

На правах рукописи

Литвиненко Юрий Алексеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ
И МИКРОСТРУЙНОГО ГОРЕНИЯ**

1.1.9 – «механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН (Новосибирск).

Научный консультант: Грек Генрих Рувимович
доктор физико-математических наук, с.н.с.

Официальные оппоненты: Баутин Сергей Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор
НИЯУ МИФИ, г. Москва
Ершов Игорь Валерьевич
доктор физико-математических наук, профессор
НГАУ, г. Новосибирск
Копьев Виктор Феликсович
доктор физико-математических наук, профессор
ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского»,
г. Жуковский

Ведущая организация: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
г. Новосибирск

Защита состоится "___" _____ 2021 г. в ___ час на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 в ФГБУН Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: ул. Институтская 4/1, Новосибирск, 630090.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090 и на сайте 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 "___" _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.А. Гапонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современный этап развития техники, в частности авиационного моторостроения и др., поставил перед инженерами и конструкторами ряд задач, тесно связанных с устойчивостью и турбулизацией пристенных (пограничные слои) и свободных сдвиговых течений (струи), а также с необходимостью управления данными процессами. Решение этих проблем во многом зависит от понимания механизма ламинарно-турбулентного перехода, влияние на который оказывают различные как внутренние (восприимчивость течений, особенности профиля скорости сдвигового потока и т.д.), так и внешние условия (акустический фон, температурный фактор и т.д.). В настоящее время достигнуты определенные успехи в решении данной проблемы, хотя, как отмечает профессор Е. Решетко в одной из своих обзорных работ, «механизм ламинарно-турбулентного перехода до сих пор остается непонятным...». Таким образом, актуальность решения данной проблемы остается очевидной.

В последние годы особое внимание исследователей вызывает роль локализованных продольных вихревых структур, так называемых полосчатых структур (англ. термин «*streaky structures*») в процессе турбулизации как пристенных, так и свободных сдвиговых течений. Их роль в механизме перехода, как и собственно представление о структуре и законах развития данных образований остаются неясными и мало исследованными. Изучение процесса перехода в течениях с наличием подобных вихревых структур является в настоящее время актуальными.

С другой стороны, широкий спектр использования струйных и особенно микроструйных течений порождает необходимость более полного понимания процессов, протекающих в таких системах. Развитие и миниатюризация компонент, связанных с тепломассопереносом, необходимость управления этими процессами приводит к проблемам устойчивости и турбулизации макро- и микроструйных течений, как и к проблеме устойчивости процессов горения газообразных топлив в микроструях. Решение этой задачи связано с проведением теоретических и экспериментальных исследований. Одним из эффективных механизмов воздействия и управления струйным течением представляется внешний периодический акустический сигнал. Такие исследования активно ведутся различными научными группами и несомненно являются актуальными.

Анализ результатов многих работ показывает, что они были получены при так называемых естественных условиях. В этом случае сбор данных носит усредненный характер, теряется фазовая информация о потоке и когерентная составляющая сигнала. Поэтому достаточно сложно детально исследовать процесс развития и взаимодействия возмущений различного типа, существующих в переходном режиме. В связи с этим представляется необходимым использовать иной методический подход для изучения данной проблемы. Проведение исследований в модельном эксперименте, где возмущения генерируются и развиваются в контролируемых условиях с сохранением фазовой информации, может дать дополнительную, а возможно, и новую информацию по данной проблеме. Настоящие исследования проводились с использованием именно такого

Цель работы

- Исследование нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости полосчатых структур в пограничном слое.
- Изучение физических процессов, связанных с развитием и разрушением свободной круглой макроструи.
- Исследование влияния начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструй.
- Изучение вихревых когерентных структур в круглой струе, развивающейся в поперечном потоке.
- Исследование течения круглой и плоской микроструй при наличии внешнего акустического поля.
- Изучение устойчивости газовых микроструй при различных режимах горения.

Научная новизна

- Обоснована и развита методика экспериментальных исследований с использованием искусственных возмущений, т.е. при «контролируемых» условиях.
- Впервые показан механизм нелинейного разрушения полосчатой структуры, связанный с процессом развития вторичного высокочастотного возмущения с образованием когерентных Λ -вихрей для синусоидальной и варикозной мод неустойчивости.
- Представлен механизм взаимодействия осесимметричных кольцевых вихрей и полосчатых структур в круглой струе с ударным профилем скорости на срезе сопла, с образованием локальных азимутальных выбросов газа, интенсифицирующих процесс смещения струи с окружающим газом и ее распад.
- Изучен механизм устойчивости круглой макроструи с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Показано, что в данной ситуации возникает протяженная область ламинарного течения с отсутствием осесимметричных вихрей.
- Исследован механизм неустойчивости плоской макроструи с «ударным» и параболическим профилем скорости на срезе сопла. Показано, что симметричная мода неустойчивости ламинарной плоской струи подавляется асимметричной модой неустойчивости. Установлено, что ламинарная и турбулентная струи на выходе из плоского канала Хагена – Пуазейля подвержены продольному синусоидальному колебанию. Показано, что взаимодействие полосчатых структур с вихревыми структурами ламинарной плоской струи приводит к генерации Ω -образных вихрей.
- Представлен сценарий развития течения круглой струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла, истекающей в поперечный поток. Показано, что наиболее неустойчивые глобальные моды с высокими собственными частотами представляют собой волновые пакеты на паре противовращающихся вихрей. Также показано, что глобальные моды с низкими собственными частотами имеют значительную амплитуду в следе струи ближе к стенке.
- Установлено, что механизм возникновения и развития когерентных структур в ламинарной и турбулентной круглых струях идентичен в общих чертах и связан с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца и развитием когерентных структур. Показано, что характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струй к акустическим возмущениям близки.
- Впервые представлена структура развития свободной круглой микроструи с развитием бифуркации под действием внешнего акустического поля. Установлено, что развитие свободной микроструи заметно отличается от характерных этапов развития макроструи.

- Впервые экспериментально показано отличие в восприимчивости внешних акустических колебаний для круглой и плоской микроструй. Установлено, что ориентация бифуркации круглой микроструи зависит от положения источника акустических колебаний, а для плоской микроструи ориентация задается положением большей стороны сопла.

- Впервые экспериментально получена бифуркация диффузионного факела при горении круглой и плоской микроструй пропана при наличии внешнего акустического поля.

Научная и практическая ценность

Научная новизна данных исследований состоит в том, что впервые поэтапно и детально экспериментально изучена устойчивость круглых и плоских макроструйных течений, механизм развития и взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами, влияние граничных и начальных условий на эволюцию струй и акустического воздействия на них. Полученные знания позволили объяснить особенности механизма развития и разрушения микроструйных течений, в том числе при наличии процесса горения. Впервые экспериментально исследованы особенности влияния профиля скорости на срезе сопла и воздействия акустического сигнала на устойчивость и характеристики развития макро- и микроструй. Выявлены особенности диффузионного горения микроструй при воздействии внешнего акустического сигнала, приводящего к развитию бифуркации пламени.

Экспериментальные данные, полученные в работе, могут использоваться для верификации методов расчета устойчивости и эволюции микроструйных течений. Результаты исследований позволяют дать рекомендации по разработке и совершенствованию микрогорелочных устройств с более эффективными тепло-массообменными характеристиками.

На защиту выносятся:

1. Разработка методики пространственно-временной термоанемометрической визуализации.
2. Результаты экспериментального исследования нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости полосчатых структур в пограничном слое.
3. Результаты экспериментального исследования развития и разрушения дозвуковой круглой макроструи.
4. Результаты экспериментального исследования влияния начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструй.
5. Результаты экспериментального исследования вихревых когерентных структур в свободной круглой струе и круглой струе в поперечном потоке.
6. Результаты экспериментального исследования дозвуковой круглой и плоской микроструй при воздействии внешнего акустического поля.
7. Результаты экспериментального исследования развития микроструй при горении пропана.

Апробация работы и публикации

Основные положения и результаты работы докладывались на 24 российских и 13 международных научных конференциях и семинарах: EUROMECH (2003), ERCOFTAC SIG33 (2008), ICMAR (2008–2018), EUCASS (2009, 2013), ASV (2010, 2012, 2013), ICTAM (2012, 2016), FLUCOME (2011), Advanced Energy Materials

(АЕМ) (2017, 2019), Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики» (2003, 2008, 2013, 2014, 2016, 2018), Сибирский теплофизический семинар (2014, 2017), Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды» (2017), Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (2017), видео-семинар по теме диссертации ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГПУ-НИИМ МГУ (2020).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 65 печатных работ, 60 из них изданы в журналах из перечня рекомендованных ВАК. Список работ представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из 182 наименований. Содержит 278 страниц, в том числе 166 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований и указаны основные положения, которые выносятся на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

Глава 1. Обзор. Состояние исследуемого вопроса

В главе представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям перехода течения в пристенных и струйных течениях к турбулентному режиму. Особенный интерес исследователей связан с возможностью контроля и управления режимами течения. Как известно, использование передовых технологий ламинаризации крыла и снижение профильного сопротивления летательных аппаратов сулят ощутимые экономические выгоды. К работе двигательной установки предъявляются новые требования, связанные со снижением уровня шума, вибрации и повышения экономичности. В связи с чем пристенные и струйные течения, безусловно, являются актуальным направлением исследований. Говоря о пристенных течениях, необходимо отметить ряд сценариев и особенностей развития переходных процессов в таких течениях. В частности, ламинарно-турбулентный переход в пристенных течениях может осуществляться по двум сценариям. Так называемый «классический» сценарий реализуется при низкой степени турбулентности набегающего потока, связан с развитием волн Толмина – Шлихтинга с последующим возникновением локальных вихревых образований, Λ -вихрей. Дальнейшее развитие и рост числа Λ -вихрей приводят к образованию турбулентного пятна и затем к возникновению турбулентности. Второй сценарий описывает механизм перехода к турбулентности при повышенной степени турбулентности набегающего потока и связан с развитием «полосчатых» структур, как результата взаимодействия возмущений внешнего течения и пограничного слоя. Такие структуры представляют собой локальные в трансверсальном направлении неоднородности, которые сносятся потоком и имеют конечные продольные размеры. В процессе развития «полосчатой» структуры происходит нарастание высокочастотных волновых пакетов, которые приводят к образованию турбулентных пятен и турбулентности.

На вогнутых поверхностях сценарий перехода зачастую связан с образованием стационарных вихрей Тейлора – Гертлера и ростом высокочастотных возмущений, приводящих к ламинарно-турбулентному переходу. Но в этом случае локали-

зованные по пространству структуры не сносятся потоком. В зависимости от длины волны вихря Тейлора – Гертлера, вихрь подвержен синусоидальной моде (нечетной) или варикозной моде (четной). Для коротковолновых вихрей характерно развитие синусоидальной моды, для длинноволновых – варикозной. Однако существование варикозной и синусоидальной моды неустойчивости не ограничивается вогнутыми поверхностями. Как будет показано ниже, таким модам подвержено течение на пластине и крыле.

Развитие свободных струйных течений также связано с наличием ламинарно-турбулентного перехода. Один из наиболее частых сценариев связан с развитием неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Осесимметричные вихри образуются в результате воздействия мощного поперечного градиента скорости в сдвиговом слое, в процессе развития происходит спаривание вихрей, вследствие чего образуются более крупные вихри. На следующем этапе происходит локальная по азимутальному направлению потеря устойчивости вихря и происходит радиальный выброс струи. В результате осесимметричный круглый вихрь трансформируется в звездообразную форму, дальнейшее развитие приводит к турбулизации и распаду струи. В целом сценарий напоминает «классический» сценарий для пристенных течений. Следует отметить, что такое развитие струи характерно лишь для струи с относительно большим диаметром сопла. Исследований со струями малого диаметра сопла порядка 100 микрон крайне мало, и механизм распада таких течений не изучен, что говорит о необходимости проведения исследований в этом направлении.

Более детальное описание нелинейных стадий развития неустойчивости пристенных и свободных сдвиговых течений на примере плоской пластины, крыла, круглых и плоских макро- и микроструй, а также особенности струйного горения представлены в главах диссертации.

Глава 2. Оборудование и методика проведения исследований

Глава посвящена методическим вопросам. Даны краткие характеристики аэродинамической трубы и макро- и микроструйных установок, на которых проводились эксперименты. Описана методика пространственно-временной термоанемометрической визуализации при проведении экспериментов в контролируемых условиях. Под контролируемыми условиями понимается периодическое воздействие, фаза которого синхронизируется с началом сбора данных термоанемометром во всех измерительных точках. Таким образом, все полученные данные синфазны.

В главе описана методика синхронизированной лазерной визуализации струйных течений с использованием периодического сигнала с акустическим воздействием, методика PIV-измерений комплексом производства Сигма-Про, методика теневых исследований микроструйного горения с использованием теневого прибора ИАБ-451.

Глава 3. О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое

В главе изложены результаты экспериментальных и численных исследований нелинейных стадий ламинарно-турбулентного перехода, связанных с возникновением трехмерных структур типа Λ - или Ω -образных вихрей. К особенностям возникновения и развития этих структур следует отнести тот факт, что они не только типичны для классического ламинарно-турбулентного перехода, но являются также непременным атрибутом перехода в более сложных течениях. К ним от-

носятся течения, модулированные продольными полосчатыми структурами типа вихрей Гертлера, вихрей поперечного течения на скользящих крыльях и т. д., а также в вязком подслое турбулентного пограничного слоя. В данных ситуациях они возникают, в частности, из-за вторичной высокочастотной неустойчивости таких течений и могут проявляться не только как Λ -структуры, но и в виде подковообразных (Ω -структур), шпилькообразных и других вихрей. Высокочастотную вторичную неустойчивость переходных и турбулентных пристенных течений при наличии в них полосчатых структур часто связывают с так называемой синусоидальной и варикозной неустойчивостью.

Экспериментальные исследования синусоидальной и варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое Блазиуса показали следующее: механизм нелинейного разрушения полосчатой структуры через процесс развития на ней торичного высокочастотного возмущения связан с образованием когерентных структур типа Λ -вихрей как для синусоидальной, так и варикозной мод неустойчивости (рис. 3.1). Вторичная высокочастотная неустойчивость полосчатой структуры синусоидального и варикозного типов на нелинейной стадии приводит к мультиплицированию новых полосчатых структур вниз по потоку. Λ -вихри множатся в трансверсальном направлении при эволюции возмущений вниз по потоку.

Установлено стабилизирующее воздействие риблет, расположенных по потоку, на синусоидальную и варикозную неустойчивость полосчатой структуры, что характеризуется снижением амплитуды возмущения как полосчатых структур, так и вторичных высокочастотных колебаний и в целом приводит к затягиванию турбулизации течения (рис. 3.2).

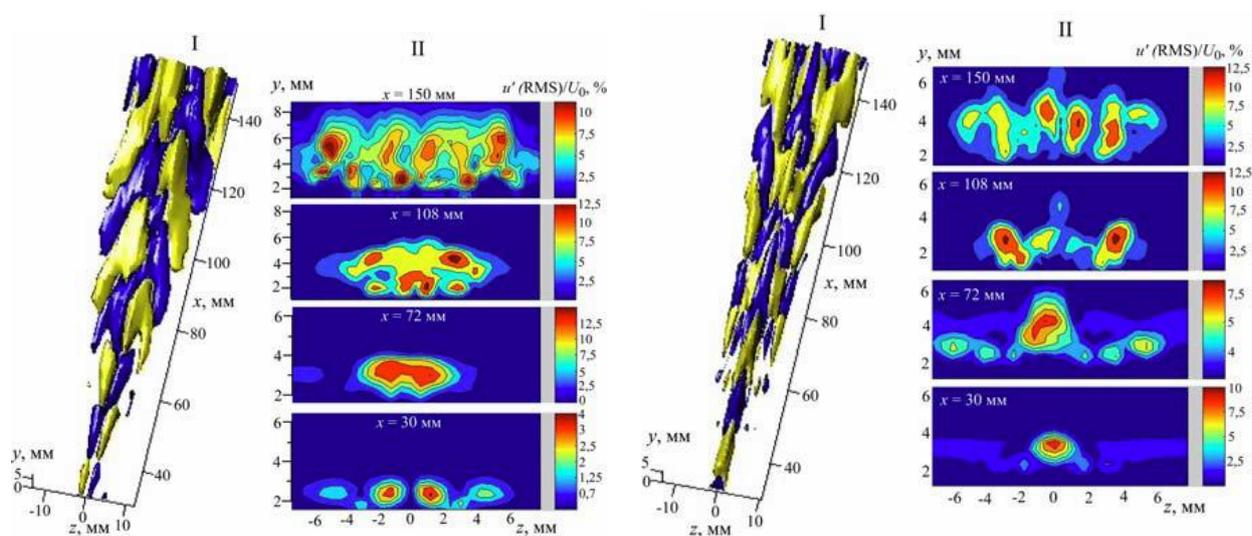


Рис. 3.1. Картины синусоидального (слева) и варикозного (справа) разрушения полосчатой структуры.

I – пространственная картина развития возмущения (минимальный уровень пульсаций 1,3 % U_0 , полутона желтого цвета – превышение скорости, полутона синего цвета – дефекты скорости); II – контурные диаграммы изолиний среднеквадратичных пульсаций скорости (RMS) в плоскости (yz) на различных расстояниях вниз по потоку (полутона красного цвета – превышение скорости, полутона синего цвета – дефекты скорости).

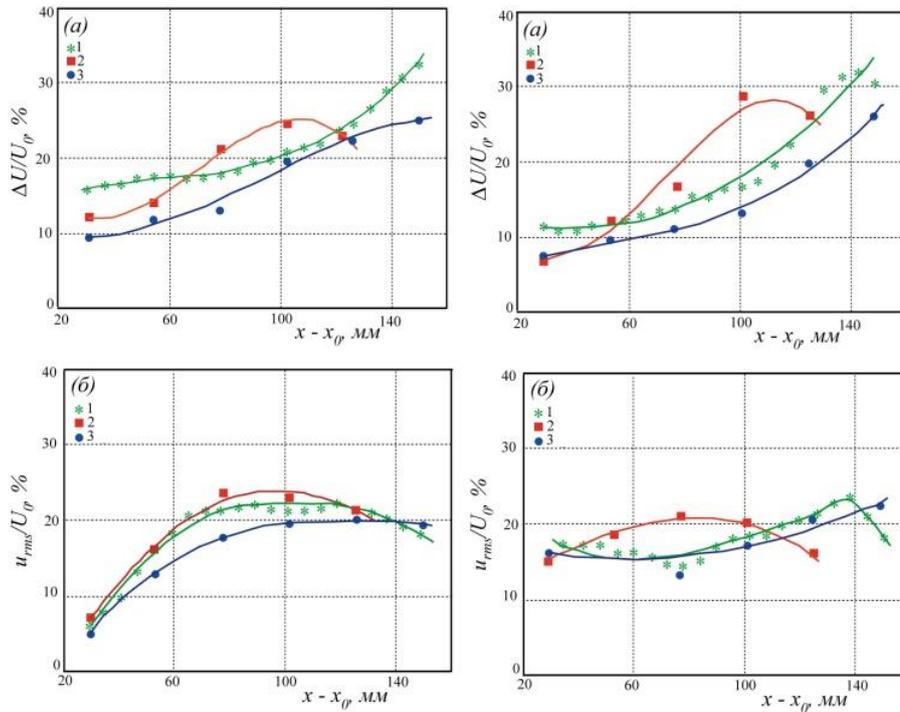


Рис. 3.2. Кривые нарастания амплитуды средней (а) и пульсационной (б) составляющих продольной компоненты скорости возмущения вниз по потоку для случая синусоидальной (слева) и варикозной (справа) неустойчивости полосчатой структуры на гладкой (1) и оребрённой поперек (2) и вдоль (3) потока поверхности.

Выводы по главе 3

1. Подтверждено, что при ламинарно-турбулентном переходе пограничного слоя, кроме образования Λ -структур на нелинейной стадии при опрокидывании двумерной волны, могут существовать нелинейные механизмы синусоидальной и варикозной мод неустойчивости продольных полосчатых структур.

2. Вторичная высокочастотная неустойчивость полосчатой структуры синусоидального и варикозного типов на нелинейной стадии приводит к появлению новых полосчатых структур вниз по потоку.

3. Механизм нелинейного разрушения полосчатой структуры через процесс развития на ней вторичного возмущения связан с образованием когерентных структур типа Λ -вихрей как для синусоидальной, так и варикозной мод неустойчивости.

4. Λ -вихри множатся в трансверсальном направлении при эволюции возмущений вниз по потоку.

Глава 4. Физические процессы, ответственные за развитие и разрушение дозвуковой круглой макроструи

В данной главе представлены результаты исследований механизма турбулизации круглой макроструи с «ударным» (английский термин “*top-hat*”) профилем скорости на срезе сопла. Экспериментальные исследования проведены при контролируемых условиях, показаны стадии взаимодействия полосчатых структур с тороидальными вихрями Кельвина – Гельмгольца вниз по потоку. Данный процесс связан с локальной потерей устойчивости тороидального вихря и возникновением азимутальных выбросов в виде Λ -образных вихрей. Наличие таких выбросов способствует интенсификации процессов смешения струи с окружающим воздухом и более ранней турбулизации струйного течения (рис. 4.1).

Установлено, что изменением частоты акустического воздействия на струю можно изменять размеры тороидальных вихрей. Увеличение частоты воздействия с 110 до 250 Гц приводит к уменьшению диаметра вихревого жгута более чем в два раза. Изменение масштаба тороидальных вихрей при акустическом воздействии приводит также и к изменению периодичности их следования. При указанных условиях (рис. 4.2) развитие тороидальных вихрей протекает с преобладанием основной гармоники в спектре пульсаций, что свидетельствует об отсутствии процесса спаривания вихрей, по крайней мере в области ближнего поля струи. Фотоснимки визуализации также подтверждают отсутствие процесса объединения вихрей. Частоты восприимчивости для таких струй находятся в пределах $0,25 < St < 0,6$.

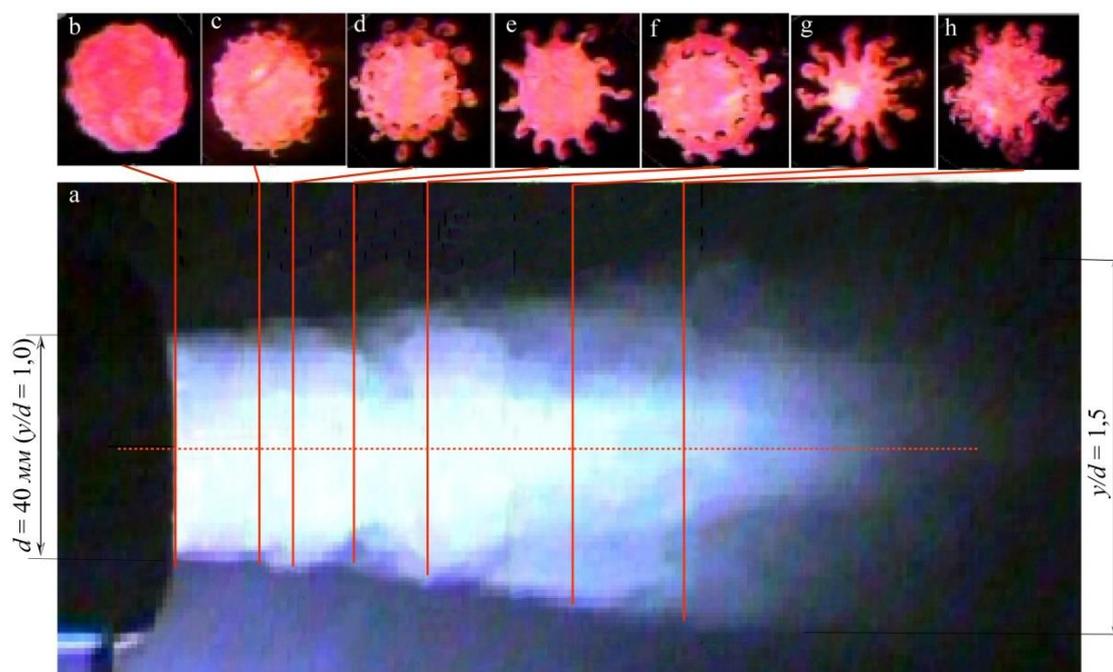


Рис. 4.1. Дымовая визуализация круглой струи, вид сбоку (а), поперечные сечения на различных расстояниях от среза сопла (b–h).

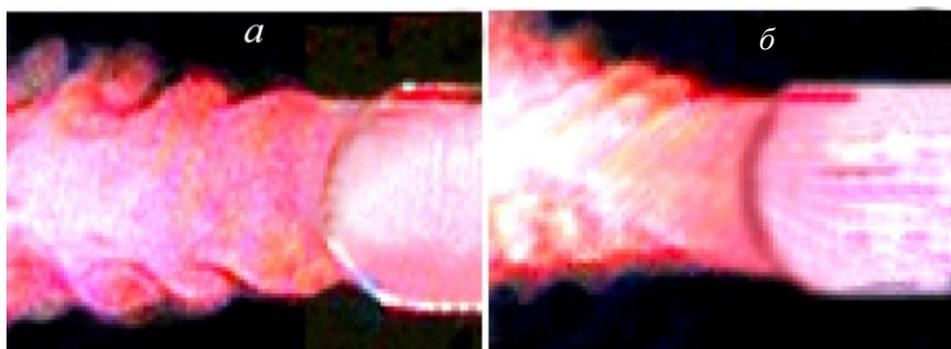


Рис. 4.2. Дымовая визуализация круглой струи при акустическом воздействии с частотой $f = 110$ Гц (а) и $f = 250$ Гц (б), $d = 22$ мм; $U_0 = 5$ м/с.

Показано, что механизм взаимодействия тороидальных вихрей с полосчатыми структурами представляет собой классический сценарий трехмерного искажения двумерной волны (кольцевого вихря) на неоднородностях потока (полосчатых структурах), развивающихся в сдвиговом слое струи. Сценарий данного процесса, где приведено сравнение образования Λ -образных вихрей в пограничном слое и струе, представлен на рис. 4.3.

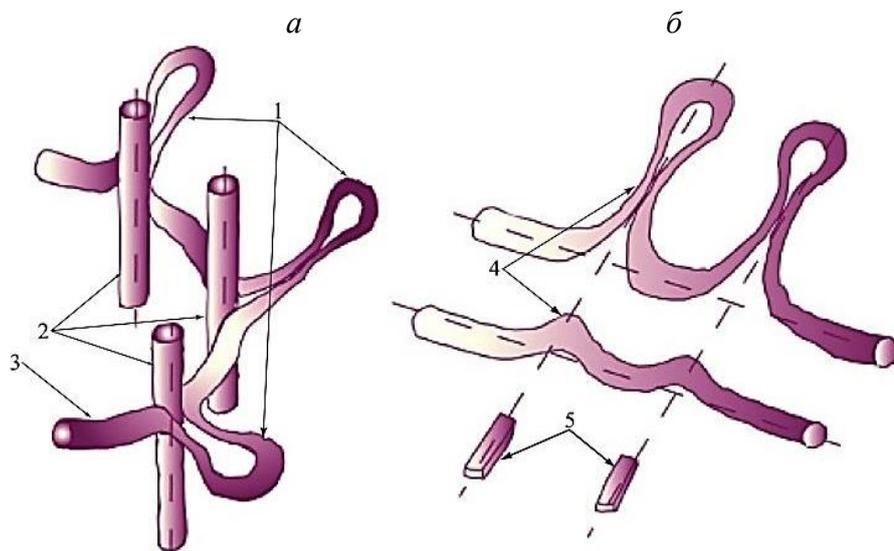


Рис. 4.3. Сценарий трехмерной эволюции двумерных возмущений при взаимодействии тороидального вихря с полосчатыми структурами (а), при локальной деформации волны Толлмина – Шлихтинга (б).

1 – Λ -образные вихри; 2 – полосчатые структуры; 3 – тороидальный вихрь; 4 – пространственное искажение двумерной волны; 5 – элементы шероховатости.

Выводы по главе 4

Установлено, что в основе механизма взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами лежит классический сценарий трехмерного искажения двумерной волны (тороидального вихря) на неоднородностях потока (полосчатых структурах), развивающихся в сдвиговом слое струи. Данный процесс приводит к возникновению азимутальных выбросов – «лучей», представляющих собой образования типа Λ -структур, равномерно распределенных по всему кольцевому вихрю. В области «головки» Λ -образных вихрей идет интенсивный процесс смешения струи с окружающим ее газом, что приводит к расширению струи, потере устойчивости и турбулентному разрушению. Показано, что внешнее акустическое воздействие приводит к изменению периодичности следования кольцевых вихрей, их масштабов и интенсификации процесса смешения струи с окружающим газом.

Глава 5. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструй

В главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития круглой и плоской макроструй.

Круглая макроструя. Установлено, что круглая макроструя с «ударным» профилем скорости на срезе сопла (короткое сопло) подвержена неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, связанного с развитием тороидальных вихрей, полосчатых структур и их взаимодействием (рис. 5.1, I). Показано, что круглая макроструя с параболическим профилем скорости на срезе сопла (длина насадка – 4 м) сохраняет ламинарный характер течения на расстояния до $20 x/d$ (рис. 5.1, II).

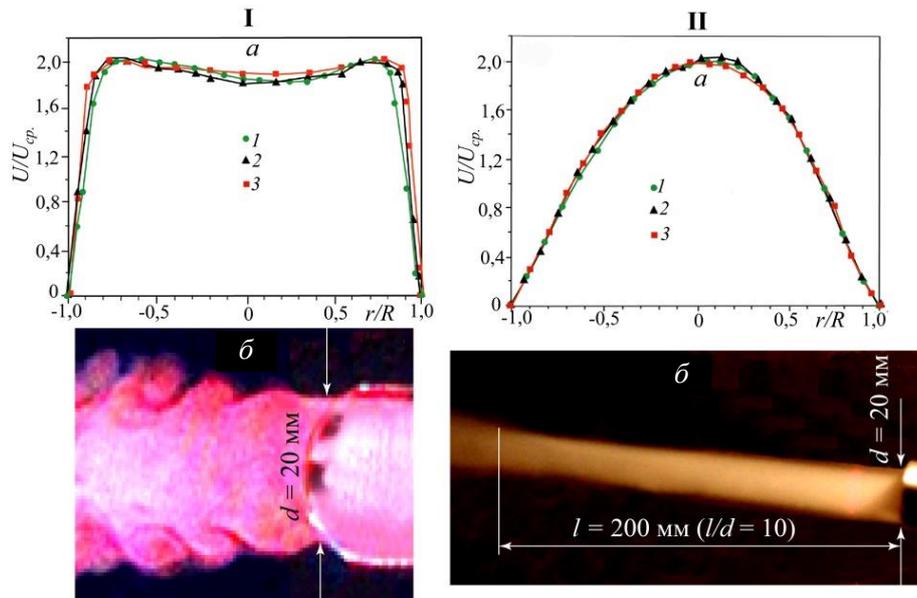


Рис. 5.1. Ударный (I) и параболический (II) профили скорости.
 а – распределение скорости в поперечных сечениях круглой струи, б – картина дымовой визуализации струи вдоль потока;
 1, 2, 3 – при $x = 2, 10, 20$ мм соответственно, скорость потока на оси струи $U_0 = 5$ м/с.

Плоская макроструя. Установлено, что плоская макроструя с «ударным» профилем скорости на срезе сопла (короткое сопло) имеет два развивающихся независимо друг от друга слоя сдвига. В этом случае воздействие на сдвиговый слой одной стороны струи, например, элементом шероховатости, инициирует развитие неустойчивости на этой же стороне, не переходя на противоположную. Это позволяет воздействовать (управлять) на процесс развития струи с помощью внесения возмущений на определенной стороне (рис. 5.2).

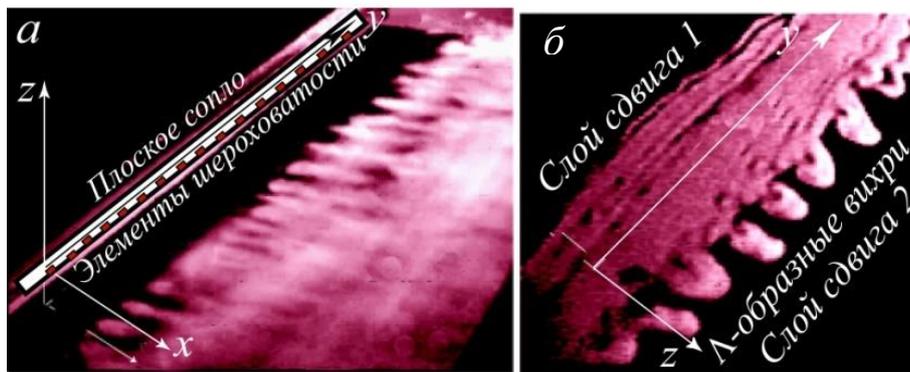


Рис. 5.2. Дымовая визуализация течения в ламинарной плоской струе с «ударным» профилем средней скорости на срезе короткого сопла
 а – вид струи с полосчатыми структурами, генерируемыми элементами шероховатости; б – поперечное сечение струи, образование грибовидных выбросов при взаимодействии струи с полосчатыми структурами.

Установлено, что акустическое воздействие с источником звука, расположенным внутри струйной установки, реализует истечение с переменным расходом плоской струи, это приводит к искусственной генерации симметричной моды. Но поскольку плоские струи абсолютно не устойчивы к несимметричной моде, происходит быстрое перестроение к несимметричной моде (рис. 5.3).

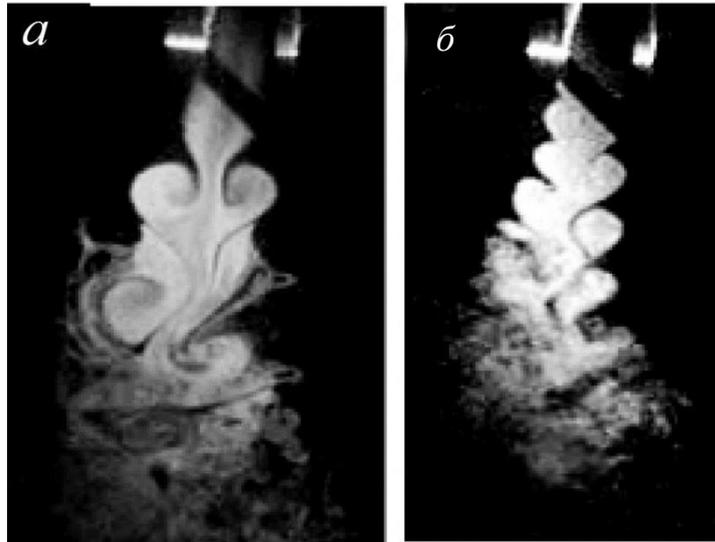


Рис. 5.3. Дымовая визуализация течения в ламинарной плоской струе в плоскости xz с акустическим воздействием ($f = 30$ Гц), генерирующим симметричную моду неустойчивости течения.

a – ближнее поле струи, варикозная мода неустойчивости; b – перестроение струи к синусоидальной моде неустойчивости, $U_0 = 3,7$ м/с.

Показано, что ламинарная и турбулентная струи на выходе из плоского канала Хагена – Пуазейля подвержены поперечному синусоидальному колебанию. При этом, ламинарная плоская струя подвержена синусоидальному колебанию при естественных условиях. Акустическое воздействие на струю на различных частотах из области восприимчивости приводит к изменению частоты следования вихрей и их размера (рис. 5.4).

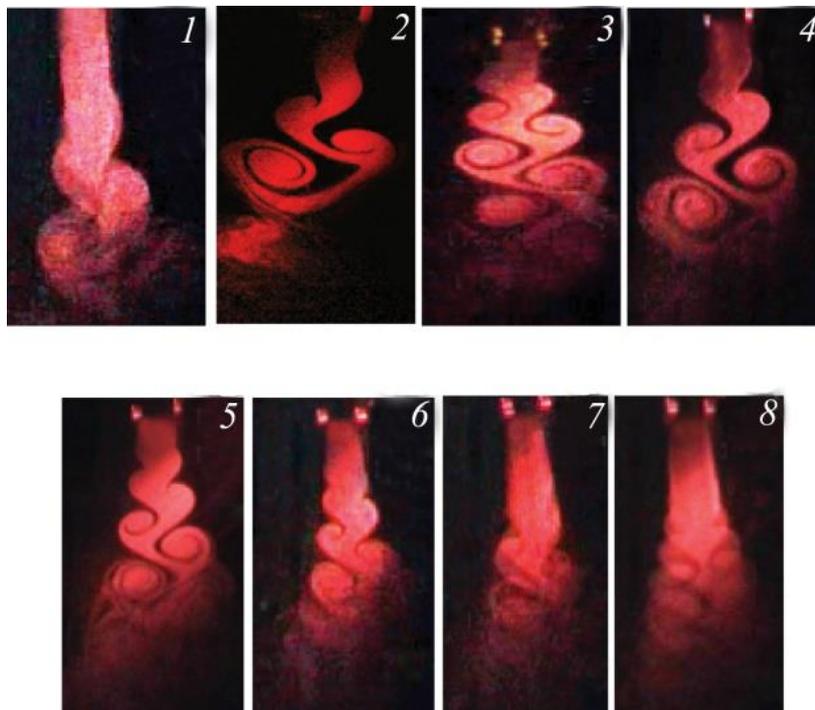


Рис. 5.4. Дымовая визуализация течения ламинарной плоской струи в плоскости xz .

1 – без акустического воздействия, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – при акустическом воздействии $f = 30, 40, 50, 60, 70, 90, 150$ Гц соответственно, $U_0 = 3,7$ м/с.

Следует также отметить отсутствие синусоидального колебания турбулентной плоской струи без акустического воздействия и возникновение данного колебания при акустическом воздействии (рис. 5.5, картины 2–5).

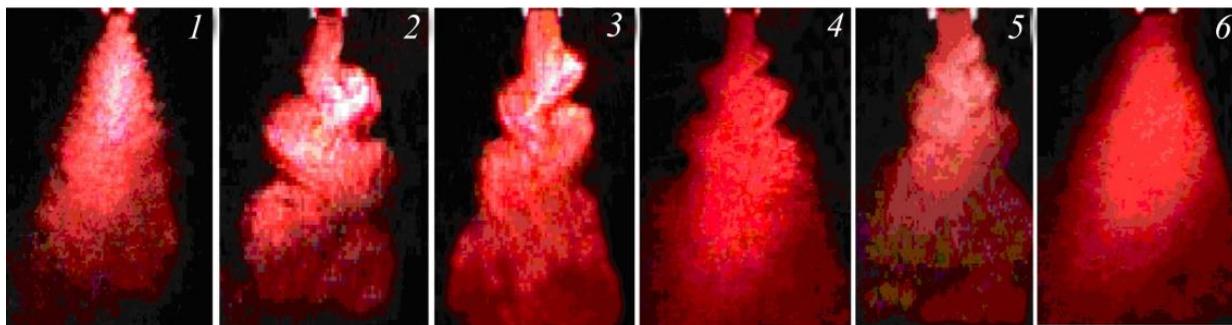


Рис. 5.5. Дымовая визуализация течения турбулентной плоской струи в плоскости xz . 1 – без акустического воздействия, 2, 3, 4, 5, 6 – при акустическом воздействии $f = 30, 40, 50, 60, 100$ Гц соответственно, $U_0 = 3,7$ м/с.

Выводы по главе 5

Круглая струя

1. Изменение начальных условий формирования круглой струи, а именно профилей средней скорости на срезе сопла, оказывает кардинальное влияние на структуру и характеристики развития.

2. Увеличение длины канала классического короткого сопла приводит к изменению начальных условий формирования круглой ламинарной струи и появлению области ламинарного течения в струе, протяженность которой растет с ростом удлинения канала, достигая величины $l/d = 10$ при $L = 4000$ мм.

3. При акустическом воздействии ламинарная круглая струя модулируется осесимметричными кольцевыми вихрями. При этом частота схода вихрей зависит от частоты акустического воздействия.

4. Акустическое воздействие на ламинарную круглую струю, при удлинении канала $L/d \geq 200$, не оказывает влияния, вне зависимости от ее частоты и интенсивности.

Плоская струя

1. Установлено, что ламинарная и турбулентная струи на выходе из плоского канала Хагена – Пуазейля подвержены продольному синусоидальному колебанию.

2. Показано, что в плоской струе искусственно генерированная симметричная мода подавляется синусоидальной модой неустойчивости.

3. Получено, что ламинарная плоская струя восприимчива к акустическому воздействию в диапазоне низких частот с модуляцией течения синусоидальным колебанием соответствующей частоты.

4. Установлено, что взаимодействие полосчатых структур с вихревыми структурами ламинарной плоской струи приводит к генерации азимутальных Λ -образных вихрей, способствующих интенсификации процесса смешения струи с окружающим газом и ускорению турбулизации струи.

5. Показано, что в струе с параболическим профилем скорости продольные вихри, генерированные на одной стороне сопла, уже в ближнем поле распространяются в обоих слоях сдвига и взаимодействуют с вихрями синусоидального возмущения, в то время как при «ударном» профиле скорости аналогичные продольные вихри не взаимодействуют на протяжении до 15 калибров ниже по течению.

Глава 6. Вихревые когерентные структуры в круглой струе в поперечном потоке

В главе представлены результаты экспериментальных исследований механизма возникновения и развития вихревых структур в свободной круглой струе и круглой струе, развивающейся в поперечном сдвиговом потоке. Установлена принципиальная разница между свободной круглой струей с «ударным» и параболическим профилями скорости на срезе сопла, состоящая в том, что в последнем случае отсутствует генерация кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца, течение в струе протяженностью до десяти калибров остается ламинарным. В данной области течения струя не подвержена влиянию акустического поля и переход струи в турбулентное состояние связан с появлением неких структур, одна из возможных причин появления которых связана с воздействием на струю слабого поперечного потока. Моделирование неустойчивости ламинарной свободной круглой струи с параболическим профилем скорости к слабому поперечному потоку показало, что данный вид неустойчивости существует, поперечный поток вызывает деформацию струи в виде тангенциальных выбросов газа с ее периферии в окружающее пространство (рис. 6.1).

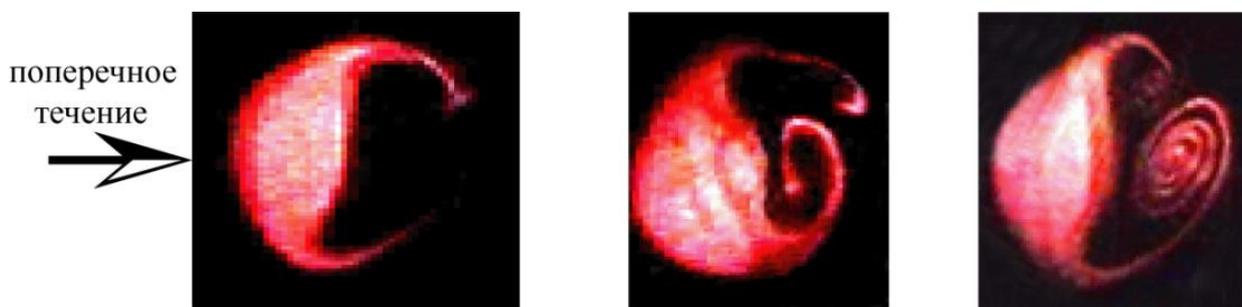


Рис. 6.1. Дымовая визуализация поперечного сечения струи (картины слева направо с ростом расстояния от среза сопла $x/d = 2, 4, 6$).

Обнаружено явление сворачивания выбросов в пару противовращающихся вихрей, и вследствие этого наблюдается уменьшение размера ядра струи, и тангенциальные выбросы газа из ядра струи, подверженные высокочастотной вторичной неустойчивости (рис. 6.2).

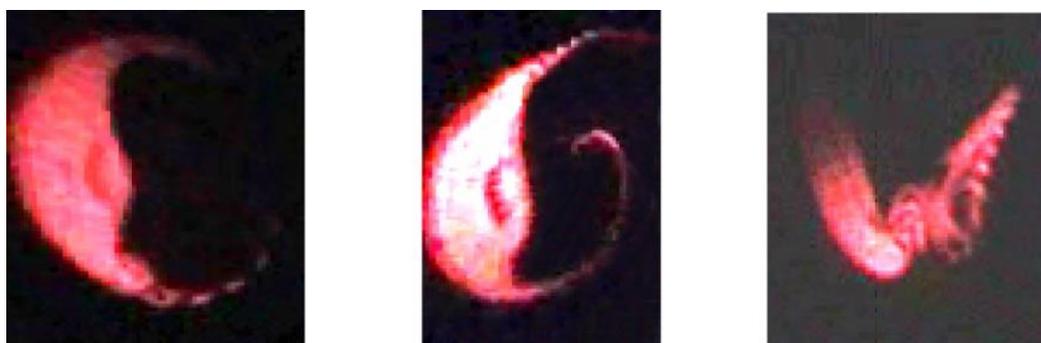


Рис. 6.2. Дымовая визуализация поперечного сечения струи, подверженной вторичной высокочастотной неустойчивости при акустическом воздействии на нее.

Показано, что круглая струя с параболическим профилем скорости в поперечном сдвиговом потоке (пограничном слое) развивается с образованием двух

стационарных противовращающихся вихрей. Обнаружено наличие вторичных высокочастотных вихревых структур на двух стационарных противовращающихся вихрях (рис. 6.3).

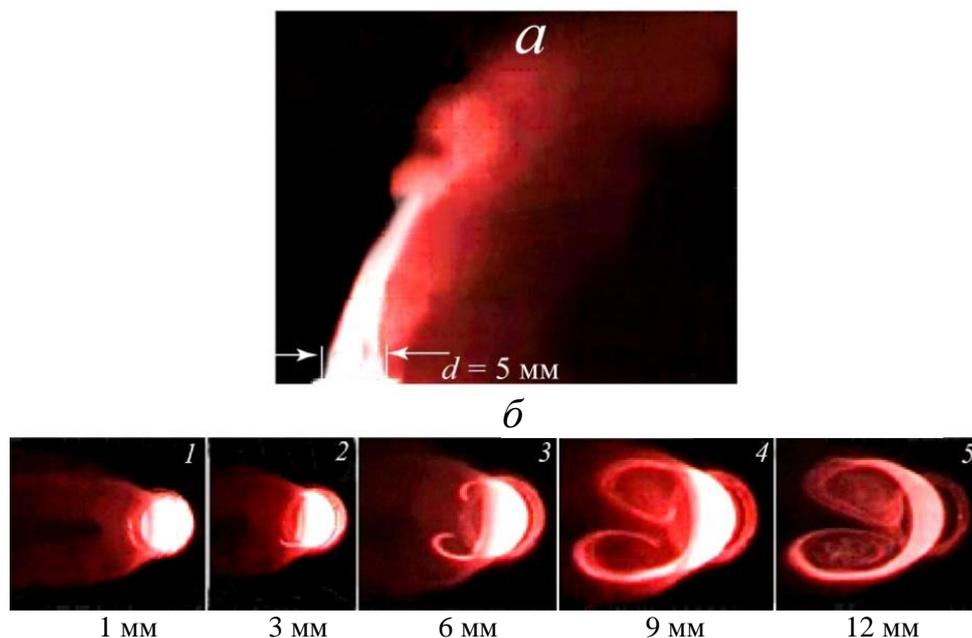


Рис. 6.3. Дымовая визуализация струи в пограничном слое (а) и картины поперечных сечений струи в пограничном слое на различных расстояниях (1–5) от среза сопла вверх по нормали к поверхности плоской пластины (б).

Поперечные сечения струи в пограничном слое на различных расстояниях от среза сопла, сечения параллельны поверхности плоской пластины.

Обнаруживается периодичность следования вихрей, задаваемая частотой акустического воздействия (30 Гц). Как видно из картин, Ω -образная вихревая структура охватывает оба из двух стационарных противовращающихся вихрей (рис. 6.4).

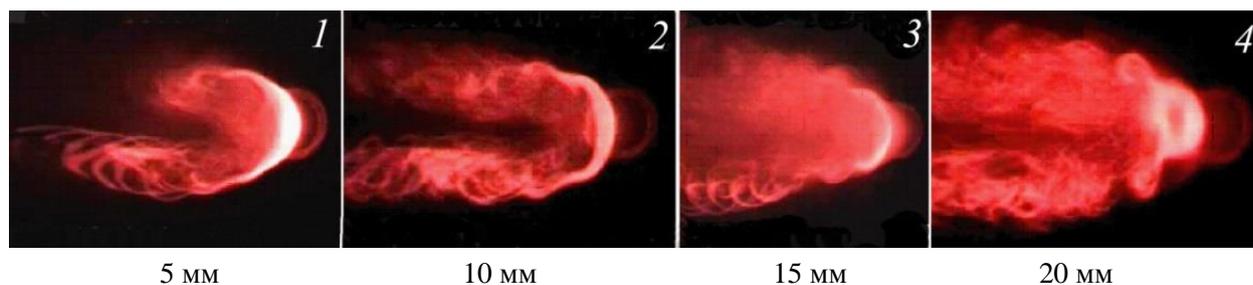


Рис. 6.4. Визуализация развития высокочастотных вторичных возмущений при частоте внешнего акустического воздействия $f = 30$ Гц.

Поперечные сечения струи в пограничном слое на различных расстояниях от среза сопла, сечения параллельны поверхности плоской пластины.

Результаты экспериментальных исследований механизма возникновения и развития ламинарной и турбулентной круглой макроструи, истекающей из сопла ($L/d = 12,5$, где $L = 250$ мм – длина канала сопла, $d = 20$ мм – диаметр выходного отверстия сопла) показали следующее. Механизм возникновения и развития когерентных структур в ламинарной и турбулентной струях идентичен в общих чертах и связан с возникновением и развитием когерентных структур типа кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца, полосчатых структур и их взаимодействием в обоих

типах течения (рис. 6.5). Характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струй к акустическим возмущениям близки (рис. 6.6).

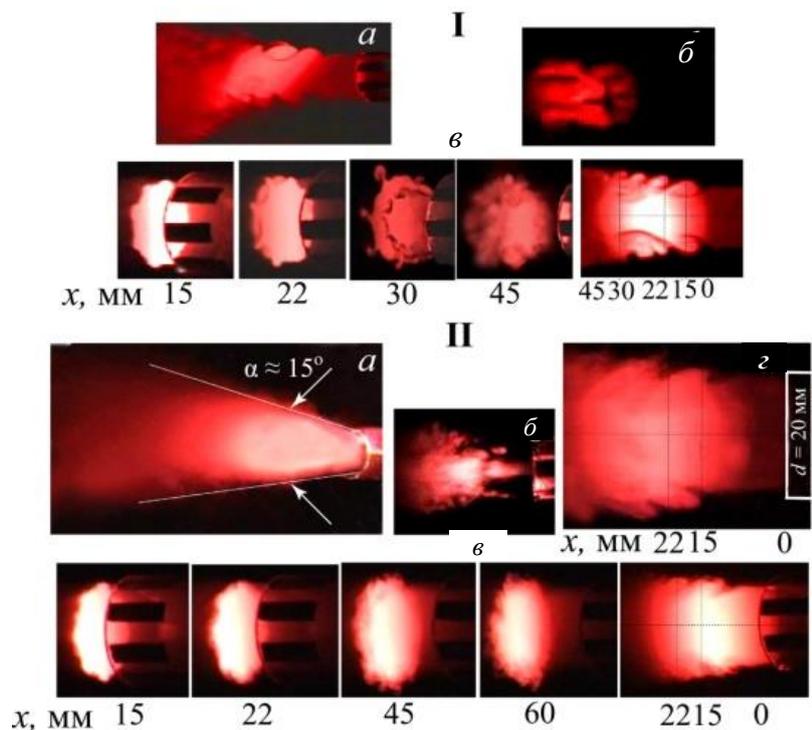


Рис. 6.5. Дымовая визуализация ламинарной круглой струи I и картины дымовой визуализации турбулентной круглой струи II.

I: a – сечение в плоскости оси симметрии; \bar{b} – полосчатые структуры в сдвиговом слое; $\bar{в}$ – поперечные сечения струи на различных расстояниях вниз по потоку;

II: a – общий вид струи; \bar{b} – полосчатые структуры в струе; $\bar{в}$ – поперечные сечения струи на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла; $г$ – продольное сечение струи вблизи среза сопла, скорость потока на оси струи на срезе сопла $U_0 = 4$ м/с

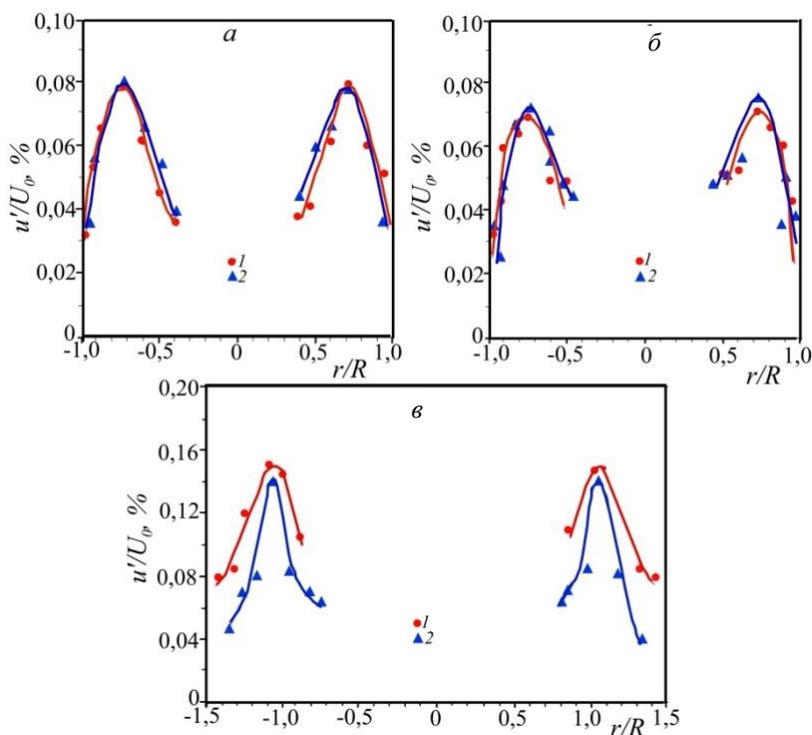


Рис. 6.6. Распределение пульсаций скорости в поперечном сечении круглой турбулентной I и ламинарной 2 струй на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла.

a – $в$ – при $x = 2, 5, 20$ мм соответственно, $U_0 = 4$ м/с

Выводы по главе 6

1. Показано, что неустойчивость круглой струи с параболическим профилем в поперечном потоке приводит к деформации струи в виде тангенциальных выбросов газа с периферии струи в окружающее пространство, сворачиванию выбросов в пару противовращающихся вихрей и вследствие этого уменьшению размера ядра струи.

2. Установлено, что Ω -образная вихревая структура восприимчива к внешним акустическим колебаниям. В результате такого воздействия развивается высокочастотное вторичное колебание.

Глава 7. Дозвуковая круглая и плоская микроструи во внешнем акустическом поле

В этой главе обсуждаются результаты экспериментальных исследований механизма развития плоских и круглых микроструйных течений при малых числах Рейнольдса во внешнем акустическом поле.

Круглые макро- и микроструи. Показано, что круглая макроструя с «ударным» профилем скорости на срезе сопла подвержена неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, связанной с образованием кольцевых вихрей, полосчатых структур, взаимодействие и эволюция которых вниз по потоку приводит к ее турбулизации. Эксперименты показали, что механизм неустойчивости Кельвина – Гельмгольца для круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла сохраняется до довольно малого диаметра струи (рис. 7.1).

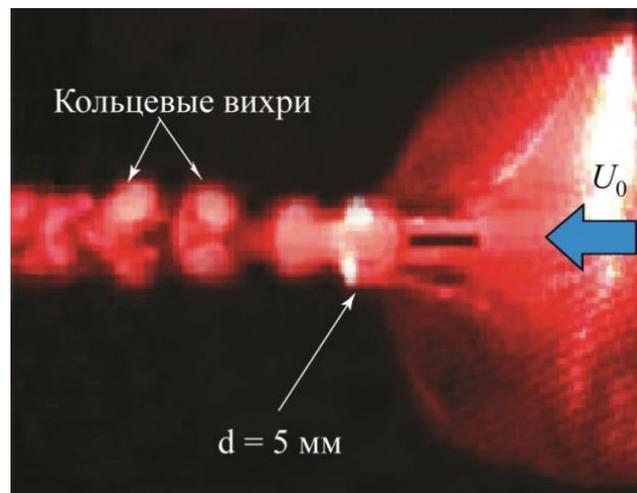


Рис. 7.1. Дымовая визуализация течения ламинарной круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла в продольном сечении.

$$U_0 = 1,5 \text{ м/с}, d = 5 \text{ мм}, Re_d = 500.$$

Установлено, что круглая макроструя с параболическим профилем скорости на срезе сопла сохраняет ламинарный характер течения большой дальности ($l/d = 10$, l – длина ламинарного участка, d – диаметр выходного отверстия сопла при длине канала сопла $L = 4$ м). Показано, что одна из причин турбулизации макроструи с параболическим профилем скорости может быть связана с ее неустойчивостью к слабому поперечному потоку.

Обнаружено, что круглая микроструя ($d = 0,2; 0,4; 0,5; 0,6$ и $1,6$ мм) подвержена (рис. 7.2), синусоидальному колебанию и бифуркации (разделению на две микроструи) (рис. 7.3) при воздействии внешнего акустического поля.

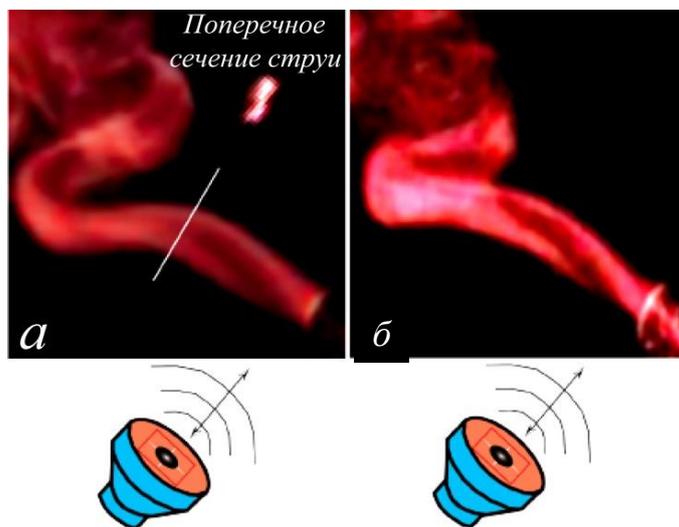


Рис. 7.2. Визуализация развития круглой микроструи при внешнем акустическом воздействии ($f = 40$ Гц (а) и 100 Гц (б), 90 дБ).

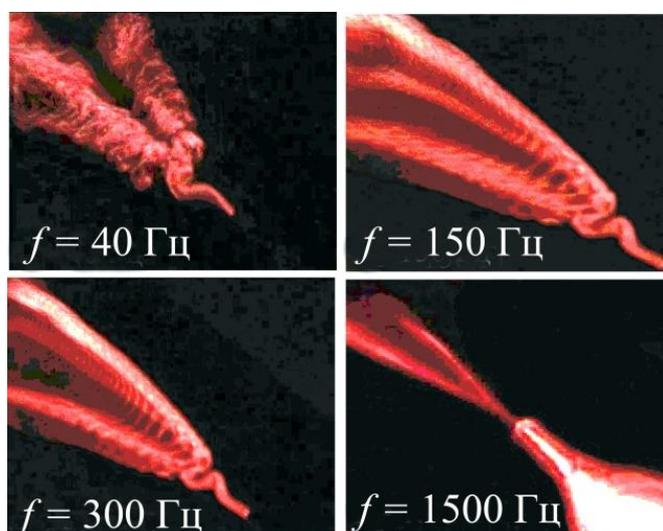


Рис. 7.3. Визуализация процесса развития синусоидального колебания и бифуркации круглой микроструи (сопло диаметром выходного отверстия $1,6$ и $0,5$ мм) в поперечном акустическом поле различной частоты.

Плоские макро- и микроструи. Показано, что плоская макроструя подвержена развитию синусоидального колебания (рис. 7.4) при воздействии внешнего акустического поля.

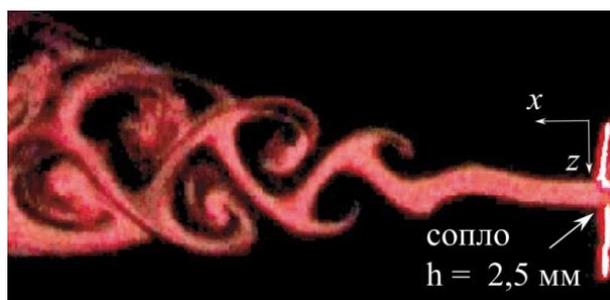


Рис. 7.4. Визуализация процесса развития плоской струи, истекающей из сопла шириной выходной щели $2,5$ мм, под воздействием внешнего акустического поля ($f = 100$ Гц).

Обнаружено явление продольного сворачивания плоскости микроструи ($l/h = 70, 180$) с краев большей стороны сопла. В то же время оба края плоской струи подвержены бифуркации (рис. 7.5 2,3), за исключением области середины струи (рис. 7.5 1).

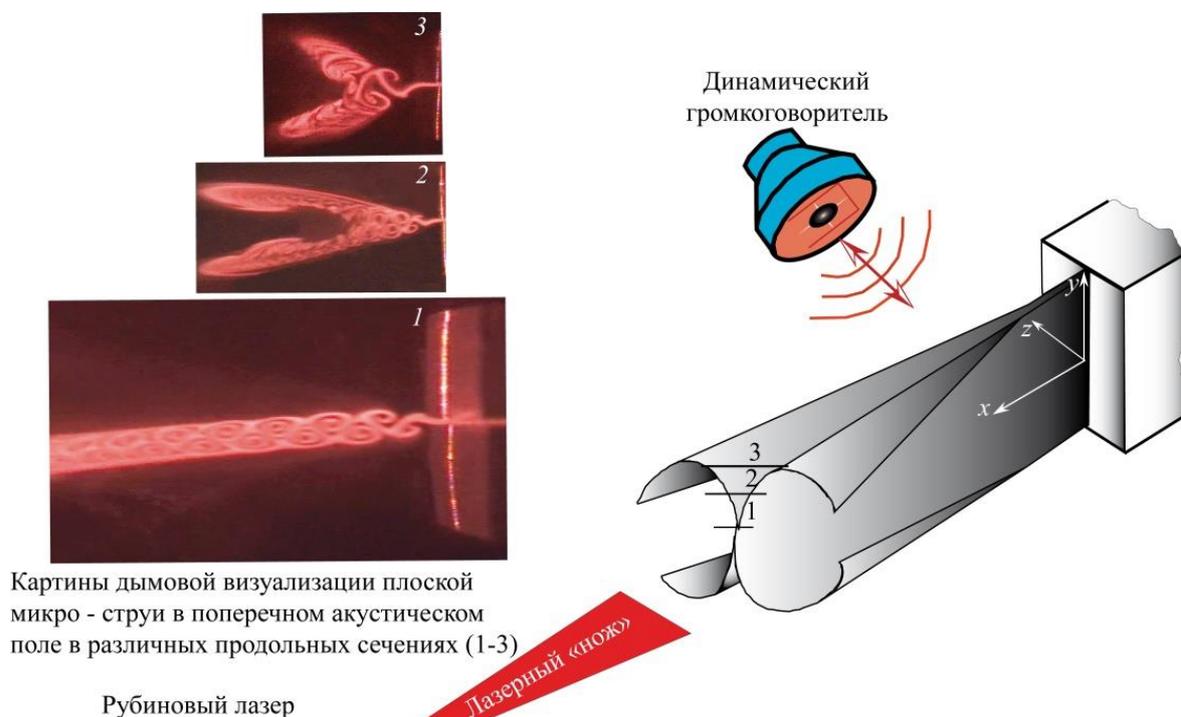


Рис. 7.5. Схема развития плоской микроструи ($35 \times 0,2$ мм) под воздействием внешнего акустического поля ($f = 150$ Гц, 90 дБ) и картины визуализации струи в плоскости xz при различных сечениях по координате y .

Развитие сложного вихревого движения приводит к процессу бифуркации и сворачивания микроструи, в результате продольная компонента скорости далее по течению значительно снижается, происходит турбулизация (рис. 7.6).



Рис. 7.6. Визуализация процесса развития плоской микроструи во внешнем акустическом поле ($f = 100$ Гц).

Установлена принципиальная разница в воздействии внешнего акустического поля на неустойчивость круглой и плоской микроструй. Показано, что плоскость развития синусоидальной неустойчивости круглой микроструи зависит от азиму-

тального положения источника акустического сигнала, а плоскость развития неустойчивости плоской микроструи задается положением ее большей стороны.

Выводы по главе 7

1. Показано, что неустойчивость Кельвина – Гельмгольца в виде осесимметричных вихревых колец для круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла сохраняется до $Re \geq 500$, что соответствует струе с диаметром не менее 5 мм

2. Установлено, что развитию синусоидальной моды неустойчивости в микроструе предшествует этап развития спиральной моды, реализующейся непосредственно со среза сопла и переходящей ниже по течению в синусоидальную моду.

3. Обнаружено явление, связанное с бифуркацией круглой микроструи при воздействии внешнего акустического поля. При бифуркации микроструя образует пару струй, развивающихся под определенным углом друг к другу.

4. Показано, что развитие синусоидальной неустойчивости круглой микроструи при внешнем акустическом воздействии происходит квазидвумерно и ориентация плоскости развития зависит от положения источника акустических колебаний в отличие от плоской микроструи.

5. Показано, что плоские макро- и микроструи наиболее неустойчивы к синусоидальной моде.

Глава 8. Устойчивость дозвуковой микроструи и горение

Целью исследований, представленных в данной главе, является экспериментальное изучение влияния начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия на структуру и характеристики развития ламинарной и турбулентной круглой и плоской макро- и микроструи без горения и при горении. Обнаружено, что диффузионное горение пропана в круглой ламинарной макроструе с ударным профилем скорости на срезе сопла сопровождается наличием присоединенного к срезу сопла пламени, развивающегося вниз по потоку ровно без каких-либо пульсаций. С другой стороны, показано, что диффузионное горение пропана в круглой турбулентной макроструе сопровождается отрывом пламени от среза сопла, наличием на торце оторвавшегося пламени струи деформации первого кольцевого вихря (*a*), вызванного наличием полосчатых структур и уширением пламени (рис. 8.1).

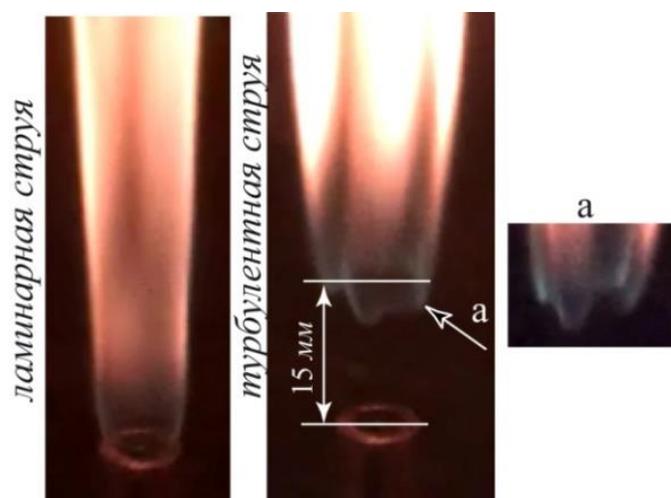


Рис. 8.1. Картины присоединенного и поднятого факела круглой макроструи газообразного топлива с ударным профилем скорости на срезе сопла.

Показано, что диффузионное горение пропана в круглой ламинарной макро-струе с параболическим профилем скорости на срезе сопла при присоединенном к срезу сопла пламени протекает в условиях развития конвективной неустойчивости и режим горения определяется параметрами диффузии. Установлено, что диффузионное горение пропана в круглой турбулентной макроструе сопровождается поднятием пламени над срезом сопла. При этом процесс горения протекает только в сдвиговой области струи, где вихревое движение способствует активному смешиванию пропана и воздуха, на оси струи горение не поддерживается. Установлено, что область стабилизации пламени в виде кольца (а) является генератором акустических колебаний (рис. 8.2).

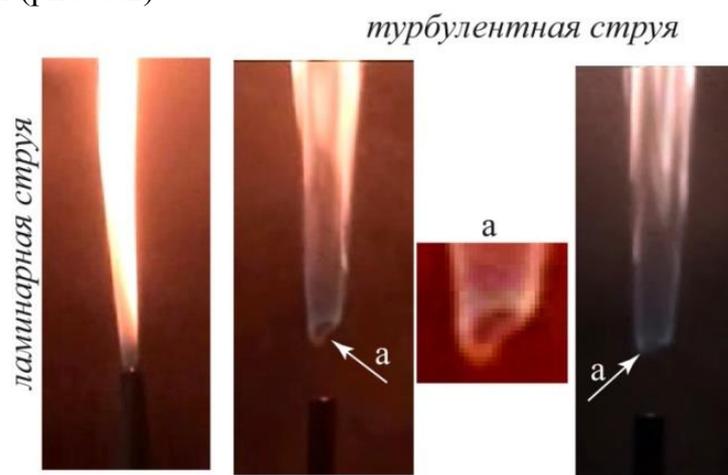


Рис. 8.2. Картины горения ламинарной и турбулентной круглой макроструй пропана, выходящей из установки с параболическим профилем скорости на срезе сопла.

Установлено, что диффузионное пламя при горении круглой микроструи пропана подвержено трансформации и бифуркации при воздействии внешнего акустического поля (рис. 8.3).

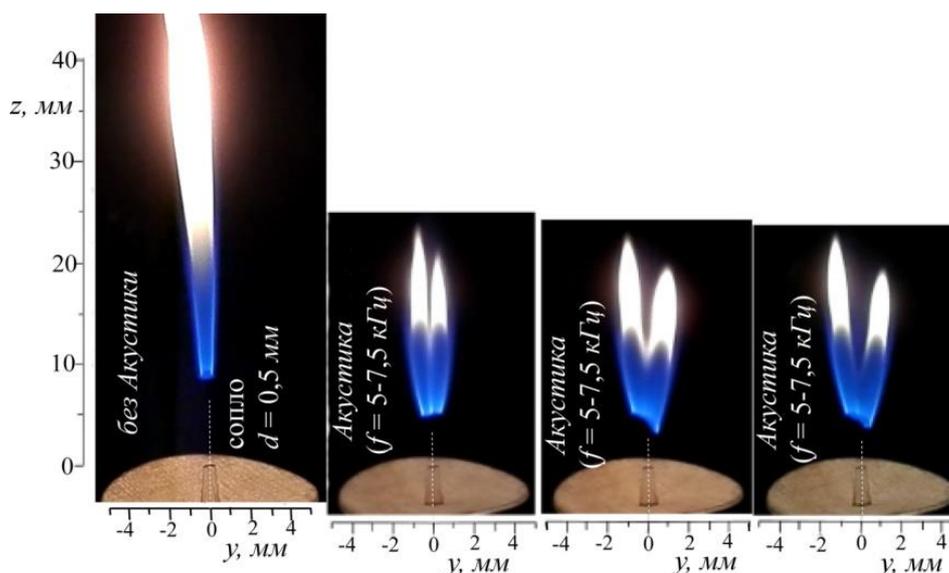


Рис. 8.3. Процесс бифуркации пламени круглой микроструи ($d = 0,5$ мм) во внешнем акустическом поле при диффузионном горении пропан.

Слева – пламя струи без акустического воздействия, справа – набор фотоснимков пламени струи при акустическом воздействии, $f = 5 - 7,5$ кГц), $U_0 = 12,5$ м/с.

Показано, что пламя при горении плоской микроструи пропана, истекающей из микросопла малого удлинения ($l/d = 10$, $l = 2$ мм – длина щели, $h = 0,2$ мм – ширина щели), подвержено бифуркации во внешнем акустическом поле (рис. 8.4).

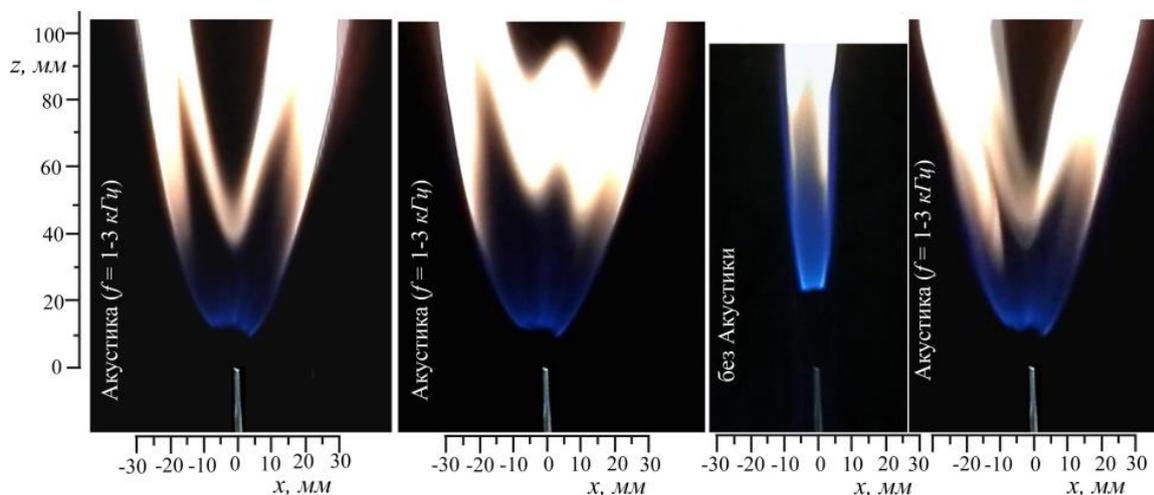


Рис. 8.4. Процесс бифуркации пламени плоской микроструи ($h = 0,2$ мм) во внешнем акустическом поле ($f = 1-3$ кГц, $A \approx 90$ дБ) при диффузионном горении пропана, $U_0 \approx 32$ м/с.

Установлено, что пламя при горении плоской микроструи пропана, истекающей из микросопла большого удлинения ($l/d \approx 180$, $l = 37$ мм – длина щели, $h = 0,2$ мм – ширина щели), подвержено бифуркации (рис. 8.5) во внешнем акустическом поле и продольному сворачиванию вихревой пелены (рис. 8.6).

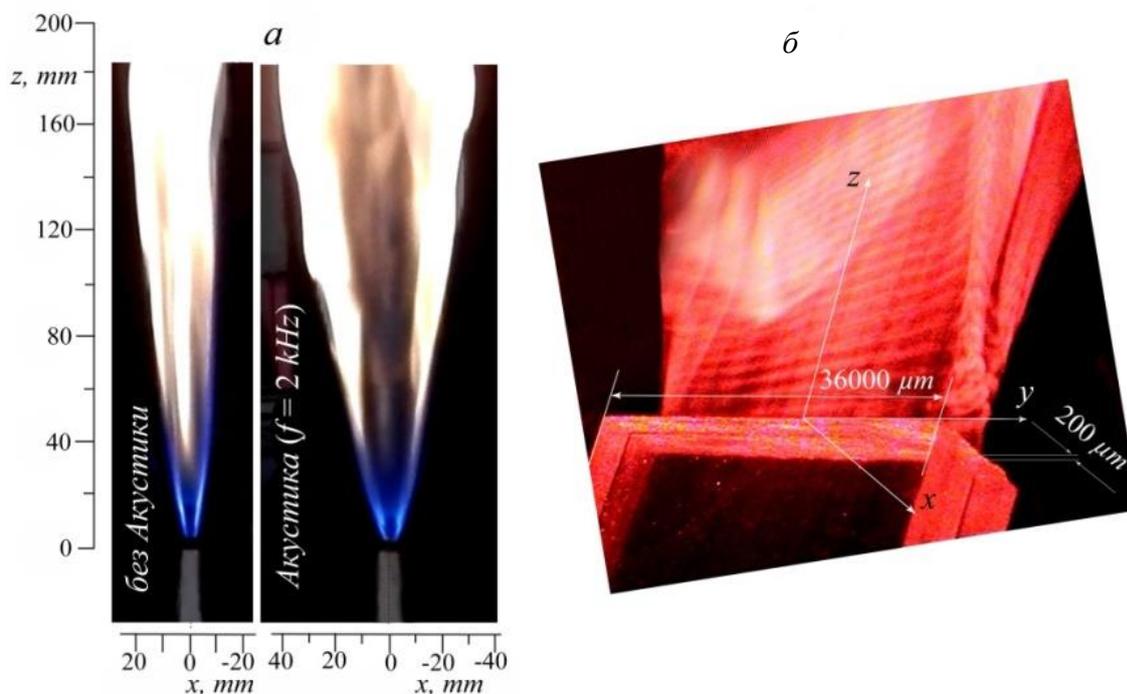


Рис. 8.5. Бифуркация пламени плоской микроструи ($l/h \approx 180$) во внешнем акустическом поле ($f \approx 2$ кГц, $A \approx 90$ дБ) при диффузионном горении пропана (а) и картина дымовой визуализации данного процесса для струи без горения (б), $U_0 \approx 16$ м/с.

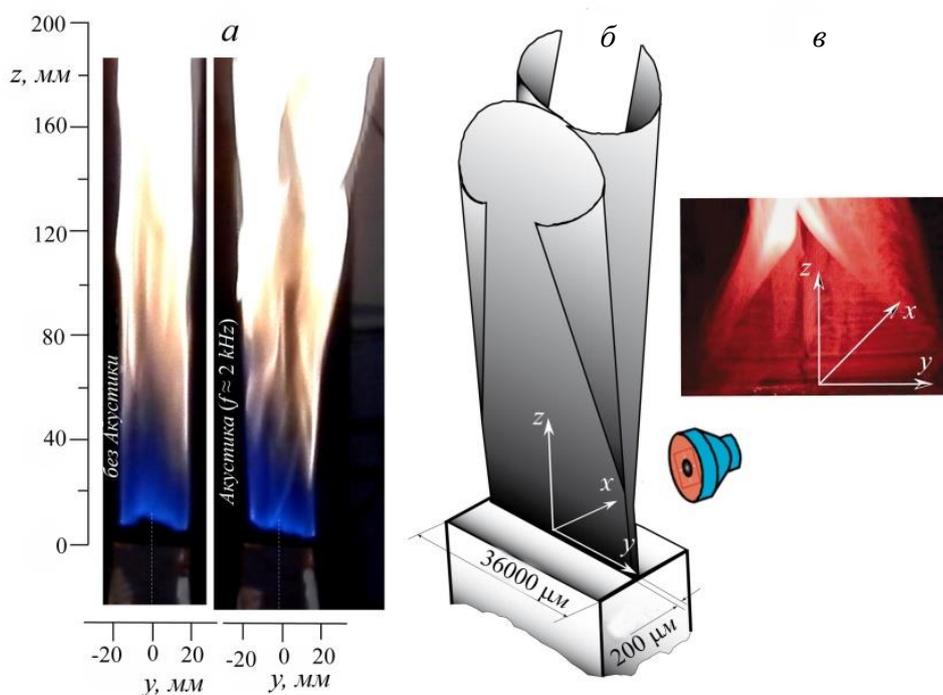


Рис. 8.6. Струйно-факельное горение плоской микроструи большого удлинения ($l/h = 180$) во внешнем акустическом поле ($f \approx 2$ кГц, $A \approx 90$ дБ) при диффузионном горении пропана (а), схема данного процесса (б) и картина дымовой визуализации струи без горения (в), $U_0 \approx 16$ м/с.

Выводы по главе 8

1. Обнаружено, что присоединенное диффузионное горение пропана в круглой ламинарной макроструе с «ударным» профилем скорости на срезе сопла не восприимчиво к внешним акустическим возмущениям

2. Показано, что локальные неоднородности на внутренней стенке сопла приводят к деформации нижнего фронта кольцеобразного пламени продольными полосчатыми структурами при диффузионном горении пропана в круглой турбулентной макроструе с поднятым факелом.

3. Установлено, что поднятое пламя при диффузионном горении круглой микроструи при внешнем акустическом воздействии подвержено развитию синусоидальной неустойчивости и бифуркации.

4. Показано, что поднятое пламя при диффузионном горении круглой микроструи под действием внешнего акустического поля значительно расширяется в сравнении с пламенем, развивающимся при естественных условиях.

5. Показано, что воздействие внешнего акустического поля на процесс диффузионного горения пропана и кинетического горения смеси пропан/воздух в плоской микроструе, истекающей из сопла малого удлинения ($l/d = 10$), приводит к изменению структуры фронта пламени, увеличению угла распространения факела и его бифуркации.

6. Установлено, что воздействие поперечного акустического поля на процесс диффузионного горения пропана в плоской микроструе, истекающей из сопла большого удлинения ($l/d = 180$), приводит к увеличению площади фронта пламени за счет вовлечения в процесс большего количества окислителя. Показано, что пламя, в частности, распространяется по продольным вихревым жгутам.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

1. Установлено, что механизм нелинейного разрушения полосчатых структур в пограничном слое через процесс их вторичной высокочастотной неустойчивости связан с образованием когерентных структур типа Λ -вихрей как для синусоидальной, так и варикозной мод неустойчивости. Обнаружен процесс роста числа Λ -вихрей вниз по потоку для обеих мод неустойчивости.

2. Установлено, что механизм взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами в макроструйном течении представляет собой классический сценарий трехмерного искажения двумерной волны (кольцевого вихря) на неоднородностях потока (полосчатых структурах), развивающихся в сдвиговом слое струи. Показано, что данный процесс приводит к возникновению азимутальных «лучей», представляющих собой образования типа Λ - или Ω -образных структур, равномерно распределенных по всему периметру кольцевого вихря. В области «головки» Λ - или Ω -образных вихрей происходит интенсивный процесс смешения струи с окружающим газом, что приводит к расширению струи и ее турбулентному разрушению вниз по потоку.

3. Установлено кардинальное влияние профиля скорости на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструи. Наличие ударного профиля скорости приводит к неустойчивости Кельвина – Гельмгольца и быстрой турбулизации струи, в то время как параболический профиль скорости способствует сохранению ламинарного течения струи большой дальности. Показано, что плоская макроструя подвержена синусоидальной моде неустойчивости. Развитие варикозной моды неустойчивости ламинарной плоской струи быстро подавляется синусоидальной модой неустойчивости.

4. Обнаружено новое явление, связанное с трансформацией круглой микроструи под воздействием поперечного акустического поля, при этом развитие струи вниз по потоку определяется механизмом синусоидальной вихревой неустойчивости присущей плоской струе. Показано, что поперечное акустическое поле приводит к бифуркации микроструи. Установлена принципиальная разница в воздействии акустического поля на неустойчивость круглой и плоской микроструй. Показано, что синусоидальная неустойчивость круглой микроструи зависит от направления вектора акустического поля, а неустойчивость плоской микроструи – не зависит.

5. Установлено, что пламя при диффузионном горении круглой микроструи подвержено трансформации и бифуркации при воздействии поперечным акустическим полем. Установлен механизм бифуркации пламени круглой микроструи, через развитие спиральной моды переходящей в синусоидальное колебание микроструи.

6. Данная работа определила развитие научного направления, связанного с исследованием влияния физических механизмов устойчивости микроструй на эффективность горения диффузионных пламен.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Грек Г.Р., В.В. Козлов, Ю.А. Литвиненко Устойчивость дозвуковых струйных течений // *Учебное пособие: Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2012. 208 с.* [с дополнительным материалом в электронном виде, включающем презентации и видеоролики на CD-диске (351 Мб)]. ISBN 978-5-4437-0062-5.
2. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of Conventional and Combusting Subsonic Jet Instabilities // *Dordrecht: Springer International Publishing, 2016. 126 p.* [с дополнительным материалом в электронном виде, включающем презентации и видеоролики на 172 с. <http://extras.springer.com>] (ISBN: 978-3-319-26957-3, DOI 10.1007/978-3-319-26958-0).
3. Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Чернорай В.Г., Грек Г.Р., Лефдаль Л.Л. Управление неустойчивостью поперечного течения скользящего крыла с помощью отсоса // *Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 4. С. 559-567.*
4. Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Лефдаль Л., Чернорай В.Г. Экспериментальное исследование варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое скользящего крыла // *Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 1. С. 13-22.*
5. Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л.Л., Грек Г.Р., Чун Х. О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т.11, № 3. С. 339-364.*
6. Чернорай В.Г., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Лефдаль Л., Грек Г.Р., Чун Х.Х. Управление трансформацией Λ -структуры в турбулентное пятно с помощью риблет // *Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 4. С. 575-585.*
7. Чернорай В.Г., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Грек Г.Р. Исследование нелинейной неустойчивости продольной структуры, генерированной шероховатостью, в пограничном слое прямого крыла // *Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 3. С. 359-376.*
8. Чернорай В.Г., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Чередниченко Е.Е. Продольные структуры в ближнем поле плоской пристенной струи // *Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 4. С. 545-553.*
9. Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Сорокин А.М. О механизме возникновения и развития когерентных структур в ламинарной и турбулентной круглых струях // *Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2008. Т. 3, № 1. С. 12-22.*
10. Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // *Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2009. Т. 4, № 1. С. 14-24.*
11. Чернорай В.Г., Литвиненко Ю.А. Исследование структуры течения плоской пристенной струи методом PIV // *Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2009. Т. 4, № 2. С. 19-26.*
12. Козлов Г.В., Грек Г.Р., Сорокин А.М., Литвиненко Ю.А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // *Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2008. Т.3, №3. С. 14-33.*
13. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В. Круглая струя в поперечном сдвиговом потоке (обзор) // *Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2010. Т. 50, № 1. С. 9-28.*
14. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // *Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2010. Т. 5, № 2. С. 28-42.*

15. Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В. Дозвуковая круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Доклады АН. 2011. Т. 436, № 1. С. 47-53.
16. Литвиненко Ю.А., Литвиненко М.В. Экспериментальное исследование восприимчивости круглой микроструи к акустическому полю // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. С. 932-934.
17. Литвиненко Ю.А., Литвиненко М.В., Катасонов М.М. Экспериментальное исследование влияния акустического поля на развитие плоской микроструи методом цифровой трассерной визуализации // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2011. Т. 6, № 4. С. 42-50.
18. Лысенко В.И., Горев В.Н., Литвиненко Ю.А., Бардаханов С.П. Получение и свойства керамики из нанопорошка оксида железа // Вестн. НГУ. Сер. Физика, 2013. Т. 8, № 1. С. 99-103.
19. Шмаков А.Г., Чернов А.А., Князьков Д.А., Коробейничев О.П., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Катасонов М.М., Грек Г.Р. Исследование эффективности многоструйной горелки с различной подачей газа при диффузионном горении // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2013. Т. 8, № 2. С. 124-127.
20. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности горения пропана в круглой и плоской мини и микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2013. Т. 8, № 3. С. 98-120.
21. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2014. Т. 9, № 1. С. 79-86.
22. Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Вихорев В.В. Экспериментальное исследование затопленной круглой струи с вихрями Дина // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2014. Т. 9, № 2. С. 128-135.
23. Козлов В.В., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Структура пламени при горении пропана в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Доклады АН. 2014. Т. 459, № 5. С. 562-566.
24. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Толкачев С.Н., Чернорай В.Г. Экспериментальные исследования локализованных возмущений и их вторичной высокочастотной неустойчивости в пограничном слое плоской пластины, прямого и скользящего крыла (обзор) // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2014. Т. 9, № 4. С. 39-64.
25. Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Вихорев В.В. Термоанемометрические исследования круглой струи, сформированной в криволинейном канале // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 1. С. 23-32.
26. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 27-41.
27. Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 52-66.
28. Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Вихорев В.В., Козлов Г.В. Влияние акустических колебаний на круглую струю, сформированную в криволинейном канале // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 67-72.

29. Литвиненко Ю.А., Балбуцкий А.Б., Вихорев В.В., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Экспериментальное исследование развития гидродинамической неустойчивости в круглой микроструе пропана при воздействии внешнего акустического поля с горением и без горения // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 4. С. 21-28.
30. Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности диффузионного горения микроструи водорода при различной пространственной ориентации выходного сопла // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10, № 4. С. 60-76.
31. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Влияние направления вектора ускорения силы тяжести Земли на диффузионное горение микроструи водорода // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2016. № 2 (45). С. 175-192.
32. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // Доклады АН. 2016. Т. 470, № 2. С. 166-171.
33. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Коробейничев О.П. Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2016. Т. 11, № 2. С. 56-76.
34. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 28-45.
35. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода Часть 2. Приподнятое пламя, сверхзвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 46-59.
36. Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Вихорев В.В. Визуализация вихревых структур в ближнем поле круглой струи, сформированной в криволинейном канале, с помощью ρv -метода // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 2. С. 103-107.
37. Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л.Л., Грек Г.Р., Чун Х.Х. Влияние риблет на развитие Λ -структуры и ее преобразование в турбулентное пятно // Доклады Академии наук. 2006. Т. 407, № 2. С. 194-197.
38. Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л., Грек Г.Р., Чун Х.Х. О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое // Доклады Академии наук. 2005. Т. 401, № 2. С. 189-192.
39. Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых макро- и микроструйных течений и микроструйное горение (обзор) // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 83-99.
40. Вихорев В.В., Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Диффузионное горение круглой струи водорода, истекающей из криволинейного канала с вихрями Дина // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 72-82.
41. Козлов В.В., Грек Г.Р., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 60-71.

42. Шмаков А.Г., Вихорев В.В., Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54-67.
43. Вихорев В.В., Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Литвиненко М.В., Шмаков А.Г. Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из криволинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 68-79.
44. Козлов В.В., Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Явление запираания микросопла при диффузионном горении водорода // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480, № 1. С. 34-39.
45. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Вихорев В.В. Диффузионное горение плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 2. С. 23-36.
46. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Вихорев В.В. Диффузионное горение круглой микроструи водорода при до- и сверхзвуковой скорости истечения из сопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 2. С. 37-52.
47. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Различные сценарии горения плоской микроструи водорода на до- и сверхзвуковой скорости // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 3. С. 300-305.
48. Козлов В.В., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 2. С. 21-34.
49. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха и нанопорошка // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 2. С. 35-45.
50. Litvinenko M.V., Kozlov V.V., Kozlov G.V., Grek G.R. Effect of streamwise streaky structures on turbulization of a circular jet // J. Appl. Mech. and Techn. Phys. 2004. Vol. 45, No. 3. P. 349-357.
51. Litvinenko Ya.A., Chernoray V.G., Kozlov V.V., Grek G.R., Loefeldahl L.L., Chun H.H. Adverse pressure gradient effect on nonlinear varicose instability of a streaky structure in an unswept wing boundary layer // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17, No. 11. P. 118106.
52. Chernoray V.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Y.A. Spatial hot-wire visualization of the Λ -structure transformation into the turbulent spot on the smooth flat plate surface and riblet effect on this process // Journal of Visualization. 2010. Vol. 13, No. 2. P. 151-158.
53. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Round and plane jets in a transverse acoustic field // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20, No. 3. P. 272-289.
54. Kozlov V.V., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Visualization of the processes of development and turbulent breakdown of a low speed round jet [Электронный ресурс] // Visualization of Mechanical Processes. 2011. Vol. 1, No 2. URL: <https://dl.begellhouse.com/es/journals/08456987543b9011,26ad62154ce5f233,318dd5e701472516.html>.

55. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Influence of initial conditions at the nozzle exit and acoustical action on the structure and stability of a plane jet [Электронный ресурс] // Visualization of Mechanical Processes. 2012. Vol. 2, № 3.
URL:<https://www.dl.begellhouse.com/es/journals/08456987543b9011,644f3c34147aa05f,6f064ee837b7a357.html>.
56. Grek G.R., Kozlov G.V., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A., Litvinenko M.V. Round jet in cross shear flow [Электронный ресурс] // Visualization of Mechanical Processes. 2012. Vol. 2, No. 4. URL:<https://www.dl.begellhouse.com/journals/08456987543b9011,6c2dbf4525681f51,68c9d916390df863.html>.
57. Chernoray V.G., Dovgal A.V., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A., Lofdahl L. Instability of a swept-wing boundary layer modulated by stationary flow perturbations [Электронный ресурс] // Visualization of Mechanical Processes. 2013. Vol. 3, No. 1. P. 1-13. URL: <https://dl.begellhouse.com/ru/journals/08456987543b9011,012ffe2e49678e34,2215feca45005f15.html>.
58. Kozlov V.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Litvinenko Yu.A. Stability of subsonic jet flows // Journal of Flow Control, Measurement & Visualization. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 94-101.
59. Kozlov V.V., Grek G.R., Katasonov M.M., Korobeinichev O.P., Litvinenko Y.A., Shmakov A.G. Stability of subsonic microjet flows and combustion // Journal of Flow Control, Measurement & Visualization. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 108-111.
60. Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Combustion of hydrogen in round and plane microjets in transverse acoustic field at small Reynolds numbers as compared to propane combustion in the same conditions (Part I) // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41, No. 44. P. 20231-20239.
61. Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II) // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41, No. 44. P. 20240-20249.
62. Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Y.A. Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, No. 24. P. 15913-15924.
63. Kozlov V.V., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko Y.A., Shmakov A.G. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, No. 1. P. 457-468.
64. Kozlov V.V., Litvinenko Y.A., Chernoray V.G., Lofdahl L.L. Breakdown of a streak via development of varicose secondary mode on the straight wing with pressure gradient // Fluid Mechanics and Its Applications. 2006. Vol. 78. P. 419-424.
65. Kozlov V.V., Vikhorev V.V., Grek G., Litvinenko Y.A., Shmakov A.G. Diffusion combustion of a hydrogen microjet at variations of its velocity profile and orientation of the nozzle in the field of gravitation // Combustion Science and Technology. 2019. Vol. 191, No. 7. P. 1219-1235.

Ответственный за выпуск Ю.А. Литвиненко

Подписано в печать 23. 07. 2021

Формат бумаги 60×84/16. Усл. печ. л. 1,8

Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 150. Заказ № 11

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