

**О Т З Ы В**

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

**Актуальность диссертационной работы**

В технологиях решения задач вычислительной гидро- и газовой динамики на сегодняшний день практически безраздельно властвуют сеточные методы. История их развития по существу неразрывно связана с развитием и совершенствованием вычислительной техники, производительность которой, согласно известной оценке – закону Мура, – до сегодняшнего дня растет практически со скоростью геометрической прогрессии. Возможности наиболее современных методов позволяют производить вычислительный эксперимент над весьма сложными, в том числе междисциплинарными, математическими моделями, учитывающими особенности протекания разнообразных физических процессов.

Совершенно очевидно, что наилучшее качество численного решения могла бы обеспечить равномерная или близкая к равномерной сетка. При этом элементарные оценки показывают, что для решения актуальных задач, особенно в трехмерной постановке, мощностей даже наиболее современных ЭВМ будет недостаточно, если использовать подобную сетку и обеспечивать корректное разрешение на всех интересующих масштабах во всей пространственной области. Выход из ситуации – использование существенно неравномерных сеток, со сгущениями в некоторых подобластях, главным образом там, где решение имеет большие градиенты. В этой связи, а также

с учетом сложной геометрической формы расчетной области, такие сетки как правило являются неструктурированными.

Имея в виду нестационарную постановку значительной части решаемых задач, большой интерес представляют методы динамической адаптации сеток. Несмотря на то, что данные вопросы затрагивались многими исследователями, а в рамках как коммерческих, так и свободных пакетов вычислительной гидрогазодинамики реализованы некоторые алгоритмы подобного типа, вопросы динамической адаптации неструктурированных сеток исследованы еще далеко не в полной мере, и разработка эффективных алгоритмов такого класса является исключительно важной задачей, в которой любое продвижение может способствовать появлению новых, высокоэффективных и конкурентоспособных вычислительных технологий.

В этой связи **не вызывает сомнений актуальность** диссертационной работы Цветковой В.О., поскольку она посвящена разработке и реализации алгоритмов численного моделирования течений газа вблизи подвижных тел сложной формы, в основе которых – динамическая адаптация расчетной сетки.

**Научная и практическая значимость** заключается в создании алгоритма задания управляющей метрики для анизотропной адаптации подвижной сетки, используемой при моделировании внешнего обтекания тел с помощью метода погруженных границ. Разработанный алгоритм, реализованный в виде программного модуля, успешно интегрирован в программный комплекс NOISEtte, использование которого позволяет успешно решать актуальные научно-технические задачи, возникающие, в частности, в авиационно-космической промышленности.

### **Новизна диссертационной работы**

**Научную новизну** работы составляет разработанный автором оригинальный подход к **математическому моделированию** течений вблизи подвижных поверхностей сложной формы, в основе которого – сочетание метода погруженных границ для получения дискретных аналогов



определяющих соотношений и алгоритма динамической адаптации подвижной неструктурированной сетки. Разработан **новый алгоритм** анизотропной адаптации подвижной сетки, учитывающий особенности формы обтекаемого объекта, а для его эффективной реализации предложена и реализована эффективная компьютерная **модель** обтекаемого тела, основанная на использовании фоновых декартовых решеток и поисковых структур, обеспечивающая обработку геометрической информации и возможность быстрого доступа к значениям функции расстояния и ее градиента, а также иных параметров поверхности тела. Программная реализация созданных алгоритмов позволила создать новый программный модуль для **отечественного программного комплекса NOISEtte**, повысив его эффективность при решении актуальных практических задач.

#### **Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы**

Все основные результаты работы представлены в 10 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Scopus/WoS или входящих в перечень ВАК РФ. Работа прошла апробацию в докладах автора, представленных на различных научных конференциях и семинарах.

#### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Полный объем работы – 113 страниц, считая титульную. Диссертация включает 74 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 62 наименования.

*Во введении* приводится обзор существующих подходов к сеточной адаптации, анализ их преимуществ и недостатков при совместном использовании с методом погруженных границ для моделирования обтекания

подвижных тел сложной формы. Обоснована актуальность темы исследования, научная новизна полученных диссертантом результатов, их теоретическая и практическая значимость, вклад автора, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, и другие формальные пункты, характеризующие представленную диссертацию.

*Первая глава* посвящена описанию математической модели и базовых принципов, лежащих в основе численных методов, используемых при решении задач газовой динамики. Для моделирования турбулентных сжимаемых течений вблизи тела предлагается использовать систему уравнений осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, дополненную замыкающими соотношениями – моделью турбулентности Спаларта – Алмараса. Приведено описание идей метода погруженных границ, в основу которого положен метод штрафных функций Бринкмана. Рассмотрена проблема обеспечения необходимого сеточного разрешения в приграничной области; для ее решения предложено использовать алгоритмы адаптации сетки.

*Вторая глава* содержит математическое описание метода анизотропной адаптации подвижной неструктурированной сетки к поверхности тел сложной формы. Адаптация представляет собой такой способ изменения сетки, при котором ее топология остается неизменной, а происходит перемещение вершин. Алгоритм основан на использовании аппарата классического вариационного исчисления. Предложен функционал, минимизация которого соответствует адаптации сетки, и представлены особенности оптимизационной вычислительной процедуры. Предложена методика задания управляющего метрического тензора, основанная на знании функции расстояния до поверхности и иных параметров поверхности; в результате степень анизотропии получаемых ячеек сетки оказывается связанной с характеристиками формы поверхности и ее геометрическими особенностями. Описан алгоритм интерполяции значений управляющей метрики на



временных слоях; его использование позволяет повысить эффективность алгоритма.

В *третьей главе* автором введено понятие гибридной геометрической модели тела. Цель скрывающегося за данным термином подхода – повышение удобства и эффективности для выполнения расчетов при задании положения обтекаемого тела в односвязной области, а также обеспечение алгоритма адаптации сетки всеми необходимыми данными, источником которых является геометрическая информация о поверхности тела. Существенной особенностью данной модели является включение в ее состав специальных структур данных, обеспечивающих быстрый доступ к соответствующей информации. Гибридный характер модели связан с возможностью задания формы тела как «неявно» – с помощью интерполяционного октодеревя, так и «явно» – триангуляцией его поверхности.

*Четвертая глава* содержит описание особенностей программной реализации модулей адаптации сетки и обработки геометрии. Также проведен анализ трудоемкости алгоритма адаптации сетки относительно общего времени расчета для различных постановок задач.

В *пятой главе* представлены результаты тестовых и верификационных расчетов. Для модельных задач обтекания подвижного двумерного цилиндра и сферы приведено сравнение полученных результатов с референсным решением и данными экспериментов.

*Шестая глава* содержит результаты вычислительных экспериментов по моделированию тонального шума изолированного винта квадрокоптера. Для обеспечения достоверности полученных результатов рассмотрена иерархия двумерных и трехмерных постановок задач. Для задач в трехмерной постановке представлены результаты исследования тональной акустики и аэродинамических нагрузок и результаты их сопоставления с аналогичными характеристиками, полученными при выполнении расчетов на сетке,

согласованной с телом. Приведены предварительные результаты для компоновки с четырьмя винтами и фиксированным фюзеляжем.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В целом, давая общую оценку содержания работы, следует отметить, что работа написана достаточно ясным языком, структурирована, обладает внутренним единством; все ее части служат достижению поставленной цели и решению сформулированных задач.

Автореферат диссертации верно и достаточно полно отражает ее содержание и включает все основные положения.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Представляется, что цели работы сформулированы на стр. 17-18 неудачно; в частности, ни в одной из них не фигурируют основные «ключевые слова» из названия диссертации. Первая из целей («Разработка методики моделирования аэродинамики подвижных тел сложной формы на неструктурированных сетках») требует, как минимум, четкой формулировки последовательности действий, приводящих к требуемому результату. Указанная «методика» при этом также обозначена как выносимое на защиту положение, однако явно в работе не сформулирована. Следует отметить, что вопросам собственно аэродинамики в диссертации уделено минимальное внимание, что, однако, нельзя считать недостатком работы. То, что названо «целями», скорее является «задачами», решение которых способствует достижению общей цели, «увязывающей» работу в единое целое.

2. Верификация моделей и алгоритмов, как следует из приведенных в Главе 5 сведений, проводилась на нескольких задачах. Однако первые две из них (плоское обтекание цилиндра и пространственное обтекание сферы, совершающих вынужденные колебания), во-первых, неверно озаглавлены: гармоническим является закон колебаний, вызывающая их сила носит, очевидно, более сложный характер, а во-вторых не вполне соответствуют



математической модели, описанной в первой главе: там явно говорилось о сжимаемых течениях, уравнениях Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу и замкнутых соотношением модели турбулентности Спаларта – Аллмараса. Или же в указанных задачах из Главы 5 производилось моделирование турбулентного течения, а в первой из задач учитывалась сжимаемость? Представленные в третьем примере рисунки дают неверную информацию о главных кривизнах эллипсоида с указанными полуосями. В четвертом примере указаны два различных значения плотности среды (по-видимому, воздуха) при одних и тех же параметрах.

3. Описание программной реализации алгоритма представлено в диссертации довольно поверхностно. В контексте использования k-d и октодеревьев следует отметить, что на сегодня известно много исключительно эффективных алгоритмов и их реализаций, в том числе для решения задачи о вычислении функции расстояния до поверхности и т.п. Следовало бы привести их обзор и (в каком-то виде) сопоставление производительности разработанной реализации с ними. Есть основание полагать, что, к примеру, упомянутый в диссертации рекуррентный алгоритм построения дерева является весьма неэффективным по сравнению с альтернативными подходами. Также представляется, что характеристики современных графических ускорителей позволили бы существенно ускорить выполнение отдельных операций, но о возможностях их использовании в тексте работы не упомянуто. Рисунок 19, имеющий цель дать некоторое представление о трудоемкости реализованных алгоритмов, неинформативен и непонятен (понять из подписи, что обозначено цветами, не удастся).

По тексту диссертации модели имеется достаточное количество неточностей и опечаток, которые, впрочем, легко устранимы при внимательном чтении работы. Чрезмерно активно используются слова и выражения, которые хотя и встречаются в разговорной речи специалистов, но все же должны быть отнесены к «математическому жаргону» – их следовало бы заменить общепринятой терминологией. Следует отметить небрежность в оформлении текста, формул, рисунков и списка литературы.

