

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук, старшего научного сотрудника Боснякова Сергея Михайловича на диссертационную работу Родионова Павла Вадимовича по теме «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **Актуальность избранной темы диссертации**

Постоянное увеличение числа доступных технологий в области гражданского авиастроения, включая средства проектирования, стимулирует создание новых методов расчета. Современные компьютеры позволяют решать многодисциплинарные задачи, среди которых особое место занимают такие дисциплины, как аэродинамика, прочность конструкций и аэроакустика. Решение задач аэроакустики в наибольшей степени продиктовано необходимостью удовлетворения текущим сертификационным требованиям по шуму на местности, вводимым и поддерживаемым Международной организацией гражданской авиации (ICAO) с целью уменьшения шумового загрязнения вблизи аэропортов. Другим немаловажным стимулом к решению аэроакустических задач является желание повысить комфорт пассажиров. В настоящее время для решения поставленных задач широко применяются суперкомпьютеры, которые требуют разработки как новых вычислительных методов, так и специальных подходов к программированию. На передний план выходит проблема ресурсоемкости расчетных технологий, которая не должна

решаться за счет понижения точности и надежности расчетных данных. Решению указанной проблемы во многом способствуют численные методы повышенного порядка точности. Данная работа посвящена разработке и внедрению в практику такого метода. Этим определяется ее актуальность.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Полный объем диссертации составляет 123 страницы, включая 66 рисунков и 12 таблиц. Список источников литературы содержит 120 наименований.

**Во введении** указаны актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи работы, определены методы исследования, отмечена научная новизна, обоснованы достоверность и практическая значимость результатов. Кроме того, автором выделены положения, выносимые на защиту, указан личный вклад, отмечены основные публикации и выступления на конференциях по теме диссертации, выражена благодарность за содействие работе.

**В первой главе** «Методика численного моделирования обтекания планера самолета» описывается физическая и математическая постановка задачи, подробно обсуждаются «дуальные ячейки» для смешанно-элементной сетки в вершинно-центрированной формулировке, дается описание «реберно-ориентированных схем», включая квазиодномерные реконструкции типа EBR (Edge-Based Reconstruction) применительно к EBR3, EBR5 и EBR-WENO5 (Weighted Essentially Non-Oscillatory scheme). Формулируются основные положения методики моделирования внешнего обтекания летательных аппаратов в рамках подхода RANS (RANS-LES) (Reynolds-Averaged Navier-Stokes - Large Eddy Simulation) с применением неструктурированных сеток.

**Во второй главе** «Схема EBR с криволинейными реконструкциями» приведены аргументы, подтверждающие недостаточную точность метода

вследствие применения прямолинейных реконструкций для аппроксимации конвективных потоков в существующих EBR схемах. Для улучшения расчетной схемы предлагается применять реберно-ориентированные криволинейные реконструкции. Рассмотрены два случая: 1) структурированные сетки; 2) неструктурированные призматические сетки в пограничных слоях. Подробно описаны алгоритмы выбора узлов и предложены шаблоны действий в случае непредвиденных обстоятельств. Процедуры расписаны до пошагового уровня. Выполнено расширение области применимости схем EBR с криволинейными реконструкциями на смешанно-элементные неструктурированные сетки. Показано, что в случае невозможности построения короткого криволинейного шаблона можно использовать на указанном ребре стандартные прямолинейные реконструкции.

**В третьей главе** «Реализация схемы EBR PL в программном комплексе NOISEtte» подчеркивается, что предложенная схема реализована в качестве отдельного модуля в программном комплексе NOISEtte. Приведена блок-схема модуля и описан пошаговый алгоритм его работы. Выписан алгоритм инициализации призматических слоев и обсуждены способы поиска точек для криволинейной реконструкции. Отмечено, что проверка вектора внешней нормали необходима для корректного построения криволинейной реконструкции.

**В четвертой главе** «Тестирование разработанного метода на модельных задачах» приведены результаты тестирования разработанного модуля с применением следующих задач: 1) распространение акустической волны в бесконечном цилиндрическом канале при наличии вязкости и теплопроводности; 2) обтекание сегмента с профилем NASA 0012; 3) обтекание винта вертолета на режиме висения; 4) обтекание геометрии NASA CRM-HL; 5) обтекание треугольного крыла. Приведены физическая и математическая постановки задачи. Выполнено сопоставление результатов, полученных различными методами. В ряде случаев проведено сопоставление результатов расчета и эксперимента.

**В пятой главе** «Моделирование шума крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки» представлены результаты численного исследования шума крыла прототипа СПС на режиме посадки при помощи вихререзающего метода, основанного на подходе DDES (Delayed Detached Eddy Simulation). Подробно описаны физическая и вычислительная постановки. Рассмотрен интегральный метод FWH (Ffowcs Williams – Hawking) для расчета звука в дальнем поле. Проведено сопоставление результатов прямого расчета методами DDES и FWH. Выполнена оценка аэродинамических характеристик крыла самолета с выпущенной посадочной механизацией.

**В заключении** обобщаются основные результаты работы.

**Список сокращений** составлен с выполнением требований ГОСТ Р 7.0.11-2011 и позволяет легче воспринимать текст диссертации.

**Список источников литературы** оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 и включает необходимый минимум источников литературы.

### **Новизна исследования**

Совместный расчет аэродинамических и акустических характеристик крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета обладает всеми признаками новизны. Полученные результаты являются уникальными и могут использоваться в качестве базовых для проведения сопоставлений в будущем, когда к этой задаче «подойдут» другие исследователи. Для получения надежных данных автор провел существенную модификацию метода EBR, которая позволяет учитывать кривизну поверхности при проведении расчетов на редких сетках. Аналогов такого подхода к модификации EBR нет. Разработанный автором метод внедрен в новую версию программы NOISEtte, которая настроена для работы с графическими процессорами. Такой подход гарантирует как минимум десятикратное ускорение расчета.

## **Значимость для науки и практики полученных результатов**

В научном плане автор подошел к важному «порогу». Потенциал численных методов, основанных на линейной реконструкции, во многом исчерпан. В настоящее время идет интенсивная работа по переходу на криволинейные сетки (проекты EU ADIGMA, EU TILDA, EU IDINOM). Так, для реализации методов четвертого порядка точности «Галеркина с Разрывными Базисными Функциями» используются криволинейные сетки на основе полиномов третьей степени. Готовится техническая база в виде программ для работы с криволинейными геометриями и сетками (экспериментальная версия программы типа ICEM CFD). Автор подметил эту важную тенденцию, но, к сожалению, пока остался в рамках линейных представлений. Тем не менее, он сделал шаг в правильную сторону, что является значимым для науки. С точки зрения практики, автор подготовил новую программу, которая, безусловна, будет полезной при проведении промышленных расчетов.

## **Обоснованность и достоверность основных положений, результатов и выводов диссертации**

В заключении к диссертации сделано 5 выводов. Это позволяет проанализировать их шаг за шагом.

1. Вывод 1 не вызывает сомнений. В диссертации «разработана методика моделирования турбулентных течений и создаваемых ими акустических полей ... с использованием схем повышенной точности на неструктурированных сетках». Достоверность данного вывода подтверждается приведенными расчетами и сопоставлениями с экспериментальными и расчетными данными других авторов.
2. Вывод 2 гласит, что «разработана новая схема, позволяющая в расчетах задач внешнего обтекания повысить точность численных результатов за счет применения криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток». Указанная схема подробно описана в Главе 2 и ее оригинальность не вызывает сомнения, так как в настоящий

момент отсутствуют публикации с описанием подобных схем. В тестах показано, что на редких сетках предложенная схема дает заметное преимущество перед исходным вариантом, что является обоснованием тезиса о повышении точности.

3. Вывод 3 гласит, что «в составе программного комплекса NOISEtte при сохранении высокой параллельной эффективности и масштабируемости кода создан модуль, реализующий новый тип реконструкций». Это подтверждается свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665709 (19.07.2023), разработанной автором.
4. Вывод 5 гласит, что «с использованием разработанной методики вихреразрешающего моделирования проведены передовые суперкомпьютерные расчеты по моделированию турбулентного течения вблизи крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки и получены оценки спектральных характеристик производимого им шума для ближнего и дальнего полей». Подтверждение обоснованности указанного вывода находится в тексте диссертации (Глава 5).

Таким образом, можно сделать заключение о том, что основные положения, результаты и выводы диссертации являются обоснованными и достоверными.

**Оценка содержания диссертации, ее завершенности в целом,  
замечания по оформлению**

Содержание диссертации полностью соответствует цели работы и сформулированным задачам. Диссертация является цельным и завершенным исследованием с четкой структурой:

1. Предложена существенная модификация известного метода расчета;
2. Новый алгоритм реализован в виде программного модуля;
3. Проведено подробное тестирование и решена практически важная задача.

Тем не менее, следует указать на недочеты при оформлении диссертации:

1. В разделе 1.1 «Физическая постановка» автор значительное внимание уделяет задаче обтекания модели в условиях аэродинамической трубы, хотя в самой диссертации исследования на эту тему отсутствуют.
2. В работе отсутствует раздел «Критический анализ источников литературы». Это создает неудобства при прочтении работы. Так, обзор литературы частично распределен между разделами «Степень разработанности темы исследования» и «Методы исследования». При этом крайне тяжело выделить ту часть обзора, которая относится непосредственно к предлагаемому методу.
3. В разделе «Заключение» автор не сформулировал рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

#### **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

Все основные результаты, полученные в данной диссертации, опубликованы в научных изданиях, включенных в список ВАК:

- 1) Результаты, сформулированные в пункте 1 заключения диссертации, изложены в статьях 5 и 6 списка публикаций автора;
- 2) Результаты, сформулированные в пунктах 2–3 заключения диссертации, изложены в статьях 1–3 списка публикаций автора. Кроме того, имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665709 (19.07.2023) «Программный модуль EBR-PL построения криволинейных реконструкций для аппроксимации конвективных потоков в призматических слоях неструктурированной смешанно-элементной сетки»
- 3) Результаты, сформулированные в пункте 4 заключения диссертации, изложены в статьях 1–4 списка публикаций автора.
- 4) Результаты, сформулированные в пункте 5 заключения диссертации, изложены в статье 5 списка публикаций автора.

## Дискуссионные положения и замечания по диссертации

При общей положительной оценке диссертации Родионова П.В. следует отметить ряд дискуссионных вопросов и замечаний:

1. В ряде случаев отсутствует четкое определение важных понятий, например, на стр. 34 автор пишет: «После выхода моделируемого течения на установившийся режим целесообразно начать накопление данных, необходимых для расчета целевых характеристик». Вопрос: «Что такое установившийся режим?»
2. Наблюдается небрежная работа с графическим материалом, например, на рисунках 12, 14 для течений с разными пределами использованы палитры с идентичной цветовой гаммой. Это затрудняет восприятие материала. Приходится всматриваться в очень маленькие цифры. Другой пример, на рисунке 41 предлагается сравнивать расчет и эксперимент при разных ракурсах.
3. Наблюдается небрежная работа при построении графиков, например, на стр. 68 размер экспериментальных маркеров на графике распределения коэффициента  $C_p$  приблизительно составляет 0.1. Но это равно цене деления на оси  $Y$  данного графике. Кроме того, обычно точность определения экспериментальных значений  $C_p$  не хуже, чем 0.01. Вопрос: «Как проводить сопоставления в таких условиях?»
4. В ряде случаев отсутствует тщательный анализ результатов, например, на рисунках 42–44 наблюдается неприемлемо большое расхождение расчетных и экспериментальных данных в области предкрылков и закрылков. Автор при этом пишет, что «на предкрылках и закрылках, особенно в сечениях, содержащих отрывы потока, соответствие численных и экспериментальных данных несколько снижается». Вопрос: «Может, это является местом, где надо приложить усилия и, используя новый точный метод, добиться лучшего соответствия?» Кроме того, в таблице 12 величины ошибок в процентах отличаются от величин, указанных в диссертации. Вопрос: «почему?»

5. В ряде случаев трудно найти логическое объяснение действиям автора, например, в Таблице 10 нет сопоставления результатов EBR и EBR PL. Вопрос: «Не считает ли автор естественным при модификации метода, прежде всего, сравнивать «старые» и «новые» результаты с целью оценки эффективности новшества?»
6. Некоторые физические результаты автора требуют пояснения, например, на стр. 83 автор пишет: «Отметим, что использование модели SST RC привело к возникновению ложного «взрыва» вихря на обеих сетках. Данное наблюдение подтверждается повышением коэффициента давления на 0.3 в сечении  $x/cr = 0.8$  на подробной сетке». Как известно, интенсивность вихря измеряется циркуляцией. В работе нет исследования этого параметра. Вопрос: «Что называется «взрывом вихря?» «Каким образом повышение статического давления связано со взрывом вихря?»
7. Хочется посоветовать автору иногда быть скромнее, например, на стр. 108 автор пишет: «проведены **передовые** суперкомпьютерные расчеты». Вопрос: «Может, написать проще: «проведены суперкомпьютерные расчеты?»

**Заключение о соответствии диссертации критериям,  
установленным Положением о присуждении ученых степеней**

Диссертация Родионова Павла Вадимовича на тему «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток» является самостоятельной законченной научно-исследовательской работой. Обоснованность и достоверность выводов, основных научных положений и практических рекомендаций диссертации не вызывает сомнений. Работа содержит практические решения, касающиеся вопросов численного моделирования аэродинамических характеристик и параметров звукового поля летательных аппаратов общего назначения. В рамках диссертационного исследования автором впервые выполнен расчет акустических

возмущений в ближнем и дальнем поле крыла в посадочной конфигурации прототипа сверхзвукового гражданского самолета. При этом использован разработанный автором модуль программы на основе модификации метода EBR, учитывающей криволинейность неструктурированной расчетной сетки в призматических слоях. Применение научных положений диссертационного исследования внесет заметный вклад в развитие теории и практики проектирования пассажирских самолетов общего назначения. Область диссертационного исследования соответствует паспорту научных специальностей ВАК Минобрнауки России, а именно специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в следующих пунктах:

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

Положения диссертационного исследования Родионова Павла Вадимовича, выносимые на защиту, отражены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации. Предложенные автором методики прошли успешную апробацию на ряде научно-практических конференций. Автореферат в полной мере отражает содержание и основные положения диссертационного исследования. По объему полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению полученных результатов, диссертационная работа Родионова Павла

Вадимовича соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 (ред. от 25.01.2024)), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Родионов Павел Вадимович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник,  
доктор технических наук



С.М. Босняков

Адрес: ФАУ ЦАГИ, 140180, г. Жуковский МО, ул. Жуковского д.1  
тел.: (495)556-43-23  
e-mail: [bosnyakov@tsagi.ru](mailto:bosnyakov@tsagi.ru)

Подпись главного научного сотрудника Сергея Михайловича Боснякова заверяю

Ученый секретарь диссертационного  
совета ФАУ «ЦАГИ»,  
доктор физ.-мат. наук, доцент

  


М.А. Брутян

Дата 23.10.24