

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Зайцева Дмитрия Кирилловича на диссертацию 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 работы. В настоящее время для численного моделирования течений жидкости и газа в областях сложной геометрии используются, главным образом, неструктурированные расчетные сетки, согласованные с границами области течения. Основными недостатками такого подхода являются дороговизна построения согласованных сеток требуемого качества и сложность контроля точности получаемого решения. Разрабатываемый в диссертации альтернативный подход, основанный на использовании локально адаптируемых декартовых сеток в сочетании с методом погруженных границ, снимает проблему создания сетки, а применение оригинальных штрафных функций и вейвлетов второго поколения обеспечило возможность наложения произвольных граничных условий с контролируемой ошибкой решения. Особое внимание уделено обеспечению параллельной эффективности вычислений. Возможности разработанного подхода продемонстрированы на широком круге задач механики жидкости и газа, включая моделирование вязких и невязких, до- и сверхзвуковых, химически реагирующих, ламинарных и турбулентных течений.

Фактически, в диссертации О. В. Васильева разработан новый класс адаптивных вейвлетных методов численного решения задач механики жидкости и газа, в том числе в областях сложной/изменяющейся геометрии, обеспечивающих автоматическое выделение и разрешение локальных структур решения на динамически адаптируемой сетке с априорной аналитической оценкой и активным контролем ошибки решения. Таким образом, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 395 страниц, включая 161 рисунок и список литературы из 337 наименований.

Во введении подробно обсуждается степень разработанности темы диссертации и обосновывается ее актуальность, формулируются цели и задачи исследования, а также основные новые научные результаты работы и положения, выносимые на защиту. Приводится внушительный список международных конференций и семинаров, на которых были представлены результаты работы, перечислены публикации по теме диссертации с указанием личного вклада автора.

Первая глава диссертации посвящена описанию разработанного автором адаптивного вейвлетного коллокационного метода для решения уравнений математической физики. В разделах 1.1, 1.2 описаны основные свойства вейвлетов первого и второго поколений. В разделе 1.3 представлены ключевые элементы разработанного метода – многоуровневое вейвлетное пороговое сжатие с активным контролем глобальной ошибки решения, восстановление решения с применением быстрого адаптивного вейвлетного преобразования второго поколения, локальная адаптация сетки на основе вейвлетного анализа, вычисление пространственных производных с помощью вейвлетных интерполянтов. В разделах 1.4 – 1.6 рассмотрены особенности реализации разработанного метода для решения эллиптических, параболических и гиперболических (в том числе, с разрывным решением) уравнений; представлены результаты решения тестовых задач, демонстрирующие сходимость и эффективность метода.

Во второй главе обсуждаются вопросы параллелизации адаптивного вейвлетного коллокационного метода. Рассмотрены варианты параллельного вейвлетного преобразования с различными схемами синхронизации; описана динамическая параллельная древовидная структура данных с однонаправленным списком связей; представлены параллельные алгоритмы сеточной адаптации, восстановления функции и вычисления производных на основе вейвлетов; описан алгоритм динамической балансировки загрузки процессов с сохранением локальности соседних узлов адаптивной сетки. Проведена проверка эффективности и масштабируемости распараллеливания; дана оценка теоретически возможной эффективности.

В третьей главе представлен пространственно-временной адаптивный вейвлетный коллокационный метод, разработанный для решения параболических задач с одновременной адаптацией сетки в пространстве и времени с целью

разрешения структур решения на оптимальной пространственно-временной сетке с активным контролем глобальной ошибки интегрирования во времени.

Четвертая глава посвящена демонстрации возможностей применения разработанных методов для решения разнообразных задач механики жидкости и газа в простой геометрии. В частности, рассмотрены задачи слияния пары вихрей и затухания двумерной турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости. Дозвуковые течения вязкого газа представлены задачами взаимодействия диффузионного пламени с парой вихрей и одномодальной неустойчивости Рэлея–Тейлора на поздней стадии. В рамках модели невязкого газа решены задачи взаимодействия ударной волны с границей раздела газов (неустойчивость Рихтмайера–Мешкова) и прямого инициирования детонации.

В пятой главе диссертации представлен метод погруженных границ со штрафными функциями, обеспечивающий возможность применения адаптивных вейвлетных коллокационных методов для решения задач в сложной геометрии, включая течения с движущимися и деформируемыми границами. Предложено обобщение метода штрафных функций Бринкмана для численного моделирования дозвуковых течений сжимаемого вязкого газа с возможностью контроля ошибки численного решения. Разработаны характеристические штрафные функции, позволяющие задавать однородные и неоднородные граничные условия Дирихле, Неймана и Робена и обеспечивающие правильное отражение акустических и ударных волн от поверхности твердого тела. На ряде модельных задач проведена проверка сходимости решения, подтверждено соответствие результатов вычислений асимптотической оценке ошибки.

В шестой главе даны примеры приложения разработанных методов штрафных функций совместно с адаптивным вейвлетным коллокационным методом для решения задач механики жидкости и газа со сложной геометрией обтекаемой поверхности. Рассмотрено течение несжимаемой вязкой жидкости сквозь периодический массив цилиндров и турбулентное течение за квадратным цилиндром, а также сверхзвуковое обтекание массива произвольно расположенных цилиндров. Продемонстрировано совпадение решений, полученных в неподвижной и движущейся системе отсчета, для задач до- и сверхзвукового обтекания цилиндра.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе, а также очерчены направления дальнейшего развития темы.

Обоснованность научных положений и выводов диссертации подтверждена численными экспериментами по проверке теоретически полученных оценок асимптотической сходимости разработанных методов на ряде тестовых задач с известными аналитическими или численными решениями. **Достоверность** полученных результатов подтверждена сопоставлением с опубликованными экспериментальными и численными результатами других авторов, полученными с использованием альтернативных методов. **Новизна** выносимых на защиту результатов также не вызывает сомнений, поскольку в диссертации разработан принципиально новый класс адаптивных коллокационных методов на основе вейвлетов второго поколения, обеспечивающий автоматическое выделение и разрешение локальных структур решения на адаптивных сетках с активным контролем ошибки.

Замечания по работе:

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?

Высказанные замечания не снижают высокой оценки работы в целом и ни в коей мере не ставят под сомнение обоснованность, новизну и достоверность полученных результатов. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработан новый класс адаптивных вычислительных методов для решения широкого спектра задач математической физики в областях

сложной геометрии с аналитической априорной оценкой и активным контролем ошибки решения, что можно квалифицировать как крупное научное достижение в области вычислительной математики. Основные результаты диссертации опубликованы в 42 изданиях, индексируемых в Web of Science или Scopus, и докладывались на многочисленных международных конференциях и на семинарах университетов и научных центров. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и основные результаты.

Исходя из сказанного, считаю, что рецензируемая работа соответствует специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика» и удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а ее автор, Васильев Олег Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика».

Официальный оппонент

д. ф-м. н.

Д. К. Зайцев

Зайцев Дмитрий Кириллович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 29
т. 8-812-2972419, zaitsev_dk@spbstu.ru, <http://aem.spbstu.ru>



ДОСТОВЕРЯЮ
и специалист
Кадров
«11» 05 2014 г.