

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель Генерального директора
ФГУП «ЦАГИ» по научной деятельности

А.Л. Медведский

«28» сентября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Мулладжанова Рустама Илхамовича

«Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях жидкости», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 –

Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы диссертации Мулладжанова Р.И., посвященной теоретическому и численному исследованию струйных и отрывных потоков, не вызывает сомнений. Рассматриваемые классы течений реализуются во множестве ситуаций в природе, а также встречаются в широком спектре инженерных приложениях. Струйные и отрывные потоки встречаются в аэрокосмических приложениях, в химической промышленности, в задачах энергетики и т.д. Рассмотренные в работе вопросы устойчивости затопленных струй помимо фундаментального интереса становятся актуальными из-за развития МЭМС-технологий, реализующихся на малых масштабах, что в свою очередь гарантирует невысокие числа Рейнольдса. Основной акцент сделан на исследовании когерентных вихревых структурах, которые обладают существенной долей турбулентной кинетической энергии, что, в свою очередь, делает их логичной целью при попытке управления характеристиками течения.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы, а также одного приложения. Работа содержит 253 страниц, включая 111 рисунков и 15 таблиц. Список литературы состоит из 422 наименований.

Во **Введении** дано обоснование актуальности исследований, сформулированы цели и задачи, приводятся основные положения и наиболее важные научные результаты, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В **главе 1** приведено описание методов исследования, использованных в данной работе, а также детали применяемых вычислительных методов и кодов (DNS, LES, URANS). Изложена постановка задачи линейной устойчивости и метод собственного

ортогонального разложения (POD), использованные для выделения крупномасштабной компоненты пульсаций скорости из численных данных.

В главе 2 проведено теоретическое исследование асимптотических характеристик неограниченного струйного течения, ассоциированного с точным решением Ландау уравнений Навье-Стокса. Решение линеаризованной задачи, которое соответствует второму члену асимптотического разложения поля скорости по обратным степеням расстояния от точечного источника движения, обобщено на случай ненулевых поперечных компонент вектора момента импульса источника. Рассмотрен вопрос гидродинамической устойчивости ламинарной струи к бесконечно малым возмущениям с учётом расширения потока. Проведено сравнение с экспериментальными данными, которое впервые позволило получить хорошее согласие для места ламинарно-турбулентного перехода. Кроме того, получена модифицированная система уравнений Навье-Стокса для прямого расчета струйных течений с различными параметрами скорости расширения струи.

В главе 3 на основе вычислительных методов исследовано три конфигурации струйного течения при числе Рейнольдса порядка 10^4 . Во-первых, при помощи базы данных DNS и метода POD впервые систематически показано, что в круглой незакрученной струе основные крупномасштабные когерентные структуры имеют спиральную форму и сносятся потоком вниз по течению. Получены их характеристики на различном расстоянии от сопла и показано хорошее совпадение с результатами линейного анализа устойчивости осредненного по времени профиля скорости турбулентной струи, используя плоскопараллельное приближение. Во-вторых, при помощи LES исследовано влияние закрутки трубы вокруг своей оси, из которой истекает жидкость в затопленное пространство, на характеристики струи в ближней области. Дано объяснение явлению противовращающегося струйного ядра в терминах когерентных структур, впервые обнаруженное экспериментально и не имевшего до сих пор должного обоснования. В-третьих, изучены переходные гидродинамические процессы в ближней области двойной (соосной) кольцевой закрученной струи, для которой при наличии горения в экспериментах был зафиксирован гистерезис режимов течения. Показано, что при резком изменении скорости истечения газа из сопла в одном из случаев образуется дипольный вихрь, который и является гидродинамическим предвестником гистерезиса в реагирующем потоке.

В главе 4 изложены результаты исследования задачи обтекания длинного цилиндра однородным потоком жидкости для двух чисел Рейнольдса (3.9×10^3 и 1.4×10^5), которые соответствуют докритическому режиму течения с ламинарным отрывом пограничного слоя. При помощи LES показано, что в рассматриваемом отрывном течении помимо периодического срыва вихрей имеются низкочастотные

квазипериодические пульсации зоны рециркуляции, соответствующие флуктуациям длины зоны возвратного течения. При помощи тройной декомпозиции получены URANS-уравнения для случая квазипериодического течения. Вычислены корреляции когерентной и стохастической компоненты поля скорости и показано, что эти корреляции становятся незначительными по сравнению с напряжениями Рейнольдса при достаточно больших скоростях потока, что подтверждает применимость стандартных уравнений URANS в практических приложениях. Исследована справедливость гипотезы Буссинеска, при помощи которой моделируются напряжения Рейнольдса.

В главе 5 представлены результаты численных расчетов щелевых струйных и отрывных течений при помощи LES. Показано, что в рассматриваемых квазидвумерных потоках реализуются крупномасштабные поперечные колебания ядра потока, которые приводят к формированию вихревых структур, сходны вихревой дорожке Кармана. Показана связь этих вихревых структур с процессами теплопереноса у твердых стенок.

Выводы по диссертации приведены по главам, основные результаты сформулированы в общем **заклучении** по диссертации.

Материал диссертационной работы изложен четко, ясно и подробно проиллюстрирован рисунками. Содержание работы позволяет сделать заключение, что ее автор провел целенаправленную работу по решению важных задач, связанных с устойчивостью и когерентными структурами в струйных и отрывных течениях.

В диссертации Р.И. Мулладжанова корректно указываются ссылки на авторов и источники цитирования, откуда заимствуются материалы. Приведено описание личного вклада автора.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций. В диссертации представлены корректные постановки всех решаемых задач. При их формулировке использованы известные уравнения Навье-Стокса для описания движения сплошной среды. Полученные результаты являются внутренне непротиворечивыми и соответствуют общим физическим представлениям.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций соответствует принятой в рамках специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Достоверность результатов обусловлена использованием проверенных методик численного и аналитического решения, совпадением полученных решений как качественно, так и во многих случаях количественно с достоверными

экспериментальными или расчетными данными, согласием полученных результатов в предельных случаях с известными и апробированными результатами других авторов.

Новизна представленных в диссертации положений заключается в следующем:

1. Впервые аналитически получено решение линеаризованных около точного решения Ландау уравнений, которое соответствует струе с ненулевыми поперечными компонентами вектора момента импульса и физически описывает неосесимметричную струю;

2. Впервые получено выражение для оценки местоположения ламинарно-турбулентного перехода на базе решения линейной задачи устойчивости для затопленной ламинарной струи, демонстрирующее хорошее количественное соответствие между теорией и экспериментом;

3. Впервые систематически показано, что спиральные бегущие волны являются наиболее энергонесущими вихревыми структурами в дальнем поле затопленной турбулентной струи;

4. Впервые показано, что небольшие колебания слабозакрученной струи относительно оси симметрии приводят к наблюдаемому явлению противовращающегося вихревого ядра;

5. Впервые исследованы переходные процессы в закрученной соосной кольцевой струе и показано, что наблюдаемый гистерезис режимов в случае реагирующего потока может быть связан с формированием вторичной зоны рециркуляции (диполя) около кромки сопла;

6. Впервые проанализированы смешанные корреляции когерентных и стохастических компонент поля скорости в отрывном течении при наличии крупномасштабных пульсаций в зоне рециркуляции и показано, что их значение не растет с увеличением числа Рейнольдса;

7. Впервые обнаружены когерентные продольные вихревые структуры в щелевых струях и следах; показана их связь с интенсивным тепломассопереносом поперек узкого канала.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты способствуют более глубокому пониманию вопросов, связанных с гидродинамической устойчивостью струйных течений, а также с влиянием когерентных вихревых структур в струях и следах на нестационарную динамику и интенсивность турбулентного тепломассопереноса. Полученные результаты можно использовать для оптимизации процессов смешения в ряде

практических приложений, построения низкоразмерных моделей струйного течения и могут быть полезными при проектировании соответствующего энергетического оборудования.

Материалы диссертации рекомендуется использовать специалистам ЦИАМ, ЦАГИ и других организаций, занимающихся исследованием струйных и отрывных течений. Полученные результаты представляют интерес для теоретических и экспериментальных групп ИТПМ СО РАН, МФТИ, НИИ Механики МГУ и других исследовательских институтов и университетов.

В качестве замечаний по диссертации можно высказать следующее:

1. При рассмотрении ламинарной струи во второй главе диссертант следует в русле традиционного подхода (Румер, Гольдштик и Яворский), обобщая имеющиеся решения во втором члене асимптотического разложения по обратным степеням расстояния от источника на случай с ненулевыми поперечными компонентами вектора момента импульса. При этом не поднимается вопрос о сходимости асимптотических разложений, ответ на который мог бы прояснить процесс перехода от дальнего поля струйного течения к его ближнему полю. Связь полученного решения с решением в ближнем поле выполняется через параметр c_0 , про который диссертант на стр. 55 пишет, что этот параметр *«вероятно, определяется интегралом сохранения недивергентного вида, что позволяет интерпретировать его как зависимость характеристик дальнего поля струи от ближней к источнику области»*, а на стр. 57 уже говорит об этой связи как о полученном факте, хотя она и не является в полной мере доказанной. Также с сожалением стоит отметить, что несмотря на большое количество цитируемой литературы, в работе отсутствует ссылка на статью [Маликов З.Н., Стасенко А.Л. Труды МФТИ, 2013, Т.5. №2. с. 59-68].

2. Автор не указал границ применимости развиваемой во второй главе теории устойчивости струйных течений. Из текста работы неясно, может ли развитый подход применяться для струй с высоким числом Рейнольдса, когда имеется потенциальный участок, выраженный слой смещения и т.д.

3. В главе 2 не показано сравнение результатов линейного анализа устойчивости в сферической системе координат при учете расширения потока и традиционного подхода в плоскопараллельном приближении;

4. В п.2.4 диссертации автор ограничивается выводом уравнений для турбулентной струи и заканчивает раздел фразой *«дальнейшие исследования будут направлены на то, чтобы решить полученную систему уравнений с периодическими граничными условиями, что позволит исследовать асимптотические струйные решения при различных α и Re »*. Как следствие, данный раздел работы является

незаконченным, а включение его в текст диссертации представляется необоснованным.

5. В главе 3 численные исследования явления гистерезиса проводятся для случая химически нереагирующего течения газа, при этом интерпретация производится для пламени;

6. При рассмотрении закрученных струй в главе 3 автор, к сожалению, не воспользовался результатами в области закрученных струй, полученные коллективом сотрудников ФГУП «ЦИАМ» под руководством С.Ю. Крашенинникова.

7. В главе 4 автор не использовал метод POD, примененный в главе 3 для струйных течений, к исследованию характеристик турбулентного следа за цилиндром с целью определения доминирующих мод. Это повысило бы взаимосвязь различных частей диссертации.

8. Важный вывод в главе 4 о корреляциях когерентных и стохастических пульсаций при докритических режимах течения сделан на основе расчетов только для двух значений числа Рейнольдса, чего может быть недостаточно. Кроме того, этот вывод основан на вычислениях с помощью метода LES, валидация которого в тексте диссертации приведена только для осредненных характеристик потока. Использование данного метода для определения пульсационных характеристик не подкреплено в тексте диссертации сравнением с экспериментальными данными.

9. В тексте диссертации автор ссылается на «выделенные синим» части уравнений (например, (2.10) или (2.18)), однако, в печатном экземпляре диссертации выделение цветом отсутствует.

Публикации, отражающие основное содержание работы. По теме диссертации автором опубликовано 39 работ в рецензируемых периодических изданиях и трудах отечественных и международных конференций. В журналах из списка, рекомендованного ВАК, по теме диссертации опубликовано 16 статей (из них 10 в международных изданиях). Количество публикаций удовлетворяет критериям, предъявляемым к докторским диссертациям. Основные результаты хорошо апробированы, они обсуждались на международных симпозиумах, всероссийских конференциях и семинарах.

Заключение

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки по представленной диссертационной работе и не носят принципиального характера. Диссертация Мулляджанова Рустама Илхамовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований нестационарных процессов разработаны теоретические положения,

совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области устойчивости и когерентных структур в струйных и отрывных течениях жидкости.

Исходя из актуальности, новизны, научной и практической значимости данной работы, можно сделать заключение, что диссертация Мулладжанова Рустама Илхамовича «Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях жидкости», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем критериям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Мулладжанов Рустам Илхамович заслуживает присуждения ему искомой степени.

Данный отзыв обсуждён и одобрен на заседании НТС НИО-9 Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ) 14 сентября 2018 года (протокол №170).

Копьев Виктор Феликсович
начальник НИО-9 ЦАГИ,
д.ф.-м.н., профессор



Копьев Виктор Феликсович

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ)

Почтовый адрес: 140180, Россия,
г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1
Телефон: 8 (495) 556-43-03
Факс: 8 (495) 777-63-32 8 (495) 556-43-37
Эл. почта: info@tsagi.ru
Сайт: www.tsagi.ru