

На правах рукописи

Мищенко Дмитрий Алексеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПОРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ МОД  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ГЁРТЛЕРОВСКОЙ  
НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ**

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

специальность 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

Новосибирск 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: к.ф.-м.н., А.В. Иванов

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор С.Г. Миронов  
д.ф.-м.н., М.В. Устинов

Ведущая организация: Московский физико-технический институт

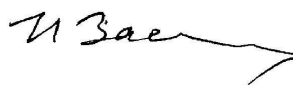
Защита состоится 24 декабря 2010 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 при Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.035.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Автореферат разослан ..... ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук



И.М. Засыпкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному изучению порождения, линейного и слабонелинейного развития мод нестационарной (в общем случае) неустойчивости Гёртлера. Проведена верификация линейной и слабонелинейной теорий гёртлеровской неустойчивости. Обоснована применимость этих теорий для описания неустойчивости, изучена область и степень их применимости.

### **Актуальность темы**

Исследование проблемы ламинарно-турбулентного перехода является одним из основных направлений механики жидкости, газа и плазмы и не только носит фундаментальный характер, но и представляет собой основу для широкого круга приложений. Неустойчивость Гёртлера является составной частью этой проблемы. Она возникает в сдвиговых течениях вдоль искривлённых поверхностей, в том числе в пограничных слоях на вогнутых поверхностях, и обычно приводит к образованию ориентированных вдоль потока вихревых структур – вихрей Гёртлера. Эти вихри могут существенно изменять тепло- и массоперенос, влиять на сопротивление трения аэродинамических поверхностей, приводить к турбулизации пограничного слоя, влиять на его сопротивляемость отрыву и на другие характеристики.

Несмотря на многолетние интенсивные исследования, неустойчивость Гёртлера до настоящего времени остается недостаточно изученной, что главным образом связано с техническими трудностями ее экспериментального исследования. Так, например, до сих пор не было получено согласования скоростей нарастания вихрей в эксперименте и линейной теории устойчивости. Соответственно область применимости линейной теории была не ясна, пороговые значения амплитуд вихрей для начала отклонения от законов линейного развития не были получены. Коэффициенты восприимчивости при возбуждении вихрей Гёртлера шероховатостями и вибрациями поверхности в экспериментах также не определялись.

При этом в подавляющем большинстве работ исследовалась стационарная неустойчивость Гёртлера, а нестационарная до настоящего времени практически не изучена ни теоретически, ни экспериментально, хотя она также важна для практики (например, при возбуждении вихрей Гёртлера нестационарными вихревыми структурами турбулентного набегающего потока как на лопатках турбомашин).

В проведённых ранее экспериментах часто использовался весьма эффективный метод контролируемых возмущений. Однако, вследствие особенностей измерения характеристик возмущений нулевой частоты, такие исследования всегда сопряжены с множеством трудностей, к которым, в частности, относится плохая точность измерений. Для решения этой проблемы в экспериментах, как правило, увеличивали амплитуду возмущений. В результате в работах, посвященных исследованию *линейной* неустойчивости Гёртлера, типичная амплитуда составляла 10 и более процентов от скорости потока. Такие большие амплитуды приводили к нелинейным эффектам и к отклонению законов развития возмущений от линейной теории устойчивости. К аналогичным отклонениям приводит и воздействие ближнего поля источника возмущений, которое особенно важно для квазистационарных продольных вихрей, но влияние которого в экспериментальных исследованиях, как правило, не учитывалось.

В настоящей работе эксперименты проведены с применением контролируемых *нестационарных* (включая квазистационарные) возмущений. Нестационарный подход к исследованию неустойчивости позволяет регистрировать возмущения очень малых амплитуд (десятые и сотые доли процента от скорости потока) и одновременно проводить измерения с очень высокой точностью. В результате в рамках диссертации впервые исследованы характеристики строго *линейной* устойчивости пограничного слоя к *нестационарным* вихрям Гёртлера. Эксперименты, проведенные с нестационарными вихрями очень низких частот, позволили надежно определить эти характеристики и для случая *стационарных* вихрей (в квазистационарном приближении). Определены амплитудные пороги начала нелинейности, получены количественные значения коэффициентов восприимчивости пограничного слоя к локализованным неоднородностям поверхности (вибрациям и неровностям) при возбуждении гёртлеровских вихрей.

### **Цель и задачи работы**

Основной целью данной диссертационной работы являлось создание нового экспериментального подхода к исследованию стационарной и нестационарной гёртлеровской неустойчивости и получение на этой основе количественных экспериментальных результатов по возбуждению, линейному и слабонелинейному развитию наиболее опасных гёртлеровских мод с целью проверки применимости линейных и слабонелинейных теорий неустойчивости Гёртлера и определения амплитудных границ применимости линейных теорий, а также последующей верификации линейных теорий восприимчивости пограничного слоя к неоднородностям поверхности.

При этом перед исследованием были поставлены следующие основные задачи:

- создать эффективные *методики* экспериментального изучения стационарной и нестационарной гёртлеровской неустойчивости и восприимчивости;
- экспериментально получить все основные характеристики *нестационарной* линейной неустойчивости Гёртлера;
- с помощью квазистационарного подхода надежно определить характеристики линейной устойчивости пограничного слоя по отношению к *стационарным* (классическим) гёртлеровским вихрям;
- проверить *применимость линейных теорий* устойчивости к описанию как стационарных, так и нестационарных вихрей Гёртлера;
- за счет постепенного увеличения начальных амплитуд возмущений определить *пороговые амплитуды* начала отклонения от законов линейной теории устойчивости и оценить степень применимости *слабонелинейной теории* гёртлеровской устойчивости;
- исследовать механизмы порождения нестационарных вихрей Гёртлера локализованными (по продольной координате) неоднородностями поверхности (вибрациями и неровностями) и получить количественные значения коэффициентов восприимчивости пограничного слоя к таким неоднородностям при возбуждении наиболее опасных гёртлеровских мод.

#### **На защиту выносятся:**

- идеи и практическая реализация квазистационарного и нестационарного экспериментальных подходов к исследованию гёртлеровской неустойчивости и восприимчивости;
- методы возбуждения контролируемых нестационарных вихрей Гёртлера с помощью специальных источников возмущений, способных работать в широком диапазоне поперечных длин волн, частот и амплитуд возмущений;
- результаты экспериментального исследования линейной неустойчивости Гёртлера (стационарной и нестационарной) в пограничном слое над вогнутой поверхностью;
- экспериментальное подтверждение применимости линейной теории устойчивости к описанию эволюции стационарных и нестационарных вихрей Гёртлера;
- результаты экспериментального исследования слабонелинейной нестационарной гёртлеровской неустойчивости пограничного слоя на вогнутой поверхности, в том числе определение амплитудных порогов начала нелинейности и экспериментальная верификация слабонелинейной теории гёртлеровской неустойчивости;

- результаты экспериментального исследования порождения нестационарных и стационарных гёртлеровских вихрей в пограничном слое локализованными (по продольной координате) неоднородностями поверхности, включая определение коэффициентов восприимчивости.

### **Научная новизна работы**

- В диссертации разработан комплекс высокоточных методов экспериментального исследования характеристик возбуждения и развития стационарной и нестационарной гёртлеровской неустойчивости пограничных слоёв;
- впервые получены все характеристики линейной устойчивости пограничного слоя к стационарным и нестационарным вихрям Гёртлера и проведено их количественное сопоставление с расчетами;
- показано, что линейная локально-параллельная теория в основном правильно описывает как стационарную, так и нестационарную неустойчивость Гёртлера, хотя непараллельная теория даёт более хорошее согласование с опытом;
- обнаружено, что с ростом частоты неустойчивость течения ослабевает при фиксированном числе Гёртлера, а нарастание числа Гёртлера способно не только дестабилизировать, но и стабилизировать течение по отношению к нестационарным гёртлеровским вихрям фиксированной частоты;
- исследованы основные начальные признаки проявления нелинейности при достижении вихрями Гёртлера больших амплитуд, определены амплитудные пороги применимости линейных теорий нестационарной гёртлеровской неустойчивости, и показана правомерность слабонелинейной теории;
- впервые экспериментально получены коэффициенты восприимчивости пограничного слоя к неоднородностям поверхности (вибрациям и неровностям) при возбуждении стационарных и нестационарных вихрей Гёртлера. Показано, что восприимчивость нарастает с частотой и на высоких частотах существенно зависит от поперечного масштаба вихрей.

### **Личный вклад автора**

Автор участвовал в изготовлении экспериментальных моделей, источников возмущений, изготовлении и наладке измерительной аппаратуры, проведении экспериментов, обработке и анализе полученных экспериментальных данных, проведении расчетов и верификации теорий<sup>1</sup>, подготовке публикаций к печати. Научный консультант проведенных исследований д.ф.-м.н., профессор Ю.С. Качанов.

---

<sup>1</sup> В настоящей диссертации все расчеты выполнены с использованием программ А.В. Бойко. Их алгоритмы, а также развитие соответствующих теоретических подходов на защиту не выносятся.

## Научная и практическая значимость работы

В диссертации разработан нестационарный подход к исследованию неустойчивости Гёртлера. На его основе созданы эффективные методики экспериментального изучения характеристик возбуждения и развития мод стационарной и нестационарной неустойчивости Гёртлера. Их применение на практике позволяет на порядки уменьшить амплитуды исследуемых возмущений и одновременно на порядки повысить точность измерений (по сравнению с традиционным стационарным подходом и в результате впервые надёжно исследовать линейную стадию развития гёртлеровской неустойчивости).

Разработанные методы позволяют эффективно изучать широкий класс задач о развитии гёртлеровской неустойчивости, а также исследовать механизмы порождения гёртлеровских вихрей внешними (по отношению к пограничному слою) возмущениями.

В диссертации экспериментально изучен механизм порождения нестационарных Гёртлеровских вихрей локальными неоднородностями поверхности (неровностями и вибрациями). Получены коэффициенты восприимчивости. Впервые измерены все основные характеристики *линейной* нестационарной (в общем случае) неустойчивости Гёртлера. Исследован переход от линейной к *слабонелинейной* стадии развития неустойчивости, получены амплитудные пороги начала нелинейности. Проведено тщательное прямое сопоставление результатов проведенных экспериментов с расчетами по линейным и слабонелинейным теориям устойчивости. Обоснована применимость этих теорий для описания гёртлеровской неустойчивости, исследованы области и степень их применимости.

Полученные в диссертации экспериментальные данные расширяют представления о линейных и слабонелинейных стадиях перехода к турбулентности в пограничном слое на вогнутой поверхности и могут быть использованы для верификации различных теорий, а также для создания более совершенных инженерных методов расчета положения перехода в пограничных слоях над искривлёнными поверхностями.

Полученные в диссертации результаты могут представлять интерес для организаций и специалистов, занимающихся исследованием проблемы возникновения турбулентности и задачами расчёта положения перехода и управления ламинарными пограничными слоями.

Обнаруженные в работе эффекты могут быть использованы при разработке и улучшении характеристик широкого класса аэродинамических устройств.

## **Достоверность результатов**

Результаты, полученные в диссертации, представляются вполне достоверными. Используемые в работе оригинальные экспериментальные методики изучения устойчивости и восприимчивости пограничного слоя на вогнутой поверхности основаны на методе контролируемых нестационарных возмущений, доказавшем свою результативность и надёжность в предшествующих исследованиях схожих задач. Основные измерения выполнены с применением хорошо апробированного термоанемометрического метода.

Эксперименты проведены в уникальной малотурбулентной аэродинамической трубе с высоким качеством потока и низким уровнем неконтролируемых возмущений. Все измерения выполнены при возбуждении в потоке возмущений контролируемого (то есть известного и воспроизводимого) частотно-волнового спектра. Влияние неконтролируемых стационарных гёртлеровских вихрей было минимизировано за счет применения специально разработанных высокоточных экспериментальных моделей с тщательно подобранными параметрами. Полученные данные сопоставлены с расчетами, выполненными по линейным и слабонелинейным теориям. Часть результатов, полученных в рамках исследования линейной неустойчивости Гёртлера, повторно воспроизведена в экспериментах, проведенных на другой экспериментальной модели при другом способе возбуждения контролируемых возмущений, основанном на иных физических принципах.

Основные результаты работы физически непротиворечивы и согласуются с имеющимися представлениями о линейной и слабонелинейной стадиях гёртлеровской неустойчивости и о механизмах восприимчивости пограничного слоя к локальным неоднородностям поверхности.

Важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их весьма серьёзная апробация на большом количестве национальных и международных конференций, а также публикация основных результатов в рецензируемых научных журналах.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации представлены в тридцати пяти публикациях, в том числе в трех журнальных статьях и в трудах многочисленных российских и международных научных конференций и семинаров (см. список в конце автореферата). В том числе на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2008), международных



конференциях «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (Москва, 2006, 2008 и 2010), школах-семинарах «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2006, 2007, 2008 и 2010), международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR) (Новосибирск, 2007, 2008, 2010), XI Конференции по турбулентности Европейского общества механиков (EUROMECH) (Порту, 2007), конференциях по механике жидкостей Европейского общества механиков (Стокгольм – 2006, Манчестер – 2008, Бад Райхенхаль – 2010); VI симпозиуме Европейского объединения исследователей течений, турбулентности и горения (ERCFTAC SIG) «Механизмы ламинарно-турбулентного перехода: предсказание и управление» (Кляйн-варсенталь, 2007) и других.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём 164 страницы, в том числе 43 рисунка.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит общую характеристику работы: сформулированы основные цели и задачи; отмечены положения, выносимые на защиту; приведена структура диссертации и её краткая аннотация.

**В главе 1** описывается обзор предыдущих экспериментальных, теоретических и численных исследований по теме настоящей диссертации. Рассматривается текущее состояние исследования ранних стадий процесса ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях на искривленных поверхностях. Основное внимание уделяется исследованию линейной стадии развития неустойчивости Гёртлера и механизмов порождения гёртлеровских вихрей. Описывается круг проблем, связанных с использованием в экспериментах традиционного стационарного подхода к исследованию неустойчивости. Обосновывается важность выбранного направления исследований.

**В главе 2** описывается разработанный нестационарный подход к исследованию неустойчивости Гёртлера и созданные на его основе методы экспериментального изучения гёртлеровской неустойчивости и восприимчивости. Описан порядок проведения экспериментов и обработки данных.

Использование в экспериментах контролируемых нестационарных возмущений взамен стационарных дает большие преимущества. Применение методов усреднения по ансамблю реализаций, а также фурье-обработки измеряемых сигналов, позволяет регистрировать возмущения очень малых амплитуд (в десятые и сотые доли процента от скорости потока) и вместе с тем обеспечить высокую точность измерений. Применяемые в работе контролируемые возмущения очень низких частот ( $0,5 \div 2$  Гц) при скорости потока около 10 м/с имеют продольный масштаб, в несколько раз превышающий размеры экспериментальной модели, и с физической точки зрения соответствуют стационарным. Применение таких *квазистационарных* возмущений дает возможность исследовать характеристики стационарной неустойчивости Гёртлера.

Эксперименты проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости потока 9,18 м/с. Основные измерения выполнены при помощи одноточечного датчика термоанемометра в пограничном слое типа Блазиуса. Эксперименты проводились с использованием специально разработанных и изготовленных по оригинальной высокоточной технологии экспериментальных моделей с заданными параметрами. Их применение позволило сделать пренебрежимо малым влияние неконтролируемых (естественных) стационарных вихрей Гёртлера.

Принципиальная конструкция экспериментальной модели и ее положение в рабочей части аэродинамической трубы показаны на рис. 1. (Эта модель использовалась для изучения линейной и слабонелинейной стадии неустойчи-

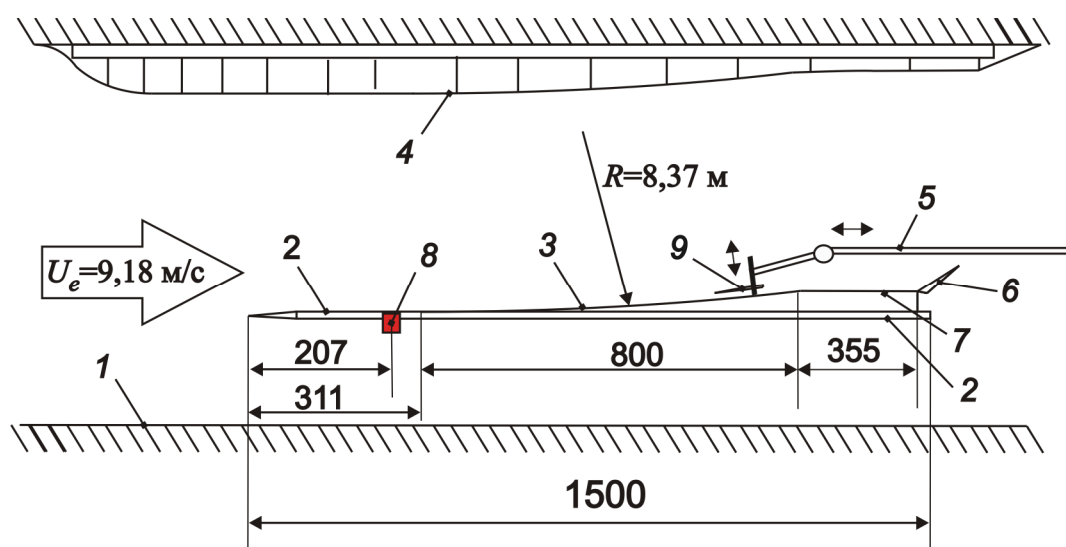


Рис. 1. Экспериментальная модель.

1 – стенка аэродинамической трубы, 2 – несущая пластина, 3 вставка с вогнутой поверхностью, 4 – адаптивная ложная стенка, 5 – координатник, 6 – закрылок, 7 – задняя часть модели, 8 – источник возмущений, 9 – датчик термоанемометра.

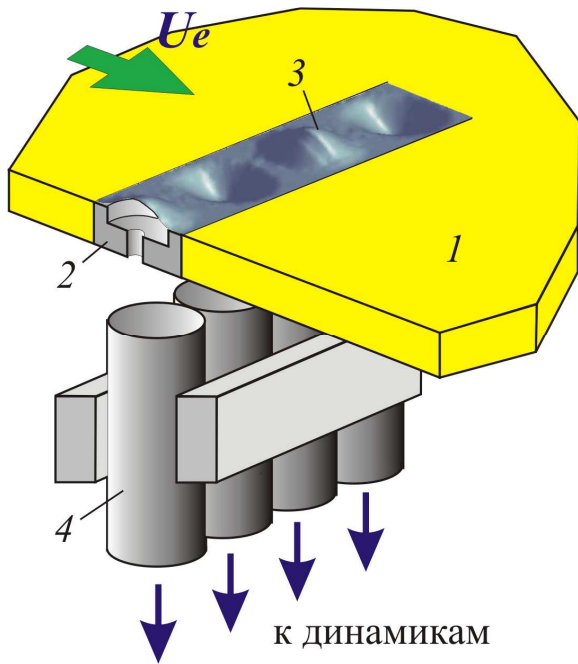


Рис. 2. Источник возмущений.

1 – поверхность модели, 2 – вставка, 3 – эластичные мембраны, 4 – пневмотрассы.

вводились в пограничный слой хорошо известным универсальным источником возмущений ВС II (который в данной работе был впервые применен для изучения вихрей Гёртлера), а также специально разработанным источником, способным моделировать неоднородности поверхности с заданными параметрами (рис. 2). Показано, что работа источников приводит к порождению в пограничном слое именно первой, наиболее опасной, дискретной моды гёртлеровской неустойчивости.

Результативность изучения неустойчивости Гёртлера с использованием разработанных методик была подвергнута серьезной проверке: В экспериментах доказана линейность развития контролируемых вихрей вниз по потоку (характеристики возмущений не зависели от амплитуды). Показано хорошее согласование характеристик регистрируемых возмущений и расчетов, выполненных по линейной теории устойчивости. Продемонстрирована пригодность моделирующего локализованные неоднородности поверхности источника для изучения механизмов порождения наиболее опасных гёртлеровских мод. Проведена оценка протяженности ближнего поля источников в эксперименте и расчетах, выполненных в рамках нелокальной непараллельной линейной теории (ЛНТ). Показано, что большая часть области измерений и в экспериментах и в расчетах соответствует дальнему полю источника, в котором можно проводить корректные измерения.

ности.) Пограничный слой формируется на плоской несущей пластине 2, которая снабжена вставкой с вогнутой поверхностью 3 (радиус кривизны  $R = 8,37$  м). Для дополнительного управления сходом потока с модели, её задняя часть 7 снабжена закрылком 6. Практически нулевой продольный градиент давления над вогнутой частью модели обеспечивается адаптивной ложной стенкой 4, которая была установлена на потолке рабочей части трубы. Источник возмущений расположен в передней части модели 8.

В ходе экспериментов контролируемые нестационарные возмущения

В последующих главах приводятся результаты практического применения разработанных экспериментальных методик.

**В главе 3** описываются экспериментальные характеристики стационарной и нестационарной *линейной* неустойчивости Гёртлера и обоснование применимости линейных теорий.

Исследование проведено для широкого диапазона параметров: чисел Гёртлера  $G^* = (U_e \delta^* / \nu) \cdot (\delta^* / R)^{1/2} = 10,3 \div 17,3$  трех безразмерных поперечных длин волн вихрей  $\Lambda = (U_e \lambda / \nu) \cdot (\lambda / R)^{1/2} = 149, 274$  и  $775$ , во всем диапазоне частот, в котором существует неустойчивость ( $F = 2\pi f \nu / U_e^2 \cdot 10^6 = 0,57 \div 22,70$ ) (здесь  $\delta^*$  – толщина вытеснения пограничного слоя,  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $U_e$  – скорость потока,  $\lambda$  – поперечная длина волны вихрей, а  $f$  – частота возмущений). Проведено прямое сопоставление результатов экспериментов с расчетами, выполненными по линейным теориям устойчивости: классической локальной параллельной (ЛПТ) и нелокальной непараллельной.

Практическое применение разработанной методики позволило впервые выполнить надёжное экспериментальное исследование стационарной *линейной* гёртлеровской неустойчивости, а также провести первое экспериментальное исследование линейной неустойчивости пограничного слоя к *нестационарным* гёртлеровским вихрям. В работе впервые получено согласование (и очень хорошее, количественное) экспериментальных и теоретических характеристик линейной устойчивости пограничного слоя к исследуемым возмущениям. Показано, что эти возмущения соответствуют наиболее опасной, первой дискретной моде неустойчивости Гёртлера.

В качестве примера такого согласования, на рис. 3 приведены кривые нарастания амплитуд (слева) и фаз (справа) продольной компоненты возмущений скорости в пограничном слое. Результаты приведены для квазистационарного (*a, б*) и существенно нестационарного (*в, г*) случаев на примере вихрей с безразмерной поперечной длиной волны  $\Lambda = 149$ . Точками показан эксперимент ( $\bullet$  – дальнее и  $\circ$  – ближнее поле источника), линиями расчет по ЛНТ и ЛПТ. Как видно на этом примере, обе теории корректно описывают развитие неустойчивости, однако нелокальная непараллельная теория лучше согласуется с экспериментом (что особенно хорошо видно на фазах – рис. 3, *г*).

На рис. 4 приведены собственные функции исследованной первой моды неустойчивости Гёртлера в одном из изученных режимов. Амплитуды имеют колоколообразную форму с максимумом в критическом слое и очень слабо зависят от частоты и поперечной длины волны возмущений. Фазы почти линейно

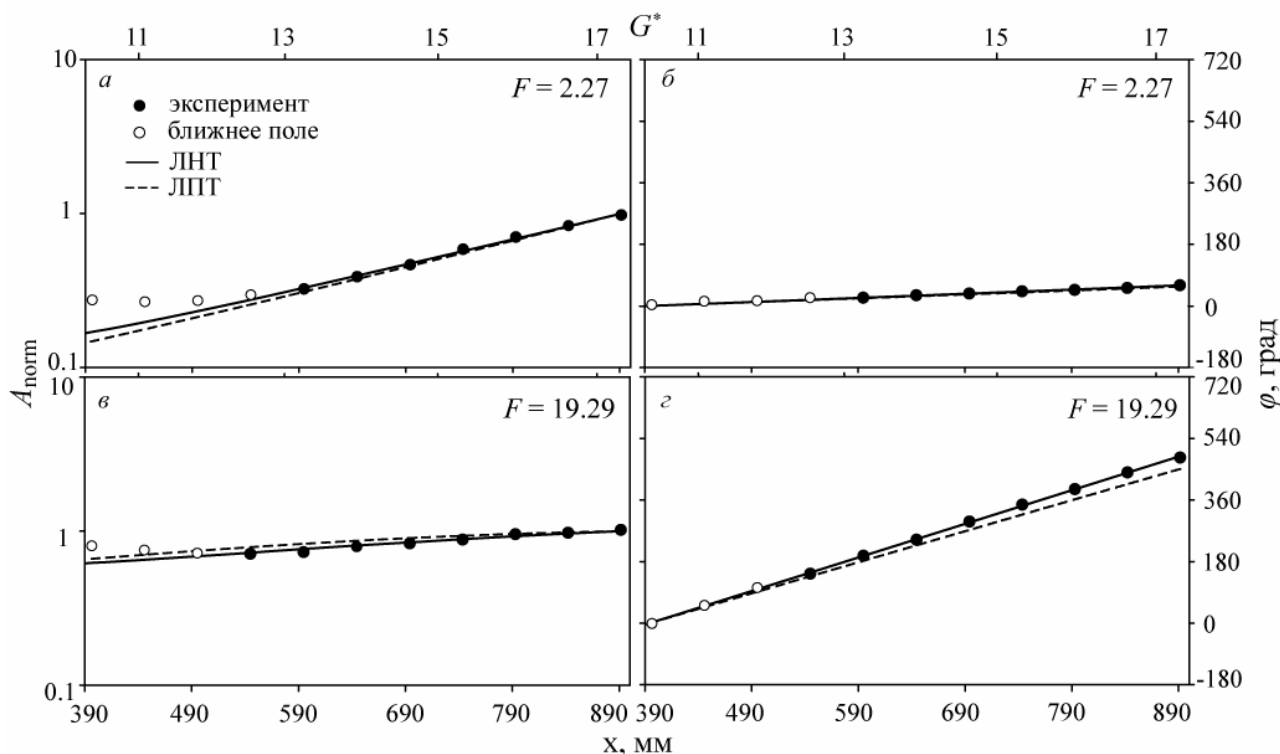


Рис. 3. Кривые нарастания амплитуд (*a*, *б*) и фаз (*в*, *г*) вихрей Гёртлера в квазистационарном ( $F = 2.27$ ) и существенно нестационарном ( $F = 19.29$ ) режимах генерации возмущений.

$\Lambda = 149$ . Точки – эксперимент, линии – расчет по ЛПТ и ЛНТ

уменьшаются при удалении от стенки. Причем скорость убывания фаз существенно зависит от частоты и практически ей пропорциональна. В результате, на высоких частотах возникает ситуация, когда разница фаз у стенки и вдали от нее превышает 180 градусов. Такая частотная зависимость значительно влияет на структуру возмущений: нестационарные вихри *первой* гёртлеровской моды наклонены к стенке и на высоких частотах формируют два (и более) противорвращающихся вихревых слоя.

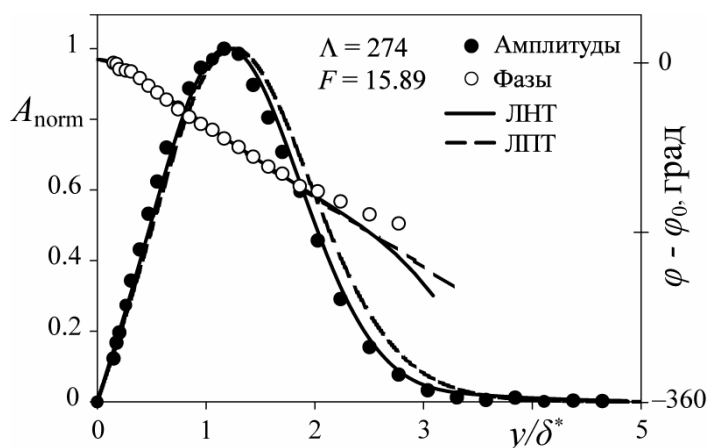


Рис. 4. Собственные функции нестационарной неустойчивости Гёртлера.

Обнаружено, что свойства неустойчивости Гёртлера существенно зависят от частоты. Инкременты возмущений уменьшаются с частотой (но очень слабо на низких частотах) (рис. 5, *a*). Фазовые скорости составляют примерно 0,65 от скорости потока и почти не зависят от параметров задачи (рис. 5, *b*). Результаты экспериментов количественно согласуются с ЛНТ расчетами.

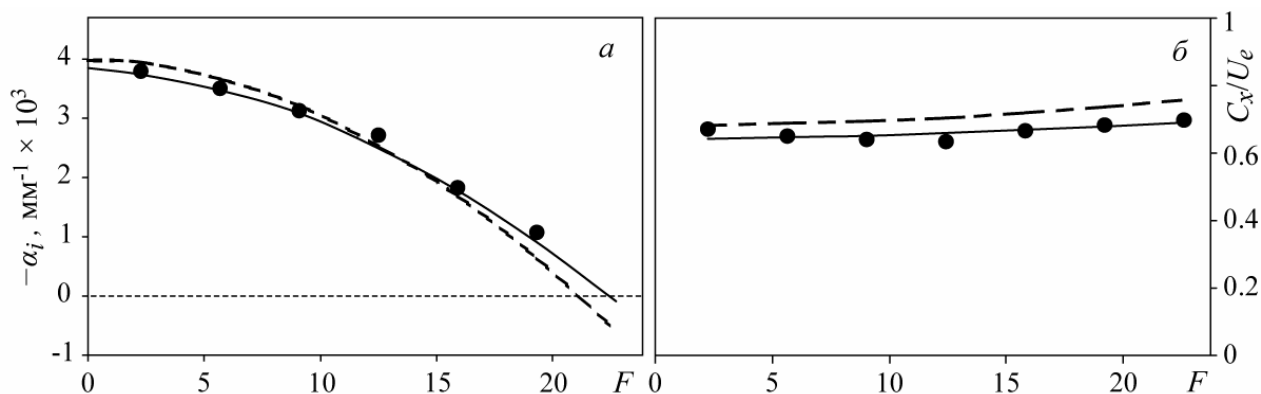


Рис. 5. Зависимость инкрементов (а) и фазовых скоростей (б) нестационарных вихрей Гёртлера от частоты.

$\Lambda = 149$ , точки – эксперимент, сплошная линия – ЛНТ, штриховая – ЛПТ.

Расчет по ЛПТ правильно предсказывает поведение инкрементов, однако дает несколько завышенную оценку фазовых скоростей.

Хотя диаграммы устойчивости, рассчитанные по ЛПТ для стационарных ( $F = 0$ ) и квазистационарных ( $F = 0,57, 2,27$ ) вихрей, мало отличаются друг от друга (особенно в области проведенных измерений, рис. 6, а), дальнейшее нарастание частоты приводит к значительным изменениям (рис. 6, б). Область неустойчивости на диаграммах искажается и разделяется на несколько доменов (на рис.6, б их видно два). Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными: в неустойчивой области возмущения нарастают, в устойчивой – затухают, экспериментально определенные нейтральные точки согласуются с расчетной кривой. Обнаруженное изменение области неустойчивости на диаграммах означает, что нарастание числа Гёртлера способно стабилизировать течение по отношению к нестационарным гёртлеровским вихрям фиксированной частоты (во всём изученном диапазоне поперечных длин волн).

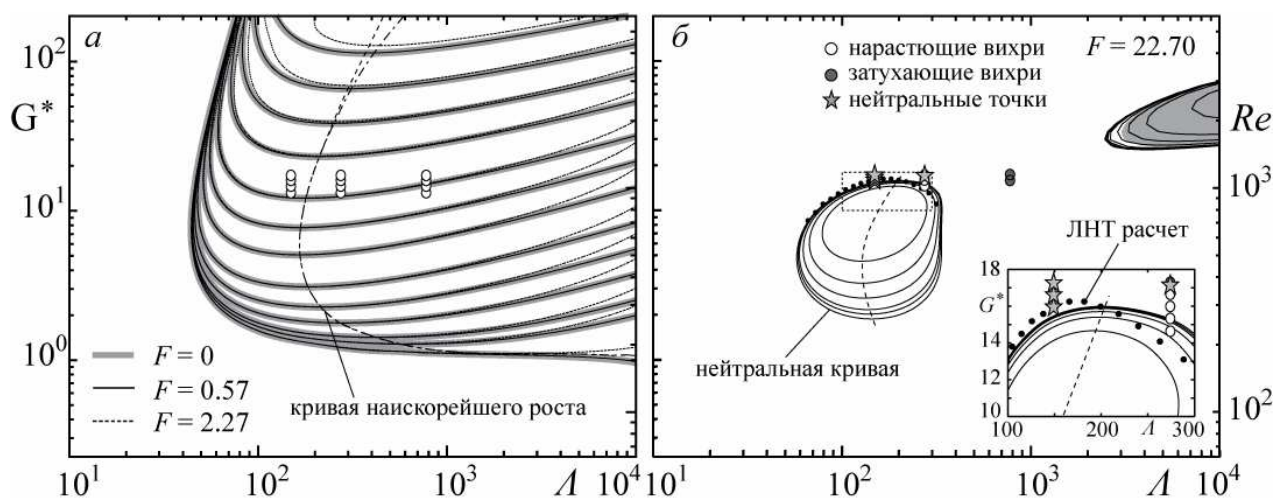


Рис. 6. Эволюция диаграмм устойчивости с частотой: квазистационарный (а) и существенно нестационарный (б) режим.

Расчет выполнен по ЛПТ. Нейтральная кривая на рис (б) уточнена с помощью ЛНТ-расчета.

**Глава 4** посвящена изучению слабонелинейной стадии развития неустойчивости. Исследования проведены для трех частотных режимов основной частотно-волновой гармоника (с параметрами  $F = 2,84, 4,54$  и  $6,81$ ,  $\Lambda = 422$ ).

В экспериментах, за счет последовательного увеличения амплитуд возмущений, удалось проследить переход от линейного к слабонелинейному развитию неустойчивости Гёртлера, зарегистрировать первые проявления действия нелинейности на развитие вихрей и определить амплитудные пороги нелинейности. Результаты измерений были тщательно сопоставлены с расчетами, выполненными по линейной и слабонелинейной теории.

Обнаружено, что начало нелинейного развития нестационарных гёртлеровских мод проявляется в:  $a$  – комбинационном взаимодействии спектральных мод,  $b$  – искажении собственных функций,  $v$  – замедлении скоростей роста амплитуд и  $d$  – уменьшении фазовых скоростей. Увеличение частоты основной моды сопровождается усилением нелинейных эффектов. Отклонения характеристик устойчивости от линейных качественно правильно описываются слабонелинейной теорией устойчивости (А.В. Бойко), хотя величины отклонений в расчётах обычно меньше экспериментальных.

На рис. 7 показаны оцененные в конце области измерений ( $G^* \approx 17,3$ ) инкременты ( $a$ ) и фазовые скорости ( $b$ ) первой (основной) и второй частотных гармоник в зависимости от локальной амплитуды основной моды. Точками показан эксперимент, сплошными линиями – результаты расчетов по ЛНТ, пунктиром – нелинейная нелокальная теория (ННТ). Можно заметить, что первые

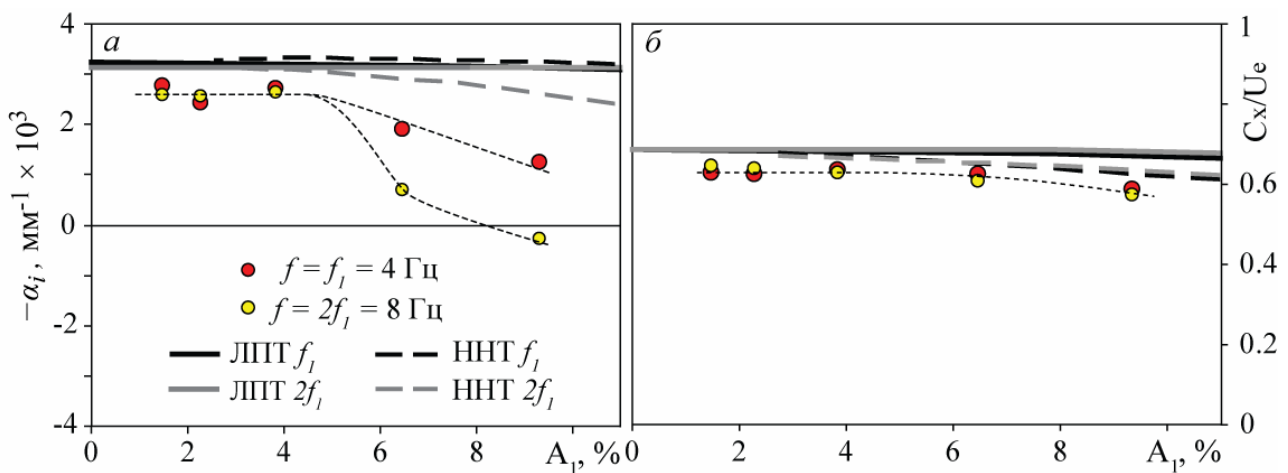


Рис. 7. Инкременты ( $a$ ) и фазовые скорости ( $b$ ), оцененные в конце области измерений  $G^* \approx 17,3$  для первой (основной) и второй частотной гармоник в зависимости от локальной амплитуды основной моды.

Точки – эксперимент; черная и серая сплошные линии – ЛНТ-расчет для частотных мод  $f_1$  и  $f_2$ ; черные и серые штриховые – расчет по нелинейной теории (ННТ).

отклонения от линейных законов развития неустойчивости проявляются после прохождения определенного амплитудного порога, величина которого составляет 4–6% от скорости потока. Найденное значение достаточно велико, однако оно по крайней мере в два раза меньше характерных амплитуд возмущений, полученных в предшествующих экспериментах по исследованию *линейной* неустойчивости Гёртлера. Таким образом, проблема больших амплитуд несомненно является одной из основных причин наблюдавшихся в таких работах отклонений измеренных характеристик устойчивости от линейной теории.

**В главе 5** приводятся результаты экспериментов по исследованию механизмов порождения гёртлеровских мод в пограничном слое, локализованными (по продольной координате) неоднородностями поверхности: вибрациями, неровностями.

В экспериментах использовалась вторая (усовершенствованная экспериментальная модель) и применен новый, специально разработанный источник возмущений (см. рис. 2), способный моделировать периодические по поперечной координате неоднородности с заданными параметрами: поперечной длиной волны ( $\lambda_z = 8$  и  $12$  мм) и частотой колебаний ( $f = 2 \div 14$  Гц в данной работе). Форма моделируемых неоднородностей была тщательно промерена в каждом из исследованных режимов возбуждения. Фурье-обработка полученной информации, позволила получить параметры гармоник частотно-волнового спектра, резонансных порождаемым в пограничном слое вихрям, которые необходимы для определения комплексных (амплитуды и фазы) коэффициентов восприимчивости течения  $\bar{G}(f, \Lambda)$ . (Коэффициенты восприимчивости

$\bar{G}(f, \Lambda) = \frac{\bar{A}_{in}(f, \Lambda)}{\bar{A}_{sur}(f, \Lambda)}$ , где  $\bar{A}_{in}(f, \Lambda)$  комплексная амплитуда моды неустойчиво-

сти пограничного слоя в положении источника, а  $\bar{A}_{sur}(f, \Lambda)$  – комплексная амплитуда резонансного спектра неоднородностей поверхности, моделируемых источником)

Как показали исследования, работа источника приводила к порождению в пограничном слое контролируемых нестационарных вихрей Гёртлера с амплитудой в десятые и сотые доли процента от скорости потока. Их экспериментальные характеристики хорошо согласуются с расчетами, выполненными по линейной теории. Амплитуды, фазы и продольное волновое число возмущений в положении источника были получены экстраполяцией экспериментальных данных вверх по потоку, выполненной с помощью линейной теории устойчивости.



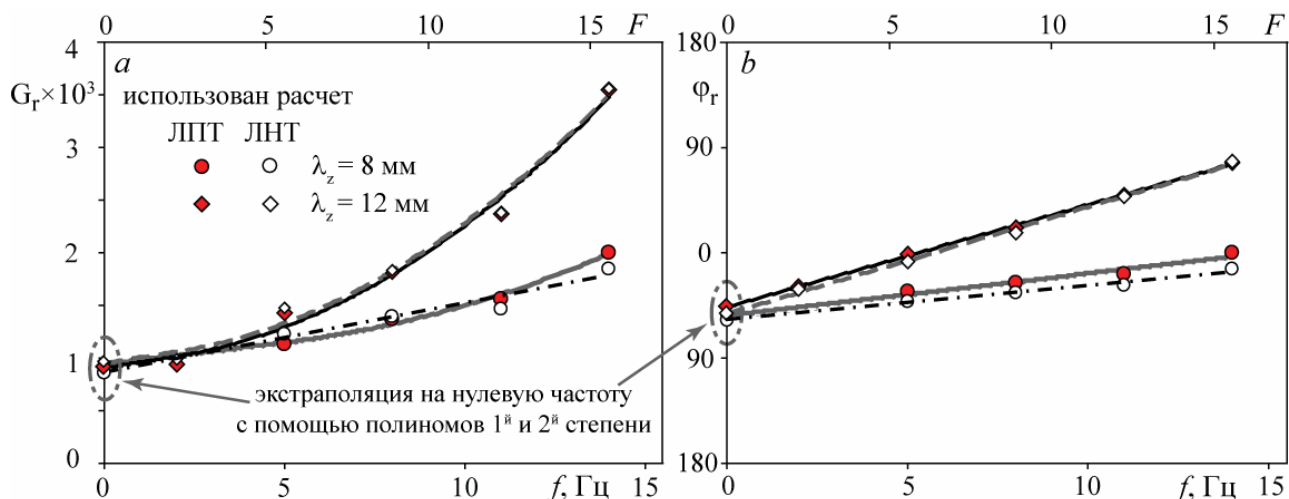


Рис. 8. Коэффициенты восприимчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к локальным неоднородностям поверхности: амплитуды (а) и фазы (б).  $G^* = 8.16$ .

Точки – эксперимент, линии – экстраполяция экспериментальных значений на нулевую частоту с помощью полиномов 1 и 2-й степени. Результаты экстраполяции обведены штрихпунктиром.

Полученные данные впервые позволили определить линейные коэффициенты восприимчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к локальным неоднородностям поверхности при возбуждении нестационарных вихрей Гёртлера (рис. 8). Амплитуды коэффициентов нарастают с частотой и на высоких частотах превышают величины, полученные для стационарных вихрей в несколько раз. Фазы слабо нарастают с частотой. Экстраполяция полученных распределений на нулевую частоту возмущений (см. рис. 8) позволила, также впервые, определить коэффициенты восприимчивости для стационарных неровностей поверхности. Увеличение поперечного масштаба неоднородностей слабо влияет на амплитуды и фазы коэффициентов на нулевой частоте, но приводит к их росту на высоких частотах.

**Заключение** содержит основные результаты и выводы работы, списки публикаций по теме диссертации. Затем следуют благодарности коллегам и соавторам.

В разделе **Литература** — 91 ссылка на процитированные источники.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан комплекс высокоточных методов экспериментального исследования характеристик возбуждения и развития стационарной и нестационарной гёртлеровской неустойчивости в пограничных слоях.

2. Впервые получены все характеристики линейной устойчивости пограничного слоя к стационарным и нестационарным вихрям Гёртлера и проведено их количественное сопоставление с расчётными.

3. Показано что линейная локально-параллельная теория в основном правильно описывает как стационарную, так и нестационарную неустойчивость Гёртлера, хотя непараллельная теория даёт более хорошее согласование с экспериментом.

4. Обнаружено, что с ростом частоты неустойчивость течения ослабевает при фиксированном числе Гёртлера, а нарастание числа Гёртлера способно не только дестабилизировать, но и стабилизировать течение по отношению к нестационарным гёртлеровским вихрям фиксированной частоты.

5. Исследованы основные слабонелинейные эффекты в конце области линейного развития гёртлеровских вихрей, и показано их качественное соответствие расчётам. Определены амплитудные пороги появления этих эффектов. Показано, что определенный по искажению скоростей роста основных мод порог нелинейности для вихрей Гёртлера составляет  $4\div 6\%$ , что значительно выше, чем для волн ТШ, но значительно ниже, чем для мод неустойчивости поперечного течения.

6. Впервые получены коэффициенты локализованной восприимчивости пограничного слоя к неоднородностям поверхности (неровностям и вибрациям) при возбуждении стационарных и нестационарных вихрей Гёртлера. Показано, что восприимчивость течения нарастает с частотой, а для высоких частот – с поперечным масштабом возмущений.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В рецензируемых журналах

1. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Нестационарная неустойчивость Гёртлера // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 3. С. 8-15.
2. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Steady and unsteady Goertler boundary-layer instability on concave wall // European Journal of Mechanics B/Fluids. 2010. Vol. 29. P. 61-83.
3. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Исследование слабонелинейного развития нестационарных вихрей Гёртлера // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 487-514.

## Материалы конференций

4. **Мищенко Д.А.** Экспериментальное исследование устойчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера // *Материалы XLIII Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”*: Физика. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2005. С. 53.
5. **Мищенко Д.А.** Экспериментальное исследование устойчивости безградиентного пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера // *Материалы Межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири»: Физико-математические науки /* Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2005. С. 13.
6. **Мищенко Д.А.** Экспериментальное исследование устойчивости безградиентного пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера: Квалификационная работа на соискание степени бакалавра. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2005. 49 с.
7. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Экспериментальное исследование устойчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера // *Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Доклады молодёжной конференции. Вып. X /* Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Нонпарель, 2005. С. 19-22.
8. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Устойчивость пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера. Эксперимент и теория // *Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тезисы докладов V Всероссийской конференции молодых учёных /* Под ред. В.М. Фомина. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2005. С. 80-82
9. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Нестационарная неустойчивость Гёртлера // *Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность: Сборник докладов на компакт диске.* М.: МГУ, 2006. CD-ROM. 6 с.
10. **Мищенко Д.А., Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С.** Нестационарная гёртлеровская неустойчивость пограничного слоя на вогнутой стенке. Эксперимент и теория // *Двенадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: Материалы конференции.* Новосибирск: редакционно-издательский центр НГУ, 2006. С. 673-674.
11. **Мищенко Д.А.** Устойчивость пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера эксперимент и теория // *Материалы XLIV Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”*: Физика. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2006. С. 127.
12. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Нестационарная неустойчивость Гёртлера пограничного слоя на вогнутой стенке. Экспери-

мент и теория // *Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов–2006”, секция “физика”*: сборник тезисов. Т. 1. М.: Физический факультет МГУ, 2006. С. 175-176.

13. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Linear-stability of Blasius boundary layer on concave wall to quasi-steady and unsteady Goertler vortices: experiment and theory // *Abstracts of EMFC6 KTH - EUROMECH Fluid Mechanics Conference 6*. Vol. 2. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006. P. 201.
14. **Бойко А.В., Иванов А.В., Мищенко Д.А.** Нестационарная неустойчивость Гёртлера. Эксперимент и теория // *Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике*. Т. 2. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2006. С. 34.
15. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** A new approach to investigation of Goertler instability. Verification of theory // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Pt. III*. Novosibirsk: Nonparel, 2007. P. 33-38.
16. **Мищенко Д.А.** Линейная неустойчивость Гёртлера // *Материалы XLV Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”*: Физика. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2007. С. 36.
17. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Экспериментальное и теоретическое исследование линейной неустойчивости Гёртлера // *Тезисы докладов IV Всероссийской научной молодежной конференции «Под знаком  $\Sigma$ »*. – Омск, 2007. CD-ROM. 2 с.
18. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Experimental and numerical study of unsteady Goertler vortices // *6<sup>th</sup> ERCOFTAC SIG 33 Workshop “Laminar-Turbulent Transition Mechanisms. Prediction and Control”*: *Progr. and Book of Abstr.* [Stuttgart], 2007, P. 53.
19. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Quasi-steady and unsteady Goertler vortices on concave wall: experiment and theory // *Proceedings of the 11<sup>th</sup> EUROMECH European Turbulence Conference «Advances in Turbulence XI»* / Eds. J.M.L.M. Palma, A. Silva Lopes. Heidelberg: Springer, 2007. P. 173–175.
20. **Мищенко Д.А.** Характеристики гёртлеровской неустойчивости пограничного слоя. Экспериментальное обоснование теории: Выпускная квалификационная работа. Магистерская диссертация. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2007. 50 с.
21. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Линейная гёртлеровская неустойчивость — точки над “i” // *Тезисы докладов международной конференции «XVIII сессия Международной школы по моделям*

*механики сплошной среды»* / Под ред. Н.Ф. Морозова. Саратов: изд. Саратовского университета, 2007. С. 22.

22. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Экспериментально-теоретическое исследование устойчивости пограничного слоя к квазистационарным и нестационарным вихрям Гёртлера // *Материалы Шестой и Седьмой школ-семинаров «Модели и методы аэродинамики»*. М.: МЦНМО, 2007. С. 15–16.
23. **Мищенко Д.А., Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С.** Линейное и нелинейное развитие нестационарных мод гёртлеровской неустойчивости // *ВНКСФ-14 Четырнадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: материалы конференции*. Уфа, 2008. С. 519-520
24. **Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Влияние нелинейности на развитие нестационарной гёртлеровской неустойчивости // *Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Докл. Молодежной конф. Вып. XI* / Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2008. С. 160-163
25. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Исследование порогово нелинейности для нестационарных вихрей Гёртлера // *Материалы международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность»*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. С. 32-34.
26. **Ivanov A.V., Boiko A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Nonlinear thresholds of development of unsteady Goertler vortices. Experiment and theory // *EUROMECH Fluid Mechanics Conference 7: Abstracts*. Manchester: University of Manchester, 2008. P. 162.
27. **Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Исследование слабо нелинейных стадий развития вихрей Гёртлера. Порог нелинейности. // *Материалы Восьмой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики»*. М.: МЦНМО, 2008. С. 20-21.
28. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Study of nonlinear development of Goertler vortices by method of controlled unsteady perturbations // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. I* / Ed. V.M. Fomin. Novosibirsk: Parallel, 2008. P. 122.
29. **Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Study of nonlinear development of Goertler vortices by method of controlled unsteady perturbations // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Proceedings*. Novosibirsk, 2008. CD-ROM. 10 p.
30. **Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Порождение нестационарных вихрей Гёртлера неоднородностями поверхности // *Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Докл. Всерос-*

сийской молодежной конф. Вып. XII / Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2010. С. 136-139.

31. **Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Исследование восприимчивости течения на вогнутой стенке к неоднородностям обтекаемой поверхности // *Материалы Десятой Международной школы-семинара “Модели и методы аэродинамики”*. М.: МЦНМО, 2010. С. 72-73.
32. **Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.** Метод возбуждения нестационарных вихрей Гёртлера локализованными неоднородностями поверхности // *Материалы Десятой Международной школы-семинара “Модели и методы аэродинамики”*. М.: МЦНМО, 2010. С. 74.
33. **Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Excitation of unsteady Goertler vortices by surface non-uniformities // *Euromech Fluid Mechanics Conference-8 (EFMC-8): Book of abstracts*. Bad Reichenhall, 2010. Section 4. P. 12.
34. **Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Experimental investigation of mechanisms of excitation of Goertler vortices // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. II* / Ed. V.M. Fomin. Novosibirsk: Parallel, 2010. P. 89-90.
35. **Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A.** Method of excitation of unsteady Goertler vortices by surface non-uniformities // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. II* / Ed. V.M. Fomin. Novosibirsk: Parallel, 2010. P. 91-92.

Ответственный за выпуск Д.А. Мищенко

Подписано к печати 11.11.2010  
Усл. печ. л 1.0, Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 125, Заказ № 11  
Формат бумаги 60×84/16

Отпечатано на ризографе ЗАО “ДокументСервис”  
630090, Новосибирск-90, Институтская, 4/1

