

На правах рукописи

**Яцких Алексей Анатольевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
И ЭВОЛЮЦИИ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В СВЕРХЗВУКОВЫХ  
ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией волновых процессов в сверхзвуковых течениях, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Новиков Андрей Валерьевич, доктор физико-математических наук, начальник отдела, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского

Леманов Вадим Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Защита состоится 14 февраля 2020 г. в 11<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, [http://www.itam.nsc.ru/education/dissertation\\_board.html](http://www.itam.nsc.ru/education/dissertation_board.html).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



С.А. Гапонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Ламинарно-турбулентный переход сдвиговых течений является одной из фундаментальных проблем в механике жидкости и газа. Практически значимой является задача предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя, образующегося на поверхности летательных аппаратов. Исследования процесса перехода ламинарного течения в пограничном слое в турбулентное состояние проводятся более 70 лет. Несмотря на значительный прогресс в вычислительных и экспериментальных технологиях в последние десятилетия, до сих пор нет полного описания физических процессов, приводящих к турбулентности в пристенных течениях.

Ламинарно-турбулентный переход в пограничных слоях является сложным комплексным явлением для теоретического описания и экспериментального изучения. Турбулизация течения в пограничных слоях происходит вследствие возникновения и развития возмущений, их роста и взаимодействия друг с другом с образованием локализованных в пространстве и времени вихревых структур. Детальные экспериментальные данные о пространственно-временном развитии возмущений в пограничных слоях могут быть получены в контролируемых условиях, когда в поток вводятся возмущения с фиксированными начальными параметрами, что позволяет определять волновые характеристики развития возмущений в пограничном слое и напрямую сопоставлять экспериментальные данные с теоретическими расчетами.

Для моделирования естественного сценария ламинарно-турбулентного перехода необходимо изучать эволюцию контролируемых возмущений, обладающих широким как пространственным, так и частотным спектральным составом (волновые пакеты). Контролируемые волновые пакеты с широким частотным и волновым составом могут быть искусственно возбуждены в пограничном слое с помощью локализованного во времени и пространстве воздействия. Экспериментальные исследования с помощью контролируемых локализованных возмущений при малых дозвуковых скоростях потока позволили достичь значительного прогресса в понимании процессов ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях. Изучение развития локализованных волновых пакетов позволяет получать детальные и обширные данные по процессу турбулизации течений в пограничных слоях.

Экспериментальное изучение пространственно-временной эволюции локализованных волновых пакетов в сжимаемых сдвиговых течениях необходимо для описания и развития методов предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода в пристенных течениях при сверхзвуковых скоростях потока. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возбуждения и развития волновых пакетов в двумерных и трехмерных пограничных слоях при сверхзвуковых скоростях потока.

**Цель работы** – развить метод экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях с помощью локализованных волновых пакетов. Исследовать развитие контролируемых волновых пакетов в сверхзвуковых пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла.

Были поставлены следующие конкретные задачи:

– Отработка методики введения локализованных волновых пакетов в сверхзвуковой пограничный слой с помощью импульсного тлеющего разряда. Апробация схем зажигания тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме и синхронности измерений в сверхзвуковом пограничном слое с вводимыми возмущениями.

– Определение оптимально-эффективной длины реализации цифровых осциллограмм, необходимой для выделения контролируемого сигнала из фона случайных пульсаций сверхзвукового пограничного слоя.

– Исследование влияния временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего разряда на генерируемые в пограничном слое пластины локализованные возмущения при числах Маха 2, 3 и 4.

– Исследование эволюции локализованных возмущений различной длительности по времени в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2.

– Исследование эволюции контролируемых волновых пакетов в пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2.

**Научная новизна.** В работе экспериментальным путем впервые:

– получены данные по пространственно-временному развитию локализованных волновых пакетов в пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла с углом стреловидности  $40^\circ$  при числе Маха 2;

– изучено влияние временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего разряда на возбуждаемые с поверхности локализованные возмущения в сверхзвуковом пограничном слое при числах Маха 2, 3 и 4;

– определены скорости распространения локализованных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины при числах Маха 2, 3 и 4;

– определены нарастающие моды волнового пакета в пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла при числе Маха 2.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в экспериментальном изучении физических механизмов, приводящих к переходу ламинарного течения в сверхзвуковом пограничном слое в турбулентное состояние. Особенностью работы является то, что исследуется развитие искусственных локализованных во времени и пространстве волновых пакетов, вводимых в пограничный слой импульсным тлеющим разрядом. В работе экспериментально изучено влияние временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего разряда на возбуждаемые в сверхзвуковом пограничном слое возмущения. Получены данные по пространственно-временному развитию локализованных волновых пакетов и оценки их волновых характеристик в сверхзвуковых пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла при числе Маха 2. Экспериментальные данные развивают и дополняют общепринятые представления об эволюции возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях. Установлено, что характер развития локализованных волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое подобен эволюции локализованных возмущений в несжимаемом пограничном слое. Показано, что развитие мод волнового пакета на отдельных частотах аналогично результатам, полученным в экспериментах с периодическими возмущениями, как в случае пограничного слоя плоской пластины, так и в случае скользящего крыла. Получено качественное и количественное соответствие экспериментальных данных по эволюции волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла результатам расчетов по линейной теории устойчивости пограничного слоя при числе Маха 2.

**На защиту выносятся:**

– метод возбуждения контролируемых волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое с помощью импульсного тлеющего разряда, зажигаемого на поверхности экспериментальной модели;

– результаты экспериментального исследования влияния временных и энергетических характеристик импульсного разряда на генерируемые им локализованные

возмущения в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины при числах Маха 2, 3 и 4;

– результаты по изучению пространственно-временного развития локализованных волновых пакетов в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2;

– результаты экспериментальных исследований пространственно-временного развития контролируемых локализованных волновых пакетов в пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты работы получены при участии автора. При выполнении работ по теме диссертации, опубликованных совместно с научным руководителем и другими соавторами, диссертант принимал участие в подготовке и планировании экспериментальных исследований, непосредственных измерениях и анализе экспериментальных данных. Автор провел проверку методик обработки полученных данных. Опубликовал основные результаты в рецензируемых журналах. Результаты работы были доложены автором на конференциях, в том числе международных.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена применением апробированных экспериментальных методик. Используемые подходы основаны на технологиях, разработанных в ИТПМ СО РАН, с помощью которых были получены признанные во всем мире научные результаты. Данные, представленные в разделах диссертационной работы, дополняют друг друга и дают целостную картину изучаемого явления. Свидетельством достоверности также является представление результатов диссертации на многочисленных российских и международных научных конференциях, а также публикации в рецензируемых журналах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре «Механика вязкой жидкости и турбулентность» ИТПМ СО РАН, а также на многочисленных российских и международных научных конференциях: Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2012; 2013; 2014; 2016; 2017), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Ижевск, 2014; Омск, 2015), Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2012; 2014; Шерегеш, 2017; 2018), Чаплыгинские чтения (Новосибирск, 2015), Международная конференция по методам аэрофизических исследований ISMAR (Новосибирск, 2014; Пермь, 2016), Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2017; 2019), Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды» (Новосибирск, 2017), International congress of theoretical and applied mechanics (ICTAM) (Монреаль, Канада, 2016), European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS) (Милан, Италия, 2017), Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости (НеЗаТеГиУс) (Звенигород, 2018), Модели и методы аэродинамики (Евпатория, 2019).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 38 работ, в том числе 8 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований и двух приложений. Объем диссертации составляет 145 страниц, включая 72 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описаны современные представления, методы и подходы изучения ламинарно-турбулентного перехода пограничных слоев. Приведен обзор предшествующих работ. Описаны актуальность данной работы, её научная новизна и практическая значимость. Сформулированы цели и задачи работы, дано краткое содержание диссертации.

**Глава 1** посвящена описанию экспериментального оборудования, методики проведения измерений экспериментальных данных. Приводятся параметры аэродинамической трубы Т-325, характеристики потока в рабочей части. Описаны экспериментальные модели плоской пластины и скользящего крыла, используемые в работе. Приведена конструкция используемых источников контролируемых возмущений. Описывается процесс обработки экспериментальных данных.

**В п. 1.1** приведено описание малотурбулентной сверхзвуковой аэродинамической трубы Т-325, в которой выполнялись все экспериментальные исследования данной работы. Эксперименты проводились при числах Маха 2, 3 и 4.

**В п. 1.2** приводится описание экспериментальных моделей плоской пластины и скользящего крыла, которые использовались в экспериментах. Модели были оборудованы источником контролируемых возмущений.

Плоская пластина (рис. 1,*а*) с источником контролируемых возмущений имеет следующие размеры: ширина модели – 200 мм, длина – 440 мм, толщина пластины – 10 мм. Угол скоса от передней кромки –  $14,5^\circ$ . Толщина передней кромки не превышала 0,1 мм. Модель жестко крепилась в центральной области рабочей части трубы с помощью выступов. При этом по ширине модель занимала всю область рабочей части. Модель устанавливалась под нулевым углом атаки.

Для генерации контролируемых возмущений модель плоской пластины была оборудована источником возмущений в виде поверхностного разряда. Источник состоит из двух медных электродов, отделенных изолятором друг от друга и от модели. Электроды и изолятор выведены на поверхность модели и отшлифованы вровень с поверхностью. Центры электродов располагались параллельно направлению набегающего потока (по  $x$ -координате). Диаметр электродов составлял 0,9 мм, а минимальное расстояние между ними было около 0,9 мм. К электродам подводились импульсы высокого напряжения со схемы зажигания разряда, и происходил пробой, вызывающий возмущения в пограничном слое. Источник расположен в центральной области пластины.

В диссертации представляются результаты двух серий экспериментов на пластине, в которых расстояние от передней кромки модели до источника контролируемых возмущений было различным. В первом случае ближайший электрод к передней кромке располагался приблизительно в 13,1 мм (конфигурация *I*), во втором – 26,6 мм (конфигурация *II*).

Экспериментальная модель крыла (рис. 1,*б*) имела угол скольжения передней кромки  $40^\circ$  и чечевицеобразный профиль. Модель устанавливалась под нулевым углом атаки в центральном сечении рабочей части аэродинамической трубы. Длина модели 0,26 м, ширина 0,2 м, максимальная толщина 20 мм, относительная толщина профиля 7,7 %.

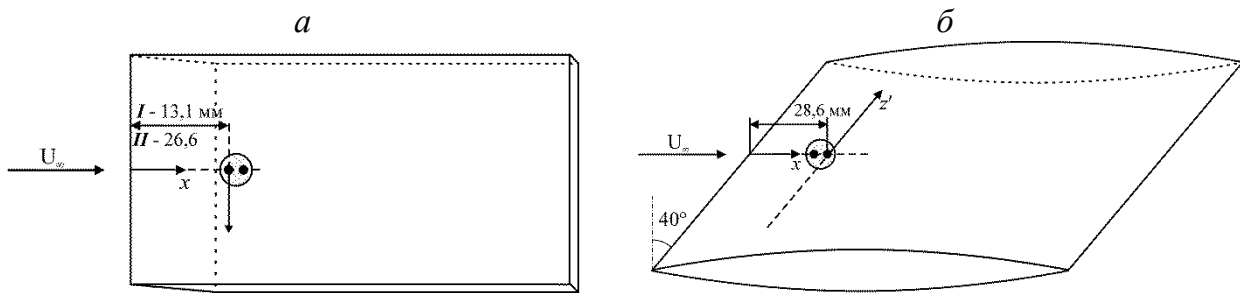


Рис. 1. Модель плоской пластины (а) и скользящего крыла (б) с источником контролируемых возмущений.

Для генерации контролируемых возмущений в пограничном слое скользящего крыла использовался источник в виде поверхностного разряда. Электроды и изолятор выведены на поверхность модели и отшлифованы вровень с поверхностью. Центры электродов располагались параллельно направлению набегающего потока (по  $x$ -координате). Диаметр электродов – 0,6 мм, а минимальное расстояние между ними было приблизительно 0,6 мм. Центр дальнего от передней кромки электрода располагался на расстоянии 28,6 мм от передней кромки модели ( $x \approx 28,6$  мм).

Во всех экспериментах продольная координата  $x$  отсчитывается от передней кромки на линии электродов источника контролируемых возмущений и направлена вдоль набегающего на модели потока. В случае плоской пластины поперечная координата  $z$  направлена перпендикулярно набегающему потоку и параллельно поверхности пластины и отсчитывалась от центра электродов источника контролируемых возмущений. Для описания данных, полученных в пограничном слое скользящего крыла, используется координата  $z'$ , направленная параллельно передней кромке. Нормальная координата  $z$  у перпендикулярна поверхности модели.

**В п. 1.3** приводится описание методики измерений пульсаций потока в сверхзвуковом пограничном слое. В качестве основного измерительного инструмента использовался термоанемометр постоянного сопротивления. Датчики термоанемометра, используемые в этой работе, изготавливались из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной около 1,5 мм. Во всех случаях величина перегрева нити датчика устанавливалась равной 0,7–0,8. Во время экспериментов записывались постоянная и переменная составляющие сигнала термоанемометра. Из записанных данных с использованием калибровочных коэффициентов вычислялись средний массовый расход и нормированные на локальное среднее течение пульсации массового расхода.

**В п. 1.4** приведено описание процесса обработки экспериментальных данных. Для выделения контролируемых возмущений из фона естественных пульсаций пограничного слоя запись сигнала термоанемометра производилась синхронно с зажиганием разряда. В каждой точке измерения было записано 320 реализаций сигнала. При обработке экспериментальных данных использовалось синхронное осреднение 320 осциллограмм безразмерных пульсаций массового расхода:

$$m'(t_k) = \frac{1}{320} \sum_{i=1}^{320} m'_i(t_k).$$

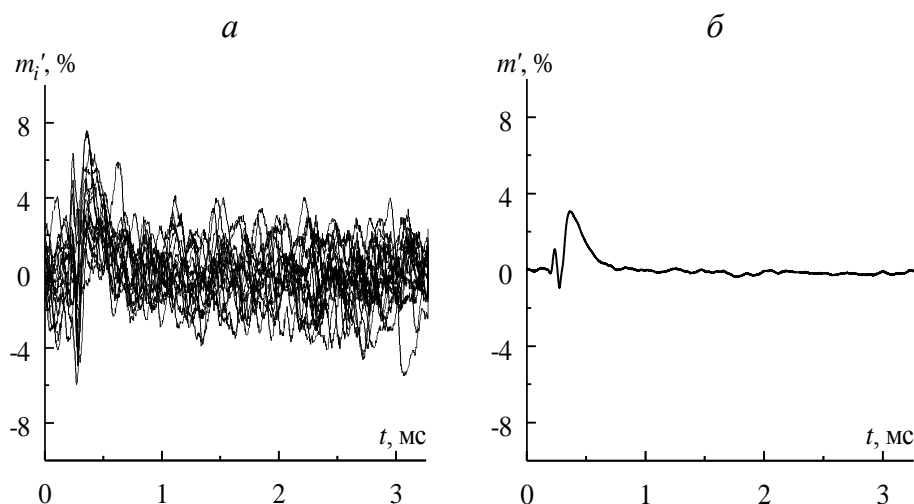


Рис. 2. Процесс синхронного осреднения.

На рис. 2 представлен пример синхронного осреднения 320 осциллограмм. На рис. 2,а показано несколько временных зависимостей пульсаций массового расхода  $m_i'$ , полученных из синхронно записанных реализаций пульсационного сигнала термоанемометра. На рис. 2,б показан результат процедуры синхронного осреднения 320 реализаций. После осреднения искусственный волновой пакет выделяется из фона случайных пульсаций пограничного слоя.

Определение волновых характеристик возмущений проводилось на основе многолетнего опыта экспериментальных исследований в ИТПМ СО РАН. Для определения волновых характеристик контролируемых возмущений в пограничном слое проводился спектральный анализ экспериментальных данных. Амплитудно-частотные спектры контролируемых возмущений получались с помощью дискретного преобразования Фурье по времени и пространству. Для описания развития возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях пластины и скользящего крыла для отдельных частот рассматривались волновые спектры возмущений. Строились амплитудные и фазовые распределения по поперечным волновым числам  $\beta$  (для случая пластины) и по  $\beta'$  (в случае скользящего крыла) для различных частот. Кроме того, определялись значения продольных волновых чисел, фазовые скорости и углы наклона фронтов волн относительно набегающего потока.

**Глава 2** посвящена описанию экспериментальных исследований возбуждения искусственных локализованных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с помощью импульсного тлеющего электрического разряда. Приведены описания работы используемых схем зажигания импульсного разряда. Представляются результаты исследований по влиянию временных и энергетических характеристик разряда на генерируемые в пограничном слое плоской пластины локализованные возмущения.

В п. 2.1 описывается схема зажигания импульсного разряда на основе разрыва тока в первичной цепи трансформатора, которая в дальнейшем использовалась в исследованиях эволюции волновых пакетов в пограничных слоях пластины и скользящего крыла. Изучено влияние параметров этой схемы на возбуждаемые в пограничном слое локализованные возмущения.

Разработанная схема (рис. 3) зажигания импульсного разряда основана на разрыве первичной цепи трансформатора. Ток в первичной цепи создается с помощью аккумуляторной батареи. Для прерывания тока в первичной цепи был установлен



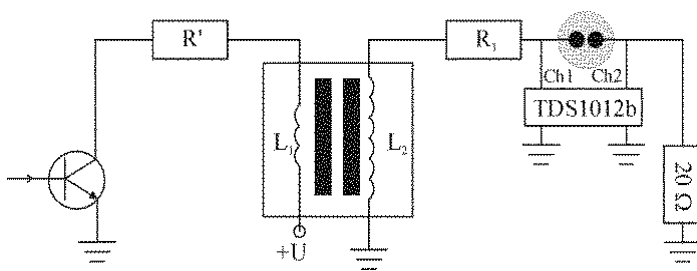


Рис. 3. Схема зажигания импульсного разряда.

мощный биполярный транзистор, работающий в ключевом режиме. При подаче прямоугольного сигнала или импульсов на переднем фронте транзисторный ключ переходит в режим открытия. На заднем фронте управляющего сигнала ключ размыкает первичную цепь катушки зажигания,

и ток в ней резко падает. Это приводит к быстрому изменению магнитного потока в сердечнике катушки, и во вторичной цепи генерируется высоковольтный импульс.

С применением схемы зажигания разряда, основанной на катушке зажигания, проведены две серии экспериментов, в которых параметры схемы зажигания различались. В первом случае (конфигурация I) на поверхности модели зажегся импульсный тлеющий разряд длительностью приблизительно 100 мкс. Во втором случае (конфигурация II) импульсный разряд имел значительно меньшую энергию и длительность приблизительно 25 мкс.

Для выбора оптимальных параметров импульсного тлеющего разряда исследовалось влияние энергии, подводимой к разряду, на амплитуду и форму генерируемых в сверхзвуковом пограничном слое локализованных возмущений. Кроме того, исследовалось влияние импульсного разряда на средние характеристики течения. Для измерения возмущений использовался термоанемометр постоянного сопротивления. Изменением параметров схемы зажигания (сопротивления первичной цепи, индуктивности катушки зажигания) можно варьировать энергию и длительность импульсного тлеющего разряда. Увеличение силы тока в первичной цепи схемы зажигания приводит к увеличению амплитуды генерируемых в пограничном слое локализованных возмущений.

В п. 2.2 исследовалось влияние временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего разряда на амплитуду и временные масштабы генерируемых пульсаций в пограничном слое пластины при числах Маха 2, 3 и 4. Для подробных исследований была разработана схема, позволяющая контролировать длительность, силу тока и частоту зажигания разряда. Работа схемы заключается в модуляции высокого напряжения с помощью быстродействующего высоковольтного ключа. Эксперименты выполнялись в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при значениях числа Маха набегающего потока  $M = 2, 3$  и  $4$ . Эксперименты при  $M = 2$  были проведены при значении единичного числа Рейнольдса потока  $Re_1 = 3,9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , при  $M=3$  –  $Re_1 = 8,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , а при  $M=4$  –  $Re_1 = 9,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . В качестве экспериментальной модели использовалась плоская пластина с острой передней кромкой. Регистрация локализованных возмущений сверхзвукового пограничного слоя, порожденных импульсным разрядом, проводилась термоанемометром постоянного сопротивления. Измерения производились в центральной области возмущений ( $z = 0$  мм) синхронно с зажиганием разряда. Датчик термоанемометра устанавливался в области пограничного слоя с максимальным уровнем естественных возмущений, при этом среднее течение было  $\rho U \approx 0,7 \cdot \rho U_\infty$ . С помощью синхронного осреднения возмущения, возбуждаемые импульсным разрядом, выделялись из фоновых естественных пульсаций пограничного слоя.

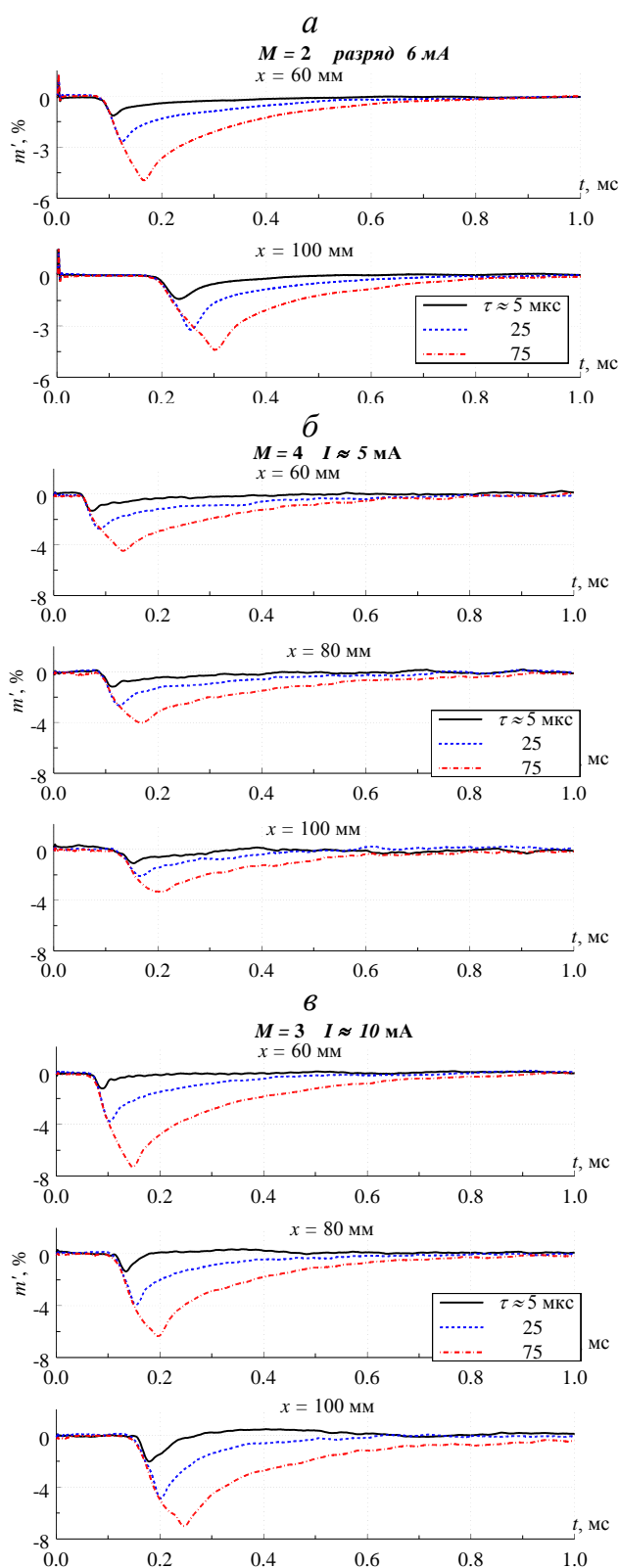


Рис. 4. Локализованные возмущения от импульсного разряда при различной длительности горения.  $M = 2$ (а),  $3$ (б) и  $4$ (в).

В п. 2.3 приводятся результаты исследования влияния импульсного тлеющего разряда, зажигающегося на поверхности плоской пластины на поле возмущений в сверхзвуковом потоке над пограничным слоем при числе Маха 2. Датчиком термоанемометра при  $z = 0$  мм на расстоянии  $y \approx 6,7$  мм от поверхности модели при различ-

На рис. 4 представлены результаты, полученные при значениях числа Маха набегающего потока  $M = 2, 3$  и  $4$ . Показаны осциллограммы локализованных возмущений, генерируемых импульсным разрядом различной длительности. Измерения проведены в пограничном слое при различных значениях продольной координаты  $x$ . В случае числа Маха  $M = 2$  измерения проведены при  $x = 60$  и  $100$  мм, для  $M = 3$  и  $4$  при  $x = 60, 80$  и  $100$  мм.

Из полученных экспериментальных данных следует, что при увеличении длительности импульсного разряда растут временные масштабы и амплитуда генерируемых возмущений. При этом нарастание передних фронтов волновых пакетов от разряда с различной длительностью происходит по одному закону. Проведены оценки скорости распространения в пограничном слое волновых пакетов вниз по потоку по времени регистрации максимального отклонения от среднего течения. Получено, что скорость распространения локализованных возмущений составляет приблизительно 60 % от скорости набегающего потока в случае числа Маха набегающего потока  $M = 2$ , при  $M = 3$  – 65%, а для  $M = 4$  – 78 %. Эти результаты близки к оценке по соотношению  $(M-1)/M$ , что соответствует локальным скоростям на уровне критического слоя.

Исследования влияния силы тока импульсного тлеющего разряда на генерируемые им локализованные возмущения показали, что интенсивность нарастания зависит от силы тока разряда. При увеличении силы тока, протекающего через разряд, амплитуда возмущений растет.

ных значениях продольной координаты  $x$  проведены измерения пульсаций массового расхода, порожденных импульсным разрядом. Термоанемометром постоянного сопротивления в потоке над пограничным слоем были зафиксированы пульсации массового расхода, порождаемые импульсным разрядом. Возмущенная зона локализована и может быть рассчитана по углам наклона волн Маха, исходящих из области источника контролируемых возмущений.

**В п. 2.4** сформулированы основные выводы по второй главе.

**В Главе 3** данной работы приводятся результаты экспериментального изучения пространственно-временного развития волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины. Эксперименты проводились при числе Маха 2 и значении единичного числа Рейнольдса  $Re_1 = (6 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Анализируется пространственная структура волновых пакетов в пограничном слое, сгенерированных импульсным разрядом с различной длительностью и энергией. Для случая кратковременного импульсного разряда проводится спектральный анализ эволюции волнового пакета вниз по потоку.

**П. 3.1** рассматривается структура искусственных волновых пакетов, генерируемых в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины импульсным разрядом с различными параметрами. Были проведены две серии экспериментов. В первой (конфигурация *I*) контролируемые волновые пакеты генерировались импульсным разрядом длительностью приблизительно 100 мкс, а источник искусственных возмущений располагался на расстоянии 13,1 мм от передней кромки. Во второй (конфигурация *II*) длительность разряда составляла приблизительно 25 мкс, а источник располагался на расстоянии 26,6 мм от передней кромки. Измерения пульсаций потока проводились точным датчиком термоанемометра постоянного сопротивления синхронно с зажиганием разряда.

На рис. 5,а показаны результаты измерений по центру возмущений (в  $z = 0$  мм) при различных значениях продольной координаты  $x$  для случая длительного разряда (конфигурация *I*). Результаты аналогичных измерений для конфигурации *II* представлены на рис. 5,б. Измерения проводились в сверхзвуковой части пограничного слоя в области максимального уровня естественных пульсаций, при этом значение среднего массового расхода оставалось постоянным  $\rho U \approx 0,7 \cdot \rho U_\infty$ . Представлены осциллограммы пульсаций массового расхода.

В обоих случаях при малых значениях продольной координаты  $x = 40\text{--}50$  мм возмущение представляется в виде локализованного по времени дефекта течения. При этом значительно отличаются амплитуды и длительности этих образований. Развиваясь вниз по потоку, изначальный дефект затухает. При  $x > 55$  мм на заднем фронте дефекта образовывается превышение течения, которое ниже по потоку значительно усиливается и растягивается по времени. В случае длительного возмущения (конфигурация *I*) при  $x > 100$  мм в области переднего фронта изначального дефекта течения образуется аналогичная структура, и возмущение становится двойным. Скорости распространения переднего фронта локализованного возмущения вниз по потоку в пограничном слое в обоих случаях составляет  $0,9 \cdot U_\infty$ , заднего  $- 0,3 \cdot U_\infty$ .

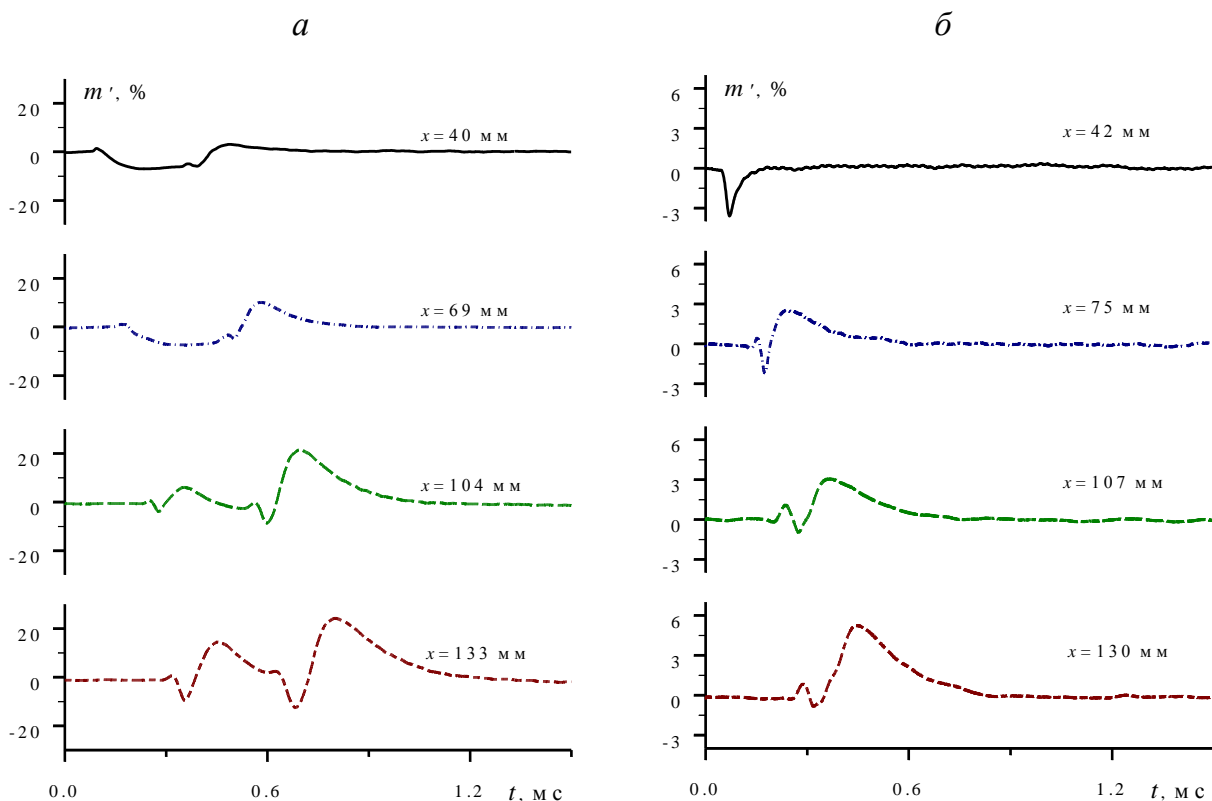


Рис. 5. Эволюция осциллограмм вниз по потоку при  $z = 0$  мм.  
*а* – конфигурация I, *б* – конфигурация II.

На рис. 6 представлены результаты измерений в пограничном слое в области максимального уровня пульсаций вдоль поперечной координаты  $z$  при различных значениях продольной координаты  $x$  для случаев конфигураций I и II в виде изолиний пульсаций в плоскости  $(z, t)$ .

В начальном сечении ( $x = 60$  мм) пульсации, образующиеся на заднем фронте, в случае длительного разряда (конфигурация I) по структуре аналогичны полученным результатам в случае кратковременного разряда (конфигурация II). Пространственные и временные масштабы этих образований близки в обоих случаях. При длительном разряде на переднем фронте локализованного возмущения также наблюдается зарождение пульсаций, которые усиливаются вниз по потоку и по структуре схожи с образованием на заднем фронте.

Можно выделить следующие структуры волнового пакета, которые наблюдаются в обоих случаях:

- дефект течения, локализованный в центральной области  $z \approx 0$  мм {1}. Распространяясь вниз по потоку, данная структура не изменяет свои пространственные и временные масштабы;
- превышение течения на заднем фронте волнового пакета {2}. Выделяется два максимума при  $z \approx \pm 1$  мм. Распространяясь вниз по потоку, данная структура увеличивает свои временные и пространственные масштабы. Наблюдается рост амплитуды вниз по потоку;
- дефекты течения с максимумами в  $z \approx \pm 2$  мм {3}. Значительно увеличивают свои размеры в поперечном направлении. Наблюдается рост амплитуды вниз по потоку.

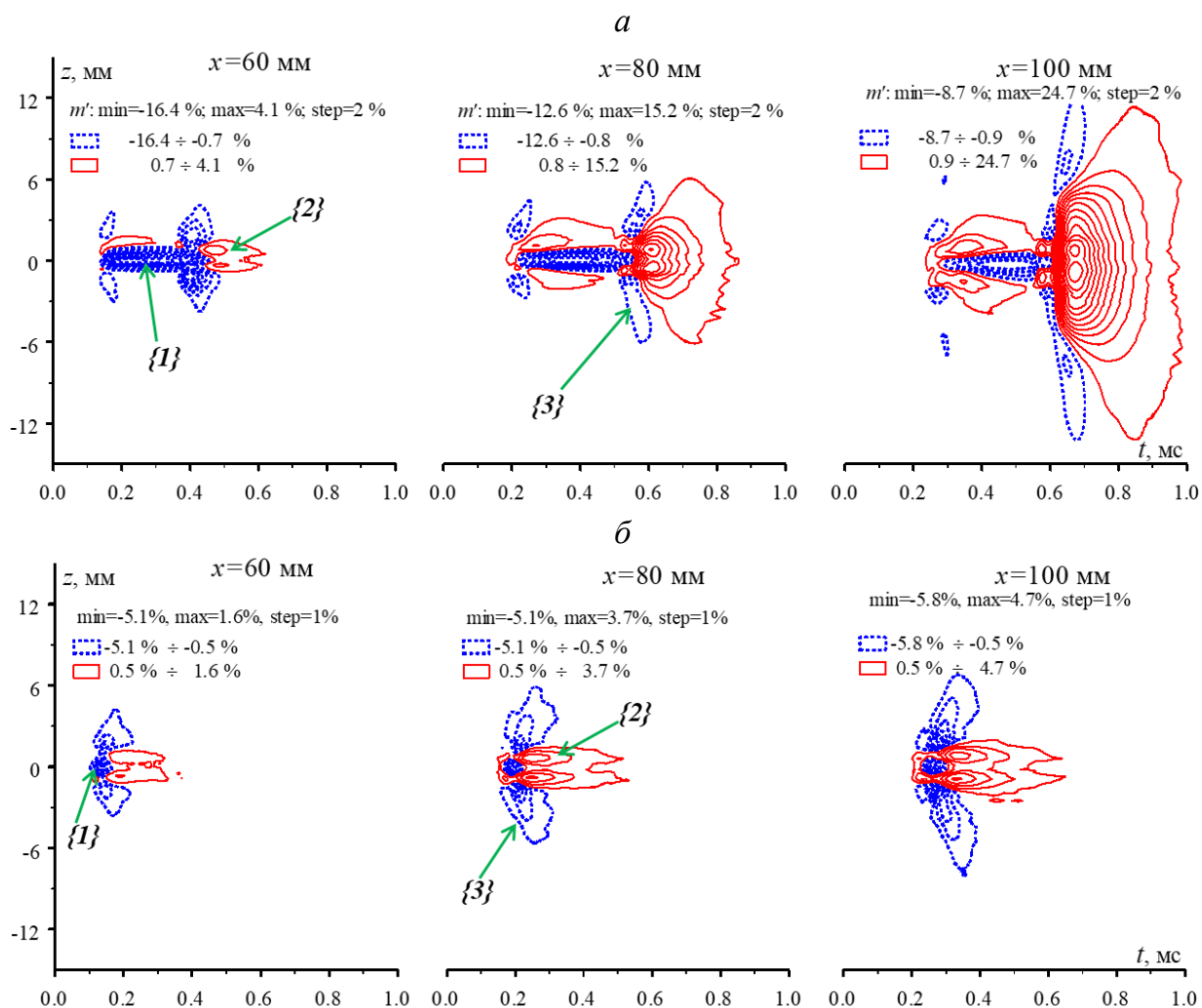


Рис. 6. Изолинии одиночного волнового пакета в плоскости  $(z, t)$ .  
*a* – конфигурация I, *б* – конфигурация II.

Экспериментальные данные о структуре и развитии волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое показывают, что на фронтах изначального дефекта, сгенерированного импульсным разрядом, формируются нарастающие вниз по потоку пульсации. Такой характер развития возмущений близок к результатам исследований эволюции локализованных возмущений в пограничных слоях при малых дозвуковых скоростях набегающего потока.

В п. 3.2 проводится частотно-волновой анализ эволюции волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое пластины. Анализируются данные, полученные в случае кратковременного импульсного разряда (конфигурация II).

Частотно-волновой анализ развития локализованного волнового пакета, порожденного кратковременным импульсным разрядом, показал, что низкочастотная часть ( $f < 16$  кГц) волнового пакета развивается в пограничном слое вниз по потоку в измеренном диапазоне координат согласно линейной теории устойчивости. Для низкочастотной части пакета определено, что наиболее нарастающие волны имеют волновой вектор, имеющий значительный угол наклона относительно набегающего потока  $\chi = \pm 60 \div 70^\circ$ .

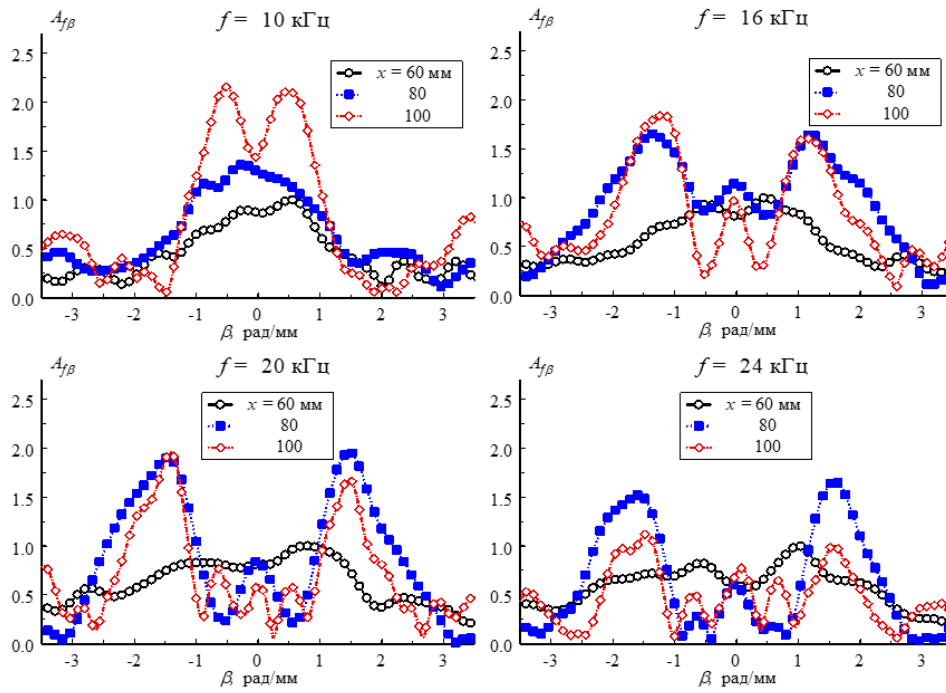


Рис. 7. Амплитудный спектр по поперечным волновым числам  $\beta$  волнового пакета при различных значениях частоты  $f$  и продольной координаты  $x$ . Пограничный слой пластины.

При более высоких частотах  $f > 16$  кГц в амплитудных спектрах по поперечным волновым числам (рис. 7) наиболее растущие волны имеют волновые числа  $\beta$  значительно большие, чем предсказывает линейная теория. При этом наблюдаются значительные неоднородности в фазовых распределениях и наличие узлов и пучностей в амплитудных распределениях, что также указывает на нелинейный характер развития. Картины эволюции на отдельных частотах качественно близки к аналогичным результатам, полученным в экспериментах с периодическими возмущениями.

В главе 4 описываются результаты экспериментальных исследований развития волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла. Эксперименты проводились при числе Маха набегающего потока  $M=2$  и значении единичного числа Рейнольдса  $Re_1 = (6 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Анализируется пространственная структура волнового пакета в пограничном слое крыла. Проводится частотно-волновой анализ эволюции волнового пакета вниз по потоку.

В п. 4.1 исследуется структура и эволюция локализованных возмущений, порожденных в пограничном слое скользящего крыла импульсным тлеющим разрядом длительностью приблизительно 25 мкс. На рис. 8 представлены результаты измерений в пограничном слое в области максимального уровня пульсаций вдоль поперечной координаты  $z'$  при различных значениях продольной координаты  $x$  в виде изолиний в плоскости  $(z', t)$ .

В сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла возбуждаемый импульсным разрядом волновой пакет несимметричен и смещен в положительные значения координаты  $z'$ . В начальном сечении ( $x \approx 49$  мм) возмущение от импульсного разряда представляется локализованным дефектом течения. Развиваясь вниз по потоку, этот дефект не изменяет своего положения по координате  $z'$ , т.е. изначальное возмущение от разряда распространяется вдоль направления набегающего потока. На боковых фронтах дефекта от разряда формируются структуры, которые значительно увеличивают пространственный масштаб волнового пакета.

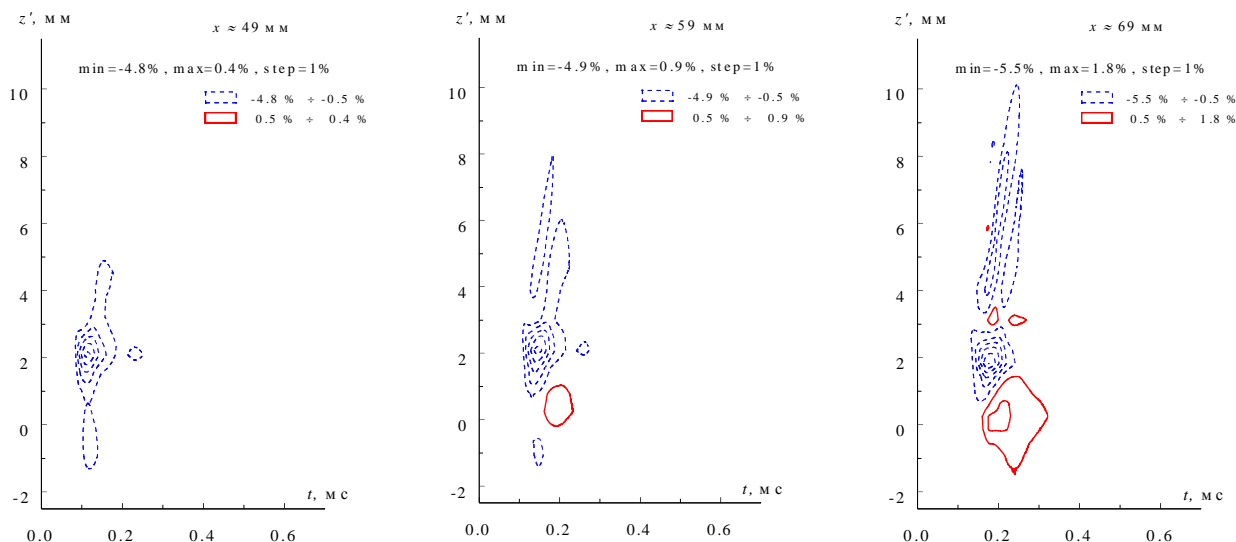


Рис. 8. Изолинии пульсаций волнового пакета в плоскости  $(z', t)$ . Скользящее крыло.

Можно выделить следующие структуры волнового пакета:

- мгновенный дефект течения, локализованный в  $z' \approx 2$  мм. Распространяясь вниз по потоку, данная структура не изменяет свои пространственные и временные масштабы;
- превышение течения, регистрируемое в  $z' = -1 \div 1$  мм. Распространяясь вниз по потоку, данная структура увеличивает свои временные и пространственные масштабы. Наблюдается рост амплитуды вниз по потоку;
- дефекты течения, образующиеся в области  $z' > 3$  мм. Значительно увеличивают свои размеры в поперечном направлении. Наблюдается рост амплитуды вниз по потоку.

Несмотря на несимметричность контролируемых возмущений в пограничном слое крыла, характер их развития вниз по потоку близок со случаем двумерного сверхзвукового пограничного слоя пластины. Разряд порождает локализованный дефект течения, на фронтах которого формируются нарастающие вниз по потоку пульсации.

В п. 4.2 проводится частотно-волновой анализ эволюции волнового пакета в сверхзвуковом пограничном скользящего крыла. Исследования показали, что значительное усиление амплитуд вниз по потоку наблюдается в области  $z' > 3$  мм, которая соответствует кратковременным дефектам, формирующимся на боковом фронте возмущения от разряда. Наблюдается монотонное нарастание фазы с увеличением поперечной координаты  $z'$ . Отсутствие скачков в фазовых распределениях указывает на линейный характер развития возмущений. Нарастание фаз возмущений вниз по потоку монотонно. Показано, что картины эволюции возмущений на отдельных частотах качественно близки к аналогичным результатам, полученным в экспериментах с периодическими возмущениями.

Из амплитудных спектров по поперечным волновым числам  $\beta'$  (рис. 9) определены коэффициенты роста возмущений вниз по потоку (рис. 10). В измеренной области наиболее растущими являются возмущения с частотой  $f = 24$  кГц и поперечным волновым числом  $\beta' \approx 1,6$  рад/мм. Угол наклона волнового вектора относительно набегающего потока  $\chi = 70 \div 71^\circ$ . Проведены сравнения экспериментальных данных по эволюции волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое скользящего

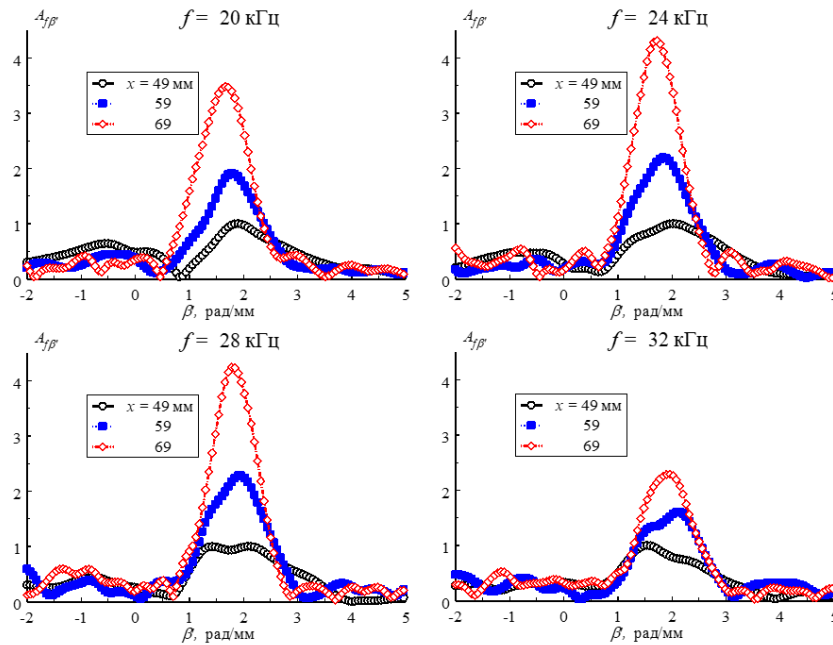


Рис. 9. Амплитудный спектр по  $\beta'$  волнового пакета при различных значениях частоты  $f$  и продольной координаты  $x$ . Скользящее крыло.

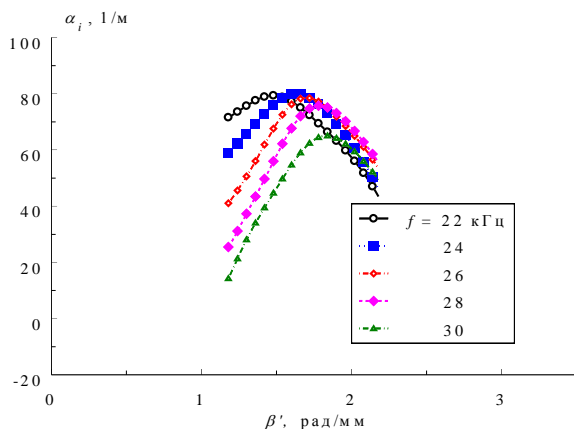


Рис. 10. Распределения показателей роста возмущений по поперечным волновым числам. Скользящее крыло.

крыла с результатами расчетов по линейной теории устойчивости. По условиям эксперимента получено согласование развития волнового пакета с линейной теорией гидродинамической устойчивости.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

1. Отработан и апробирован метод введения контролируемых волновых пакетов с помощью импульсного тлеющего разряда, который зажигался локально на поверхности модели, и метод изучения их развития в сверхзвуковом пограничном слое при числах Маха 2, 3 и 4.
2. Экспериментально исследовано влияние временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего разряда на генерируемые локализованные возмущения в пограничном слое плоской пластины при числах Маха 2, 3 и 4. Установлено, что при увеличении длительности воздействия тлеющего разряда или повышении силы тока амплитуда генерируемых в сверхзвуковом пограничном слое возмущений возрастает.
3. В пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 определены скорости распространения переднего и заднего фронтов волнового пакета ( $0,3 \cdot U_\infty$  и  $0,9 \cdot U_\infty$  соответственно), а также углы расплывания в поперечном к потоку направлении. Впервые в широком частотном диапазоне выделены нарастающие вниз по потоку моды с оценкой их волновых характеристик. По условиям экспериментов установлено, что развитие низкочастотной части волнового пакета согласуется с линейной теорией гидродинамической устойчивости сверхзвукового пограничного слоя. Для



высокочастотной части волнового пакета волновые характеристики не согласуются с линейной теорией гидродинамической устойчивости. Можно утверждать, что характер развития локализованных волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое в целом аналогичен эволюции локализованных возмущений в несжимаемом пограничном слое.

4. В пограничном слое крыла с углом скольжения передней кромки  $40^\circ$  и чечевицеобразным профилем с относительной толщиной 7,7% при числе Маха 2 получено, что на боковом фронте локализованного возмущения от разряда формируются нарастающие вниз по потоку пульсации. В широком частотном диапазоне выделены нарастающие вниз по потоку моды и определены их волновые характеристики. По условиям экспериментов получено согласование развития волнового пакета с линейной теорией гидродинамической устойчивости.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Возбуждение и развитие волновых пакетов в сверхзвуковом сдвиговом слое // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2013. Т. 8, вып. 2. С. 70–78.
2. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, вып. 1. С. 17–28.
3. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. О пространственной структуре волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58, вып. 7-2. С. 132–136
4. Yermolaev Yu.G., Yatskikh A.A., Kosinov A.D., Semionov N.V. Wave analysis of the evolution of a single wave packet in supersonic boundary layer // 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016) (Russia, Perm, 27 Jun. – 3 Jul., 2016): AIP Conference Proceedings. 2016. Vol.1770, Art. No. 030037.
5. Yatskikh A.A., Rumenskikh M.S., Yermolaev Y.G., Kosinov A.D., Semionov N.V. Excitation of localized wave packet in swept-wing supersonic boundary layer // MATEC Web of Conferences: XXXIII Siberian Thermophysical Seminar (STS-33) (Russia, Novosibirsk, 6 – 8 Jun., 2017): Proceedings. 2017. Vol. 115, Art. No. 02015.
6. Yermolaev Y.G., Yatskikh A.A., Kosinov A.D., Semionov N.V. Propagation of the wave packet in a boundary layer of swept wing at Mach number 2 // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017): Dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Russia, Novosibirsk, 5–9 Jun., 2017): AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893, Art. No. 020007.
7. Yatskikh A.A., Ermolaev Y.G., Kosinov A.D., Semionov N.V. Hot-wire visualization of the evolution of localized wave packets in a supersonic flat-plate boundary layer // Journal of Visualization. 2017. Vol. 20, No. 3. P. 549–557.
8. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Исследование влияния параметров импульсного разряда на порождаемые в сверхзвуковом пограничном слое локализованные возмущения // Письма в журнал технической физики. 2019. Т. 45, вып. 5. С. 59–62.

#### **Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов:**

1. Yatskikh A.A., Ermolaev Y.G., Kosinov A.D., Semionov N.V., Semenov A.N. Evolution of localized artificial disturbance in 2D and 3D supersonic boundary layers // Journal of Aerospace Engineering: Pt. G. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 2018. DOI: 10.1177/0954410018787120

2. Яцких А.А. Экспериментальное исследование возбуждения и развития волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое // *Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Физика неравновесных процессов.* Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2012. С. 31.
3. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г. Импульсный источник возмущений и сверхзвуковой пограничный слой на плоской пластине // *Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Доклады IX Всероссийской конференции молодых ученых / Под ред. В.В. Козлова.* Новосибирск: Параллель, 2012. С. 311–314.
4. Яцких А.А. Экспериментальное исследование возбуждения и развития волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое // *Всероссийский молодежный конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук. Сборник трудов / под общ. ред. В.Н. Зимины, В.Н. Наумова, А.Н. Морозова.* М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 223–228.
5. Яцких А.А. Волновой пакет в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины при  $M=2$  // *19-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-19, Архангельск): материалы конференции.* Екатеринбург: Изд. АСФ России, 2013. С. 430–431
6. Яцких А.А. Возбуждение и эволюция одиночного волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // *Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Физика сплошных сред.* Новосибирск: Новосибир. гос. ун-т., 2013. С. 36.
7. Яцких А.А. Развитие одиночного волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // *20-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: материалы конференции (ВНКСФ-20, Ижевск).* Екатеринбург: Изд. АСФ России, 2014. С. 510–511.
8. Яцких А.А. Пространственная эволюция волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // *Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции: Физика сплошных сред.* Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2014. С. 49.
9. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г. Возбуждение одиночных волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое // *Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Доклады X Всероссийской конференции молодых ученых / Под ред. В.В. Козлова.* Новосибирск: Параллель, 2014. С. 241–244.
10. Yatskikh A.A., Yermolaev Yu.G., Kosinov A.D., Semionov N.V. Method of the excitation of single wave packet in supersonic boundary layer // *Int. Conf. Methods of Aerophysical Research. June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk, Russia: Abstr. Pt. II / Ed. V.M. Fomin.* Novosibirsk: Avtograf, 2014. P. 218–219.
11. Yermolaev Yu.G., Yatskikh A.A., Kosinov A.D., Semionov N.V. Evolution of the pulsed wave packet in a supersonic boundary layer // *Int. Conf. Methods of Aerophysical Research. June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk, Russia: Abstr. Pt. I / Ed. V.M. Fomin.* Novosibirsk: Avtograf, 2014. P. 223–224.
12. Яцких А.А. О пространственной структуре волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // *21-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-21, Омск): материалы конференции.* Екатеринбург: Изд. АСФ России, С. 486-487.
13. Ермолаев Ю.Г., Яцких А.А. Возмущения сверхзвукового пограничного слоя от импульсного тлеющего разряда // *Труды Международной научно-технической конференции "VII-е Чаплыгинские чтения", посвященной 146-летию со дня рождения выдающегося русского ученого-аэродинамика (Новосибирск, 7-8 апр. 2015 г.) / Под ред. А.Н. Серьезнова.* Новосибирск: Новосибирский гос. технический ун-т, 2016. С. 170–177.
14. Yatskikh A.A., Yermolaev Yu.G. Visualization of the evolution of coherent structures in a supersonic boundary layer // *The 13th Asian symposium on visualization: abstracts.* Novosibirsk: Parallel, 2015. P. 91–92.

15. Ермолаев Ю.Г., Яцких А.А. Экспериментальное исследование возбуждения и развития волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20 – 24 авг. 2015 г.): сборник докладов / Под ред. Д.А. Губайдуллина, А.М. Елизарова, Е.К. Липачёва. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. С. 1340–1342.
16. Yatskikh A., Yermolaev Yu., Kosinov A., Semionov N. Evolution of localized artificial disturbance in 2D supersonic boundary layer [Электронный ресурс] // Contributions to the Foundations of Multidisciplinary Research in Mechanics / ed. J.M. Floryan. Papers presented during the 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2016), Montreal, 2016. P. 1023–1024. URL: [http://iutam.org/wp-content/uploads/2017/02/ICTAM\\_Proceedings\\_Vol\\_2.pdf](http://iutam.org/wp-content/uploads/2017/02/ICTAM_Proceedings_Vol_2.pdf) (Дата обращения 02.12.2019 г.)
17. Яцких А.А. Спектральный анализ развития волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции: физика сплошных сред. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2016. С. 66.
18. Яцких А.А. Возмущения от импульсного разряда в ламинарном сверхзвуковом пограничном слое // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции: физика сплошных сред. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2017. С. 74.
19. Яцких А.А., Руменских М.С., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Возбуждение локализованного волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла // XXXIII Сибирский теплофизический семинар: тезисы докладов. Новосибирск, 2017. С. 93.
20. Ермолаев Ю.Г., Семенов Н.В., Яцких А.А., Косинов А.Д. Об эволюции волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла // Аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов: Материалы XV Всероссийской школы-семинара СибНИА. Новосибирск, 2017. С. 25–27.
21. Яцких А.А., Семенов А.Н., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции локализованных контролируемых пульсаций в сверхзвуковом пограничном слое // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых / Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2017. С. 153–154.
22. Яцких А.А., Руменских М.С., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Косорыгин В.С. Возбуждение локализованного волнового пакета в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, вып. 1. С. 57–65.
23. Яцких А.А., Семенов А.Н., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Влияние параметров импульсного разряда на возмущения сверхзвукового пограничного слоя плоской пластины // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, вып. 3. С. 41–48.
24. Яцких А.А., Семенов А.Н., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Экспериментальное и численное исследование импульсного воздействия на сверхзвуковой пограничный слой // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых / Под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2018. С. 173–174.
25. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Эволюция локализованных волновых пакетов в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое // Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность: материалы XXIII Международной конференции / Отв. ред. Н.В. Никитин, Н.В. Попеленская. М.: МАКС Пресс, 2018. С. 349.
26. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Экспериментальные исследования эволюции волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла // Модели и методы аэродинамики: материалы 19-й международной школы-семинара. М.: ЦАГИ, 2019. С. 137.
27. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Смородский Б.В., Панина А.В., Семенов Н.В., Косинов А.Д. Эволюция локализованного волнового пакета в пограничном слое скользящего крыла при числе Маха потока  $M=2$  // XXXV Сибирский теплофизический семинар: тезисы докладов. Новосибирск, 2019. С. 66.

Ответственный за выпуск А.А. Яцких

Подписано в печать 4.12.2019  
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.2,  
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 5

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»  
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1