

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

Диссертационная работа Плаксина Глеба Максимовича посвящена разработке метода идентификации акустических источников (численного бимформинга), возникающих при турбулентном обтекании твердых тел по данным вычислительного эксперимента для авиационных приложений.

**Актуальность работы**

Разработка метода идентификации акустических источников по данным вычислительного эксперимента (данным CFD (Computational Fluid Dynamics) – расчетов) является актуальной задачей современной авиационной промышленности. Создание новых самолетов требует учета постоянно ужесточающихся международных нормативов по снижению шума летательных аппаратов. Следовательно, необходима разработка технологии, позволяющей оценивать мощность и локализацию акустических источников на этапе проектирования для последующего возможного изменения конструктивных особенностей с целью уменьшения шума, производимого летательным аппаратом. Развитие подобных подходов, заключающихся в разработке математической модели и численного алгоритма, имеет важное значение.

**Научная новизна работы**

Технология бимформинга в применении к данным CFD-расчетов имеет слабое представление в научных публикациях. В основном для решения подобных задач используются хорошо изученные методы натурального бимформинга, то есть бимформинга, разработанного для применения к данным физического эксперимента. Такие подходы имеют ограничения, например, предположение о некоррелированности источников. Вычислительный эксперимент имеет ряд особенностей, таких как, например, возможность измерять акустическое поле в произвольном наборе точек как в плане их количества, так и в плане геометрической конфигурации, расстояния до источника, определяя, тем самым, виртуальные микрофоны. Это позволяет избавиться от предположения о некоррелированности. Техники натурального бимформинга не позволяют в полной мере учитывать такие особенности, поэтому для обработки данных CFD-расчетов возникает потребность в разработке отдельного подхода.

В диссертационной работе предложен вариант численного бимформинга для обратной задачи восстановления правой части уравнения Гельмгольца. Разработка численного алгоритма решения основана на введении физически обоснованных ограничений на параметры дискретизации и сведении обратной задачи к системе линейных алгебраических уравнений.

Для программного комплекса NOISEtte, позволяющего численно решать газодинамические задачи, разработан модуль численного бимформинга, тем самым, расширив возможности основного программного пакета. Представлена и параллельная реализация алгоритма, в том числе, вариант для расчета на графических процессорах.

**Практическая значимость**

В работе представляется подход бимформинга, который может быть использован на этапе промышленного проектирования летательных аппаратов. Быстрая скорость обработки данных вычислительного эксперимента при помощи реализованного программного модуля позволяет проводить массовые расчеты, получая оценки мощности акустических источников и их локализацию для различных полос частот. Тем самым, возникает возможность формировать достаточно полную картину распределения акустической интенсивности на поверхности конструктивных элементов самолетов. Разработанный подход и программный модуль может в дальнейшем использоваться для решения промышленных задач.

## **Степень обоснованности и достоверности**

Построенный метод численного бимформинга, во-первых, верифицируется на синтетических данных, показывая высокую точность решения тестовых задач. Во-вторых, производится сравнение результатов, полученных численным бимформингом, с экспериментальными данными, и показан хороший уровень соответствия. Результаты решения промышленной задачи отвечают теоретическим предположениям о механизмах генерации шума и результатам применения альтернативных способов анализа акустических полей, получаемых при проведении CFD-расчетов.

## **Структура диссертации**

Диссертация содержит 125 страниц, включая введение, пять глав, заключение, список литературы, состоящий из 63 источников, и список публикации автора по теме диссертации. В работе присутствуют 66 рисунков и 4 таблицы.

## **Содержание диссертационной работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, практическая значимость и научная новизна, приведен обзор литературы, степень разработанности темы и основные методы решения подобных задач, обсуждается достоверность результатов, формулируются цели и задачи работы, а также указываются основные положения, выносимые на защиту. Указаны российские и международные конференции, на которых были представлены результаты диссертации.

**В первой главе** приводится математическая формулировка задачи. Рассматривается прямая задача аэроакустики, заключающаяся в определении акустического поля в произвольных точках пространства, и линейные модели, позволяющие экономично решать прямую задачу. В свою очередь, задача численного бимформинга в строгой постановке представляет из себя обратную задачу по восстановлению непрерывной функции источника в правой части в уравнении Гельмгольца для подвижной среды для плотности простого слоя (монопольный тип источника), а также плотностей простого и двойного слоя для источников дипольного и смешанного типа. Данные постановки обладают свойствами существования и единственности решения.

**Во второй главе** формулируется дискретная задача и рассматривается метод ее решения. Основным результатом данной главы является предложение применения конечно-элементного представления для дискретизации задачи, который сводит ее к задаче по минимизации нормы невязки исходных данных на микрофонах и полученных линейным переносом от источника. Вводятся физически обусловленные ограничения на шаги сетки источника и микрофонной решетки, которые в совокупности с методом наименьших квадратов позволяют получить систему линейных алгебраических уравнений с хорошо обусловленной матрицей без использования регуляризации с явно заданным параметром. При решении тестовых задач численно получены универсальные диапазоны параметров дискретизации, приводящих к получению матрицы с малым числом обусловленности. Построенный как для источников монопольного, так и дипольного и смешанного типов метод верифицируется на задачах с синтетическими данными, показывая высокую точность их решения.

**Третья глава** посвящена программной реализации метода численного бимформинга. Приводится общая структура модуля и основного алгоритма. Рассматривается алгоритм вычисления интегральных сверток базисных функций конечно-элементного представления для треугольных сеток с функцией Грина. Обсуждается вариант параллельной реализации алгоритма, в том числе, для вычисления на графических процессорах и гетерогенных вычислениях.

**В четвертой главе** рассматривается решение модельной задачи по идентификации акустических источников на сегменте прямого трехкомпонентного крыла 30P30N с выпущенной механизацией на режиме посадки по результатам численного моделирования его турбулентного обтекания. Рассматриваются геометрические конфигурации сетки источника и микрофонной решетки, доставляющие устойчивость решения для различных типов источника. Устойчивость конфигураций исследуется на тестовых задачах с зашумленными данными, линейно перенесенными от случайно заданных референсных источников. Для выбранных конфигураций решается задача численного бимформинга для данных из CFD-расчета, рассматриваемого в сторонней статье. Результаты для монопольного источника сравниваются с экспериментальными данными, также приведенными в сторонней статье, достигается высокий уровень согласования. Для

дипольного источника производится сравнение поля акустического давления, формируемого найденным источником, и из стороннего CFD-расчета. Выявлено качественное сходство рассматриваемых полей с наличием характерной для диполя картиной. Также для данной модельной задачи приводится и решается постановка с комбинированным источником, состоящим из распределенной и точечных дипольных составляющих. Для данной постановки удается получить высокий уровень согласования исходных и восстановленных сигналов с относительной невязкой, существенно более низкой, чем для чисто монопольного, дипольного или смешанного источника.

**Пятая глава** посвящена решению промышленно-ориентированной задачи по оценке интенсивности и локализации акустических источников, возникающих при турбулентном обтекании крыла модели прототипа сверхзвукового пассажирского самолета. Приводятся результаты для источников монопольного типа и дипольного с моментом, ориентированным по нормали к поверхности источника. Результирующий источник локализован за задней кромкой крыла в направлении потока, что хорошо согласуется с теоретическими предположениями о механизмах генерации шума для подобного типа крыльев, а также с результатами анализа ближнего поля. Корректность полученных результатов проверяется при помощи сравнения сигналов, посчитанных в среднем поле по акустической аналогии Фокса Уильямса – Хокинга по исходным данным из CFD-расчета и линейно перенесенных от найденных источников. Показан высокий уровень соответствия таких сигналов

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.**

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в шести научных статьях, перечень которых приведен в конце работы. Из них 4 статьи входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 4 индексируются в базе Web of Science (WoS) и 5 — в базе Scopus.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертацию.

#### **Замечания**

1. Стр. 27. Ставится обратная задача бимформинга по определению правой части в уравнении Гельмгольца. Желательно более четко математически сформулировать прямую (корректную) задачу, а затем обратную – где и какие данные обратной задачи измеряются.
2. Стр. 32-33. Интегральные уравнения 1 рода являются некорректными задачами, небольшие помехи в данных могут привести к большой неустойчивости решения. При этом «рассматриваемая дискретизация задачи имеет регуляризирующие свойства и позволяет получить дискретную задачу численного бимформинга, имеющую единственное и устойчивое решение». Какое решение находит регуляризирующий алгоритм? Возможно, что априорное предположение о форме правой части позволяет достаточно точно восстановить решение.
3. Для более точного понимания расчетов хорошо было бы построить графики зависимости числа обусловленности матрицы от разбиений сетки, расстояния между источниками и приемниками, длиной волны.
4. В главе 2 желательно привести характерные частоты, расстояния и длины волн для оценки степени некорректности задачи. Указать на стр. 40 в каких единицах приведено расстояние между микрофонами и источниками.
5. Подписи графиков, например, 2.11 желательно сделать более информативными. Английские надписи на графиках желательно дублировать в описании рисунков.
6. Стр. 44. Не совсем понятно, каким частотам соответствуют данные длины волн.
7. Стр. 79. Не указано на каком отрезке задается равномерное распределение. Желательно было исследовать влияние уровня шума (10%, 25% и т.д.) на разрешимость обратной задачи.
8. Стр. 104. Желательно указать весь диапазон спектра, разрешаемом при проведении CFD-моделирования и более детально пояснить с чем связан выбор именно этой частоты.
9. Есть ли перспективы применения разработанного алгоритма для восстановления более общего вида правой части уравнения Гельмгольца?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

**Заключение**

Таким образом, диссертация Плаксина Глеба Максимовича является научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям. В том числе соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Шишленин Максим Александрович  
доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник,  
ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирская обл., Новосибирск, Академика Коптюга, 4,  
тел.: 7(383) 329-76-19, e-mail: [maxim.shishlenin@math.nsc.ru](mailto:maxim.shishlenin@math.nsc.ru)

Я, Шишленин Максим Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с деятельностью диссертационного совета, и на их последующую обработку.

12.05.26

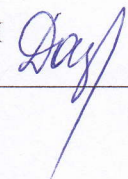


(подпись)



(расшифровка подписи)

Подпись главного научного сотрудника  
лаборатории прикладных обратных задач  
ФГБУН Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН  
М.А. Шишленина удостоверяю:  
Ученый секретарь Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН  
к.ф.-м.н.



Н.А. Даурцева