

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Цветковой Валерии Олеговны** на тему «Динамическая адаптация подвижной неструктурированной сетки для моделирования течений газа вблизи движущихся тел произвольной конфигурации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность выбранной темы. Турбулентные течения жидкости или газа встречаются во многих сферах нашей жизни. Зачастую, экспериментальное исследование таких течений может быть сопряжено со многими сложностями, например, с трудностями визуализации потоков, воспроизведением внешних условий среды, невозможностью использования мелкомасштабных или крупномасштабных моделей, высокой стоимостью проведения эксперимента. Во многих областях натурные эксперименты полностью или частично заменяются компьютерным моделированием. Использование эффективных методов численного моделирования турбулентных потоков особенно актуально в задачах оптимизации параметров или дизайна новых продуктов, например, с целью снижения лобового сопротивления, уменьшения акустического шума, повышения аэродинамической или гидродинамической эффективности. Моделирование обтекания твердых подвижных тел может быть затруднено из-за изменяющейся во времени формы расчетной области. Построение расчетных сеток, отслеживающих движение одного или нескольких твердых тел, само по себе уже является сложной задачей. В работе Цветковой В. О. предлагается метод адаптации неструктурированной расчетной сетки к положению поверхностей твердых подвижных тел сложной формы, а также методика использования этих сеток для решения задач аэродинамики с помощью метода погруженных границ. Этот подход упрощает решение задач со сложным взаимодействием газа и твердых тел, так как он достаточно универсален и не

требует специализированных методов перестроения расчетных сеток при изменении топологической связности расчетной области. Предложенные в работе методы были реализованы в программном комплексе NOISEtte и расширили класс прикладных задач, для которых он может быть применен.

Общая характеристика диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении обсуждается актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Также приводится обзор методов сеточной адаптации.

Первая глава посвящена математической постановке задачи обтекания газом подвижных тел. Для численного решения задачи предложен метод погруженных границ на подвижных сетках. Обсуждаются требования к подвижной сетке для обеспечения необходимого сеточного разрешения вблизи границы твердых тел.

Вторая глава описывает способ адаптации подвижной сетки с помощью управляющей метрики. Предложен явный вид построения метрического тензора, учитывающего расстояние до внутренних и внешних медиальных осей и локальную кривизну поверхности твердого тела. Обсуждаются методы быстрой интерполяции положения вершин сетки и необходимые условия для ускорения адаптации сетки.

В третьей главе предлагается использование вспомогательной гибридной структуры для быстрого построения метрического тензора. Обсуждаются необходимые подготовительные шаги, а также особенности интерполяции тензорных полей.

В четвертой главе приведены особенности реализации разработанных программных модулей. Исследуется вклад работы этих модулей в общее время расчета в программном комплексе NOISEtte.

Пятая глава посвящена тестированию, верификации и валидации предложенных методов. Проводится сравнение с референсным решением и экспериментальными данными для задач обтекания подвижного двумерного

цилиндра и движущейся сферы. Качественно анализируется работа метода адаптации сетки для простых и сложных областей.

В шестой главе приводятся результаты численного моделирования тонального шума изолированного винта квадрокоптера. Рассматривается двумерная и трехмерная постановки задачи. Приводится сравнение с референсным методом, использующим согласованные с поверхностью твердого тела расчетные сетки. Приводятся предварительные результаты для задачи с четырьмя винтами и неподвижным фюзеляжем.

В заключении приводятся основные результаты работы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в предложенном методе построения метрического тензора для анизотропной адаптации неструктурированной сетки в процессе движения одного или нескольких твердых тел сложной формы, а также в предложенной методике использования этой сетки для численного решения задач аэродинамики и аэроакустики с помощью метода погруженных границ. Использование метода погруженных границ с адаптивными подвижными сетками позволило выполнить моделирование вращения четырех винтов квадрокоптера вблизи неподвижного фюзеляжа на односвязной расчетной сетке без изменения топологической связности сеточных элементов. Полученные результаты являются новыми.

Теоретическая значимость работы состоит в предложенной методике использования метода погруженных границ на адаптивных сетках, сгущающихся к границам подвижных тел. Эта методика, хоть и сформулирована для конкретного класса задач аэродинамики, может быть обобщена на более широкий класс задач. **Практическая значимость** состоит в разработке эффективных методов построения метрического тензора, использующих гибридную структуру из фоновой сетки и деревьев поиска, и внедрении предложенных методов в программный комплекс NOISEtte.

Достоверность результатов подтверждается проведением численных экспериментов и сравнением с референсными решениями. Результаты были представлены на российских и международных научных конференциях и

опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых в РИНЦ, Web of Science и Scopus.

В ходе ознакомления с текстом диссертации возникли следующие **вопросы и замечания.**

1. В работе применяется метод адаптации неструктурированных сеток на основе перераспределения сеточных вершин без изменения связности. Необходимость сохранения топологической связности сетки не обоснована особенностями использованных численных методов. Возможно методы адаптации сетки на основе конформной бисекции или с использованием локальных операций перестроения сетки могли бы привести к лучшим результатам?
2. Насколько эффективна параллельная реализация метода адаптации сетки? Не может она ли стать «бутылочным горлышком» в параллельных расчетах с использованием комплекса NOISEtte?
3. Проводилась ли количественная оценка качества адаптации сетки на тестовых моделях? Какой критерий используется для остановки итераций минимизации функционала во время адаптации сетки при смещении тела?
4. При сравнении нового метода DMR-IBM с референсным методом BFM в ходе вычислительного эксперимента не приведено сравнение размеров используемых расчетных сеток и времени расчета.
5. Какой критерий измельчения используется при построении фоновой сетки со структурой восьмеричного дерева?
6. Как определяется метрический тензор \mathbf{G} в трехмерной постановке? Формула (2.4) не имеет очевидного обобщения на трехмерный случай.
7. В формуле (1.2) для слагаемого, описывающего конвективную часть, используется некорректная сумма векторной и тензорной величин.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы В.О. Цветковой.

Автореферат корректно и полно отражает содержание диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Цветковой Валерии Олеговны является законченным научным исследованием, содержание и результаты работы соответствуют паспорту научной специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, В.О. Цветкова, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент

Данилов Александр Анатольевич

25 октября 2023 г.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука
Российской академии наук

ИВМ РАН

119333 Москва, ул. Губкина, дом 8

Тел.: +7-926-5624042, email: a.danilov@inm.ras.ru

Подпись Данилова А.А. заверяю:

Ученый секретарь ИВМ РАН, д.ф.-м.н.,

Шутяев В.П.

