

ОТЗЫВ официального оппонента на диссертацию
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
АСФАНДИЯРОВА Данила Гамилевича
на тему «Численное моделирование пристенной турбулентности на
основе схемы КАБАРЕ»
по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

В наше время моделирование нестационарных турбулентных течений является одним из наиболее востребованных приложений вычислительного эксперимента при решении промышленно-ориентированных задач. Следует отметить, что даже учитывая высокие темпы роста вычислительных мощностей, прямое численное моделирование турбулентного течения, подразумевающее разрешение всех масштабов неоднородностей, пока не представляется возможным. Согласно оценкам экспертов, такой подход может стать возможным лишь к концу этого столетия. В такой ситуации чрезвычайно *актуальной* становится разработка различных моделей, позволяющих проводить расчеты с высокой точностью при неполном разрешении спектра турбулентных пульзаций в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Развитию одного из таких подходов посвящена диссертация Асфандиярова А.Г.

С точки зрения математического моделирования турбулентных течений, наибольшую сложность представляет область вблизи твёрдой стенки обтекаемого препятствия. К настоящему моменту разработано достаточно большое количество моделей пристенного слоя, используемых при вихреразрешающем моделировании турбулентных течений. Они используются в рамках подхода, получившего название *Моделирование крупных вихрей* (LES), а также в гибридных методах, учитывающих вблизи стенки различные модели замыкания для осреднённых уравнений Навье-Стокса (RANS). Общей чертой всех подобных моделей является необходимость их тщательной адаптации к различным классам задач.

Снижение эмпиризма при построении той или иной модели или выборе того или иного подхода в целом является *актуальной* задачей, решение которой, в свою очередь, невозможно без разработки современных программных комплексов, ориентированных на высокопроизводительные суперкомпьютерные вычисления, и проведения на них вихреразрешающих расчётов турбулентных течений как в рамках прямого численного моделирования (в тех отдельных случаях, где это возможно), так и LES или RANS-LES моделирования.

Диссертационная работа Асфандиярова Д.Г. состоит в разработке *нового* вычислительного алгоритма для вихреразрешающего моделирования пристенных турбулентных течений, его реализации в виде программного комплекса и проведении с его помощью серии расчётов одного из канонических пристенных течений, а именно течения в плоском канале. Разработанный Асфандияровым Д.Г. вычислительный алгоритм построен на основе явной аппроксимации конвективных потоков по известной схеме КАБАРЕ и решении двух сеточных уравнений эллиптического типа для обеспечения условия несжимаемости. Для решения этих уравнений большой размерности автор использует ранее разработанный Кузнецовым Ю.А. быстрый прямой метод, допускающий эффективное распараллеливание. Высокая точность предложенного в диссертационной работе вычислительного алгоритма показана на серии расчетов по прямому численному моделированию течения в канале при различных числах Рейнольдса. Также этот алгоритм используется и при проведении расчётов в рамках *неявного* LES (ILES) моделирования трёхмерного турбулентного течения в плоском канале. Привлекательной стороной подхода ILES, как известно, является отсутствие модели, описывающей не разрешенные по сетке масштабы неоднородностей турбулентного течения. Роль такой модели выполняет вязкость численного метода. Для реализации ILES подхода на основе схемы КАБАРЕ, автором предложен искусственный приём, позволяющий повысить точность

воспроизведения турбулентного течения вблизи стенки даже при неполном сеточном разрешении спектра турбулентных пульсаций.

Достоверность полученных Асфандияровым Д.Г. результатов подтверждается их сравнительным анализом по отношению к данным физического эксперимента и расчётным данным, полученным другими авторами.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 137 страниц. Список литературы содержит 107 наименований.

Во введении изложена актуальность выбранной темы, её основная цель работы, методология исследования, научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводится список докладов и публикаций, подготовленных автором по теме диссертации.

В первой главе даётся краткий обзор работ по прямому численному моделированию течения в плоском канале, а также рассмотрены особенности вихреразрешающего моделирования турбулентного течения возле твердой стенки.

Во второй главе представлен вычислительный алгоритм для расчета течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале. Явная аппроксимация конвективных потоков проводится по схеме КАБАРЕ. Для обеспечения условия несжимаемости, согласно выбранному алгоритму, требуется решать два сеточных уравнения Пуассона для давления. Для этих целей используется блочно-параллельный быстрый прямой метод Ю.А. Кузнецова. В этой же главе описывается представлен программный комплекс, реализующий предложенный автором вычислительный алгоритм и предназначенный для проведения расчетов на параллельных вычислительных системах с разделенной памятью с использованием библиотеки MPI.

В третьей главе приводятся результаты прямого численного моделирования течения в плоском канале с использованием разработанного вычислительного алгоритма в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Полученные результаты подробно сравниваются с данными расчета других авторов, использующих псевдоспектральный метод высокого порядка точности. Здесь же рассматриваются вопросы построения оптимальных сеток, размеров расчетной области по длине канала для получения приемлемой точности расчета. Также делаются выводы о вычислительной эффективности предложенного метода.

Четвертая глава представляет результаты расчета задачи о турбулентном течении в канале, полученные в рамках подхода ILES. Для улучшения предсказания средних характеристик потока автором предлагается модификация метода в первом пристенном слое расчетных ячеек.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Диссертационная работа представляет собой полное и законченное исследование по теме, указанной в названии. Содержание диссертации позволяет сделать вывод о высокой научной квалификации автора по выбранной специальности.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

К диссертационной работе есть несколько критических замечаний.

1. В диссертационной работе не содержится сведений по верификации разработанного вычислительного алгоритма на тестовых задачах с известными точными решениями, для которых можно было бы представить важную информацию о сеточной сходимости нового метода. О корректной работе алгоритма можно судить лишь косвенно путем сравнения с экспериментальными данными и численными результатами других авторов, полученных по задаче о течении в канале.
2. Подход с модификацией метода в первом слое сеточных ячеек для улучшения моделирования турбулентного течения в пристенной области в рамках метода ILES не является универсальным и оставляет

много вопросов, среди которых следующие: какой высоты должен быть этот первый слой по отношению к характерным физическим размерам задачи; почему модификация касается одного слоя, а не двух или трёх, например; может ли быть достаточно одного и того же первого слоя ячеек с фиксированной высотой достаточно для правильного моделирования течения при различных числах Рейнольдса. Подгонка параметров первого слоя под задачу может оказаться не менее трудоёмкой процедурой, как и настройка той или иной модели пристенного моделирования в рамках LES и RANS-LES подходов.

3. Предложенный подход с модификацией метода в первом слое сеточных ячеек принципиальным образом зависит от характера течения в пристенной области. В частности, у рецензента есть большие сомнения в его применимости для отрывных турбулентных течений.

Отмеченные замечания не являются критичными, не снижают научной и практической значимости результатов, полученных Асфандияровым Д.Г., и не влияют на моё общее положительное впечатление от его диссертационной работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета М.В. Ломоносова.

Уверена, что соискатель Асфандияров Данил Гамилевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник Отдела 16

Федерального государственного учреждения

«Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной математики

им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Козубская Татьяна Константиновна

01.11.2019

Контактные данные:

тел.: +7 499 9781314, e-mail: office@keldysh.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Адрес места работы: 125047, Москва, Миусская пл., д.4

Тел: +7 499 2207218, e-mail: kozubskaya@imamod.ru

Подпись сотрудника ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Т.К. Козубской удостоверяю:

Ученый секретарь

к.ф.-м.н.

05.11.2019



А.И. Маслов