

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Гареева Линара Рафаиловича
на тему: «ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ НАРАСТАНИЯ
ВОЗМУЩЕНИЙ В СТРУЙНОМ ТЕЧЕНИИ»
по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертационная работа **Гареева Линара Рафаиловича** посвящена экспериментальному изучению эволюции и механизмов роста контролируемых локализованных возмущений в осесимметричной затопленной струе воздуха при малых числах Маха. В последнее время успешные результаты в области линейного анализа (модального и немодального) развития возмущений в пристенных пограничных слоях стимулируют применение данного подхода и к струйным течениям. В связи с этим, задача поиска механизмов нарастаний возмущений в струйных течениях является *актуальной*.

Основные *положения выносимые на защиту*, посвящены двум важным задачам: модальному и немодальному механизму развития возмущений в струйных течениях. Эти механизмы *обоснованы* как различными методами аэрофизического эксперимента, так и сопоставлением с результатами линейного (модального и немодального) анализа устойчивости струйных течений с заданными начальными условиями. *Научные выводы*, полученные в результате экспериментального подтверждения двух (модального и немодального) механизмов развития неустойчивости, вносят значительный вклад в развитие теории гидродинамической устойчивости затопленных струй. Эти результаты дают основу для *фундаментального изучения* более широкого класса струйных течений.

Практическая значимость полученных результатов, заключается в том, что детальное понимание механизмов перехода к турбулентности в затопленных струях может послужить основой для разработки методов управления ламинарно-турбулентным переходом в струйных течениях. Так,

длинные ламинарные струи могут использоваться для формирования локальных чистых зон в производственных и лабораторных условиях. Напротив, турбулизация струй необходима для интенсификации перемешивания, и процессов тепло- и массообмена в энергетических установках. *Достоверность* полученных результатов обусловлена следующими факторами: *во-первых*, использованием современных методов исследования в аэрогидродинамическом эксперименте: термоанемометрия и цифровая трассерная визуализация (PIV, Particle Image Velocimetry); *во-вторых*, согласием расчетов линейной теории устойчивости и данного эксперимента. Также основные результаты докладывались и обсуждались на многих всероссийских и международных семинарах и конференциях. Результаты диссертации изложены в 36 печатных работах, из них 5 статей опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus.

Новизна данной работы обусловлена уникальными характеристиками физической модели - затопленной осесимметричной струи воздуха: длинный ламинарный участок $L/D \sim 5$ при высоком числе Рейнольдса $Re \sim 5000$. Разработаны два метода внесения контролируемых стационарных и нестационарных возмущений на начальном участке струи: тонкое кольцо и волнообразный тонкостенный дефлектор. Существенной особенностью рассматриваемого течения является неклассический профиль скорости с тремя точками перегибами в начальном сечении струи. Это обуславливает наличие двух мод неустойчивости, расположенных достаточно удалённо друг от друга. В данной работе впервые продемонстрировано количественное согласие характеристик развивающихся возмущений с теоретическим анализом собственных мод течения. Благодаря развитию внесенных контролируемых стационарных возмущений впервые наблюдался новый немодальный сценарий перехода к турбулентности в струе, напрямую не связанный с развитием волн Кельвина-Гельмгольца.

Диссертационная работа выполнена на 115 страницах и включает введение, четыре главы, заключение и список литературы. Во **введении** представлены: актуальность темы, цель и задачи работы, новизна работы, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования. Кроме этого, во введении приведены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора, структура и объём диссертации.

В **первой главе** представлен обзор литературы, разбитый на две части. Первая часть обзора соответствует модальному подходу роста возмущений в течениях с поперечным сдвигом, включая в струйные течения. Вторая часть обзора посвящена подходу немодального роста возмущений в сдвиговых течениях. При этом отмечается практическое отсутствие экспериментальных работ с немодальным вариантом для струйных течений.

Во **второй главе** дается описание экспериментального оборудования, методики проведения экспериментов, двух экспериментальных моделей и подход к обработке экспериментальных данных. В работе использованы несколько методов: визуализация течения, термоанемометрия и цифровая трассерная визуализация (PIV). Главными особенностями струйного источника являются малые габариты и низкий уровень пульсаций ($< 1\%$). В результате получен длинный ламинарный участок $x/D \sim 5$ при высоком числе Рейнольдса $Re \sim 5000$. Разработаны два метода внесения контролируемых стационарных и нестационарных возмущений на начальном участке струи: тонкое кольцо и волнообразный тонкостенный дефлектор. Существенной особенностью рассматриваемого течения является неклассический профиль скорости с тремя точками перегибами в начальном сечении струи. Полученные расчетные профили скорости без возмущений соответствуют экспериментальным. Также дана оценка погрешностям измерений.

Результаты экспериментального исследования эволюции контролируемых локализованных собственных мод в затопленной воздушной струе приведены в **третьей главе**. В первой части главы, для справки,

представлен теоретический линейный анализ устойчивости профиля скорости с тремя точками перегиба. Далее описан метод внесения гармонических возмущений при помощи двух вариантов тонких колец. Первая мода, которая локализована вблизи границы струи, и вторая мода, порождаемая внутренней точкой перегиба, были экспериментально исследованы при помощи визуализации потока и измерений термоанемометром. Визуализация показала, что возмущения, вносимые кольцом большего диаметра с частотами в диапазоне 3-6 Гц, приводят к сокращению ламинарного участка струи, а вносимые возмущения на других частотах практически не влияют на ламинарную структуру течения. В результате опытов определены: длина ламинарного участка, длины волн возмущений, радиальные распределения пульсаций скорости, инкременты нарастания возмущений. Было показано, что длины волн и инкременты нарастания обеих мод, а также радиальные распределения продольной компоненты пульсации скорости первой моды находятся в отличном соответствии с линейной теорией.

Глава 4 посвящена изучению немодального механизма линейного роста возмущений в рассматриваемом струйном течении. В первой части главы, для справки, на основании теоретического анализа исследуются оптимальные возмущения кинетической энергии. Отмечается, что наибольшему росту энергии соответствуют стационарные возмущения, которые были реализованы в опытах с помощью волнообразного тонкостенного дефлектора. Визуализация поперечных сечений струи выполнена на расстояниях $x/D = 0.5-3.5$, измерена продольная составляющая скорости при помощи термоанемометра, а также проведена серия PIV-измерений в поперечных и продольных сечениях. В данной главе продемонстрировано подавление модального сценария перехода к турбулентности через рост волн Кельвина-Гельмгольца и инициация «обходного» сценария перехода к турбулентности, через немодальный «lift-up» механизм роста малых возмущений. Этот сценарий ранее не наблюдался в струйных течениях.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

По диссертации можно сделать следующие *замечания*:

1. В начальных условиях отсутствует экспериментальное распределение пульсаций скорости в начальном сечении затопленной струи.
2. В работе не указано кто выполнил расчет представленный рис.2.3. Почему ламинарная часть на этом рисунке достигает $x/D=10$, в то же время в эксперименте эта величина составляет $x/D\sim 5$?
3. В части 2.2 отсутствуют важные характеристики эксперимента, например, схема измерения термоанемометром (ТА) и методика проведения тарировки при низких скоростях.
4. В случае измерения с помощью PIV, при изучении немодального роста возмущений в 4 главе, не указаны область измерения и пространственное разрешение PIV. В связи с этим сложно оценить информацию, полученную с помощью PIV.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Материал автореферата соответствует тексту диссертации. *Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы» по физико-математическим наукам, а именно следующим ее направлениям: Ламинарные и турбулентные течения, Гидродинамическая устойчивость.* Содержание диссертации также соответствует критериям, определенным пп. 2.1-2.5 *Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова*, а также оформлена согласно требованиям *Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.*

Таким образом, *соискатель Гареев Линар Рафаилович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».*"

Официальный оппонент, Старший научный сотрудник

Лаборатории физических основ энергетических технологий (7.4)

Кандидат технических наук [REDACTED] Леманов Вадим Владимирович

04.12.2024 г. Дата

телефон: [REDACTED] E-mail: [REDACTED]

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес организации: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1. <http://www.itp.nsc.ru>, director@itp.nsc.ru, +7(383) 330-90-40, факс +7(383) 330-84-80.

Контактные данные: Леманов Вадим Владимирович

тел.: [REDACTED], e-mail: [REDACTED]

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика

Подпись старшего научного сотрудника Института теплофизики им. С.С.

Кутателадзе СО РАН Леманова Вадима Владимировича

удостоверяю:

Старший научный сотрудник ИТФ СО РАН
к.ф.-м.н.



Машаров М.С.
04.12.2024