

## УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук

академик РАН



*Ю. Г. Евтушенко*  
Ю. Г. Евтушенко

« 23 » апреля 2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Вячеслава Юрьевича Глотова «Математическая модель свободной турбулентности на основе принципа максимума», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### Общая характеристика работы

Диссертационная работа Вячеслава Юрьевича Глотова посвящена одной из актуальных проблем вычислительной гидродинамики – математическому моделированию турбулентных течений сплошных сред. Наиболее разработанные подходы к моделированию турбулентности, основанные на процедурах осреднения уравнений Навье-Стокса (т.н. RANS-модели) или разделения крупных и малых масштабов движения (т.н. LES-модели), не обладают свойством универсальности, т.к. содержат ряд модельных настроечных параметров, значение которых определяется на основании эмпирических данных. Поэтому с ростом ресурсов вычислительной техники возникает все больший интерес к методу прямого численного моделирования полных нестационарных уравнений Навье-Стокса (т.н. DNS-модель). Единственное допущение, на котором базируется модель DNS, состоит в том, что уравнения Навье-Стокса адекватно описывают не только ламинарные, но и турбулентные течения. Данный подход полностью свободен от эмпиризма и не предполагает использования дополнительных модельных членов и уравнений.

Строго говоря, проведение прямого численного моделирования предполагает разрешение всех масштабов турбулентности – от интегральных, определяемых размерами системы, и вплоть до колмогоровских диссипативных масштабов. Однако диапазон этих масштабов при больших числах Рейнольдса, представляющих наибольший интерес с точки зрения промышленных приложений, оказывается настолько велик, что разрешение всех масштабов расчетной сеткой не представляется возможным. Поэтому возникает вопрос о проведении DNS-расчетов на грубых сетках не разрешающих всех масштабов турбулентности.

Возможность использования грубых сеток, не разрешающих колмогоровский масштаб турбулентности, базируется на представлении, что основная часть энергии турбулентности заключена именно в крупных «энергосодержащих» вихрях, а малые вихри нужны лишь для отвода энергии каскада турбулентности на уровень вязкой диссипации. Ясно, что необходимо использовать численные схемы, имеющие на больших масштабах улучшенные диссипативные и дисперсионные свойства, но обладающие на малых масштабах достаточной внутренней диссипацией. Последняя должна обеспечить передачу энергии от крупных вихрей на «подсеточный» уровень масштабов, неразрешенных сеткой, и при этом не нарушить статистические характеристики турбулентности для разрешаемых масштабов. Впервые описанный подход, получивший название «неявное моделирование крупных вихрей» (Implicit LES), появился в начале 90-х годов XX века. Он основывался на использовании схем высокой разрешающей способности (TVD, ENO, WENO и др.), необходимой составной частью которых является т. н. процедура нелинейной коррекции потоков, обеспечивающая, в частности, упомянутую выше фильтрацию «подсеточных» масштабов.

В диссертационной работе Вячеслава Юрьевича Глотова разрабатывается новый класс вычислительных алгоритмов Implicit LES. Подход основан на обладающих минимальным вычислительным шаблоном схемах «Кабаре» и/или «Крест», дополненных процедурой нелинейной коррекцией потоков,

использующей принцип максимума<sup>1</sup>. В этом состоит его *научная новизна*. Предложенный подход тестируется на ряде модельных задач, известных в теории свободной турбулентности. Выясняется, в частности, что разработанные вычислительные алгоритмы, как минимум, не уступают, а по ряду свойств и несколько превосходят некоторые схемы высокой разрешающей способности. В этом можно усмотреть *практическую значимость* работы Вячеслава Юрьевича Глотова. *Обоснованность и достоверность* результатов работы обеспечивается использованием подтвержденных практикой теоретических положений и методов математического моделирования, применением при моделировании известной базовой модели механики сплошных сред, корректностью математических постановок рассматриваемых задач, а также сравнением результатов вычислительных экспериментов, с имеющимися теоретическими положениями и с результатами расчетов по алгоритмам других авторов.

### Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 134 страницы. Список литературы содержит 97 наименований.

*Во введении* дается краткий обзор существующих методов моделирования турбулентности, а также сформулированы цель и задачи работы, дается обоснование актуальности выбранной темы.

*В первой главе* диссертации обосновывается выбор базового алгоритма при построении модели турбулентности. Рассматриваются одномерные модельные задачи. Основными требованиями к алгоритму стали минимальность его внутренней диссипации и компактность вычислительного шаблона. Среди схем второго порядка аппроксимации на компактном шаблоне только две обладают свойством бездиссипативности – это схема «Кабаре» и схема «Крест». Схема

---

<sup>1</sup> Исходно схемы «Кабаре» и «Крест» являются трехслойными. Однако они могут быть представлены как двухслойные за счет расширения списка зависимых переменных – включения в него потоковых переменных. При этом вычислительный шаблон оказывается локализованным в пределах одной ячейки разностной сетки.

приводится к двухслойному консервативному представлению с разделением консервативных и потоковых переменных (как в схеме «Кабаре»). Помимо этих схем рассматривается также класс гибридных схем «Кабаре»+«Крест», использующих линейную комбинацию направленной и центральной экстраполяции при вычислении новых значений потоковых переменных. На примерах тестовых задач демонстрируются достоинства и недостатки рассматриваемых схем. Далее, конструируется сеточный диссипативный механизм, который сохраняет статистические характеристики турбулентных течений в инерционном интервале для всех вихрей, представимых на заданной расчетной сетке. В качестве такого механизма была берется нелинейная коррекция потоков на основе принципа максимума, предложенная ранее для обеспечения монотонности газодинамических течений в схеме «Кабаре». На примерах моделирования одномерного аналога турбулентности (т. н. «бюргюлетности») показывается, что данный выбор в полной мере оправдал себя.

*Вторая глава* полностью посвящена обзору существующей теории двумерной и трехмерной турбулентности, результатов её численного моделирования и экспериментальных данных.

*В третьей главе* рассматриваются двумерные задачи и ортогональные расчетные сетки. Проводится обобщение рассматриваемых схем на случай уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Приводятся результаты численного моделирования одиночных вихрей и двумерной турбулентности, как свободно-затухающей, так и при наличии форсинга. Показывается, что при использовании предложенного вычислительного алгоритма наклоны расчетных кривых энергетических спектров совпадают с теоретическими («-4» в энстрофийном интервале и «-5/3» в энергетическом интервале) вплоть до самых малых масштабов, разрешенных сеткой.

*В четвертой главе* рассматриваются трехмерные течения, а именно, вихри Ренкина, Хилла и Тейлра-Грина. Результаты моделирования турбулентности, возникающей при развале вихря Тейлора-Грина, полученные с помощью алгоритмов «Кабаре» и «Крест», сравниваются с известным DNS-расчетом Брэчета. В целом расчеты демонстрируют высокое качество алгоритмов, предложенных автором диссертации. Схема «Кабаре» дает хорошее соответствие

результатам DNS-расчетов на сетках в 3 раза более крупных по каждому направлению. Однако, заметно значительное численное демпфирование структур, определенных менее чем на 5 узлах расчетной сетки. На примере задачи со случайным начальным полем скоростей делаются попытки улучшения расчетных спектральных характеристик турбулентности с привлечением гибридных схем «Кабаре»+«Крест».

*В заключении* диссертационной работы перечислены защищаемые положения, даны сведения об апробации работы и перечислены публикации по теме диссертации.

### **Замеченные недостатки**

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания.

1. Как можно заключить из текста диссертации и автореферата, основные расчеты были выполнены на многопроцессорном вычислительном комплексе «Ломоносов». В 3-м пункте защищаемых положений анонсирован разработанный автором комплекс параллельных программ для моделирования уравнений Навье-Стокса в несжимаемой жидкости на ортогональных сетках (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618645). Однако никаких данных об этом комплексе и о его эффективности (хотя бы время расчета) в диссертации не приводится, хотя это было бы уместным.

2. В диссертации и автореферате указывается, что результаты проделанной работы в настоящее время используются в ИБРАЭ РАН при расчетах перемешивания турбулентных затопленных струй водорода под защитным колпаком АЭС при вероятностном анализе безопасности, но никакой информации далее не приводится. Было бы уместным дать в диссертации хотя бы схематичную постановку этой задачи и примеры ее расчетов.

3. Слишком малые размеры рисунков и графиков в тексте диссертации, а также слишком скупая информация в подрисуночных подписях.

Сделанные замечания, тем не менее, не влияют на окончательную положительную оценку работы.

### **Заключение ведущей организации**

В диссертационной работе решена сложная математическая и вычислительная проблема, а именно, разработан и на нескольких канонических задачах опробован новый класс вычислительных алгоритмов Implicit LES для расчета свободно-турбулентных течений. Алгоритмы отличаются компактностью вычислительного шаблона и улучшенными диссипативными и дисперсионными свойствами. Они, как минимум, не уступают, а по ряду свойств и несколько превосходят некоторые схемы высокой разрешающей способности. Разработанные автором диссертации алгоритмы реализованы им в виде комплекса параллельных программ (ориентированный на многопроцессорный вычислительный комплекс «Ломоносов»).

Все положения и выводы диссертации достоверны и научно обоснованы. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми и имеют общенаучный интерес. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Выносимые на защиту положения опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой серьезную научно-квалификационную работу и имеет важное теоретическое и прикладное значение. Автор проявил глубокую физико-математическую эрудицию, высокий уровень владения численными методами и изобретательность при программной реализации предложенных им вычислительных алгоритмов.

Результаты работы могут быть использованы в ряде научно-исследовательских учреждений, например, в Вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН, Физическом факультете и факультете Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, Московском физико-техническом институте, Техническом университете МИРЕА, ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» и др.

Диссертационную работу Вячеслава Юрьевича Глотова «Математическая модель свободной турбулентности на основе принципа максимума» можно квалифицировать как завершенное научное исследование в области математического моделирования и вычислительных технологий. Тема и

содержание диссертационной работы соответствуют специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». *Диссертация отвечает всем требованиям, предъявляемых ВАК к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Вячеслав Юрьевич Глотов, заслуживает присуждения ему этой ученой степени.*

Отзыв подготовлен на основании протокола заседания семинара отдела Механики сплошных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук от «17» марта 2015 года, протокол №1.

Заведующий отделом Механики сплошных сред,

д. ф.-м. н.

А.А. Чарахчьян

Ведущий научный сотрудник,

к. ф.-м. н., доцент

В.Н. Котеров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук

119333, Москва, ул. Вавилова, 40.

E-mail: [wcan@ccas.ru](mailto:wcan@ccas.ru), тел.: 8-499-135-04-40