



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

05.11.2024 № 09-21-4-251
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого,
кандидат физико-математических наук

Ю. В. Фомин



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертацию Родионова Павла Вадимовича «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением по 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 темы диссертационной работы. Диссертация П.В. Родионова посвящена развитию методики численного моделирования течений вязкого газа на основе конечно-объемных вершинно-центрированных схем повышенной точности на неструктурированных сетках с призматическими слоями и приложениям данной методики для решения сложных аэродинамических и аэроакустических задач внешнего обтекания. Несомненная актуальность исследований данной направленности обусловлена все возрастающей востребованностью высокоточного численного моделирования турбулентных течений и аэродинамического шума при проектировании летательных аппаратов различного назначения.

Научная новизна результатов работы состоит, прежде всего, в том, что в ней:

- разработана новая численная схема для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях динамики сжимаемой среды; разработанная схема принадлежит семейству схем с реберно-ориентированной реконструкцией и использует в призматических слоях неструктурированной сетки квазиодномерные

003596

криволинейные реконструкции в тангенциальном по отношению к поверхности обтекаемого тела направлении; применение разработанной схемы позволяет существенно повысить точность численного решения задачи внешнего обтекания, характеризующихся высокими значениями числа Рейнольдса.

- впервые в отечественной практике получены результаты вихреразрешающих суперкомпьютерных расчетов по оценке шума крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Разработанная численная схема для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях динамики текучей среды, использующая криволинейные реконструкции, обеспечивает возможность существенного повышения точности результатов и устойчивости расчетов при численном моделировании течений, характеризующихся одновременно высокими значениями числа Рейнольдса, сложностью общей геометрии и выраженной искривленностью обтекаемых поверхностей; задачи такого рода типичны для авиационной отрасли, судостроения и энергомашиностроения. Полученные в работе результаты по оценке шума крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки в точках ближнего и дальнего полей полезны для расчета общего шума сверхзвукового пассажирского самолета на этом режиме. Оценки общего шума гражданского самолета необходимы для проверки соответствия разрабатываемого прототипа летательного аппарата международным сертификационным нормам.

Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских научных и образовательных организациях, ведущих исследования и разработки в области численного моделирования турбулентных течений применительно к решению авиационных задач и родственных задач в смежных отраслях (ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ИТПМ СО РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МАИ, СПбПУ, и др.).

Структура и общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Полный объем диссертации составляет 123 страницы, включая 66 рисунков, 12 таблиц и библиографический список литературы из 120 наименований работ.

Во Введении обосновывается актуальность и практическая значимость темы диссертации, дается обзор методов численного моделирования турбулентных течений и аэродинамического шума, применяемых в области авиационного проектирования, формулируются цель и конкретные задачи диссертационного исследования, дается общая характеристика используемых для их решения методов и формулируются

основные научные результаты работы и положения, выносимые автором на защиту. Приводится список конференций и семинаров, на которых докладывались результаты работы, а также описывается личный вклад соискателя в диссертационное исследование.

В первой главе диссертации дается общее описание физической постановки задачи внешнего обтекания элементов планера самолета и формулировка применяемой методики численного расчета по методу конечных объемов с использованием неструктурированных сеток и реберно-ориентированной реконструкцией требующихся при расчете значений переменных. Общее описание методики дополняется изложением ее применения для RANS расчетов и вихреразрешающих гибридных RANS-LES расчетов.

Во второй главе детально излагается разработанная соискателем численная схема для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях динамики сжимаемой среды; представленная схема, обозначаемая автором как EBR PL, предназначена для применения в призматических слоях неструктурированной сетки и использует квазиодномерные криволинейные реконструкции в тангенциальном по отношению к поверхности обтекаемого тела направлении.

Третья глава посвящена описанию реализации схемы EBR PL в программном комплексе NOISEtte, разрабатываемом в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и уже нашедшем широкое применение для решения сложных аэродинамических и аэроакустических задач на суперкомпьютерах. Принципиально важно, что автору удалось реализовать разработанную им новую схему в программном комплексе NOISEtte при сохранении достигнутой ранее высокой параллельной эффективности и масштабируемости кода.

В четвертой главе представляются результаты методических и тестовых расчетов с применением разработанной соискателем схемы EBR PL с криволинейной реконструкцией в сопоставлении с данными, получаемыми по схеме с прямолинейной реконструкцией, ранее реализованной в коде NOISEtte. Расчеты выполнены для нескольких модельных задач разного уровня сложности: распространения акустической волны в цилиндрическом канале, обтекания сегмента крыла с аэродинамическим профилем NASA 0012, обтекания модельного двухлопастного вертолетного винта. По результатам расчетов достаточно убедительно демонстрируются преимущества схемы EBR PL. Излагаются также результаты тестирования применяемой методики на задачах моделирования обтекания треугольного крыла и модели планера магистрального самолета в посадочной конфигурации.

В пятой главе излагаются результаты вихреразрешающего моделирования турбулентного течения вблизи крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки, включая получение спектральных характеристик

производимого крылом шума в ближнем и дальнем поле. Представленные суперкомпьютерные расчеты, выполненные с применением разработанной методики, обоснованно позиционируются как передовые.

В Заключение формулируются основные результаты работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.

Достоверность заключения о возможности существенного повышения точности численного решения внешних аэродинамических задач посредством применения криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток обоснована обстоятельным анализом результатов сравнительных расчетов, проведенных соискателем для представительной выборки модельных задачи с применением разработанной схемы и исходной схемы с прямолинейной реконструкцией. Достоверность выполненного моделирования аэродинамики течения вблизи крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки во многом обоснована результатами тестирования применяемых подходов и методов на задачах численного моделирования обтекания треугольного крыла и модельной геометрии планера магистрального самолета в посадочной конфигурации. Достоверность представленных в работе численных результатов обеспечена также применением программного комплекса NOISEtte, прошедшего тестирование на широком наборе задач из области струйных течений, турбомашиностроения, аэродинамики и аэроакустики вертолетных винтов, и других.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить следующее.

1. Последовательный обзор литературы по теме диссертации содержится лишь в подразделе «Степень разработанности темы исследования», однако он посвящен преимущественно обзору решаемых уравнений и подходам к моделированию турбулентности. Вопросы, относящиеся к построению шаблона реконструкции, излагаются вперемешку с методами построения схем повышенной точности (TVD, WENO). Вместе с тем, диссертация во многом посвящена разработке новой численной схемы с криволинейной реконструкцией требующихся при расчете значений переменных, однако же, обзор/анализ литературы по этой части далек от полноты.

2. Неясно, почему преимущество новой, разработанной автором схемы с криволинейной реконструкцией не продемонстрировано при решении тестовой задачи об обтекании модельной геометрии пассажирского самолета NASA Common Research Model в конфигурации High Lift (глава 4): в пункте 4.4 приведены результаты, полученные с применением только новой схемы. Или с применением

исходной схемы с прямолинейной реконструкцией не удалось получить сошедшее решение?

3. Приведенные на рис.41 поверхностные распределения коэффициента трения на крыле самолета содержат отчетливо выраженные полосы, ориентированные по потоку, однако в диссертации отсутствуют комментарии, поясняющие причины возникновения этих полос.

4. Отсутствует обоснование выбора существенно дозвуковых режимов при обращении к тестовой задаче о треугольном крыле, применяющемся, как правило, для высокоскоростных летательных аппаратов.

5. Первый пункт в представленных соискателем формулировках научной новизны подразумевает определенные преимущества от использования подробных сеток на поверхностях, формируемых для приложения метода Фокса Уильямса – Хокинга (FWH), в то время как в разделе 5.6 обосновывается применение относительно грубых сеток. Остается непонятным, какие сетки на FWH поверхностях рекомендует использовать автор в рамках своей методики: подробные или грубые?

6. При математической постановке ряда задач область решения, начальные и граничные условия явно не прописываются, читателю приходится их доопределять при рассмотрении результатов решения и картин моделируемого течения.

7. В стилистическом отношении текст слабо проработан. В значительном ряде мест отсутствуют предложения, связывающие один абзац с последующим, что затрудняет восприятие логики изложения. Нередко встречаются различного вида жаргонизмы, несогласованные и/или неудачные выражения, например, «изучать обтекание геометрии», «для RANS моделирования используется только URANS», «расчетную область заполним сеткой» и т.п.

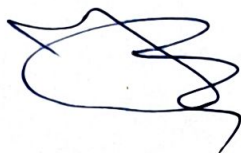
Высказанные замечания относятся, в основном, к представлению материала на страницах диссертации и не изменяют общего положительного впечатления о работе, выполненной П.В.Родионовым. Работа прошла широкую апробацию на конференциях и семинарах, а ее основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и основные результаты

Таким образом, диссертация Родионова Павла Вадимовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи повышения точности численного решения аэродинамических и аэроакустических задач внешнего обтекания при высоких значениях числа Рейнольдса, характерных для авиационных приложений, содержит ряд новых научных результатов, имеющих важное практическое значение. Работа П.В. Родионова соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской

Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института (ФизМех) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) 16 октября 2024 года (протокол № 11-24 от 16.10.2024).

Директор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФизМех СПбПУ, кандидат физико-математических наук (01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы), доцент



Иванов Николай Георгиевич

тел. +7 (812) 552-6621, email: ivanov_ng@spbstu.ru

Профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФизМех СПбПУ, доктор физико-математических наук (01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы), профессор



Смирнов Евгений Михайлович

тел. +7 (812) 552-6621, email: smirnov_em@spbstu.ru

Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

+7 (800) 707-18-99; office@spbstu.ru; <http://www.spbstu.ru>