



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИМ РАН
Академик РАН
Тыртышников Е.Е.
«24» мая 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Васильева Олега Викторовича «Адаптивные вейвлетные коллокационные методы многомасштабного численного моделирования задач механики жидкости и газа», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика»

Актуальность темы диссертации

Диссертация О. В. Васильева основана на научных исследованиях соискателя за более чем двадцатилетний период и посвящена разработке новых классов эффективных многомасштабных адаптивных вычислительных методов на основе вейвлетов второго поколения для численного моделирования задач математической физики в простой и сложной геометрии со способностью задавать произвольные граничные условия, с теоретической априорной оценкой и активным контролем ошибки решения, с автоматической динамической адаптацией вычислительной сетки и демонстрации возможностей разработанных методов для решения широкого спектра задач механики жидкости и газа, включающих течения несжимаемой/сжимаемой, вязкой/невязкой, химически инертной/реагирующей жидкости/газа во всех скоростных режимах.

Несмотря на то, что турбулентные течения нас окружают всюду, решение уравнений, описывающих турбулентность, до сих пор не найдено научным сообществом. Турбулентность является одной из последних нерешенных проблем в классической физике, при этом необходимость предсказывать физико-механические характеристики турбулентных течений присутствует практически во всех областях науки и техники. Однако несмотря на научный багаж, накопленный за многие годы, существующие методы не могут в полной мере ответить постоянно растущим требованиям промышленности по численному моделированию турбулентных течений. Численные расчёты, требующие от нескольких месяцев до нескольких лет, не пригодны для эффективного цикла проектирования. Несмотря на существенный прогресс в области численного моделирования турбулентных течений, вычислительные затраты даже при эффективном использовании суперкомпьютеров по-прежнему чрезмерно велики. Таким образом, в настоящее время существует явная необходимость в разработке новых эффективных технологий численного моделирования, которые могут быть использованы при проектировании и оптимизации аэрокосмических транспортных систем, их компонент, а также и в других отраслях промышленности, в которых турбулентные течения влияют на технические характеристики конечного продукта.

Таким образом, актуальность темы диссертации обусловлена важностью разработки эффективных адаптивных подходов для численного моделирования задач механики жидкости и газа, способных идентифицировать, выделять и разрешать на адаптивной сетке локализованные структуры, при этом активно контролируя ошибку решения.

Краткий анализ содержания работы

Структура диссертации включает введение, шесть глав, заключение и список литературы.

Во введении даётся общая характеристика выполненной работы, обосновывается актуальность темы исследований, даётся краткий обзор работ других авторов по выбранной теме, определяются цели и задачи диссертации, формулируются положения, выносимые автором на защиту, и перечисляются публикации, сделанные по теме работы. Первые четыре главы диссертации посвящены описанию класса вейвлетных коллокационных методов для решения эллиптических, параболических и гиперболических систем уравнений. В последних двух главах диссертации описаны разработанные методы штрафных функций, расширяющие возможности применения адаптивных вейвлетных коллокационных методов для решения задач математической физики в сложной геометрии, включая течения жидкости и газа во всех скоростных режимах в областях со стационарными, подвижными и деформируемыми границами. В первой главе представлены ключевые компоненты класса адаптивных вейвлетных коллокационных методов для решения эллиптических, параболических и гиперболических систем уравнений, приведены асимптотические оценки сходимости численного решения и локального разрешения, подтверждённые результатом численных экспериментов. Во второй главе адаптивные вейвлетные коллокационные методы обобщены для параллельных вычислений. В главе также описаны разработанное параллельное асинхронное вейвлетное преобразование второго поколения, структура данных типа дерева произвольной размерности, квантование и межпроцессная миграция данных, динамическое распараллеливание задачи, эффективность распараллеливания и параллельная масштабируемость. Третья глава посвящена принципиально новому адаптивному подходу на основе вейвлетов второго поколения для решения параболических задач с одновременной адаптацией сетки в пространстве и времени, разрешающему две основные проблемы классических маршевых вычислительных методов - неэффективность использования глобального шага интегрирования по времени и отсутствие возможности контроля глобальной ошибки во времени. Эффективность пространственно-временной сеточной адаптации и способность активного контроля глобальной ошибки интегрирования во времени и сходимости решения продемонстрированы на примере тестовых задач. Применение вейвлетных адаптивных коллокационных методов для решения задач механики жидкости и газа в простой геометрии представлены в четвёртой главе. В пятой главе представлены методы штрафных функций, расширяющие возможности применения адаптивных вейвлетных коллокационных методов для решения задач в сложной геометрии. Автором разработан новый класс методов штрафных функций, снимающий ограничения ранее разработанных методов и обеспечивающий возможность задавать общие однородные и неоднородные граничные условия Дирихле, Неймана и Робина на стационарных и подвижных границах, по функциональности, гибкости и простоте применения близкий к определению аналитических граничных условий. В диссертации приведены асимптотические оценки сходимости разработанных методов штрафных функций, а также представлены численные результаты проверки сходимости решения, подтверждающие соответствие результатов вычислений асимптотической оценке ошибки. Применение разработанных методов штрафных функций совместно с адаптивными вейвлетными к методами для численного моделирования обтекания стационарных и движущихся объектов рассмотрено в шестой главе, где также приведено обобщение адаптивного вейвлетного коллокационного метода с варьирующимся в пространстве и времени вейвлетный порогом, расширяющим возможность метода регулировать локальное сеточное разрешение не только для контроля ошибки численного решения, но также из соображений физического моделирования. Совместное использование методов штрафных функций и адаптивных методов позволяет воспроизводить геометрию задачи стационарными и движущимися границами с заданной точностью без чрезмерного разрешения вдали от границы и минимизировать количество

узлов сетки внутри объекта сложной геометрии, необходимых для определения граничных условий.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Достоверность результатов диссертации и выносимых на защиту положений обеспечивается следующим. При разработке численных методов автор применяет обоснованные теоретические выводы, строгий математический аппарат и тщательную верификацию. Верификация проводится путем сопоставления результатов расчетов с известными аналитическими и эталонными решениями тестовых задач, с расчетами других авторов, а также с экспериментальными данными. Результаты диссертации изложены в 46 публикациях, 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, а также представлены в приглашённых докладах на 43 международных конференциях и на семинарах университетов как в России, так и за рубежом и докладах на 66 международных конференциях.

Оценка новизны, научной и практической значимости проведённых исследований

Соискателем 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. Класс методов основан на разработанном автором быстром $O(N)$ адаптивном вейвлетном преобразовании второго поколения, позволяющим устранить все недостатки подходов на основе вейвлетов первого поколения, и включающим процедуру проверки восстановления функции, обеспечивающей принудительное включение узлов-предков, необходимых для рекурсивного вычисления вейвлетных коэффициентов на адаптивной сетке. Важным свойством разработанного класса методов является возможность применения разработанных методов для эффективного решения широкого спектра задач механики жидкости и газа, включающих моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости, дозвуковых, транзвуковых и сверхзвуковых, инертных и химически реагирующих, ламинарных, переходных и турбулентных течений.

К существенным достижениям можно также отнести обобщение адаптивного вейвлетного коллокационного метода для параллельных вычислений и разработка принципиально нового пространственно-временного адаптивного вейвлетного коллокационного метода, обладающего способностью контроля глобальной ошибки во времени.

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.

К существенным достижениям можно также отнести объединение адаптивного вейвлетного коллокационного метода с разработанными методами штрафных функций, расширяющее возможности применения вейвлетных подходов для решения задач в сложной геометрии. Объединение двух подходов расширяет возможности каждого из методов и позволяет локальное разрешение как геометрии задачи, так и структур решения с систематическим контролем ошибки решения и аппроксимации граничных условий.

Высокая цитируемость работ автора как по адаптивным методам на основе вейвлетов, так и по методам штрафных функций демонстрирует важное теоретическое и практическое значение разработанных методов и их распространение как в России, так и за рубежом.

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.

Полнота опубликования и апробация результатов исследований

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.

Замечания по диссертационной работе

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 AWCM 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 Робина", 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.

Приведенные замечания не снижают научной и практической значимости представленных в диссертации результатов и общей высокой оценки выполненного исследования.

Заключение

В целом, диссертация Васильева Олега Викторовича является законченным научным исследованием на актуальную тему, содержащим большое количество новых предложений, реализованных при создании новых эффективных численных методов. Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Основные результаты работы и выводы представлены в автореферате, который соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация показывает, что автор имеет высокую математическую культуру и может самостоятельно проводить полномасштабные научные исследования от анализа проблемы и постановки математических задач до разработки численных методов их решения, построения алгоритмов, реализации их в виде программ, проведения вычислительных экспериментов и сопоставления результатов расчёта с эмпирическими данными. Анализ диссертации, автореферата и публикаций автора, соответствующих основному содержанию диссертации, позволяет сделать вывод, что в работе О. В. Васильева создан хороший научный задел по направлению «Адаптивные вейвлетные коллокационные методы многомасштабного численного моделирования задач механики жидкости и газа». 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».

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании семинара «Вычислительная математика и приложения» ИВМ РАН под руководством академика Е.Е.Тыртышникова, протокол №1 от 20 мая 2021 г.

Отзыв подготовил ученый секретарь ИВМ РАН, д.ф.-м.н. (01.01.07), профессор Шутяев Виктор Петрович.

Ученый секретарь ИВМ РАН,
д.ф.-м.н., профессор

Шутяев В.П.

Подпись д.ф.-м.н., проф. Шутяева В.П. удостоверяю.
Главный инспектор ОК ИВМ РАН



Шитова Т.И.

« 24 » _____ мая _____ 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

Почтовый адрес: 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Губкина, д.8

E-mail: director@inm.ras.ru

Телефон: +7-495-984-81-20

Веб-сайт: <http://www.inm.ras.ru>