

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Глотова Вячеслава Юрьевича
«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

Диссертация В.Ю. Глотова направлена на разработку вычислительных моделей турбулентных течений, развивающихся при высоких числах Рейнольдса вдали от твердых поверхностей. Сегодня расчеты такого рода течений все в большей мере опираются на подходы, развиваемые в рамках концепции метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES). Современная компьютерная техника позволяет использовать такие расчетные сетки, на которых разрешаются не только крупные, но и средние, и даже весьма мелкие вихревые структуры. Как следствие, одним из основных, если не определяющим требованием к вычислительной модели свободной турбулентности становится надежное численное воспроизведение процесса энергетического каскада на максимально широком (для данной сетки) участке инерционного интервала спектра турбулентных пульсаций. В классической концепции метода LES подразумевается, что увод энергии на подсеточные масштабы контролируется полуэмпирической моделью подсеточной турбулентности, т.е. явно вводится диссипативный механизм физического характера. Сегодня, однако, хорошо известно, что численная диссипация схем, обеспечивающих устойчивость вычислений, может быть сравнима с диссипацией, вводимой подсеточной моделью, а в ряде случаев иметь даже превалирующую роль. Осознание этого, а также желание избавиться от «эмпиризма», присущего моделям подсеточной турбулентности, послужило толчком к развитию нового направления в моделировании турбулентности на основе вихреразрешающих подходов, а именно: метода LES с неявным введением достаточного по мощности диссипативного механизма только за счет собственных свойств выбранной численной схемы - т.н. метода Implicit LES (ILES). Начало работ в этом направлении связывается с публикацией метода монотонизации интегрирования уравнений динамики крупных вихрей (MILES), разработанного в начале 90-х годов исследователями (J.Boris и др.) из Naval Research Laboratory (США). Общая концепция метода MILES основана на идее использования нелинейных схем высокой разрешающей способности, разработанных ранее для расчета разрывных газодинамических течений. При LES-моделировании эти схемы призваны обеспечить фильтрацию подсеточных пульсаций без введения искусственной вязкости. В течение последних двух десятилетий было предложено множество реализаций метода ILES, с разными способами введения численной диссипации при дискретизации конвективных потоков (MILES-подход, использование противопоточных схем и др.). Исследования в этой области вычислительной математики сохраняют высокую актуальность и активно продолжаются. В их ряду стоит и диссертационное исследование В.Ю.Глотова, направленное на разработку, в соответствии с концепцией MILES, эффективной вычислительной модели свободной турбулентности на основе разностных схем, в

которые вводятся нелинейная коррекция конвективных потоков, обеспечивающая аккуратное описание инерционного интервала пульсаций, вплоть до наиболее мелких вихрей, представимых на выбранной расчетной сетке.

Работа В.Ю.Глотова, состоящая из введения, 4-х глав и заключения, носит выраженный методический характер. Это придает ей как научную, так и практическую значимость.

В диссертации просматривается несколько взаимосвязанных направлений. Одно из них – это распространение разностной схемы КАБАРЕ на случай двумерных и трехмерных течений несжимаемой жидкости и оценка возможностей этой схемы по предсказанию структуры и спектральных характеристик свободной турбулентности при введении нелинейной коррекции потоков. Судя по всему, исходно ожидалось, что уникальные свойства схемы КАБАРЕ, обеспечивающие ее высокую эффективность при расчете ударно-волновых и аэроакустических процессов, столь же положительно проявятся и в случае распространения данной схемы на LES-моделирование несжимаемых турбулентных течений, и приведут к созданию «идеального» или почти идеального LES алгоритма. Оказалось, однако, что в определенной мере это ожидание оправдалось лишь в отношении задач двумерной турбулентности: в работе, в частности, показано, что для задачи форсинга однородной изотропной турбулентности, удается на разных по густоте сетках правильно воспроизвести обратный энергетический каскад с законом Колмогорова и прямой каскад энтропии с наклоном «-4» или «-3», в зависимости от варианта схемы (оба случая наклона допускаются альтернативными теориями двумерной турбулентности, достаточно полный обзор которых приведен во второй главе диссертации). Получению данного результата предшествовала представленная в третьей главе работа по формулировке схемы КАБАРЕ для двумерных задач несжимаемой вязкой жидкости, либо в переменных «функция тока-завихренность», либо в переменных «скорость-давление» (и та, и другая формулировка обладают научной новизной), а также серия тестовых и сопоставительных расчетов для весьма интересной в методическом отношении модельной задачи о «жизни» одиночного невязкого вихря.

Материалы четвертой главы свидетельствуют, что в случае трехмерной свободной турбулентности схема КАБАРЕ не обладает свойствами идеального LES алгоритма, по крайней мере, при использовании переменных «скорость-давление». В области больших волновых чисел спектры имеют выраженное отклонение вниз от закона Колмогорова (автор отмечает, что «вихревые структуры, определенные менее чем на 5-6 узлах сетки испытывают сильное численное демпфирование»). Логично предположить, что эта относительная неудача сформировала еще два направления исследований соискателя: использование схемы «Крест» («чехарда») с необходимыми модификациями и далее введение и приложение гибридных схем. Соискателем предложена новая модификация схемы «Крест», идентифицируемая как схема «двухслойный крест» с разнесенными консервативными и потоковыми переменными, аналогично схеме КАБАРЕ. Несомненное достоинство введенной модификации схемы заключается в компактности ее шаблона и в возможности введения коррекции конвективных потоков, в частности, как это принято в диссертации, на основе принципа

максимума. Гибридные схемы вводятся в виде линейной гибридизации схем КАБАРЕ и «двухслойный крест» (на этапе экстраполяции потоковых переменных); изменяя параметр гибридизации α можно регулировать диссипативные и дисперсионные свойства схемы.

Естественно, что введение в рассмотрение новых схем выдвинуло задачу их детального спектрального анализа в линейном и нелинейном случае на примере простейшего одномерного уравнения переноса. Обширный материал, полученный по результатам такого анализа, приводится в первой главе диссертации. Там же представляются результаты решения нелинейного уравнения Бюргерса (одномерного аналога уравнений Навье-Стокса) при задании периодических граничных условий и случайных начальных данных. Наиболее интересными здесь являются сопоставительные данные по расчету затухающей «бюргюленции» на основе разных схем, как введенных автором, так и представленных в литературе. Соискателем получено, в частности, что с позиций концепции идеального LES наилучший результат достигается в случае использования гибридной схемы при $\alpha=0,3$. Примечательно, однако, что в случае моделирования трехмерной свободной турбулентности по гибридной схеме оптимальным является значение $\alpha=0,9$. Это наблюдение лишний раз свидетельствует, что параметры «технологических» настроек вычислительной модели, определенные по результатам решения одномерных задач, чаще всего оказываются непригодными для многомерных задач.

Полученные в диссертации результаты представляются достоверными по следующим обстоятельствам. В работе использованы вычислительные подходы и модели, которые достаточно апробированы, а также классические методы линейного спектрального анализа. Применимость использованных вычислительных методов в условиях рассматриваемых задач детально проанализирована в диссертации, а правильность выбора основных схемных факторов обоснована. В работе повсеместно, где это возможно, проводится сопоставление с данными расчетов других авторов. Результаты, полученные в диссертации для задач гидродинамического содержания, физически непротиворечивы.

При прочтении диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

1. Отсутствует прямое указание на то, с использованием какой формулировки (в переменных «функция тока-завихренность» или «скорость-давление») получены представленные результаты для двумерной задачи об одиночном вихре, читателю приходится догадываться об этом по косвенным признакам. В одном из пунктов Заключение сообщается о проведении (для той же задачи) сравнительного анализа решений, полученных в разных наборах переменных, однако в тексте диссертации этот анализ отсутствует. Сравнение решений по разным формулировкам дается, правда, в опубликованных статьях соискателя, но весьма желательно было бы видеть это и на страницах диссертации.

2. Неясно, проводились ли расчеты затухания и форсинга двумерной однородной изотропной турбулентности и при использовании переменных «функция тока-завихренность», или только по схеме для естественных переменных «скорость-давление», формулировка которой содержит, согласно соотношению (3.29),

«свободный» параметр, принимавшийся в расчетах равным нулю или единице. Кстати, в формуле (3.29) содержится опечатка: должно быть V_{CRN} и V_{CLN} , а не U_{CRN} и U_{CLN} .

3. В первый пункт Заключения включен вывод о том, что для схемы Крест «по аналогии со схемой КАБАРЕ, предложен алгоритм монотонизации потоковых переменных на основе принципа максимума, устраняющий нелинейную неустойчивость Филлипса». Вместе с тем, из рис. 1.17 диссертации следует, что введенный алгоритм монотонизации для схемы Крест, по-существу, не работает. Имеет ли смысл его вообще вводить?

4. На стр. 55 бегло упоминается схема WENO5-G-RK3, по которой для спектров одномерной задачи получены очень хорошие результаты (рис. 1.27). Неясно, является ли это оригинальной или уже известной реализацией схемы WENO? Если оригинальной, то почему она не описана сколько-нибудь детально?

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не изменяют общего положительного впечатления о работе, выполненной В.Ю.Глотовым. Автором получен ряд новых достоверных результатов, имеющих научную и практическую значимость. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в научной печати. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертации.

Считаю, что представленная В.Ю.Глотовым диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а ее автор Глотов Вячеслав Юрьевич заслуживает присуждения искомой степени по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой гидроаэродинамики
СПб Политехнического Университета Петра Великого



Смирнов Евгений Михайлович

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
192251, С.-Петербург, Политехническая улица, д.29,
тел./факс (812) 552-66-21, email: aero@phmf.spbstu.ru