

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 16 ноября 2023 г. №13

О присуждении **Цветковой Валерии Олеговне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «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» принята к защите 29.06.23 (протокол заседания №13/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Цветкова Валерия Олеговна**, 1994 года рождения, в 2018 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» с присвоением квалификации «магистр» по направлению подготовки 03.04.01 – «Прикладные математика и физика».

С 2018 г. по 2022 г. соискатель освоила программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по

направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника».

В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в ВНИЛ «АЭРО» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Диссертация выполнена в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в период обучения в аспирантуре.

Научный руководитель – Козубская Татьяна Константиновна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отдела № 16 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Научный консультант – Кудрявцева Людмила Николаевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук.

Привлечение научного консультанта Л.Н. Кудрявцевой обосновано тем, что значительная часть диссертационной работы, связанная с проведением исследований в области сеточных технологий, выполнена под ее руководством. Ранее, во время обучения В.О. Цветковой в МФТИ, Л.Н. Кудрявцева выступала в роли научного руководителя магистерской диссертации соискателя.

Официальные оппоненты:

Марчевский Илья Константинович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,

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

дали **положительный** отзыв на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в своем **положительном** отзыве, подписанном **Симаковым Сергеем Сергеевичем**, доктором физико-математических наук, доцентом кафедры вычислительной физики МФТИ и утвержденным **Баганом Виталием Анатольевичем**, кандидатом физико-математических наук, проректором по научной работе МФТИ указала, что работа посвящена решению актуальной научной и практической проблемы, связанной с моделированием течений газа вблизи движущихся тел произвольной конфигурации. Работа вносит существенный вклад в развитие методов моделирования задач нестационарной газодинамики и предлагает подход к решению широкого класса задач. 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 наук физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 10 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 9 публикаций в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 8 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, из них одна работа без соавторов.

1. И.В. Абалакин, А.П. Дубень, В.О. Цветкова, Эффективная методика задания граничных условий на твердых стенках для расчета сложных турбулентных течений, Матем. моделирование, 32:11, 2020; Math. Models Comput. Simul., 2021, 13(4), 591–603 [ВАК, Scopus]

2. V. Tsvetkova, T. Kozubskaya, L. Kudryavtseva, N. Zhdanova. On mesh adaptation for supercomputer simulation of flows around solid bodies defined by immersed boundary method, *Procedia Computer Science*, 2020, 178, p. 404-413 [**Scopus**]
3. П. В. Родионов, А. П. Дубень, Т. К. Козубская, В. О. Цветкова. EBR схемы с криволинейными реконструкциями переменных вблизи обтекаемых тел, *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2020; *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2021, 61(1) 3-19 [**ВАК, WoS, Scopus**]
4. С. М. Босняков, А. В. Волков, А. П. Дубень, В. И. Запрягаев, Т. К. Козубская, С. В. Михайлов, А. И. Трошин, В. О. Цветкова, Сравнение двух вихреразрешающих методик повышенной точности на неструктурированных сетках применительно к моделированию струйного течения из двухконтурного сопла, *Матем. моделирование*, 31:10 (2019), 130–144; *Math. Models Comput. Simul.*, 12:3 (2020), 368–377 [**ВАК, Scopus**]
5. В. Г. Бобков, В. О. Вершков, Т. К. Козубская, В. О. Цветкова, Методика деформации неструктурированных сеток в задачах определения аэродинамических характеристик тел при малых перемещениях, *Матем. моделирование*, 33:3 (2021), 109–132; *Math. Models Comput. Simul.*, 2021, 13(6), 986–1001 [**ВАК, Scopus**]
6. В. О. Цветкова, И. В. Абалакин, В. Г. Бобков, Н. С. Жданова, Т. К. Козубская, Л. Н. Кудрявцева, Моделирование обтекания винта, заданного методом погруженных границ, на адаптивной неструктурированной сетке, *Матем. моделирование*, 33:8 (2021), 59–82; *Math. Models Comput. Simul.*, 2022, 14(2), 224–240 [**ВАК, Scopus**]
7. T. Kozubskaya, L. Kudryavtseva and V. Tsvetkova, Unstructured Mesh Adaptation for Moving Bodies in Immersed Boundary Methods, in: *WCCM-ECCOMAS2020*. URL https://www.scipedia.com/public/Kozubskaya_et_al_2021a [**Scopus**]

8. Т. К. Козубская, Л. Н. Кудрявцева, В. О. Цветкова, Анизотропная адаптация подвижной неструктурированной сетки к телам сложной формы, заданным интерполяционным 8-деревом, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 62:10 (2022) 1620–1631; Comput. Math. Math. Phys., 2022, 62(10), pp. 1590–1601 [ВАК, Scopus]
9. Цветкова В.О., Численное моделирование турбулентного обтекания неподвижного винта дрона с использованием метода погруженных границ, Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 56, 2022 [ВАК]
10. Bobkov, V. G., Kozubskaya, T. K., Kudryavtseva, L. N., Tsvetkova, V. O. (2022). Hybrid Dynamic Mesh Redistribution – Immersed Boundary Method for Acoustic Simulation of Flow Around a Propeller. Supercomputing Frontiers and Innovations, 9(4), 69–84 [ВАК, Scopus]

Личный вклад соискателя в работах [2, 6-10] заключается в разработке методики моделирования турбулентного обтекания подвижных тел, разработке алгоритма построения анизотропной сеточной адаптации к форме тел сложной конфигурации, а также получении результатов численного моделирования задач обтекания различных двух- и трехмерных подвижных и стационарных объектов с использованием представленных подходов и численных методов [3]. В работах [1, 4] представлено дальнейшее развитие разработанного метода за счет применения граничных функций. В работе [5] приводится разработанный соискателем эффективный алгоритм моделирования обтекания тел, совершающих малые смещения, на основе сеточной деформации. В работе [10] приведены результаты численного моделирования тонального шума изолированного винта квадрокоптера. Для расчетов использовался параллельный программный комплекс Noisette, где в виде встроенных модулей реализованы алгоритмы обработки геометрии и сеточной адаптации, разработанные в соавторстве с Цветковой В.О.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационной работы. Сведения об опубликованных соискателем работах достоверны.

На диссертацию поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, а также 2 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. В отзывах содержится ряд замечаний:

В отзыве ведущей организации МФТИ:

1. В работе не проведен анализ области применимости разработанной методики, а также не сформулированы условия для ее применимости.

2. В работе проведены оценки эффективности разработанной методики на примере решения ряда задач. Из полученных оценок следует, что предложенная методика требует существенных вычислительных затрат. Содержащиеся в диссертации примеры снижения вычислительных затрат за счет применения интерполяции при адаптации не совсем убедительны, в частности из-за того, остается открытым вопрос, всегда ли такая интерполяция применима.

3. Замечание о возможности уменьшения степени сгущения сетки для снижения вычислительных затрат за счет применения функции стенки не подтверждено примерами

4. В работе не упоминается порядок аппроксимации используемой в расчетах численной схемы, а также не содержатся результаты экспериментального исследования порядка схемы путем решения задач на последовательности сгущающихся сеток.

5. Вызывает сомнение использование термина «модель» в контексте «гибридной геометрической модели». Как минимум, необходимо было бы дать дополнительное обоснование правомерности этого термина.

6. Для рассмотренной в диссертации задачи моделирования турбулентного обтекания изолированного винта квадрокоптера не указаны вычислительные затраты (ни в терминах задействованных ресурсов вычислительного кластера, ни в терминах физического времени расчета).

В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Марчевского И.К.:

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 окто-

дереьев 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).

В отзыве официального оппонента, к.ф.-м.н. Данилова А.А.:

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.

Отзыв на автореферат от к.т.н. Миргазова Руслана Миннхатовича, начальника научно-исследовательского центра комплексных исследований и разработок винтокрылых летательных аппаратов (НИЦ КИиРВКЛА) Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ ЦАГИ) и д.т.н., профессора Крицкого Бориса Сергеевича, главного научного сотрудника НИЦ КИиРВКЛА ФАУ ЦАГИ замечаний не содержит.

Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н. Титарова Владимира Александровича, главного научного сотрудника, руководителя Отделения 2 «Моделирование сложных физических и технических систем» Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» содержит следующие замечания:

1. Линии уровня числа Маха, полученные с помощью BFM и DRM-IBM, заметно отличаются вблизи вертикальной оси, однако в автореферате данный факт никак не обсуждается, автор пишет о хорошем согласии решений.

2. Рисунок 5 мелковат, следовало бы привести кусочек сетки с сильным увеличением.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации,

включая численное моделирование задач газовой динамики, исследование новых подходов к решению задач нестационарной газодинамики, разработку и анализ новых алгоритмов в области вычислительной геометрии, реализации их в виде программного комплекса, применение методов и средств математического моделирования для решения сложных научно-практических задач, что подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Разработана методика моделирования аэродинамики подвижных тел сложной формы** на неструктурированных сетках. Подход основан на использовании метода погруженных границ, позволяющего определять задачу внешнего обтекания в односвязной области. Сгущение неструктурированной сетки к поверхности тела осуществляется путем ее динамической адаптации без изменения исходной топологии.

2. **Разработан метод анизотропной адаптации подвижной неструктурированной сетки к поверхности тел произвольной формы.** Управляющая метрика строится как функция геометрической модели тела. Она обеспечивает сеточное сгущение в нормальном направлении к поверхности, а в тангенциальном направлении сгущает сетку лишь по мере необходимости.

3. **Предложена гибридная геометрическая модель тела,** обеспечивающая корректную работу алгоритма адаптации подвижной неструктурированной сетки к его поверхности. Гибридный способ задания положения тела и его геометрической конфигурации основан на использовании декартовой сетки структуры восьмеричного дерева как носителя геометрии с возможностью точного расчета расстояния вблизи поверхности.

4. В рамках исследовательского программного комплекса NOISEtte создан **программный модуль**, реализующий разработанную методику и

обеспечивающий расчеты на высокопроизводительных вычислительных системах с распределенной памятью. **Получено** свидетельство о государственной регистрации РИД. **Проведена верификация** на модельных задачах в двумерной и трехмерной постановках и **валидация** с использованием экспериментальных данных.

5. Путем проведения **численного моделирования тонального шума изолированного винта квадрокоптера** продемонстрирована **работоспособность** созданной методики при решении задач турбулентного обтекания движущихся объектов сложной геометрии.

Теоретическая значимость исследования состоит в разработке алгоритма задания метрики, управляющей анизотропной адаптацией подвижной сетки, для использования ее в комбинации с методом погруженных границ на односвязных расчетных сетках в задачах внешнего турбулентного обтекания подвижных тел.

Практическое значение результатов исследования заключается в программной реализации разработанной методики моделирования аэродинамики подвижных тел сложной формы на неструктурированных сетках в рамках программного комплекса NOISEtte, что, в частности, потребовало создания новых модулей поэтапной обработки геометрии тела и задания анизотропного управления адаптацией сетки к поверхности тел произвольной конфигурации. Комбинация разработанных в диссертации и реализованных в программном комплексе NOISEtte сеточных технологий с методом погруженных границ позволяет проводить расчеты востребованных авиационной промышленностью задач обтекания подвижных препятствий.

Достоверность обеспечивается проведением тестирования и верификации всех этапов разработки алгоритма, сравнением численных результатов моделирования двух- и трехмерных задач относительно друг друга и иных валидированных подходов, а также сравнением с экспериментальными данными.

Личный вклад соискателя состоит в разработке и программной реализации гибридной геометрической модели задания подвижного тела, построении и реализации алгоритма управления анизотропной сеточной адаптацией с учетом особенностей формы тела, проведении расчетов и анализе полученных результатов.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали члены диссертационного совета: д.ф.-м.н. Головизнин В.М., д.ф.-м.н. Змитренко Н.В., д.ф.-м.н. Козлов А.Н., д.ф.-м.н. Мажукин В.И., д.ф.-м.н. Василевский Ю.В., д.ф.-м.н. Меньшов И.С., д.ф.-м.н. Якобовский М.В., д.ф.-м.н. Поляков С.В., а также сотрудник института д.ф.-м.н. Горобец А.В.

В частности, Мажукин В.И. уточнил, зависит ли адаптация сетки от искомого решения. Соискатель ответила, что непосредственно решение не участвует в управлении адаптацией. Также уточнила, что единственное, на что может повлиять решение, это выбор шага по времени. Если шаг небольшой, то можно не вызывать адаптацию каждый раз, а использовать интерполяцию на временных слоях.

Меньшов И.С. спросил, возможно ли при использовании метода погруженных границ получить распределение по поверхности тела аэродинамических характеристик, таких как коэффициент давления и коэффициент сопротивления формы. Соискатель в ответ сказала, что такие методы, позволяющие посчитать интегральные характеристики на поверхности тела, заданного на сетке с ним не согласованной, существуют, и что, однако, для задач, представленных в диссертации, таких расчетов и сравнений не проводилось.

Поляков С.В. уточнил, возможно ли в представленной технологии изменять количество ячеек во времени. Соискатель ответила, что метод предполагает сохранение связности сетки, соответственно, количество вершин не меняется. Это одно из преимуществ метода, поскольку не требует, например, перестраивать декомпозицию сетки, и упрощает реализацию в коде.

Горобец А.В. спросил, смогла бы технология, например, скользящих интерфейсов показать более точные результаты в сравнение с предложенным методом для этой же прикладной задачи. Соискатель ответила, что использование скользящих интерфейсов для предложенной постановки может дать более точный результат, однако, это сравнение некорректно, потому что область применимости метода из диссертации гораздо выше.

Существенных замечаний во время защиты высказано не было.

В ходе дискуссии поддержку диссертационной работы выступили д.ф.-м.н. Головизнин В.М., д.ф.-м.н. Гаранжа В.А., д.ф.-м.н. Поляков С.В., д.ф.-м.н. Василевский Ю.В., д.ф.-м.н. Якобовский М.В.

На заседании 16 ноября 2023 года диссертационный совет принял решение за разработку и исследование динамической анизотропной адаптации подвижной неструктурированной сетки для моделирования течений газа вблизи движущихся тел произвольной конфигурации, вносящих существенный вклад в развитие нестационарной газодинамики, присудить Цветковой Валерии Олеговне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 19, против – 1, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.1.237.01

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.237.01

16.11.2023 г.


 Якобовский М.В.


Корнилина М.А.