

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора ИИМ им. М.В. Келдыша РАН
по научной работе
член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук
Якобовский М.В.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Родионов Павел Вадимович работал в отделе № 16 в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности младшего научного сотрудника.

В 2014 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Прикладная математика и информатика». В 2018 г. окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2018 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Козубская Татьяна Константиновна. Работает в должности главного научного сотрудника отдела № 16 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

По итогам обсуждения диссертации «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертации обусловлена растущей востребованностью численного моделирования при проектировании летательных аппаратов. Решение авиационных задач часто требует проведения ресурсоемких суперкомпьютерных расчетов, поэтому точность, надежность и параллельная эффективность используемых численных методов, а также корректность применяемых методик моделирования приобретают ключевую роль для получения достоверных численных результатов.

Целью диссертации является разработка подхода к численному решению задач внешнего обтекания из области аэродинамики и аэроакустики, основанного на моделировании течения

вязкого газа при помощи конечно-объемных вершинно-центрированных схем повышенной точности на неструктурированных сетках с призматическими слоями.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Сформулировать применительно к расчету аэродинамических и аэроакустических задач внешнего обтекания критерии выбора численной схемы и ее параметров, принципы построения расчетной сетки, методы контроля состояния расчета и методику предсказания акустического шума в дальнем поле.
2. Разработать модификацию существующей численной схемы, обладающую повышенной точностью и надежностью при расчетах течений вблизи тел криволинейной формы с пограничными слоями на неструктурированных сетках и допускающую эффективную программную реализацию.
3. Реализовать новую схему в программном комплексе NOISEtte при условии сохранения высокой параллельной эффективности и масштабируемости кода.
4. Выполнить тестирование разработанной схемы и продемонстрировать ее преимущества в задачах распространения акустической волны в цилиндрическом канале, обтекания сегмента с аэродинамическим профилем NASA 0012 и обтекания модельного двухлопастного винта.
5. С использованием разработанной методики выполнить суперкомпьютерный вихререзающий расчет турбулентного течения вблизи крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки и получить оценки спектральных характеристик производимого им шума.

Основные результаты работы:

1. Разработана методика моделирования турбулентных течений и создаваемых ими акустических полей для авиационных приложений с использованием схем повышенной точности на неструктурированных сетках.
2. Разработана новая схема, позволяющая в расчетах задач внешнего обтекания повысить точность численных результатов за счет применения криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток.
3. В составе программного комплекса NOISEtte при сохранении высокой параллельной эффективности и масштабируемости кода создан модуль, реализующий новый тип реконструкций.
4. Продемонстрированы преимущества новой схемы в задачах распространения акустической волны в цилиндрическом канале, обтекания сегмента с аэродинамическим профилем NASA 0012 и обтекания модельного двухлопастного винта.
5. С использованием разработанной методики вихререзающего 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.

Личный вклад соискателя заключается в формулировке методики численного решения аэродинамических и аэроакустических задач внешнего обтекания, разработке новой численной схемы с криволинейными реконструкциями, реализации данной схемы в программном комплексе NOISEtte, проведении всех описанных в работе расчетов и анализе соответствующих численных результатов.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработанная методика численного решения аэродинамических и аэроакустических задач внешнего обтекания является обобщением опыта, накопленного соискателем при проведении крупномасштабных суперкомпьютерных расчетов авиационной направленности. *Впервые* для расчета шума в точках дальнего поля с помощью интегрального метода на основе аналогии Лайтхилла предложено использование более подробного сеточного разрешения на замыкающих акустический источник контрольных поверхностях для уменьшения эффектов, связанных с прохождением через данные поверхности нестационарных турбулентных структур.
2. Разработана *новая* схема аппроксимации конвективных слагаемых в дифференциальных уравнениях, описывающих течение сжимаемой среды. Данная схема принадлежит семейству схем с реберно-ориентированной реконструкцией, приспособлена для расчетов на неструктурированных смешанно-элементных сетках и использует в призматических сеточных слоях в тангенциальном по отношению к обтекаемому телу направлении криволинейные квазиодномерные реконструкции. Применение разработанной схемы позволяет повысить точность численных результатов в задачах внешнего обтекания, характеризующихся высокими значениями числа Рейнольдса.
3. *Впервые* в отечественной практике получены результаты вихреразрешающих суперкомпьютерных расчетов по оценке шума крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки.

В работе используются различные методы обоснования достоверности полученных результатов. Достоверность численных результатов, полученных при решении задачи о распространении акустической волны в цилиндрическом канале, подтверждается сравнением с точным решением. Достоверность результатов расчетов обтекания сегмента с аэродинамическим профилем NASA 0012, модельного двухлопастного винта, треугольного крыла и модельной геометрии планера магистрального самолета в посадочной конфигурации обосновывается сравнением с доступными экспериментальными данными. О корректности моделирования аэродинамики течения вблизи крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки косвенно свидетельствуют представленные результаты тестирования используемых численных подходов и методов на задачах обтекания треугольного крыла и модельной геометрии планера магистрального самолета в посадочной конфигурации ввиду близости режимов обтекания.

Практическая значимость работы имеет три основных направления:

1. Разработанная методика проведения аэродинамических и аэроакустических расчетов внешнего обтекания полезна для исследователей, решающих указанные задачи с использованием моделей RANS или вихреразрешающего моделирования. Она позволяет повысить надежность получаемых численных результатов и улучшить контроль за состоянием проводимых расчетов.
2. Разработанная схема с криволинейными реконструкциями даст возможность повысить точность численных результатов и уменьшить вероятность возникновения численных эффектов, связанных с локальной потерей устойчивости, при проведении расчетов авиационной направленности.
3. Полученные численные оценки шума крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки в точках ближнего и дальнего полей практически полезны для расчета общего шума сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки. Оценки общего шума гражданского самолета важны для проверки соответствия разрабатываемой модели летательного аппарата международным сертификационным нормам.

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

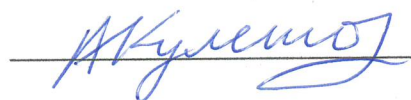
1. Bakhvalov P., Kozubskaya T., **Rodionov P.** EBR schemes with curvilinear reconstructions for hybrid meshes // Computers & Fluids. 2022. V. 239. P. 105352. (WoS, Scopus)
2. Дубень А.П., Козубская Т.К., **Родионов П.В.**, Цветкова В.О. EBR схемы с криволинейными реконструкциями переменных вблизи обтекаемых тел // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2021. Т. 61, № 1. С. 3–19. (перечень ВАК, WoS, Scopus)
3. **Rodionov P.V.** Curvilinear Reconstructions for EBR Schemes On Semi-Structured Meshes // 14th WCCM-ECCOMAS Congress. 2021. V. 700. P. 1–12. (Scopus)
4. Бахвалов П.А., Дубень А.П., Козубская Т.К., **Родионов П.В.** EBR схемы с криволинейными реконструкциями для решения двумерных задач внешнего обтекания // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 152. С. 1–22. (перечень ВАК)
5. Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К., **Родионов П.В.** Подходы к численному моделированию акустического поля, создаваемого крылом самолета с механизацией на режиме посадки // Математическое моделирование. 2022. Т. 34. № 7. С. 24–48. (перечень ВАК, Scopus)
6. Gorobets A.V., Bakhvalov P.A., Duben A.P., **Rodionov P.V.** Acceleration of NOISEtte Code for Scale-Resolving Supercomputer Simulations of Turbulent Flows // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. V. 41. P. 1463–1474. (перечень ВАК, WoS, Scopus)

Диссертация «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток» Родионова Павла Вадимовича 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 «Математическое моделирование» отделов № 15 и № 16 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Присутствовало на заседании 17 чел. Среди них 7 чел. д.ф.-м.н. и 8 чел. к.ф.-м.н. по специальности диссертации.

Выступили с положительной оценкой диссертации: Тишкин В.Ф., Кулешов А.А.

Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол N 3 от 16 мая 2024 г.



Кулешов Андрей Александрович
д.ф.-м.н., г.н.с. отд. № 15