

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 10 июня 2021 г.

Соискатель: Васильев Олег Викторович.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему: «Адаптивные вейвлетные коллокационные методы многомасштабного численного моделирования задач механики жидкости и газа».

Специальность 01.01.07 – «Вычислительная математика».

Отрасль наук: физико-математические науки.

Председатель: академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Секретарь: к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 24 членов диссертационного совета присутствовали 16 чел., из них 6 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1.	ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
4.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
5.	ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6.	ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7.	КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
8.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
9.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
10.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
11.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
12.	МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13.	ОРЛОВ Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
14.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
15.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял решение: присудить Васильева Олега Викторовичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика»..

Заключение диссертационного совета приведено ниже:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
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 ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 июня 2021 г. № 3

О присуждении **Васильеву Олегу Викторовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Адаптивные вейвлетные коллокационные методы многомасштабного численного моделирования задач механики жидкости и газа» по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика» принята к защите 9 марта 2021 г. (протокол № 3/пз) диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального Государственного Учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Васильев Олег Викторович 1968 года рождения. В 1991 г. окончил Московский физико-технический институт по специальности «прикладная математика и физика». В 1996 г. окончил аспирантуру Университета Нотр-Дам-дю-Лак, Индиана, США по специальности «аэрокосмическая техника и механика». Ученая степень «Doctor of Philosophy (PhD)» присуждена от 19 мая 1996 г. в Университете Нотр-Дам-дю-Лак, Индиана, США по специальности «аэрокосмическая техника и

механика». Университет Нотр-Дам-дю-Лак, Индиана, США согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 22 апреля 2019 года № 799-р входит в перечень иностранных научных организаций и образовательных организаций, которые выдают документы об ученых степенях и ученых званиях, признаваемых в Российской Федерации, согласно которому ученая степень «Doctor of Philosophy (PhD)» соответствуют ученой степени «кандидата наук», получаемой в Российской Федерации. В период подготовки диссертации соискатель работал в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»: с 2016 года работал по договорам гражданско-правового характера, с декабря 2020 г. работает в должности старшего научного сотрудник ВНИЛ №10 «Моделирование аэродинамических и аэроакустических характеристик турбулентных течений для авиационных приложений» (АЭРО).

Диссертация выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. **Гаранжа Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела 26 Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук».
2. **Зайцев Дмитрий Кириллович**, доктор физико-математических наук, доцент (ученое звание), профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

3. **Кудрявцев Алексей Николаевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории вычислительной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук** в своем положительном заключении, подписанном ведущим научным сотрудником, учёным секретарём ИВМ РАН, доктором физико-математических наук, профессором Шутяевым Виктором Петровичем, утвержденном директором ИВМ РАН, академиком РАН, доктором физико-математических наук, профессором Тыртышниковым Евгением Евгеньевичем указала, что в диссертации предложен новый класс коллокационных методов на основе вейвлетов второго поколения, обеспечивающий системный контроль ошибки численного решения параболических, эллиптических и гиперболических систем уравнений, позволяющий выделять, разрешать и отслеживать локальные структуры решения на адаптивных вычислительных сетках. В диссертации также представлен новый класс методов штрафных функций для численного решения задач математической физики с уникальными свойствами, отличающими его от всех известных методов погруженных границ общностью формулировки и возможностью накладывать произвольные граничные условия с заданной степенью точности, априорно определяемой значением штрафного параметра. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в МГУ, ИВМ РАН, МФТИ, МИФИ, ИПМ РАН, ИВМ и МГ СО РАН, ИММ УрО РАН и других организациях и учреждениях, занимающихся исследованием и разработкой алгоритмов численного моделирования задач механики жидкости и газа. Диссертация Васильева Олега Викторовича является законченным научным исследованием на актуальную тему, содержащим большое количество новых

предложений, реализованных при создании новых эффективных численных методов. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как серьёзное научное и практическое достижение в области разработки эффективных многомасштабных адаптивных численных методов для решения задач математической физики. Работа отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор Васильев Олег Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.07 — «Вычислительная математика».

Соискатель имеет 124 опубликованных работ, в том числе 46 работ по теме диссертации, 42 из которых – в периодических научных журналах или изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus, включая 29 статей в журналах из первого квартиля базы данных Web of Science.

К числу наиболее значительных работ соискателя можно отнести следующие:

1. Vasilyev, O.V., “Solving Multi-Dimensional Evolution Problems with Localized Structures Using Second Generation Wavelets,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Special issue on High-Resolution Methods in Computational Fluid Dynamics, **17**(2), pp. 151–168, 2003. (Scopus, WoS, Q4)
2. Vasilyev, O.V. and Bowman, C., “Second Generation Wavelet Collocation Method for the Solution of Partial Differential Equations,” *Journal of Computational Physics*, **165**, pp. 630–693, 2000. (Scopus, WoS, Q1)
3. Vasilyev, O.V. and Kevlahan, N.K.-R., “Hybrid Wavelet Collocation – Brinkman Penalization Method for Complex Geometry Flows,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **40**, pp. 531–538, 2002. (Scopus, WoS, Q2)

4. Vasilyev, O.V. and Kevlahan, N.K.-R., “An Adaptive Multilevel Wavelet Collocation Method for Elliptic Problems,” *Journal of Computational Physics*, **206**(2), pp. 412–431, 2005. (Scopus, WoS, Q1)
5. Alam, J.M., Kevlahan, N.K.-R., and Vasilyev, O.V., “Simultaneous Space-Time Adaptive Wavelet Solution of Nonlinear Partial Differential Equations,” *Journal of Computational Physics*, **214**(2), pp. 829–857, 2006. (Scopus, WoS, Q1)
6. Liu, Q. and Vasilyev, O.V., “Brinkman Penalization Method for Compressible Flows in Complex Geometries,” *Journal of Computational Physics*, **227**(2), pp. 946–966, 2007. (Scopus, WoS, Q1)
7. Regele, J.D. and Vasilyev, O.V., “An Adaptive Wavelet-Collocation Method for Shock Computations,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **23**(7), pp. 503–518, 2009. (Scopus, WoS, Q4)
8. Brown-Dymkoski, E., Kasimov, N., and Vasilyev, O.V., “A Characteristic Based Volume Penalization Method for General Evolution Problems Applied to Compressible Viscous Flows,” *Journal of Computational Physics*, **262**, pp. 344–357, 2014. (Scopus, WoS, Q1)
9. Nejadmalayeri, A., Vezolainen, A., Brown-Dymkoski, E., and Vasilyev, O.V., “Parallel Adaptive Wavelet Collocation Method for PDEs,” *Journal of Computational Physics*, **298**, pp. 237–253, 2015. (Scopus, WoS, Q1)

Вклад соискателя является определяющим при получении всех научных результатов указанных 46 работ. Недостоверных сведений в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах не выявлено.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

Отзыв официального оппонента Гаранжи В. А.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Количество примеров, демонстрирующих разные свойства разработанных в диссертации алгоритмов можно было бы сократить, выбрав примеры, иллюстрирующих сразу несколько аспектов. Из-за большого количества

примеров сильно увеличился объем работы и усложнилось ее понимание. Скажем, в Параграфе 2.7 описаны результаты параллельного моделирования турбулентных течений с использованием метода когерентных вихрей, в то время как достаточно детальные постановки задач моделирования рассматриваются позже, в Главах 4-6.

2. Численные методы, основанные на вейвлетах, не гарантируют монотонность решений или справедливость принципа положительности решений. Автору следовало бы более подробно обсудить эту тему, в частности указать, каким образом гарантировалась, скажем, положительность плотности при моделировании сложных физических процессов. В этой связи я бы также отметил идеи В.И. Лебедева, который использовал тонкие свойства полиномов Чебышева для фильтрации нефизических осцилляций с сохранением структур решения.
3. Для ряда классических тестовых задач вычислительной аэрогидродинамики (одномерный расчет слабой и сильной ударной волны, обтекание неподвижного кругового цилиндра) в литературе доступно большое количество расчетных данных, в том числе на адаптивных сетках. Сравнение с ними сделало бы более понятным поведение вейвлетных решений.
4. В Параграфе 4.1 описана задача двумерного слияния вихрей в несжимаемой жидкости. Из описания сложно понять, насколько точным и эффективным является описанный алгоритм. В п. 4.4.1 для решения этой же задачи используется вейвлетный метод с адаптацией в пространстве-времени. Из изложения трудно понять, что является каноническим решением в этой задаче, и какой из описанных методов является наиболее точным. Для этой задачи есть известные расчеты. В частности, с использованием компактных схем высокого порядка, которые можно было бы использовать для сравнения.
5. За исключением нескольких разделов диссертации, в большинстве случаев эффективность разработанных алгоритмов измерялась

коэффициентом сжатия. Целесообразно было бы также включить сравнение вычислительной стоимости разработанных методов с существующими неадаптивными подходами, а также с известными методами типа конечных объемов на адаптивных декартовых сетках.

Отзыв официального оппонента Зайцева Д. К.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В диссертации не приводятся количественные данные о вычислительной эффективности разработанного метода по сравнению с популярными CFD кодами на основе метода конечного объема при сопоставимой точности расчета в областях сложной геометрии.
2. При демонстрации возможностей разработанного метода автор не всегда уделяет должное внимание точности полученного решения. В частности, в задаче обтекания цилиндра при $Re=100$ (дорожка Кармана, разд.5.2.3) погрешность определения амплитуды колебаний поперечной силы составила 20%.
3. Неясно, насколько подходит разработанный в диссертации метод для моделирования турбулентных течений с помощью RANS моделей турбулентности. В частности, позволяют ли разработанные штрафные функции задать нелинейные граничные условия (пристеночные функции) на обтекаемой поверхности?

Отзыв официального оппонента Кудрявцева А. Н.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Было бы интересно выполнить сравнение разработанного метода с другими высокоточными современными численными методами, такими, например, как псевдоспектральные методы при моделировании дозвуковых течений и WENO схемы - при расчете сверхзвуковых. Я понимаю, что невозможно требовать от автора наряду с разработкой кода, основанного на собственном методе, еще и реализации, специально для целей сравнения, других численных алгоритмов. Тем не менее, вопрос о

том, насколько большую точность при одинаковых временных затратах можно получить или насколько быстрее можно решить задачу при одинаковой точности, если использовать данный метод, напрашивается.

2. Метод пространственно-временной адаптации развит в диссертации для параболических уравнений. Насколько возможно его распространение на гиперболические, учитывая, что для них определяющую роль играет консервативность численной схемы и, следовательно, при использовании локального временного шага необходимо обеспечить согласование численных потоков и выполнение законов сохранения?
3. В численном методе решения гиперболических уравнений (п. 1.6) используется скалярная искусственная вязкость, пропорциональная максимальному по модулю собственному значению матрицы Якоби. Такой подход обычно приводит к излишней диссипации компонент решения, соответствующих энтропийной и вихревой модам. По приведенным в диссертации тестам (задача об ударной трубе) трудно сделать заключение, насколько серьезной может быть данная проблема; для этого требуется решить немного другие тестовые задачи, такие как, например, задача Шу и Ошера (Shu-Osher problem) о взаимодействии ударной волны с синусоидальным возмущением плотности.
Интересно было бы также понять, какой порядок сходимости демонстрирует данный метод для течений, включающих газодинамические разрывы. Широко распространено мнение, что в случае систем уравнений, когда имеются характеристики, пересекающие ударную волну, все схемы сквозного счета сходятся с первым порядком, независимо от их точности на гладких решениях. Удастся ли обойти эту трудность с помощью адаптивного вейвлетного метода (см. рис. 1.40, где говорится о схеме 2-го, 4-го, 6-го порядка)?
4. При решении уравнений для многокомпонентного газа динамическая вязкость и обратная молярная масса смеси определяются как средневзвешенные по массе значения этих величин для отдельных

химических компонент. Если для молярной массы такое определение является естественным и следует из закона Дальтона, то для вязкости это, строго говоря, является неверным. Обычный подход основан на использовании правила Уилки (Wilke).

5. В отдельных случаях используется непонятная мне терминология. Так, в п. 1.6.3, говоря о двух тестовых задачах, автор называет их задачами о формировании слабой и сильной ударных волн. Первая из них -это классическая задача Сода (Sod) об ударной трубе. Ударная волна в ней не формируется, а возникает сразу в момент распада разрыва и далее распространяется неизменной. Вторая -тоже задача об ударной трубе, только с другими параметрами. Глядя на графики, трудно понять, почему автор называет ее задачей о сильной ударной волне, скорее уж тут уместно говорить о сильной волне разрежения.

В п. 5.5.4 приведены результаты расчетов «докритического и сверхкритического сверхзвукового обтекания клина». «Докритическим обтеканием» здесь именуется стационарное обтекание клина с присоединенной ударной волной. Естественно ожидать, что «сверхкритическое обтекание» - это стационарное обтекание с отошедшей головной ударной волной. Вместо этого показано решение совсем другой задачи нестационарное течение, возникающие при нерегулярном (маховском) отражении от клина движущейся ударной волны.

В п. 4.4.1 говорится о быстром «многопольном» методе. Устоявшимся термином является «мультипольный».

В отзыве ведущей организации, ФГБУ ИВМ РАН, содержатся следующие замечания:

1. В диссертации рассматривается изотропная адаптация к особенностям решения, при которой для анизотропного решения используется мелкий шаг сетки во всех направлениях, даже в тех, для которых

мелкого шага не требуется. Поэтому рассматриваемые дискретизации не обеспечивают оптимальную асимптотику падения ошибки для решений с анизотропными особенностями (например, изображенных на рис. рис.1.29, 1.30 на с.94, или решений с погранслоями).

2. Как отмечено на странице 100, при решении нестационарных задач шаг по времени имеет ограничения типа CFL, что означает для метода А WCM с только пространственной адаптацией очень малые шаги по времени. Обобщение метода на пространственно-временную адаптацию порождает большие требования к оперативной памяти и привносит дополнительные сложности в балансировке нагрузки при параллельных вычислениях.
3. Предложенный подход к параллелизации адаптивного вейвлетного коллокационного метода требует нелокальных обменов между процессорами, когда требуемая процессору информация может находиться на всех или почти всех других процессорах. Такие обмены могут тормозить расчет на очень большом числе процессоров (десятки тысяч и выше).
4. Замечания по терминологии. Согласно российской традиции используется термин "условие Рабина", а не Робена (несмотря на французское происхождение фамилии). Однако фамилия Стрэнга должна писаться через "э", а не через "а" (стр.45). Кроме того, правильный термин "схема Кранка-Николсон" (стр.85), поскольку Николсон - женщина.
5. Замечания редакционного характера. Перечисление на семи страницах введения докладов конференций, где представлены результаты диссертации, - перебор. Тексты общим объемом три страницы из введений к главам 2 и 5 скопированы в общее введение.
6. Замечание по обзору литературы. Обзору метода фиктивных областей не хватает упоминания его дискретного аналога, метода фиктивных компонент, развитого в 70-х годах прошлого века Г.И.Марчуком,

Ю.А.Кузнецовым, А.М.Мацокиным (обзор метода представлен в RJNAMM 1(1), 1986). В методах фиктивных компонент прямоугольные сетки допускают локальную модификацию к границе с порождением треугольных приграничных ячеек и предполагают применение быстрых решателей в качестве переобуславливателей.

На автореферат диссертации поступило три положительных отзыва:

1. В отзыве **Титарева Владимира Александровича**, доктора физико-математических наук, руководитель отделения 2 «Моделирование сложных физических и технических систем» Федерального государственного учреждения Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук» содержатся следующие замечания: «1. Использование словосочетания «сжимаемый газ» выглядит довольно странным. 2. На странице 13 не хватает ссылки на пионерскую работу В.П. Колгана по схемам типа MUSCL. 3. В автореферате не представлено решения задач обтекания с отражением сильных ударных волн от препятствий.»
2. В отзыве **Меньшова Игоря Станиславовича**, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника отдела № 8 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН содержится следующее замечание: «Небольшое замечание касается терминологии: «фантомные ячейки», «сжимаемый газ» и ряд других являются, по-видимому, дословным переводом с английского и звучат несколько странно.»
3. В отзыве **Дерюгина Юрия Николаевича**, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, главного научного сотрудника ИТМФ ФГУП - «РФЯЦ-ВНИИЭФ» содержится следующее замечание: «результаты работы не оформлены в виде монографии.»

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем

компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации, включая разработку новых вычислительных методов, обоснование численных алгоритмов и повышения их эффективности, а также применение вычислительных методов для решения сложных научно-практических задач и задач механики жидкости и газа. Это подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получены следующие основные результаты:

1. Для эффективного численного решения параболических, эллиптических и гиперболических систем уравнений разработан класс коллокационных методов на основе вейвлетов второго поколения, способных выделять, разрешать и отслеживать локальные структуры решения на адаптивных вычислительных сетках с контролем ошибки решения. Теоретически полученные аналитические оценки асимптотической сходимости разработанных методов подтверждены результатами численных экспериментов по решению тестовых задач с известными аналитическими решениями.
2. Адаптивный вейвлетный коллокационный метод обобщён для параллельных вычислений.
3. Для параболических задач с высокой перемежаемостью разработан пространственно-временной адаптивный вейвлетный коллокационный метод, позволяющий получить решение с одновременной адаптацией сетки в пространстве и времени.
4. Для расширения области применения адаптивного вейвлетного коллокационного метода при решении задач со сложной геометрией, включая подвижные и деформируемые границы, разработан класс методов штрафных функций, позволяющих задавать однородные и неоднородные граничные условия Дирихле, Неймана и Робена на границе областей сложной геометрии с возможностью оценки и контроля ошибки

решения через изменение параметров штрафных функций. Получены теоретические оценки асимптотической сходимости разработанных методов.

5. Продемонстрированы возможности применения и эффективность адаптивного вейвлетного коллокационного метода для численного моделирования широкого спектра задач механики жидкости и газа как в простой, так и в сложной геометрии с применением разработанных методов штрафных функций.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в диссертации представлены новый класс коллокационных методов на основе вейвлетов второго поколения, обеспечивающий системный контроль ошибки численного решения параболических, эллиптических и гиперболических систем уравнений, позволяющий выделять, разрешать и отслеживать локальные структуры решения на адаптивных вычислительных сетках. В диссертации также представлен принципиально новый класс методов штрафных функций для численного решения задач математической физики с уникальными свойствами, отличающими его от всех известных методов погруженных границ общностью формулировки и возможностью накладывать произвольные граничные условия с заданной степенью точности, априорно определяемой значением штрафного параметра.

Значение полученных соискателем результатов исследования для науки и практики определяется способностью разработанных в диссертации методов получать решение с автоматическим контролем ошибки на адаптивной сетке, отслеживающей и разрешающей с заданной точностью все структуры решения и границы области, общностью формулировки и возможностью накладывать произвольные граничные условия, близкой по функциональности, гибкости и простоте реализации к определению аналитических граничных условий, а также применимостью разработанных в диссертации классов методов для эффективного решения

широкого спектра задач математической физики, включая численное моделирование течений жидкости и газа во всех скоростных режимах.

Разработанный адаптивный вейвлетный коллокационный метод с возможностью систематического контроля ошибки и сеточного разрешения открывает перспективы принципиально новой философии численного моделирования, основанной на осознании необходимости тесной интеграции математического моделирования, адаптивных численных методов и алгоритмов генерации сетки для более гибкого учёта физики задачи, минимизации вычислительных ресурсов, улучшения качества и эффективности численного моделирования и повышения степени прогнозирования физических свойств моделируемых систем.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что все полученные автором результаты являются обоснованными. Достоверность разработанных в диссертационной работе методов и алгоритмов подтверждена применением обоснованных теоретических выводов, строгого математического аппарата и тщательной верификацией и валидацией результатов. Все теоретически полученные аналитические оценки асимптотической сходимости разработанных методов подтверждены результатами численных экспериментов по решению тестовых задач с известными аналитическими или эталонными численными решениями. Результаты численного моделирования течений подтверждены соответствием с опубликованными экспериментальными и вычислительными данными, полученными другими авторами с использованием альтернативных подходов. Результаты диссертации достаточно полно представлены в высокорейтинговых научных журналах, в том числе входящих в реферативные базы Web of Science и Scopus. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на приглашённых докладах на международных конференциях и на семинарах университетов как в России, так и за рубежом и докладывались на международных конференциях. Все

разработанные в диссертации методы документированы и реализованы в адаптивной среде для универсального численного многомасштабного моделирования AWESUMM, находящейся в свободном доступе, и используются исследователями в Италии, Польше, России, США, Чили и Южной Корее.

Личный вклад соискателя состоит в формулировке разрабатываемых методов, постановке задач, получении ключевых теоретических и практических результатов, технической реализации, постановке численных экспериментов и анализе полученных результатов. Соискатель является основным разработчиком адаптивной среды для универсального численного многомасштабного моделирования (AWESUMM), которая использовалась для получения результатов диссертации. Вклад соискателя является определяющим при получении всех научных результатов, выносимых на защиту.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертационная работа Васильева Олег Викторовича является научно-квалификационной работой, вносящей значительный вклад в развитие адаптивных вычислительных методов и методов погруженных границ. На основании выполненных соискателем исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области разработки эффективных многомасштабных адаптивных численных методов для решения задач математической физики.

На заседании 10 июня 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Васильеву Олегу Викторовичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика». Из 24 человек, входящих в состав диссертационного совета, на заседании присутствовали 16 человек, в том числе 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. Заседание проходило в удаленном интерактивном режиме с использованием интернет-технологий,

при этом все члены совета присутствовали очно, дистанционно участвовали два оппонента, очно – один оппонент. Результаты открытого голосования: за 16, против – нет, воздержавшихся - нет.

Председатель диссертационного совета

д.ф.-м.н., академик РАН,

Б.Н. Четверушкин

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н.

М.А. Корнилина

10 июня 2021 г.