

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Родионова Павла Вадимовича «Численное моделирование турбулентных течений для авиационных приложений с применением криволинейных реконструкций в призматических слоях неструктурированных сеток» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация Родионова П.В. посвящена разработке подхода к численному моделированию внешнего обтекания летательных аппаратов (ЛА) на режимах полета, требующих применения вихререзающих методов описания турбулентности. Ориентация на получение не только аэродинамических, но и акустических характеристик принята как обязательное свойство разрабатываемого подхода, так как шум планера на режиме посадки представляет практический интерес, и именно этот режим является наилучшим кандидатом на описание в вихререзающей постановке. Следует подчеркнуть, что реализация разрабатываемого подхода ведется в рамках программного комплекса NOISEtte, и работа Павла Вадимовича может оказаться востребованной пользователями данного программного комплекса.

Диссертация представлена на 123-х страницах, содержит введение, пять глав, заключение, список сокращений и список литературы.

Во введении перечислены методы, используемые при аэродинамическом проектировании планера ЛА, и среди них на основе сопоставления достоинств и недостатков очерчено место методов вычислительной газовой динамики (CFD). В подразделе «Степень разработанности темы исследования» раскрыта множественность и разнообразность подходов к численному описанию течения около ЛА, безусловно свидетельствующая о проработанности темы исследований. В свою очередь, обосновано место вихререзающих методов, которые составляют основу NOISEtte. Приведено описание двухступенчатого способа расчета шума в дальнем поле с использованием интегрирования по контрольной поверхности. Присутствует во введении и обзор классов численных схем с указанием используемого класса. Также имеются необходимые подразделы, формулирующие цель работы, задачи работы, методы исследования, подразделы обосновывающие научную новизну и значимость, подтверждающие достоверность результатов и личный вклад автора. Присутствует обязательный список положений, выносимых на защиту.

Глава 1 называется «Методика численного моделирования обтекания планера самолета» и содержит ряд разнородных параграфов, раскрывающих название главы в совокупности. Главу можно разделить на две большие части.

Первая часть состоит из параграфов 1.3-1.6 и описывает принятые в NOISEtte способы построения конечных объемов и способы расчета конвективных потоков консервативных величин на их границах. Как и в большинстве конечно-объемных расчетных схем, для интерполяции газодинамических параметров в каждую точку расчета потоков используются независимые реконструкции по набору значений в одномерно упорядоченном наборе точек. Сетки NOISEtte допускают разнородные элементы и в общем случае не содержат узлов, которые могут быть упорядочены подходящим образом. В параграфе 1.5 описывается способ определения набора точек для интерполяции, не совпадающих с узлами сетки, и использования дополнительной линейной интерполяции для получения значений в них. Очевидна неединственность такого способа, и одно из положений, выносимых на защиту, формулирует новый способ реконструкций. Отметим, что в 1.3-1.6 ничего не сказано об ограничителях, играющих важную роль при использовании методов, основанных на LES (Large Eddy Simulation) с неявной фильтрацией.

Вторая часть состоит из большого параграфа 1.7 и описывает методику моделирования в виде последовательности шагов, выполняемых расчетчиком. Методика сформирована автором на основании своего опыта расчетов. Заострим внимание на некоторых пунктах методики. В пункте 1.7.1 рекомендовано устранить элементы геометрии, которые «с высокой вероятностью не окажут значимого влияния на целевые характеристики течения», но значительно затруднят расчет. Оппонент полностью согласен с этим пунктом вопреки распространенному мнению, что геометрию необходимо воспроизвести максимально точно. Это связано не только с ростом вычислительных затрат, но и с возможностью получения ошибок от плохо разрешенного элемента, значительно превосходящих ошибки от его отсутствия. В подразделе, касающемся построения расчетной сетки, много внимания уделено значениям допустимых сеточных шагов и не говорится о приемлемом темпе нарастания между соседними ячейками, а ведь оба этих параметра в соизмеримой степени влияют на качество решения и вычислительные затраты. Выбор сеточного шага в $\frac{1}{4}$ длины волны может не позволить разрешить значимые турбулентные масштабы, которые зачастую меньше длин акустических волн. В подразделе «Выбор численного метода и его параметров» также рекомендован шаг по времени в $\frac{1}{4}$ периода акустических волн, требующих разрешения. Вес противопоточной схемы в LES области является одним из нескольких параметров, влияющих на воспроизведение инерционного интервала в спектре турбулентных структур, и выбор его минимального значения может быть неоправданным упрощением по сравнению с калибровкой всего комплекса на модельных задачах. В подразделе 1.7.7

говорится о часто встречающейся необходимости уточнения постановки и проведения повторных расчетов. Это утверждение согласуется с опытом оппонента, более того, в процессе уточнения постановки может оказаться полезным решение модельных задач, относящихся к описанию элементов исследуемого течения.

Глава 2 называется «Схема EBR с криволинейными реконструкциями» и содержит описание оригинальной модификации способа реконструкции параметров, выполненной в рамках диссертационной работы. В начале главы описана проблема, с которой сталкивается исходная схема EBR (Edge-Based Reconstruction) на типичных для RANS (Reynolds–Averaged Navier–Stokes) расчетных сетках с соотношением пристеночных и тангенциальных шагов сетки в десятки и сотни раз. Такая сетка однозначно обусловлена соотношением градиентов RANS решения в окрестности стенки и может быть построена только выделением одномерного сеточного направления по направлению стенки. Это, в свою очередь, приводит к формированию ряда поверхностных сеток схожей структуры, последовательно соединенных между собой сеточными линиями стеночного направления, и построению призм со схожими основаниями из соседних поверхностей и короткими боковыми ребрами из линий стеночного направления. Идея метода, заключающаяся в поиске точек интерполяции по тангенциальным к стенке направлениям среди точек поверхности рассматриваемого ребра (i -го узлового слоя), роднит предложенную схему со схемами для структурированных сеток и исключает влияние высоких градиентов потока по направлению стенки на несоответствующие им шаги сетки по тангенциальным направлениям. Решение предложенного типа видится необходимым, так как RANS или пристеночное RANS моделирование используется почти во всех расчетах, описывающих турбулентность. Проблемой предложенного решения может оказаться резкое переключение способа реконструкции с криволинейного на прямолинейный. Оно обязательно произойдет при выходе из призматического слоя или внутри него (параметр θ). Исследование степени влияния такого переключения на качество и устойчивость решения может привести к формулированию функции непрерывного перехода между способами реконструкции в дальнейшем.

Глава 3 называется «Реализация схемы EBR PL в программном комплексе NOISEtte» и содержит описание созданного автором, включенного в NOISEtte и зарегистрированного программного модуля. Так как система NOISEtte формирует и запоминает шаблоны на стадии подготовки к расчету, работа модуля не влияет на производительность в процессе расчета итераций. Из этого же следует отсутствие необходимости в высокой численной эффективности описанных в главе алгоритмов.

Отметим, что реализация полезного алгоритма для комплекса, близкого к массовому использованию, достойна уважения.

Глава 4 называется «Тестирование разработанного метода на модельных задачах» и содержит описание решения множества задач с сопоставлением и анализом результатов для разных вариантов реконструкций. В задачах 4.1-4.3, где влияние модификаций схемы на решения в пристеночных призматических слоях удалось проследить, варианты EBR IJK и EBR PL показали преимущества перед базовой EBR с прямолинейными реконструкциями. Причем при 2D расчетах задачи 4.1 видно, что точность схемы EBR IJK оказывается выше и вдали от стенки, где шаги во всех направлениях близки. Возможно, это связано с тем, что EBR IJK использует для реконструкции значения в имеющихся узлах, а не линейные интерполяции, вносящие ошибки второго порядка малости.

Задачи 4.4 и 4.5 требуют описания сложного течения с отрывами, и влияние модификаций схемы в призматических слоях в них сложно проследить. Они являются подготовительными для основной задачи раздела 5. Особенно это относится к DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) расчету задачи 4.5. Вероятно, он оказал влияние на формирование методики моделирования, описанной в 1.7.

Глава 5 называется «Моделирование шума крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета на режиме посадки» и описывает основной расчет диссертации. Он содержит получение шума в дальнем поле. В главе подробно описаны детали расчетов в RANS и DDES постановках на двух разных расчетных сетках. Сопоставлены аэродинамические характеристики, ожидаемо показавшие снижение коэффициентов подъемной силы при использовании вихреразрешающей постановки. Присутствует анализ влияния расчетной сетки и контрольной поверхности с замыкающими дисками на результаты расчета шума в дальнем поле. Также представлен ряд расчетных спектров в точках ближнего и дальнего поля. На текущий момент нет возможности сравнить результаты расчетов с экспериментом или расчетами других авторов, но такое сравнение было выполнено для сходной задачи параграфа 4.5, и оно показало, что NOISEtte не уступает другим расчетным кодам при воспроизведении течения около треугольного крыла под большим углом атаки.

Автореферат отражает содержание диссертации.


По результатам рассмотрения работы можно сделать следующие замечания.

1. При рассмотрении расчетных схем мало внимания уделено ограничителям, применяемым или отсутствующим при реконструкции.
2. При построении расчетной сетки не обращается внимание на коэффициент нарастания сеточных шагов в соседних ячейках.

3. Выбор сеточного шага и шага по времени нужно связывать не только с длинами акустических волн, но и с масштабами подлежащих разрешению турбулентных структур, так как они могут быть меньше.
4. Выбор веса противопоточной схемы из принципа минимального значения устойчивой работы расчетного алгоритма предпочтительно заменить на калибровку на модельных задачах в комплексе с другими параметрами.
5. Разработанный метод криволинейных реконструкций подразумевает резкое переключение между значительно отличающимися способами реконструкции, что может негативно сказаться на свойствах итоговой расчетной схемы.

Указанные недостатки не снижают научную ценность диссертации Родионова Павла Вадимовича. Тема диссертации является актуальной с высоким уровнем научной проработки. Автором разработана и реализована в рамках программного комплекса NOISEtte расчетная схема, улучшающая свойства данного комплекса. Подчеркнем, что Павел Вадимович продемонстрировал умение внедрять создаваемые модули в существующий комплекс программ. Диссертация является законченным научным исследованием, соответствует паспорту специальности и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Родионов Павел Вадимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составил старший научный сотрудник
отдела 017 ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»
кандидат физико-математических наук
111116 Москва ул. Авиамоторная 2
vashorstov@ciam.ru

 Шорстов Виктор Александрович

Дата 28.10.2024

Подпись Шорстова В.А. удостоверяю
Ученый секретарь



 Джамай Екатерина Викторовна

Контактные данные: Федеральное автономное учреждение «Центральный институт моторостроения имени П.И. Баранова».
Адрес: 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, 2.
Телефон: +7 (495) 362-93-11.
E-mail: vashorstov@ciam.ru.
Сайт организации: <http://ciam.ru/>