

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН
Института теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН

аркович
литрий
аркович

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Литвиненко Юрия Алексеевича** «Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя, струйных течений и микроструйного горения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9– Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность. Диссертация Литвиненко Ю.А. посвящена экспериментальным исследованиям нелинейной стадии развития ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое плоской пластины и крылового профиля, в свободных струйных течениях, а также при диффузионном микроструйном горении. Тема диссертации, несомненно, является актуальной, поскольку пристенные и свободные струйные течения входят в широкий спектр технических приложений, использующихся в отраслях производства. Процессы теплообмена в задачах энергетики, смешения и взаимодействия в химической промышленности, системы управления и корректировки в аэрокосмической отрасли. Исследования микроструйных течений помимо фундаментального интереса, носят вполне прикладной смысл. Так, например МЭМС-технологии основываются в частности на свойствах микроструйных течений с низким числом Рейнольдса. Развитие когерентных полосчатых структур в пристенных течениях и струях нередко носят определяющий характер при формировании ламинарно-турбулентного перехода, поскольку в них заложена основная часть кинетической энергии.

Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав с изложением результатов исследований, заключения и списка цитируемой

литературы из 182 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 278 страниц, в том числе 166 иллюстраций.

Во введении представлено обоснование актуальности исследований, особенности выбранных методических подходов, сформулированы цели и задачи, кратко изложено содержание диссертации, а также наиболее важные научные результаты, выносимые на защиту.

В главе 1 содержится общая характеристика проблемы и обзор основных работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям механизма неустойчивости различных сдвиговых течений и особенно макро – и микроструйных течений, в том числе и изучение микроструйного горения в соответствии с темой диссертационной работы в кратком изложении. Более детально эти вопросы рассмотрены в каждой из глав, в которых представлены результаты исследований.

В главе 2 описываются экспериментальные установки и условия проведения экспериментов. Рассматриваются методики проведения экспериментальных исследований и используемая аппаратура.

Глава 3 посвящена результатам исследований синусоидальной и варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое плоской пластины на поздних стадиях нелинейного развития. Приводятся качественные и количественные характеристики возмущений, возникающих в результате этих процессов:

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.

В главе 4 представлены результаты исследований механизма разрушения дозвуковой круглой макроструи:

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 посвящена исследованию влияния начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструй. Показаны особенности развития ламинарной и турбулентной микроструи. Представлены картины лазерно - дымовой визуализации струй при изменении начальных условий на срезе сопла (распределений средней и пульсационной составляющих продольной компоненты скорости) с помощью изменения удлинения канала соплового аппарата:

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.

В главе 6 представлены результаты исследования когерентных вихревых структур в свободной круглой струе и круглой струе при наличии поперечного потока. Показаны особенности возникновения и развития таких структур при указанных условиях. Обсуждаются картины лазерно - дымовой визуализации для ламинарной и турбулентной струй и результаты термоанемометрических измерений (распределений средней и пульсационной составляющей продольной компоненты скорости) в поперечных сечениях ламинарной и турбулентной струй при различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла. Установлено, что характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струи к внешнему акустическому воздействию близки.

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 посвящена обсуждению результатов экспериментальных исследований механизма развития плоских и круглых макро – и микроструйных течений при малых числах Рейнольдса в поперечном акустическом поле. Проведено сравнение полученных результатов с результатами последних исследований по данной тематике.

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.

В главе 8 представлены результаты исследований по устойчивости дозвуковых макро – и микроструй и их горению. Представлены результаты диффузионного и кинетического горения пропана в круглой и плоской микроструе при внешнем акустическом воздействии:

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.

Материал диссертационной работы изложен четко, ясно и подробно проиллюстрирован рисунками. Содержание работы отражает полноту проведенных исследований по решению актуальных задач, связанных с развитием пристенных и струйных течений, а также процесса диффузионного струйно-факельного горения.

Автор приводит описание личного вклада и корректно ссылается на источники заимствований. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

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.

Материалы диссертации рекомендуется использовать специалистам ЦИАМ, ЦАГИ и других организаций, занимающихся исследованием струйных течений. Полученные результаты используются и представляют интерес для теоретических и экспериментальных групп ИТПМ СО РАН, ИТ СО РАН, ИХКиГ СО РАН и других исследовательских институтов и университетов.

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 (AEM) (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).

На семинаре высказаны следующие замечания:

1. В диссертации представлено множество иллюстраций в тоже время большинство из них не имеет масштабных шкал, что заметно затрудняет восприятие материала.
2. В работе выполнен большой объем экспериментальных исследований с различными параметрами струй, но недостаточно внимания уделено сравнению полученных результатов. На чем основываются утверждения о значительном отличии свойств макро - и микроструй?
3. Автор использует различные термины при обозначении одних и тех же мод неустойчивости, «варикозная» она же симметричная или «синусоидальная» она же несимметричная.

Представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием, а полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам, носят как фундаментальный так и прикладной характер.

Диссертационная работа Литвиненко Юрия Алексеевича «Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя, струйных течений и микроструйного горения», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9- «Механика жидкости, газа и плазмы», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем критериям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Литвиненко Юрий Алексеевич заслуживает присуждения ему искомой степени.

Доклад по материалам диссертационной работы Литвиненко Ю.А. был заслушан, обсужден и одобрен на семинаре "Физическая гидродинамика" ИТ СО РАН под председательством Алексеенко С.В.

Присутствовало на семинаре 19 чел. Результаты голосования: «за» - 19 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 01 от «05» октября 2021 г.

Председатель Семинара "Физическая гидродинамика"
академик РАН

Почтовый адрес:

630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Акад
Лаврентьева 1, к. 234

Факс: 8 (383) 330-84-80

Тел.: 8 (383) 330-70-50

E-mail: aleks@itp.nsc.ru

Сайт организации: <http://www.itp.nsc.ru>

Алексеенко
Сергей
Владимирович

Руководитель подразделения, на базе кот
проходил семинар

Заведующий лаборатории 6.1. "Лаборатория пр
тепломассопереноса"

д.ф.-м.н., с.н.с

Факс: 8 (383) 330-84-80

Тел.: 8 (383) 316-51-35

E-mail: kuibin@itp.nsc.ru

Сайт организации: <http://www.itp.nsc.ru>

Куйбин Павел
Анатольевич

Секретарь семинара

Старший научный сотрудник лаборатории
"Лаборатория моделирования"

к.т.н.

Факс: 8 (383) 330-84-80

Тел.: 8 (383) 316-52-31

E-mail: ivankabardin@gmail.com

Сайт организации: <http://www.itp.nsc.ru>

абардин Иван
онстантинович

Сведения о ведущей организации
по диссертационной работе **Литвиненко Юрия Алексеевича**
«Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя,
струйных течений и микроструйного горения»
по специальности 1.1.9 – «механика жидкости, газа и плазмы»

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ИТ СО РАН
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	Лаборатория 6.1. проблем тепломассопереноса
Место нахождения	г. Новосибирск
Почтовый индекс, адрес организации	630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Веб-сайт	http://www.itp.nsc.ru
Телефон	+7(383) 330-90-40
Адрес электронной почты	director@itp.nsc.ru

Список публикаций сотрудников ИТ СО РАН по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Cherdantsev A.V., Markovich D.M.	Development and interaction of disturbance waves in downward annular gas-liquid flow	International Journal of Multiphase Flow. - 2021. - Vol. 138. - 103614. - 17 p.	Статья, 2021
2	Cherdantsev A. V., Isaenkov S. V., Cherdantsev M. V., Markovich D. M.	The effect of high-frequency oscillations on the disturbance waves in annular flow	International Journal of Multiphase Flow. - 2021. - Vol. 143. - 103754. - 17 p.	Статья, 2021
3	A.S. Lobasov, L.M. Chikishev,	Coherent Structures and Turbulent Transport in the	Journal of Applied Mechanics and	Статья 2020

	V.M. Dulin, D.M. Markovich	Initial Region of Jets and Flame in Swirling Flow	Technical Physics 61 (3), 350-358	
4	D.K. Sharaborin, R.V. Tolstoguzov, V.M. Dulin, D.M. Markovich	On the Structure of an Impact Jet with Flow Swirling and Combustion	Combustion, Explosion, and Shock Waves 56 (2), 131-136	Статья 2020
5	V.M. Dulin, A.S. Lobasov, L.M. Chikishev, D.M. Markovich, K. Hanjalic	1. On impact of helical structures on stabilization of swirling flames with vortex breakdown	Flow, Turbulence and Combustion 103 (4), 887-911	Статья 2019
6	R. Mullyadzhanov, S Abdurakipov, K Hanjalić	On coherent structures and mixing characteristics in the near field of a rotating- pipe jet	International Journal of Heat and Fluid Flow 63, 139-148	Статья 2017
7	Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Лукашов В.В., Шаров К.А., Леманов В.В.	Исследование струйного горения водорода с помощью гильберт- диагностики	Автометрия. - 2019, -Т.54,№1. – С.21-25	Статья 2019
8	Lemanov V.V., Terekhov V.V., Terekhov V.I.	The heat transfer of round impinging jets	Journal of Physics:Conference Series 2019, Volume 1382, Issue 1, 012021	Статья 2019
9	Philippov M.V., Chokhar I.A., Terekhov V.V.	Experimental study of interaction of two parallel circular jets	Journal of Physics: Conference Series 2019, Volume 1359, Issue 1, 012019	Статья 2019
10	Леманов В.В., Лукашов В.В., Абдрахманов Р.Х., Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Шаров К.А.	Режимы неустойчивого истечения и диффузионного горения струи углеводородного горючего	Физика горения и взрыва. - 2018. - Т. 54, № 3. - С. 3- 12.	Статья 2018

Директор ФГБУН
Института теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН
академик РАН

ич Д.М./

юля 2021г.