»
«Региональные самолеты»
кандидат физико-математических наук
(специальность 1.1.9 -
«Механика жидкости, газа и плазмы»)

Березко Максим Эдуардович

115280, Москва,
ул. Ленинская Слобода, д. 26, стр. 5,
Тел.: +7 916 959 38 19,
e-mail: shevvi@mail.ru

Подписи Андрея Александровича Бабулина, Владимира Ивановича Шевякова и Березко Максима Эдуардовича удостоверяю.

Руководитель направления
по работе с филиалами и ДЗО
департамента управления персоналом
ПАО «Яковлев»



Синицын Игорь Викторович