

## **ОТЗЫВ**

**на диссертацию А.В. Гарбарука «Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**

### **Актуальность.**

Проблема турбулентности уже более ста лет является проблемой номер один в теоретической гидромеханике. Неудивительно, что этой проблеме посвящены десятки монографий и огромное количество статей. В настоящее время, несмотря на значительные усилия ученых и исследователей во всём мире, физическая сторона явления турбулентности всё еще остаётся недостаточно понятой. Так, неясно, почему большие массивы молекул при некоторых условиях начинают вести себя непредсказуемо, образуя сложные вихревые структуры в макродвижении жидкости и газа. В то же время в подавляющем большинстве прикладных задач имеют место именно турбулентные течения. Это вынуждает, невзирая на отсутствие полного понимания всех физических аспектов явления турбулентности, создавать и развивать приближенные инженерные подходы и модели для описания и расчета тех или иных характеристик турбулентных течений. В основе инженерного описания турбулентных течений лежат уравнения Навье–Стокса. Их осреднение приводит к уравнениям Рейнольдса или же к так называемым «фильтрованным» уравнениям. И те, и другие решаются численно. В настоящее время инженерное искусство моделирования турбулентных течений достигло очень высокого уровня, и большинство подходов (URANS, LES, RANS-LES и их усовершенствованные модификации) и полуэмпирических моделей турбулентности (их десятки) вошли в качестве неотъемлемой части в универсальные коммерческие пакеты (ANSYS, FlowVision и др., их несколько десятков), в программное обеспечение небольших научных групп и крупных компаний (Boeing, Pratt&Whitney и многих других), в открытые коды. Возникновение турбулентности часто связывается с потерей устойчивости ламинарного течения, причём это относится как к стационарным, так и к нестационарным течениям. Обычно исследование устойчивости ламинарных течений сводят к исследованию устойчивости (линейной или нелинейной) решений уравнений

Навье–Стокса, что в целом оправдано, хотя линейная теория иногда приводит к парадоксам.

В диссертационной работе А.В. Гарбарука рассматриваются, анализируются и развиваются различные подходы к численному моделированию пристеночных турбулентных течений, отдельная глава посвящена исследованию устойчивости турбулентных течений. Рассмотрен очень широкий круг методологически и практически важных задач. Ряд подходов предложен и использован впервые. В связи со сказанным выше **тема диссертационного исследования безусловно актуальна.**

**Диссертация состоит из** введения, в котором дан анализ современного состояния и тенденций развития численного моделирования пристеночных турбулентных течений и обосновывается актуальность темы исследования, пяти глав, в которых последовательно представлен аналитический обзор работ на момент начала текущего века, приведены новые результаты автора с использованием различных известных и развитых в работе подходов, пионерские результаты автора по исследованию глобальной устойчивости турбулентных течений на основе линейной теории устойчивости применительно к уравнениям Рейнольдса, заключения, в котором сформулированы основные результаты, и списка литературы, насчитывающего 435 наименований.

**Научная новизна и соответственно научная значимость диссертации состоит** в развитии моделей и подходов при численном моделировании пристеночных турбулентных течений, в разработке новых технологий такого моделирования, в том числе для важного класса отрывных течений, в полученных новых результатах при решении как тестовых, так и актуальных практических задач, а также в предложенном автором подходе к анализу глобальной устойчивости турбулентных течений.

#### **Достоверность результатов.**

Методология, используемая автором, является общепринятой в практике численного моделирования турбулентных (и не только турбулентных) течений, однако, если рассуждать чисто теоретически, вопрос о достоверности результа-

тов при использовании данной методологии является дискуссионным. Соображения по этому вопросу будут приведены ниже в разделе **Дискуссионные положения и замечания**.

**Практическая значимость диссертации** не вызывает сомнений и состоит из двух частей. Во-первых, в работе существенно развита технология численного моделирования турбулентных течений на основе различных подходов (RANS, глобальный RANS-LES, DDES и IDDES на основе модели турбулентности SST), обеспечивающая более высокую точность расчетов, и даны соответствующие рекомендации. Во-вторых, получены новые важные для практики результаты, наиболее значимыми из которых являются подробные расчетные данные по нестационарным аэроакустическим нагрузкам на элементы пилотируемого космического корабля при полете в плотных слоях атмосферы.

#### **Дискуссионные положения и замечания.**

Сразу отмечу, что существенных замечаний по представленной диссертации нет. К «шероховатостям» можно отнести опечатки, неудачные стилистические обороты, отсутствие ссылок на известные работы российских ученых и исследователей, относящиеся к тематике работы и т.п.

Мне хотелось бы остановиться на некоторых общих вопросах, имеющих прямое отношение к представленной диссертационной работе.

1. Рассмотрим вначале вопрос об обосновании достоверности результатов численного моделирования в соответствии с теми пунктами, которые приведены стр. 20 диссертации. Полемизуя с автором, хотелось бы отметить, что все приведенные доводы в пользу достоверности не являются достаточными.

- Использование фундаментальных законов сохранения механики жидкости и газа еще не гарантирует достоверности. Уравнения, описывающие эти законы (уравнения Рейнольдса в RANS-подходе или фильтрованные уравнения Навье–Стокса в подходе LES, или уравнения при комбинированном RANS- LES подходе) не образуют замкнутой системы. Для их замыкания используется множество способов, и именно эти дополнительные соотношения являются ключевой особенностью той или иной модели

турбулентных течений. Часто даже наиболее распространенные и наиболее точные по умолчанию модели дают разные результаты, поэтому самих уравнений законов сохранения недостаточно для адекватности модели течения.

- Исследование влияния параметров численного алгоритма (вид и размер расчетной области, тип сетки, размер и сгущение ячеек, шаг по времени и др.) на результаты расчета – это очень важная часть численных исследований, но опять-таки не достаточная. Здесь проверяется тенденция сходимости результатов в себе (в частности, сходимость по сетке), что придает некоторую практическую уверенность вычислителя в правильности результатов расчетов, но формально это не является даже верификацией численной модели. Более того, стремление размеров ячеек сетки к нулю при конечном числе значащих цифр в ЭВМ ведет к росту погрешности.
- Согласие результатов расчетов с использованием собственной модели и собственного численного алгоритма и кода с результатами, полученными, например, даже в таких известных пакетах, как ANSYS CFX или ANSYS Fluent, опять же повышает уверенность самого вычислителя в правильности расчетов, но является лишь косвенным доводом в пользу собственной численной модели. К сожалению, даже в таких авторитетных пакетах встречаются заметные неточности в используемых моделях. Это в меньшей степени относится к моделям течений без физико-химических превращений, но часто к моделям более сложных течений, когда в пакете используются «сырые», а порой и ошибочные модели элементарных процессов (в частности, если говорить о близкой мне области двухфазных течений, это модели взаимодействия частиц примеси между собой, модели взаимодействия частиц с обтекаемой поверхностью, модели эрозии поверхности и др.), которые в ряде случаев не обоснованы и приводят к противоречиям с экспериментом. Однако суть здесь не столько в конкретных деталях, сколько в принципе: согласие собственных результатов с расчетами по другим программам не является достаточным для достоверности.
- Убедительная физическая интерпретация результатов и их согласие с данными экспериментов, конечно, повышают доверие к численной модели,

однако адекватность модели не является ее универсальным свойством. Результаты могут практически совпадать с опытом по одним параметрам и заметно отличаться по другим. Именно такая ситуация порождает поиск всё новых моделей сложных турбулентных течений. Кроме того, опытные данные всегда имеют некоторый, иногда довольно заметный, разброс, и часто результаты по различным моделям попадают в коридор доверительного интервала для того или иного параметра. В этом случае требуются дополнительные опытные данные, которых может и не быть.

Данные соображения, на мой взгляд, важны, так как диссертация представлена по физико-математическим наукам и по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Возможно, они были бы менее критичны по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

2. В работе представлено очень большое количество примеров расчетов конкретных течений, однако не хватает достаточно подробного обсуждения степени универсальности той или иной технологии расчета. Хотелось бы, чтобы автор, имея огромный опыт, сформулировал в итоге некие общие более или менее универсальные рекомендации по выбору подходов и моделей турбулентных течений в случаях, отличных от рассмотренных в диссертации. Иначе следует констатировать, что моделирование сложных турбулентных течений по-прежнему остаётся не столько наукой, сколько искусством.

3. Глава 5 является одной из наиболее интересных, но в то же время и наиболее спорной. В ней исследуется глобальная устойчивость стационарных решений уравнений Рейнольдса к малым возмущениям на основе линейной теории устойчивости.

Начнем с короткой преамбулы. Как известно, ламинарное течение при больших числах Рейнольдса становится неустойчивым и переходит в турбулентное. На языке математических моделей это означает, что решение уравнений Навье–Стокса, которые описывают течение в терминах актуальных параметров, становится неустойчивым. Уравнения Рейнольдса являются одним из ответов на вызов, который заключается в необходимости как-то описывать неустойчивое с точки зрения актуальных параметров течение. С использованием

процедуры априорного осреднения параметров из уравнений Навье–Стокса выводятся уравнения Рейнольдса, которые при их замыкании с помощью той или иной модели турбулентности позволяют рассчитать поля осредненных параметров жидкости или газа.

В работе исследована устойчивость стационарных решений уравнений Рейнольдса (кстати, можно было рассмотреть и нестационарные решения) с использованием формализма аппарата теории линейной устойчивости. Здесь следует отметить, что, во-первых, как известно, линейная теория подчас приводит к парадоксам (один из наиболее известных примеров – течение Пуазейля в круглой трубе, которое в линейной теории всегда устойчиво, что не соответствует действительности). Во-вторых, устойчивость решения уравнений Рейнольдса будет зависеть от принятой модели турбулентности. Вопрос же о ее влиянии на устойчивость остался открытым.

С физической точки зрения автор исследовал глобальную неустойчивость неустойчивого течения применительно к анализу явления бафтинга, но это явление успешно исследовалось и без анализа устойчивости уравнений Рейнольдса. Более того, оно, на мой взгляд, связано не столько с турбулентностью, сколько с возникновением слабых ударных волн и нестационарных конфигураций ударных волн при трансзвуковом обтекании крыльев. По сути предложенный подход позволяет лишь учесть влияние вязкого пограничного слоя на поверхности крыла на ударно-волновые конфигурации, которые являются причиной бафтинга. При этом вопрос о том, какую поправку в исследование бафтинга вносит учет турбулентного пограничного слоя и какую модель турбулентности следует использовать при оценке устойчивости обтекания крыла или профиля остался открытым.

Развитый в работе аппарат теории линейной устойчивости применительно к уравнениям Рейнольдса получился, на мой взгляд, довольно громоздким и, скорее всего, в большинстве реальных расчетов сложных течений с глобальной неустойчивостью исследователи будут ограничиваться прямым численным решением нестационарных уравнений Рейнольдса (или даже Эйлера, так как в некоторых случаях вязкие эффекты не являются причиной глобальной неустойчивости), поэтому ценность развитого подхода является скорее теоретической.


4. Последнее замечание. При оценке диссертации на соискание ученой степени доктора наук естественно было бы ожидать, что автор имеет значимые сольные публикации (фундаментальные статьи или аналитические обзоры). Однако в приведенном списке публикаций нет ни одной работы, в которой соискатель был бы единственным автором.

**В заключение отмечу,** что высказанные дискуссионные положения и замечания не влияют на общую однозначно положительную оценку диссертационной работы. Диссертация написана хорошим понятным научным языком. Автор занимается данной тематикой практически 30 лет. Неудивительно, что в диссертации приведено очень большое количество конкретных оригинальных теоретических, методических и практических результатов. При ее чтении иногда складывалось впечатление, что некоторые фрагменты диссертации являются отчасти кратким рефератом выполненных исследований, столь велико разнообразие и количество подробностей, относящихся к различным аспектам моделирования рассматриваемого класса течений (в диссертации представлено 269 рисунков). В работе приведены уникальные результаты расчетов очень сложных задач (например, расчет обтекания элементов пилотируемых космических кораблей: головной части космической ракеты на участке выведения и возвращаемой капсулы на режиме трансзвукового обтекания). Впечатляет список публикаций автора по теме исследования как по количеству (62 наименования), так и по уровню (множество статей опубликовано в ведущих международных журналах и рецензируемых трудах международных конференций). Нельзя не отметить, что соискатель является представителем хорошо известной у нас и за рубежом российской научной школы по моделированию и методам расчета вязких, в том числе турбулентных течений. Основателем этой школы был Лев Герасимович Лойцянский. Научная школа, к которой принадлежит соискатель, в настоящее время является ведущей в России и признанной в мире в области численного моделирования сложных турбулентных течений. Под руководством соискателя успешно защищены две кандидатские диссертации (М.С. Грицкевич, Е.К. Гусева).

**Автореферат правильно отражает содержание диссертации.**

Считаю, что диссертация **Гарбарука Андрея Викторовича «Численное моделирование и анализ устойчивости пристеночных турбулентных течений»** удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО СПбПУ», утвержденным приказом №795 от 28.05.2020 (**пункты 2.1-2.8**), предъявляемым к докторским диссертациям, поскольку является научно-квалификационной работой, в которой *на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и представлены конкретные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, состоящее в разработке новых полуэмпирических моделей турбулентности, гибридных RANS-LES моделей, в существенном развитии методологии численного моделирования пристеночных турбулентных течений, ее эвристическом обосновании и в применении к решению актуальных практических задач*, а ее автор **Гарбарук Андрей Викторович** заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент  
доктор физ.-мат. наук, профессор

  
Ю.М. Циркунов  
20 ноября 2020 г.

Подпись Ю.М. Циркунова удостоверяю:



Циркунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат премии Н.Е. Жуковского первой степени за 2011 год, член Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике.

Место работы: кафедра плазмогазодинамики и теплотехники,

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им.

Д.Ф. Устинова. 1-я Красноармейская ул., дом 1, 190005 г. Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: [tsrknv@bstu.spb.su](mailto:tsrknv@bstu.spb.su) ; [Yury-Tsirkunov@rambler.ru](mailto:Yury-Tsirkunov@rambler.ru)