

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Гареев Линар Рафаилович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ НАРАСТАНИЯ  
ВОЗМУЩЕНИЙ В СТРУЙНОМ ТЕЧЕНИИ**

Специальность 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Диссертация подготовлена на кафедре гидромеханики  
механико-математического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Веденев Василий Владимирович**,  
доктор физико–математических наук,  
профессор

Официальные оппоненты: **Качанов Юрий Семёнович**,  
доктор физико–математических наук,  
профессор, Институт теоретической и  
прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН,  
главный научный сотрудник  
**Судаков Виталий Георгиевич**,  
доктор физико–математических наук,  
доцент, Центральный  
аэрогидродинамический институт  
им. проф. Н.Е. Жуковского,  
заместитель начальника отделения  
**Леманов Вадим Владимирович**,  
кандидат технических наук,  
Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
старший научный сотрудник

Защита состоится 20 декабря 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседа-  
нии диссертационного совета МГУ.011.5 Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119192, Москва, Мичу-  
ринский проспект, д. 1, НИИ механики МГУ, кинозал.

Email: [aero.natap@mail.ru](mailto:aero.natap@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной  
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27)  
и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3161>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета МГУ.011.5,  
кандидат физико–математических наук

Н.В. Попеленская

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Затопленные струйные течения широко применяются в различных технологических процессах: в горении, перемешивании, распылении и т.д. Устойчивость таких течений и условия, при которых осуществляется переход к турбулентности, определяют эффективность этих процессов. Известно, что ламинарные струи быстро разрушаются из-за низкого критического числа Рейнольдса, что, как правило, ограничивает длину их ламинарного участка до 1–2 диаметров выходного сечения. Это усложняет детальное экспериментальное изучение механизмов роста возмущений и последующего перехода к турбулентности в них.

В НИИ механики МГУ недавно была предложена новая методика создания затопленных струй с длинным ламинарным участком. Экспериментальная установка обеспечивает затопленную воздушную струю диаметром  $D = 0.12$  м при числах Рейнольдса вплоть до 12 500 и длиной ламинарного участка до  $5.5D$ . Такие параметры течения создают отличные условия для экспериментального исследования развития малых контролируемых возмущений в ламинарной струе.

Множественные экспериментальные работы научных коллективов за последние 60 лет (Власов Е.В. и Гиневский А.С., S.C. Crow и F.H. Champagne, K.B.M.Q. Zaman и A.K.M.F. Hussain, J. Cohen и I. Wygnanski, R.A. Petersen и M.M. Samet, Козлов В.В. и Грек Г.Р. и др.) показали, что линейная теория устойчивости в применении к струям даёт удовлетворительные прогнозы лишь некоторых параметров возмущений, нарастающих в таких течениях. Наибольший успех в этом плане был достигнут в подтверждении частоты (числа Струхаля) наиболее быстро растущего возмущения, однако инкременты роста, в свою очередь, отличались на порядок от теоретических. Основной проблемой проведения экспериментальных исследований подобного рода является очень малый начальный ламинарный участок при достаточно больших диаметрах сопел ( $\sim 0.05 - 0.1$  м), а в струи малого диаметра (микроструи), внесение и отслеживание контролируемых возмущений крайне затруднительно, хотя их ламинарный участок может достигать 10 и более диаметров сопла.

В отличие от ламинарных струйных течений, пристенные течения достаточно хорошо изучены в многочисленных работах научного коллектива Качанова Ю.С., Козлова В.В., Бойко А.В. из ИТПМ СО РАН и в работах Alfredsson P.H. и Fransson J.H.M. из КТН, а также в других

коллективах. Проведены многочисленные эксперименты в малозумных трубах по исследованию развития волн Толмина-Шлихтинга, исследованы особенности модального механизма развития возмущений. Также было показано экспериментально, что при достаточно высоком уровне внешней турбулентности в пограничных слоях переход к турбулентности осуществляется по «bypass» сценарию с образованием продольных вихревых структур («streaks»).

Плодотворные результаты в области линейного анализа развития возмущений в пограничных слоях подталкивали экспериментаторов и теоретиков использовать те же подходы в применении к струйным течениям. Но, несмотря на теоретические предсказания немодального роста в затопленных струях, до сих пор не было экспериментов, в которых этот механизм был бы однозначно идентифицирован. Роль немодального роста в переходе к турбулентности в струях также остаётся неясной.

Таким образом, в связи с рядом открытых вопросов высока актуальность проведения тщательных экспериментов по изучению развития разных типов возмущений в струях. Помимо фундаментального интереса, результаты таких исследований могут использоваться для построения эффективных, научно обоснованных законов управления струями для ускорения или, наоборот, замедления перехода в них.

### **Цель и задачи работы.**

1. Экспериментальное исследование развития собственных мод струи, возбуждаемых вносимыми гармоническими возмущениями малой амплитуды различной частоты.

2. Изучение влияния вносимых трехмерных стационарных возмущений с разными азимутальными числами различной амплитуды на структуру ламинарного течения и на особенности перехода к турбулентности.

3. Измерение и анализ характеристик полученных возмущений и их сравнение с предсказаниями линейной теории устойчивости в применении к рассматриваемому экспериментальному струйному течению.

### **Новизна работы.**

В данной работе проводится измерение характеристик растущих возмущений в струе с длинным ламинарным участком при числе Рейнольдса  $\sim 5000$ , что не было ранее проведено в литературе. К тому же рассматриваемое течение имеет неклассический профиль скорости с тремя точками перегибами и двумя модами неустойчивости, сконцентрированными достаточно удалённо друг от друга. Поочередное усиление и экспе-

риментальный анализ этих двух мод — более сложная задача валидации линейной теории устойчивости по сравнению с классическими профилями струй. В данном исследовании впервые продемонстрировано количественное согласие всех характеристик развивающихся возмущений с расчетом собственных мод течения.

Ненаблюдаемый ранее немодальный механизм развития возмущений в струйных течениях впервые экспериментально инициируется в представленном исследовании. Разработана новая технология создания тонкостенных волнообразных конструкций, благодаря которой удастся изменять характеристики вносимых стационарных возмущений. Развитие таких возмущений отслеживается при помощи визуализационных и измерительных методов и анализируется с использованием разработанных компьютерных методов обработки. Благодаря развитию внесенных таким способом возмущений впервые наблюдался новый сценарий перехода к турбулентности в струе, не связанный с развитием волн Кельвина-Гельмгольца.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

С точки зрения фундаментальной науки, перечисленные задачи являются новыми. Количественная валидация модального анализа устойчивости и инициализация немодальных механизмов вносят значительный вклад в развитие теории гидродинамической устойчивости, особенно в контексте их применения к затопленным струям. Практическая значимость и актуальность экспериментов заключается прежде всего в том, что детальное понимание механизмов перехода к турбулентности в затопленных струях может послужить основой для разработки методов управления ламинарно-турбулентным переходом — как для его затягивания, так и для ускорения. Затягивание перехода может быть важно для создания длинных ламинарных струй, используемых для формирования локальных чистых зон в производственных и лабораторных условиях. Такая чистая зона создаётся струёй фильтрованного воздуха и не требует использования непроницаемых стенок, как в случае с обычными «ламинарными боксами». Локальные чистые зоны могут применяться в высокоточных производствах электроники и оптики, а также в фармацевтических, химических и микробиологических лабораториях, пищевой промышленности и медицине. Ускорение турбулизации, напротив, полезно в ситуациях, где необходимо интенсивное перемешивание, как, например, в форсунках камер сгорания авиационных двигателей и энергетических

установок. Таким образом, полученные результаты могут быть полезны для создания научных основ разработки новых инновационных технологий и устройств, основанных на управлении линейными механизмами ламинарно-турбулентного перехода в струях.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Линейная теория устойчивости количественно верно описывает начальное развитие малых возмущений в струйных течениях. Длины волн, инкременты роста и радиальные распределения пульсаций скорости растущих возмущений находятся в хорошем согласии с теоретическими значениями.

2. Тонкие пластиковые конструкции, разработанные и протестированные в рамках диссертации, создают возмущения, растущие в соответствии с немодальным механизмом. При этом имеется возможность широкой вариации заданных параметров, таких как азимутальное число вихрей поперечной скорости, амплитуда таких вихрей и диаметр их расположения.

3. В струйном течении существует немодальный механизм развития возмущений, что было экспериментально обнаружено впервые.

4. Переход к турбулентности при инициации немодально растущих возмущений происходит по «обходному» сценарию, при котором отсутствует рост волн Кельвина-Гельмгольца, но наблюдается искажение поперечного сечения струи и появление грибовидных структур поперечной скорости.

### **Методология и методы исследования.**

Для возбуждения наиболее быстро растущих собственных мод рассматриваемого течения в эксперименте поочередно вносились контролируемые возмущения при помощи колебания тонких металлических колец двух диаметров, соответствующих концентрациям амплитуды собственных мод течения. Для инициализации стационарных возмущений, по структуре схожих с рассчитанными оптимальными возмущениями, разработана технология создания тонких волнообразных конструкций. Такая технология была реализована при помощи САД моделирования и 3D печати из PLA пластика. Для получения экспериментальных данных использовались современные методы измерений: термоанемометрия, PIV измерения и визуализация течения лазерным ножом. Во многих экспериментах применялась автоматическая обработка данных с фильтрацией спектра полученных возмущений около исследуемых частот. Для

составления и последующей обработки корреляционных картин, а также компьютерной обработки кадров после визуализации применялись разработанные программные модули.

### **Достоверность и апробация результатов.**

Достоверность результатов работы обусловлена использованием классических методов исследования в аэрогидродинамическом эксперименте; хорошей повторяемостью полученных результатов; использованием откалиброванных и настроенных измерительных приборов с тщательной оценкой их погрешности и применения проверенных экспериментальных техник; согласием расчетов линейной теории устойчивости и эксперимента.

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: Семинар по механике сплошных сред под руководством академика РАН А.Г. Куликовского, профессора В.П. Карликова, профессора А.Н. Осипцова, член-корр. РАН А.А. Афанасьева и профессора Н.В. Никитина; конференция-конкурс молодых учёных НИИ механики МГУ (Москва, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023); XIV, XV и XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск – Шерегеш, 2020, 2021, 2023); всероссийские конференции молодых учёных-механиков «YSM» (Сочи, 2020, 2021, 2023, 2024); конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 2020, 2021, 2023, 2024); 8<sup>th</sup> International Conference of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer «FFHMT» (Онлайн, Канада, 2021); 25<sup>th</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics «ICTAM» (Онлайн, Италия, 2021); 72<sup>nd</sup> International Astronautical Congress «IAC» (Дубай, ОАЭ, 2021); XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2022); European Drag Reduction and Flow Control Meeting «EDRFCM» (Париж, Франция, 2022); XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2023); 93<sup>rd</sup> Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics «GAMM» (Дрезден, Германия, 2023); XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023); the 6<sup>th</sup> symposium on fluid-structure-sound interaction and control «FSSIC» (Пусан, Республика Корея, 2023); XX Научно-техническая конференция по аэроакустике (Суздаль, 2023); XXV международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (Звенигород,

2024); 10<sup>th</sup> International Symposium on Fluid-Structure Interactions, Flow-Sound Interactions, Flow-Induced Vibration & Noise «FIV: FSI<sup>2</sup> & FIV + N» (Фос-ду-Игуасу, Бразилия, 2024); 26<sup>th</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics «ICTAM» (Тэгу, Республика Корея, 2024).

### **Публикации соискателя по теме диссертации.**

Основные результаты диссертации изложены в 36 печатных работах, из них 5 статей опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus.

### **Личный вклад.**

Все основные результаты, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Он принимал участие в модернизации и подготовке экспериментальной установки и во всех описанных в диссертации экспериментальных работах, большинство из которых проводил самостоятельно. Большая часть экспериментальных данных была обработана и проанализирована самостоятельно соискателем. Научному руководителю принадлежат постановки линейных задач устойчивости струйного течения, подходы к экспериментальным исследованиям, обсуждение результатов. Группа соавторов соискателя занималась теоретико-расчетной частью представленной работы — модальным и немодальным анализом, в которых соискатель участия не принимал. Теоретические разделы 3 и 4 глав приведены в тексте диссертации для полноты картины исследования.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 115 страниц, включая 54 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 117 наименований.

## **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в работе, формулируются цели, ставятся задачи диссертационной работы, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Глава 1** представляет собой обзор литературы, состоящий из двух частей. Первая часть посвящена проведенным экспериментальным и теоретическим исследованиям модального роста возмущений в сдвиговых течениях, в особенности в струйных течениях, вторая часть — исследованиям в области немодального роста возмущений в таких течениях.

В **главе 2** приводится подробное описание использованного экспериментального оборудования и методов. В **разделе 2.1** описывается формирующее струю устройство, разработанное в лаборатории экспериментальной гидродинамики НИИ механики МГУ (рис. 1). Главными особенностями устройства-формирователя являются конструкция малого размера (185 мм в высоту, 185 мм максимальный наружный диаметр) и низкий уровень пульсаций на выходе из сопла ( $< 1\%$ ). Эксперименты проходили при числе Рейнольдса  $Re = 5400$ , построенному по диаметру струи  $D = 0.12$  м и средней скорости  $U_{av} = 0.66$  м/с, которой соответствует максимальная осевая скорость  $U_c = 1.5$  м/с. На выбранном режиме длина ламинарного участка составляет  $\geq 5D$ .

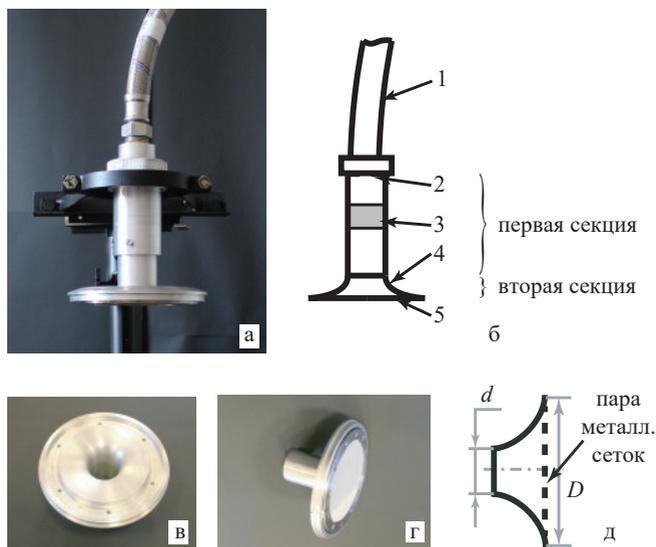


Рис. 1: Фотография (а) и схема (б) формирующего устройства: трубопровод (1), перфорированная пластина (2) и втулка с двумя металлическими сетками (3), диффузор (4) с металлическими сетками (5). Фотография диффузора без (в) и с (г) металлическими сетками и его схема (д).

Стоит отметить, что экспериментальный профиль скорости отличается от «классических»: он имеет 3 точки перегиба, которые генерируют 2 ветви растущих возмущений. Рассматриваемое осесимметричного течение было смоделировано в CFD-комплексе, проведены расчеты ламинарного установившегося вязкого течения. Полученные расчетные профили

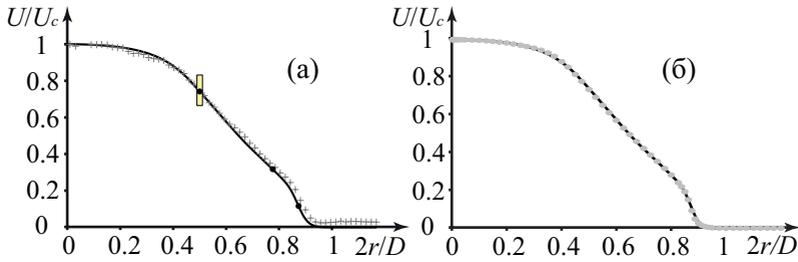


Рис. 2: Сравнение экспериментальных (крестики) и численных (линия) (а), численных (линия) и аналитических (маркеры) (б) профилей скорости струи при  $x/D = 0.01$ . На левом графике черные кружки обозначают точки перегиба, а желтый прямоугольник — положение дефлектора.

соответствуют экспериментальным, как показано на рис. 2(а). Для проведения анализа устойчивости рассчитанные профили скорости аппроксимировались аналитическими функциями. На рис. 2(б) показано отличное соответствие аналитического профиля расчетному.

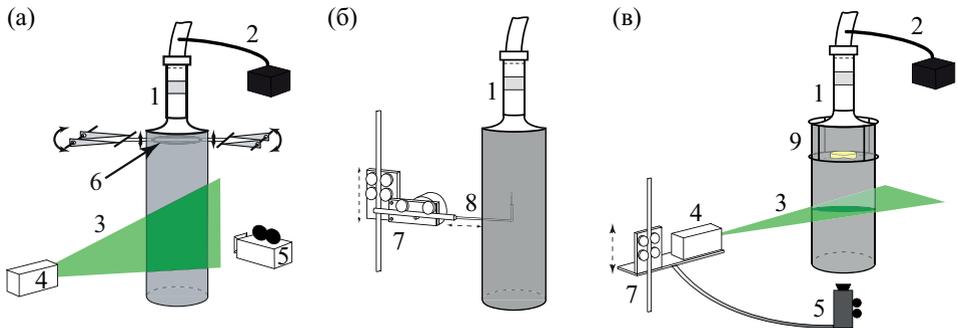


Рис. 3: Схемы визуализации течения в продольной плоскости (а), проведения термоанемометрических измерений (б) и проведения PIV измерений в поперечной плоскости (в). 1 — диффузор, 2 — генератор глициринового аэрозоля, 3 — лазерный нож, 4 — лазер, 5 — видеочамера, 6 — осциллирующее кольцо, 7 — координатное устройство, 8 — державка с датчиком термоанемометра и 9 — держатель с дефлектором.

В разделе 2.2 описывается измерительное оборудование и схемы проведения визуализационных, термоанемометрических и PIV экспери-

ментов (рис. 3). Описаны технические характеристики устройств и дана оценка погрешностям измерений.

**Глава 3** посвящена исследованию развития собственных мод рассматриваемого течения. В **разделе 3.1** приводится для справки теоретический линейный анализ устойчивости рассматриваемого струйного течения. Дана постановка задачи на собственные значения для уравнения Рэлея. Приводятся результаты расчетов: длины волн и инкременты растущих возмущений, посчитан N-фактор.

В **разделе 3.2** описан метод внесения гармонических возмущений при помощи тонкого колеблющегося соосно струе кольца (использовались кольца двух диаметров поочередно, чтобы усиливать рост двух разных мод). В **разделе 3.3** приводятся результаты проведенных экспериментов и сравнение значений, полученных в рамках линейной теории и в эксперименте. Визуализация показала, что возмущения, усиливаемые кольцом большего диаметра с частотами в диапазоне 3 – 6 Гц приводят к укорочению ламинарного участка струи, а вносимые возмущения на других частотах практически не влияют на ламинарную структуру течения (рис. 4). Этот результат соответствует линейной теории — частоты наиболее растущих возмущений лежат в этом же интервале.

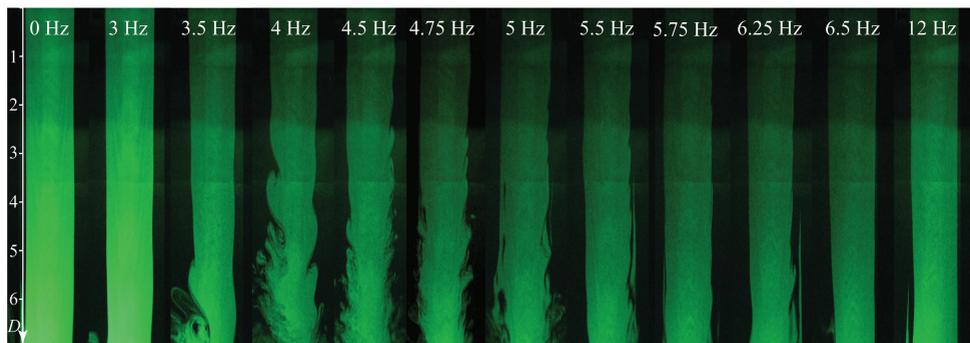


Рис. 4: Фотографии струи при колебаниях первого (большого) кольца с различными частотами при постоянной амплитуде скорости колебаний кольца. Осевое расстояние измеряется от расположения кольца.

Длины волн растущих возмущений фиксировались двумя способами: через покадровую обработку видеозаписей визуализации (бегущие волны, генерируемые кольцом с большим диаметром, соответствующим максимуму радиального распределения амплитуды первой собственной моды,

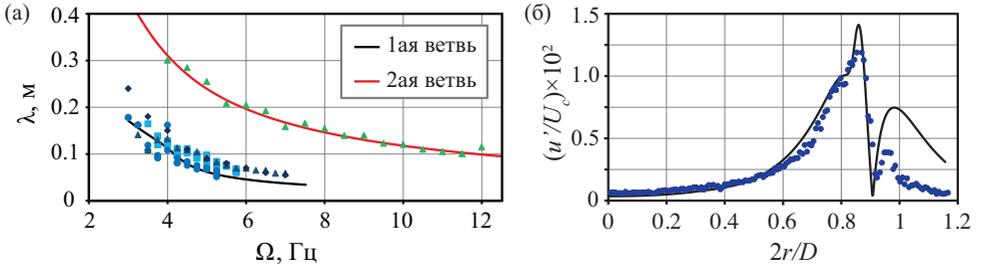


Рис. 5: Сравнение теоретических (кривые) и экспериментальных (маркеры) длин волн возмущений первой ветви и второй ветви растущих возмущений (а), радиальных распределений осевой амплитуды растущих волн первой ветви и пульсаций скорости  $u'/U_c$  при  $x/D = 0.5$  и частоте возмущения 5 Гц (б).

видны на краях струи) и через корреляционный анализ сигналов термоанемометра и дальномера, измеряющего перемещения кольца. По обоим способам расчетные длины показали количественное соответствие экспериментальным (рис. 5(а)).

Проведено сравнение распределения по радиусу струи отфильтрованных пульсаций скорости около возбуждаемых частот с теоретическим распределением амплитуды продольной компоненты первой собственной моды. Получено отличное соответствие этих распределений. В качестве примера, на рис. 5(б) показано сравнение для собственной частоты возмущения и колебания кольца 5 Гц при  $x/D = 0.5$ .

Была проведена серия термоанемометрических измерений вниз по течению для разных частот возмущения и разными колеблющимися кольцами. Измерения проводились на малом радиальном интервале под кольцом, и для каждого расстояния вниз потоку выбиралось максимальное отфильтрованное около частоты возбуждения значение из этого интервала. Инкременты пространственного роста возмущений практически совпадают с расчетными.

По результатам проведенных экспериментов с колеблющимися кольцами и сравнения с теоретическими расчетами подводится итог в **разделе 3.4**.

**Глава 4** посвящена изучению немодального механизма линейного роста возмущений в рассматриваемом струйном течении. Снова, для справки, в начале главы в **разделе 4.1** приводятся основные положения тео-

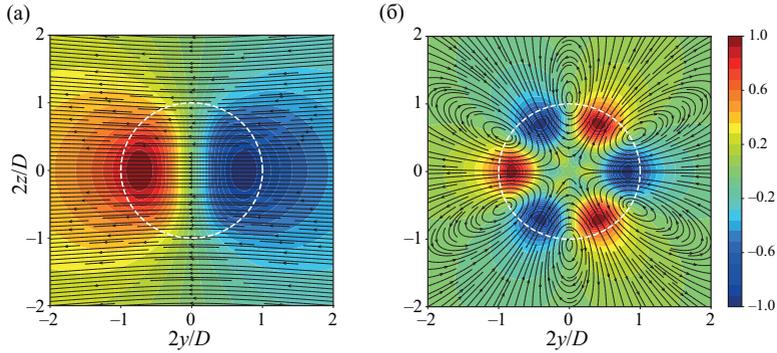


Рис. 6: Распределение осевой компоненты оптимальных возмущений скорости и линии тока в поперечном сечении струи для  $n = 1$  (а),  $n = 3$  (б). Координата  $x$  соответствует сечению, при котором достигается глобальный максимум энергии.

ретического анализа. Исследуются оптимальные, в смысле роста кинетической энергии, возмущения. Описываются результаты проведенных расчетов: наибольшему росту энергии соответствуют стационарные возмущения; показана типичная поперечная структура оптимального возмущения: она содержит зоны ускорения и замедления частиц, как показано на рис. 6. Найден теоретический прирост энергии такого возмущения вниз по потоку; показано, что продольная компонента нарастает вниз по потоку по линейному закону, а радиальная и азимутальная компоненты постоянны.

В разделе 4.2 описывается разработанная методика создания пластиковых конструкций (дефлекторов), которые вносят стационарные возмущения в струю, по структуре аналогичные оптимальным возмущениям (рис. 7(a)). Верхняя кромка таких дефлекторов — окружность с радиусом  $r_0 = D/4$ , а нижняя кромка — синусоидально деформированная окружность с заданным азимутальным волновым числом  $n$  и радиусом  $r = \tilde{r}_0(1 + \varepsilon \sin(n\theta))$ , где  $\varepsilon$  определяет безразмерную амплитуду отклонения от окружности,  $\theta$  — полярный угол, а  $\tilde{r}_0 \approx r_0$  — базовый радиус с поправкой на сохранение площади выходного сечения, равной площади входного сечения. Высота дефлектора между верхней и нижней кромками составляет  $h = 10$  мм, толщина стенки — 0.6 мм. Модели проектировались в CAD программе, а затем печатались на 3D-принтере из PLA пластика. Положение дефлектора в пространстве по отношению к про-

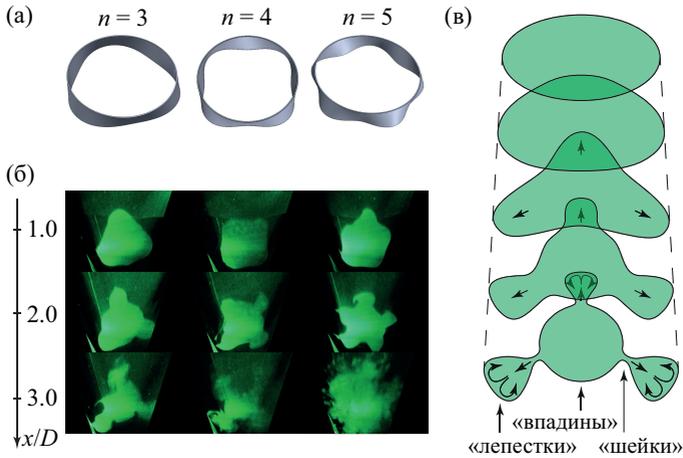


Рис. 7: 3D модели дефлекторов с азимутальными числами  $n = 3, 4, 5$  (а), развитие стационарных возмущений вниз по потоку, внесенных этими дефлекторами, в фотографиях поперечного сечения (б) и качественная схема этого развития (в).

филю скорости набегающего потока показано на рис. 2(а).

В **разделе 4.3** описываются проведенные эксперименты с дефлекторами и полученные результаты. Была проведена серия визуализаций поперечного сечения струи при внесении в неё стационарных возмущений дефлекторами разных параметров  $n$  и  $\varepsilon$  (рис. 7(б)). Обнаружено, что такие возмущения линейно деформируют поперечное сечение вниз по потоку: образуются  $n$  нарастающих линейно «лепестков» и уменьшающихся линейно «впадин», а переход к турбулентности происходит резко без образования вихрей Кельвина-Гельмгольца при сильном сужении «шеек» и отрыве «лепестков» от ядра течения. Схема развития таких стационарных возмущений показана на рис. 7(в).

При помощи термоанемометрии, PIV и обработки визуализаций подтверждено, что возмущения, которые вносят дефлекторы, качественно соответствуют теоретически оптимальными: продольная компонента возмущений нарастает вниз по потоку линейно, а радиальная компонента близка к постоянному значению (рис. 8).

Структура вносимых возмущений была проанализирована с помощью PIV измерений в поперечной плоскости. Оказалось, что она качественно

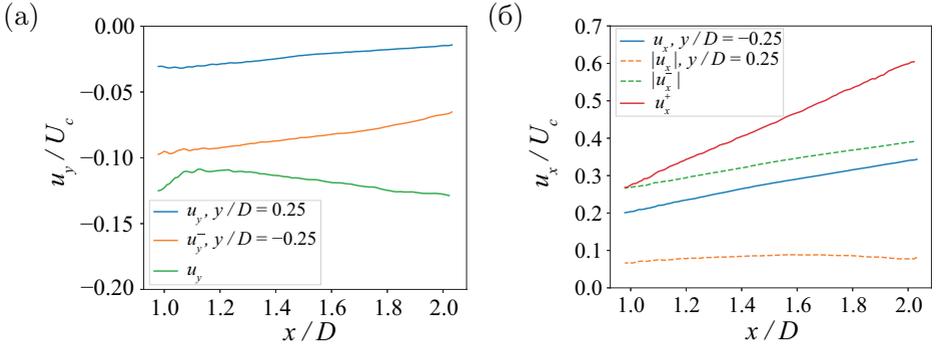


Рис. 8: Зависимость безразмерных поперечной  $u_y/U_c$  (а) и осевой  $u_x/U_c$  (б) компонент возмущения скорости от продольной координаты  $x$  для  $n = 3$ ,  $\varepsilon = 0.1$ . Штриховыми линиями обозначены отрицательные значения, взятые по модулю.

близка к структуре оптимальных возмущений — образуются попеременные зоны ускорения и замедления частиц в поперечных плоскостях, и, как следствие, образуются зоны продольной завихренности: медленные частички переносятся в зону быстрых и наоборот (на рис. 9 приведено сравнение с теорией).

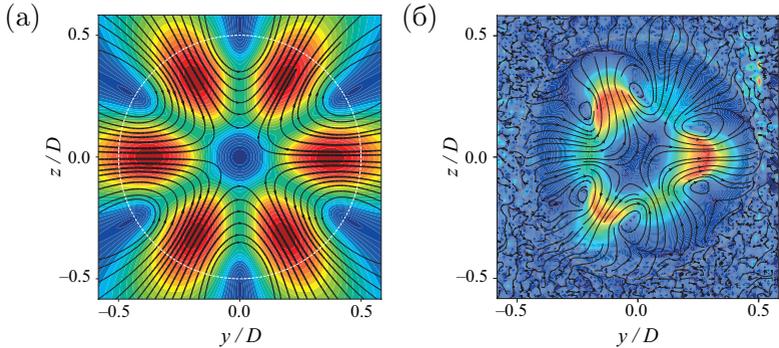


Рис. 9: Сравнение полей течения в поперечном сечении для теоретически оптимального возмущения (а) и эксперимента при  $\varepsilon = 0.05$  (б). Цветная заливка соответствует поперечным скоростям возмущения для  $n = 3$ , нормализованным по его максимальному значению.

Обсуждается вопрос о линейности вносимых возмущений. Проведена

серия визуализаций поперечного сечения вниз по потоку при внесении дефлекторов с  $n = 3$ ,  $\varepsilon = 0.01, \dots, 0.1$ . При помощи разработанного программного модуля полуавтоматической обработки видеозаписей получены значения длины «лепестков» от расстояния вниз по потоку. Показано, что возмущения, вносимые дефлекторами разной амплитуды  $\varepsilon$  ведут себя качественно одинаково, и увеличение  $\varepsilon$  линейно увеличивает коэффициент линейного нарастания радиуса «лепестков». Кроме того, показана масштабируемость вносимых возмущений: переход к турбулентности происходит при нарастании «лепестков» в поперечном сечении до примерно одинакового уровня.

В разделе 4.4 проведен анализ количественного сопоставления возмущений, вносимых в эксперименте дефлекторами, и соответствующих им оптимальных возмущений. Предлагается оценить уровень нарастания кинетической энергии вниз по потоку в эксперименте при помощи коэффициента  $\varkappa$ :

$$\sqrt{\frac{K(x)}{K_y}} = 1 + \varkappa \frac{x - x_0}{D},$$

где

$$K(x) = \frac{1}{LU_c^2} \int_L (u_x^2(x, y) + u_y^2(x, y)) dy, \quad K_y(x) = \frac{1}{LU_c^2} \int_L u_y^2(x, y) dy,$$

в предположении чистоты инициированного «lift-up» механизма. Из этого следует, что  $K(x_0) = K_y$ , т.к. в «фиктивном» начальном сечении  $x_0$  продольная компонента должна равняться нулю. Значения  $\varkappa$ , полученные из приведенного соотношения, зависят от выбора  $x_0$  и  $K_y$ . Рассматриваются максимальные и минимальные значения этих переменных, и для них получены 4 значения  $\varkappa$  для разных  $n$  (рис. 10).

Видно, что значения  $\varkappa \sim 3$ , в то время как коэффициент линейного роста кинетической энергии оптимальных возмущений  $\sqrt{E(x)/E(0)} \sim 30$ . Различие на порядок, помимо неоднозначности экспериментального определения  $\varkappa$ , объясняется, прежде всего, невозможностью воссоздания сложной трехмерной структуры оптимальных возмущений в эксперименте. В этом исследовании не было стремления внести действительно оптимальные возмущения, а создавались такие, которые, как ожидалось, будут иметь схожий немодальный механизм роста: продольные вихри, переходящие в полосчатые структуры. Как показывают полученные результаты, этого добиться удалось.

Результаты исследования немодального роста возмущений, проведённого в 4 главе, резюмируются в **разделе 4.5**.

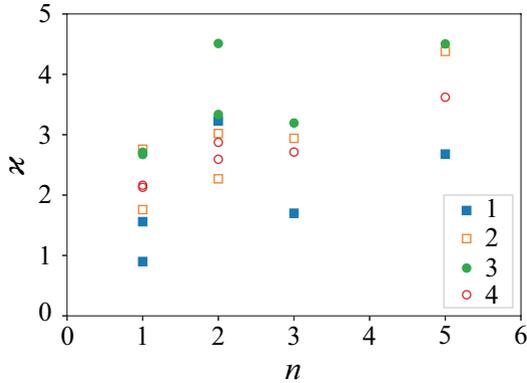


Рис. 10: Коэффициент роста  $\kappa$ , найденный двумя различными методами. Случаи с разными  $\varepsilon$  объединены и не разделяются.

## Основные результаты и выводы диссертации

1. Рассмотренное осесимметричное струйное течение воздуха с длинным ламинарным участком и диаметром  $D = 0.12$  м позволяет проводить детальные экспериментальные исследования развития контролируемых возмущений при числе Рейнольдса  $Re_D = 5400$ .

2. В струе существуют две осесимметричные растущие моды, которые изучались отдельно: поочередно вносились гармонические возмущения разной частоты посредством колебаний двух тонких металлических колец разных диаметров, соответствующих точкам перегиба профиля скорости.

3. В результате экспериментов, при помощи визуализации потока лазерным ножом и измерений термоанемометром, было показано, что длины волн и инкременты нарастания обеих растущих мод, а также радиальные распределения продольной компоненты пульсации скорости первой моды находятся в отличном соответствии с расчетами собственных мод. Кроме того, диапазон частот вносимых кольцом возмущений, приводящих к наибольшему сокращению длины ламинарного участка, соответствует диапазону частот наиболее быстро растущих собственных возмущений.

4. Разработана методика внесения стационарных трехмерных возмущений в рассматриваемое струйное течение, которые развиваются согласно немодальному механизму. Возмущения вносились при помощи тонких пластиковых волнообразных конструкций с варьируемыми параметрами: азимутальным волновым числом деформации выходного сечения, амплитуды этой деформации и радиусом.

5. Проведён цикл экспериментальных исследований развития стационарных возмущений в струе с использованием: визуализации лазерным ножом, термоанемометрических и PIV измерений, разработанных программных модулей обработки экспериментальных данных.

6. Впервые выявлен немодальный механизм развития возмущений в струйном течении. Установлены особенности развития стационарных возмущений, указывающие на их немодальный рост, аналогичный «lift-up» механизму роста возмущений в пристенных течениях.

7. Переход к турбулентности при инициации немодально растущих возмущений происходит по «обходному» сценарию, при котором отсутствует рост волн Кельвина-Гельмгольца, но наблюдается искажение поперечного сечения струи и появление грибовидных структур поперечной скорости. Такой сценарий перехода к турбулентности наблюдается в струях впервые.

## Публикации автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

1. *Гареев Л.Р., Иванов О.О., Веденеев В.В., Ашуров Д.А.* Влияние амплитуды вносимого стационарного возмущения на его немодальный рост в ламинарной затопленной струе // ПМТФ. — 2024. — Т. 65., № 1. — С. 70–74. — <https://elibrary.ru/item.asp?id=54618963>. [Пятилетний импакт-фактор РИНЦ: 0,91]. (0,58 п.л. / авторский вклад 80%: 0,46 п.л.). Перевод:  
*Gareev, L.R., Ivanov, O.O., Vedeneev, V.V., Ashurov, D.A.* Effect of the amplitude of a stationary perturbation on its non-modal growth in a laminar submerged jet // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2024. — Vol. 65, no. 1. — P. 61–65. — DOI: 10.1134/S0021894424010073. [Scopus SJR — 0.267].
2. *Ivanov, O.O., Ashurov, D.A., Gareev, L.R., Vedeneev, V.V.* Non-modal perturbation growth in a laminar jet: an experimental study // J. Fluid Mech. — 2023. — Vol. 963. — A8. — DOI: 10.1017/jfm.2023.286. [Scopus SJR — 1.565]. (3,7 п.л. / авторский вклад 35%: 1,3 п.л.).
3. *Ашуров Д.А., Веденеев В.В., Гареев Л.Р., Иванов О.О.* Экспериментальное изучение немодального механизма роста возмущений в ламинарной затопленной струе // Доклады РАН. Физика, технические науки. — 2023. — Т. 509. — С. 28–38. — DOI: 10.31857/S2686740023010029. [Пятилетний импакт-фактор РИНЦ: 1,12]. (1,27 п.л. / авторский вклад 35%: 0,44 п.л.). Перевод:  
*Ashurov, D.A., Vedeneev, V.V., Gareev, L.R., Ivanov, O.O.* Experimental study of the nonmodal perturbation growth mechanism in a laminar submerged jet // Doklady Physics. — 2023. — Vol. 68, no. 3. — P. 77–86. — DOI: 10.1134/s1028335823020015. [Scopus SJR — 0.278].
4. *Gareev, L.R., Zayko, J.S., Chicherina, A.D., Trifonov, V.V., Reshmin, A.I., Vedeneev, V.V.* Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // J. Fluid Mech. — 2022. — Vol. 934. — A3. — DOI: 10.1017/jfm.2021.1022. [Scopus SJR — 1.565]. (3,12 п.л. / авторский вклад 25%: 0,78 п.л.).

5. *Зайко Ю.С., Гареев Л.Р., Чичерина А.Д., Трифонов В.В., Веденев В.В., Решмин А.И.* Экспериментальное обоснование применимости линейной теории устойчивости к затопленной струе // Доклады РАН. Физика, технические науки. — 2021. — Т. 497. — С. 44–48. — DOI: 10.31857/S2686740021020115. [Пятилетний импакт-фактор РИНЦ: 1,12]. (0,58 п.л. / авторский вклад 20%: 0,12 п.л.). Перевод: *Zayko, J.S., Gareev, L.R., Chicherina, A.D., Trifonov, V.V., Vedeneev, V.V., Reshmin, A.I.* Experimental Validation of Linear-Stability Theory Applied to a Submerged Jet // Doklady Physics. — 2021. — Vol. 66, no. 4. — P. 106–109. — DOI: 10.1134/S1028335821040054. [Scopus SJR — 0.278].

Статьи в сборниках конференций:

6. *Linar Gareev, Vasily Vedeneev, Oleg Ivanov, Julia Zayko, Denis Ashurov, Alexander Reshmin, Vladimir Trifonov* Experimental study of perturbation growth in a round laminar jet // Proceedings in applied mathematics and mechanics. — 2023. — V. 23. — e202300283.
7. *Гареев Л.Р.* Экспериментальное изучение развития возмущений в круглой струе // Труды конференции-конкурса молодых ученых (19–20 октября 2021 г.). — г. Москва: изд-во НИИ механики МГУ, 2022. — С. 19–26.
8. *Linar Gareev, Anastasia Chicherina, Alexander Reshmin, Vladimir Trifonov, Vasily Vedeneev, Julia Zayko* Comparison of Experimental and Theoretical Characteristics of Linear Waves in the Submerged Air Jet // Proceedings of the 8th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'21), 2021. — Niagara Falls, Canada. — No. 138.
9. *Linar Gareev, Julia Zayko, Vladimir Trifonov, Alexander Reshmin, Vasily Vedeneev.* Experimental investigation of perturbation growth in laminar jets // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC-2021. — Dubai, UAE.
10. *Гареев Л.Р.* Экспериментальное изучение развития возмущений в круглой струе // Труды конференции-конкурса молодых ученых (21–25 октября 2019 г.). — г. Москва: изд-во НИИ механики МГУ, 2020. — С. 58–65.

11. *Веденеев В.В., Гареев Л.Р., Зайко Ю.С., Решмин А.И., Трифонов В.В., Чичерина А.Д.* Экспериментальное подтверждение результатов модальной теории устойчивости в применении к затопленной струе // Волны и вихри в сложных средах: 11-ая международная конференция – школа молодых ученых, 1–3 декабря 2020 г., Москва: Сборник материалов школы. — г. Москва: ООО «ИСПО-принт», 2020. — С. 36–39.