

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН  
член-корреспондент РАН



  
А.И. Аптекарев

2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной математики им.  
М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Динамическая адаптация подвижной неструктурированной сетки для моделирования течений газа вблизи движущихся тел произвольной конфигурации» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Цветкова Валерия Олеговна обучалась в очной аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», прошла государственную итоговую аттестацию и по решению Государственной экзаменационной комиссии получила квалификацию «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

В 2018 году окончила Московский физико-технический институт (государственный университет) по специальности 03.04.01 «Прикладные математика и физика», выдан диплом, присуждена степень «Магистр».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 году ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника во внештатной научно-исследовательской лаборатории ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Козубская Татьяна Константиновна работает в должности главного научного сотрудника отдела № 16 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный консультант – кандидат физико-математических наук Кудрявцева Людмила Николаевна работает в должности научного сотрудника в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук. Необходимость привлечения научного консультанта обосновывается темой диссертационной работы, подразумевающей достаточно глубокие знания в области сеточных технологий. Л.Н. Кудрявцева является известным специалистом по сеточным технологиям, более пятнадцати лет она занимается научно-исследовательскими работами в этом направлении в группе под руководством д.ф.-м.н. В.А. Гаранжи в ФИЦ «ИУ» РАН.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Тема диссертации является актуальной** поскольку работа посвящена разработке сеточных технологий для моделирования взаимодействия среды с подвижными телами. Методы моделирования турбулентных течений вблизи движущихся препятствий сейчас бурно развиваются и являются важной неотъемлемой частью нестационарной аэродинамики.

**Целью диссертации является построение методики моделирования задач аэродинамики и аэроакустики, где присутствуют одно или несколько подвижных тел.** Форма тел может быть произвольной и достаточно сложной.

Движение тел может осуществляться под действием аэродинамических или вынужденных сил.

**В диссертации решались следующие задачи:**

1. Разработка методики моделирования аэродинамики подвижных тел сложной формы на неструктурированных сетках
2. Реализация предложенных методов и вычислительных технологий в рамках программного комплекса NOISEtte
3. Верификация и валидация разработанных алгоритмов и реализующих их программных модулей
4. С использованием разработанной методики и программных модулей решение имеющей прикладное значение задачи с подвижными телами реальной конфигурации

**Основные результаты диссертации:**

1. Разработана новая *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 неявной 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 на РИД. Проведена **верификация** на модельных задачах в двумерной и трехмерной постановках и **валидация** с использованием экспериментальных данных.
5. Численное моделирование **тонального шума изолированного винта квадрокоптера** продемонстрировало работоспособность разработанной методики при решении задач турбулентного обтекания движущихся объектов произвольной геометрии.

**Научная новизна** работы заключается в разработке и программной реализации анизотропной адаптации подвижной неструктурированной сетки с учетом особенностей формы объекта, а также в реализации эффективной модели задания тела, включающей в себя этап предварительной подготовки геометрии и методов быстрого доступа к значениям расстояния, градиентов функции расстояния и различных параметров поверхности тела.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке алгоритма задания управляющей метрики анизотропной адаптации подвижной сетки для использования ее в комбинации с методом погруженных границ на односвязных расчетных сетках в задачах внешнего турбулентного обтекания подвижных тел.

**Практическая значимость** работы заключается в программной реализации модуля поэтапной обработки геометрии тела и модуля задания анизотропного управления адаптацией сетки к поверхности тел, характерных для авиационной промышленности. Комбинация разработанных в диссертации сеточных технологий с методом погруженных границ позволяет проводить

расчеты востребованных промышленностью задач обтекания подвижных препятствий.

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

Материалы диссертации полно представлены в 10 печатных работах: из них 9 – статьи в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science, 8 – в рекомендованных изданиях перечня ВАК. На разработанный в ходе написания работы программный модуль MUnMAdapt получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ как результата интеллектуальной деятельности.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

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](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]

На программный модуль, реализующий в том числе результаты диссертации, получено свидетельство РИД: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665711 от 24 ноября 2020 года «Программный модуль MUnMAdapt адаптации подвижной неструктурированной сетки к поверхности тела при использовании метода погруженных границ», авторы: Кудрявцева Л.Н., Козубская Т.К., Гаранжа В.А., Цветкова В.О., Жданова Н.С., правообладатель: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

**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.

**Основные результаты диссертации** докладывались на следующих научных конференциях и институтских семинарах:

- 1) 9th International Young Scientist Conference in Computer Science, 5-13 сентябрь, 2020,
- 2) VI ECCOMAS Young Investigators Conference (YIC2021), 7-9 июля 2021,
- 3) VIII Российская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике», 20-25 сентября 2021,
- 4) Всероссийская научная конференция «Теоретические основы конструирования численных алгоритмов и решение задач математической физики», посвященная памяти К.И. Бабенко, 26 августа, 2022,
- 5) Девятая российская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике», сентябрь, 2022.
- 6) Научный семинар 15-го отдела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

**Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.**

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


Заключение принято на расширенном заседании семинара отдела №15 «Математическое моделирование» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН под руководством член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отделом №15 В.Ф. Тишкина и д.ф.-м.н., г.н.с. А.А. Кулешова.

Присутствовало на заседании 20 чел.

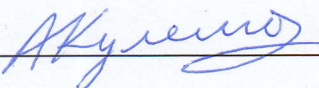
Выступили с положительной оценкой диссертации: д.ф.-м.н. В.Ф. Тишкин, д.ф.-м.н. И.С. Меньшов, д.ф.-м.н. О.В. Васильев, к.ф.-м.н. Л.Н. Кудрявцева (консультант), д.ф.-м.н. Т.К. Козубская (руководитель).

Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 2 от «6» апреля 2023 г.

Член-корр. РАН,  
д.ф.-м.н., зав. отделом №15

  
В.Ф. Тишкин

д.ф.-м.н., г.н.с. отдела №15

  
А.А. Кулешов