

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Шестакова Максима Владимировича
«Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных
турбулентных струй и следов в щелевых каналах», представленную на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Кандидатская диссертация М.В. Шестакова посвящена детальному экспериментальному исследованию закономерностей формирования, развития и взаимодействия трехмерных вихревых структур, образующихся в квазидвумерных сдвиговых турбулентных течениях типа струй и следов, развивающихся в щелевых каналах, определению степени влияния эффектов двумерной турбулентности на развитие этих течений и получению количественных данных о влиянии вихревых структур на процессы смешения и тепломассопереноса.

Актуальность исследования этих явлений обусловлена как большим фундаментальным значением задач формирования трёхмерных вихревых структур в сложных турбулентных квазидвумерных течениях, в которых крупномасштабные долгоживущие вихревые структуры, играют важную роль в процессах переноса, так и широчайшим распространением таких течений в природе и в большом классе технических и технологических устройств. В природе такие течения реализуются, например, в атмосфере и океанах, а также в областях втекания рек в водоемы малой глубины. В технических приложениях такого сорта течения часто реализуются в установках атомной энергетики и в химических технологических установках. Характеристики и свойства течений важно учитывать при разработке и проектировании ряда технических устройств и аппаратов. Известно также, что эффективность тепломассообмена в узких каналах, часто присутствующих в таких установках, существенно зависит от структуры турбулентности потока и от характера и интенсивности возникающих в них крупномасштабных вихревых структур. Исследование, представленное в диссертации М.В. Шестакова, без сомнения способствует углублению понимания основополагающих физических характеристик и механизмов формирования, развития и взаимодействия трехмерных вихревых структур в сложных турбулентных квазидвумерных течениях.

Основные результаты моего **краткого анализа достижений соискателя**, изложенных им в тексте диссертации, сводятся к следующему.

Во введении (объёмом 7 страниц) достаточно ясно сформулированы основные цели и задачи работы, представлен авторский взгляд на новизну, практическую ценность и достоверность полученных результатов и перечислены основные результаты работы, выносимые на защиту. В целом, введение производит хорошее впечатление и выполняет задачу информирования читателя о круге рассматриваемых в работе проблем, их актуальности и важности, а также об основных целях диссертации, её структуре и степени апробации.

В главе 1 (объёмом 46 страниц) дан исключительно хороший, подробный, представительный обзор результатов предыдущих экспериментальных, теоретических и численных работ по теме диссертации. При этом, основной акцент сделан на экспериментальных исследованиях. Обзор хорошо структурирован. В нём затронут широкий класс предыдущих исследований обширного круга задач, относящихся к свободным турбулентным плоским струям, пристенным турбулентным струям, ограниченными турбулентными струям, квазидвумерными ограниченными турбулентными струями и турбулентными следами. В обзоре показана недостаточная изученность ряда важных аспектов проблемы. В частности отмечено отсутствие экспериментальных исследований, посвященных трехмерной вихревой структуре квазидвумерных сдвиговых турбулентных течений при малых отношениях высоты канала к ширине сопла или к диаметру обтекаемого тела. Сделан вывод о том, что предыдущие исследования вторичных течений при помощи точечных и интегральных методов измерений носят лишь качественный характер и не дают однозначного ответа на вопрос о природе формирования вторичных течений в ограниченной турбулентной струе. Отмечается, что существующие модели формирования вторичных течений, основанные на деформации вихревых структур сдвигового слоя, требуют экспериментального подтверждения.

На основе проведённого обзора работ соискатель приходит к обоснованному выводу об актуальности темы его диссертации и показывает необходимость применения современных экспериментальных методов, позволяющих проводить одновременные измерения всех трех компонент скорости в объеме потока в широком диапазоне как временных, так и пространственных масштабов.

Глава 2 (объёмом 53 страницы) является методической. Она посвящена описанию ряда использованных в работе методов измерений и экспериментальных стендов, использованных в опытах. Эта глава имеет самый большой размер в диссертации и занимает более четверти объёма её основного содержания. Такой большой размер отражает, во-первых, весьма солидный вклад соискателя в развитие, совершенствование и освоение широкого спектра методических приёмов получения и анализа экспериментальных данных, а во-вторых, блестяще характеризует высокую квалификацию автора диссертации в вопросах владения современными методами обработки больших массивов экспериментальных данных и идентификации, на этой основе, вихревых структур в сложных турбулентных течениях.

Уровень квалификации соискателя в указанных выше методических вопросах настолько высок, что Глава 2 его диссертации представляет отдельный интерес, как для молодых экспериментаторов, так и для убеждённых сединой опытных исследователей. В частности, должен признаться, что я тоже прояснил для себя ряд аспектов современных панорамных методов измерений...

В главе 3 (объёмом 38 страниц) приведены результаты двумерных измерений в квазидвумерной ограниченной турбулентной струе. Я бы выделил здесь два основных результата, полученных в рамках этой главы. Во-первых, в дальнем поле такой струи зарегистрированы продольные структуры,

с линейным масштабом, на порядки превышающим глубину канала, что указывает на существенную роль трехмерных эффектов, которые необходимо учитывать при построении численных моделей тепломассопереноса в квазидвумерной ограниченной турбулентной струе. Во-вторых, обнаружено новое явление модуляции амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи и дано объяснение физического механизма этого явления.

В главе 4 (объемом 25 страниц) приведены результаты экспериментального исследования пространственной структуры квазидвумерной турбулентной струи. Благодаря применению томографического метода PIV с высоким временным разрешением выполнены впечатляющие измерения пространственных трехкомпонентных распределений скорости, позволившие получить ряд уникальных результатов. Наиболее значительные из них следующие. Экспериментально показано наличие двух видов когерентных вихревых структур в ближнем и дальнем поле квазидвумерной турбулентной струи: крупномасштабных квазидвумерных и продольных. Обнаружено, что продольные вихревые структуры возникают в результате взаимодействия вихревых структур Кельвина - Гельмгольца с ограничивающими стенками канала. Сделан важный вывод о необходимости учёта трехмерных продольных вихревых структур, периодически формирующихся в квазидвумерной турбулентной струе, при разработке моделей тепломассопереноса.

В главе 5 (объемом 26 страниц) Приведены результаты экспериментального исследования пространственной структуры квазидвумерного турбулентного следа за цилиндром. На основе одновременных измерений трёх компонент скорости потока обнаружены новые (внутренние) вторичные течения, формирующиеся в результате деформации и растяжения сдвиговых вихревых структур Кельвина-Гельмгольца. Найдено, что внешние вторичные течения образуются в результате наличия концевых участков близко расположенных подковообразных вихревых структур. Впервые экспериментально в квазидвумерном турбулентном следе за цилиндром обнаружены продольные вихревые структуры, которые образуются в результате взаимодействия сдвиговых вихревых структур Кельвина-Гельмгольца с ограничивающими стенками канала.

Приведённый выше анализ основных достижений диссертации показывает, что её автором получено большое количество важных результатов, обладающих несомненной **научной новизной**. Ряд из них не имеет аналогов не только в предыдущих экспериментальных, но и в численных исследованиях.

Степень достоверности полученных результатов представляется достаточно высокой ввиду следующих обстоятельств. Методы измерений, использованные в рамках данной диссертации (прежде всего группа методов PIV) хорошо освоены в научном коллективе, где соискатель работает. Измерения сопровождалась специальными калибровочными тестами. В ряде случаев приведены оценки погрешности используемых методов и степени воспроизводимости результатов измерений. Во многих местах проведено сопоставление результатов данной работы с экспериментальными данными, полученными другими авторами. Наконец, важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их весьма

серьёзная апробация на большом количестве национальных и международных семинаров, симпозиумов и конференций.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, представляется мне весьма высокой ввиду следующих обстоятельств. Прежде всего, необходимо отметить, что довольно большой объём диссертации М.В. Шестакова (216 страниц, включая около 350, в общей сложности, рисунков) обусловлен её сложным, комплексным характером. Содержание диссертации отражает большую глубину проведённого исследования, которое выполнено в рамках единого подхода, на базе широкого применения современных углублённых методов измерений физической структуры и природы турбулентных потоков. Глубокий, всесторонний анализ экспериментальных данных с применением различных, дополняющих друг друга, подходов к их обработке, сочетается с сопоставлением полученных результатов с результатами предыдущих работ. Диссертация представляется достаточно цельной, логически завершённой, а её выводы хорошо обоснованными.

Наиболее существенное замечание

Во многих местах диссертации анализ полученных результатов показывает важную роль неустойчивостей течения к различным возмущениям. Прежде всего, речь идёт о неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, о синусовой и варикозной модах неустойчивости струй и слоёв смешения. Хорошо известно, что наилучшим подходом к изучению неустойчивостей является метод контролируемых возмущений. В рамках этого подхода удаётся наиболее подробно изучить все основные характеристики возмущений, понять причины и условия возникновения неустойчивостей. Используемый в данной работе метод «естественных» (т.е. неконтролируемых) возмущений также способен дать важные, интересные результаты, но его возможности существенно ограничены. Автор отмечает, что при создании экспериментальных установок большое внимание уделялось минимизации фоновых неконтролируемых возмущений. Однако, многие важные нестационарные возмущения, наблюдаемые в потоке, определённо возникали вследствие развития тех слабых неконтролируемых возмущений, которые всё же оставались в установке (вихревые, акустические, вибрационные возмущения). Возбуждение же слабых контролируемых возмущений сильно помогло бы в этой работе прояснить физическую природу наблюдаемых структур и причины их возникновения. Это замечание, впрочем, носит характер пожелания для будущих экспериментов в этой области, которые могут быть ещё более успешными благодаря применению метода контролируемых возмущений.

Второстепенные замечания

1. Оглавление диссертации представляется мне несколько странным. Названия параграфов в Главах 3, 4 и 5 удивительно однообразны и не отражают особенностей результатов, представленных в этих главах. Например, параграфы 3.1, 4.1 и 5.1 имеют одинаковое название

«Методика и параметры измерений», это при том, что в диссертации имеется очень обширная методическая глава. Параграфы 3.3, 4.2 и 5.2 называются «Результаты измерений...» или «Результаты экспериментов...». С учётом большого объёма диссертации, эти обстоятельства заметно осложняют её восприятие. Было бы намного информативнее разбить параграфы 3.3, 4.2 и 5.2 на части и назвать их со смысловой нагрузкой сообразно с полученными результатами измерений. Например: «Меандрирование ядра струи» или «Динамика вихревых структур», и т.д.

2. Стр. 11, начало первого абзаца. Фраза «Свободные сдвиговые турбулентные течения, неограниченные и неподверженные влиянию стенок...» содержит грамматическую ошибку. Следует писать: «Свободные сдвиговые турбулентные течения, неограниченные и не подверженные влиянию стенок...»

3. Стр. 34, строки -3 и -2. Выражение: «В работах также представлены самые неустойчивые волновые числа и частоты...» является жаргоном, которого следует избегать в серьёзной научной литературе. Неустойчивыми являются не *волновые числа* или *частоты*, и даже не *возмущения* (когда речь идёт о первичной неустойчивости), а *течения*...

4. В работе обнаружено интересное явление модуляции амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи, связанное с циклической сменой режимов течения, соответствующих варикозной и синусоидальной моде неустойчивости струи. Однако не предпринята попытка объяснения физической природы этого явления. Например, связано ли это явление с проблемой восприимчивости течения к слабым неконтролируемым возмущениям потока и стенок или оно обусловлено существованием некой глобальной низкочастотной неустойчивости всего поля течения?

5. Оформление текста диссертации удивляет очень большим размером некоторых абзацев, часто – более одной страницы! Такой стиль затрудняет восприятие работы при чтении.

6. Рис. 3.3.10, 3.3.11, 3.3.14 и 3.3.15. Выражения в подписях к рисункам типа «Распределение нормированных пульсаций... компоненты скорости» имеет неясный смысл. Судя по всему, речь идёт о распределениях «амплитуд пульсаций» скорости или «среднеквадратичных амплитуд пульсаций» скорости. Проблема усугубляется естественным отсутствием в формате изолиний третьей оси и, соответственно, обозначения переменной, отображаемой на ней.

7. Стр. 141, последняя строка. Написано: «...представлено виде профилей...». Должно быть: «...представлено в виде профилей...».

8. В выводах к Главе 5 (стр. 189) написано: «Определена область влияния вторичных течений на осредненную структуру квазидвумерной турбулентной струи». При этом, Глава 5 целиком посвящена течению в следе за цилиндром. Предположительно, слово «струи» является опiskой.

Говоря об оформлении диссертации в целом, необходимо отметить, что в ней содержится необычно мало орфографических ошибок и описок. Текст написан, в основном, ясным, чётким языком.

Заключение

Сделанные выше замечания не снижают, однако, общую весьма высокую оценку диссертации М.В. Шестакова, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение важной научной задачи изучения закономерностей формирования, развития и взаимодействия трехмерных вихревых структур в квазидвумерных сдвиговых турбулентных течениях типа струй и следов, имеющей важное значение при разработке моделей потоков и компьютерных программ для описания процессов тепломассообмена в энергетических и химических установках. Тема диссертации является актуальной, а характер выполненных исследований соответствует специальности 1.1.9 — механика жидкости, газа и плазмы. Все основные результаты диссертации очень хорошо опубликованы в отечественных и международных научных изданиях, в том числе 8 статей – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК. **Автореферат** составлен в соответствии с установленными требованиями и отражает содержание диссертации.

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что по своей актуальности, объему выполненной автором работы, новизне полученных им результатов, их достоверности, научной и практической ценности, диссертация М.В. Шестакова «Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах» удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы», главный научный сотрудник ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

09.02.2022

Качанов Юрий Семенович

Подпись Ю.С. Качанова заверяю
Учёный секретарь ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.



Ю.В. Кратова

Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук. Телефон: +7(913)941-78-49. Адрес электронной почты: kachanov@itam.nsc.ru