

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Литвиненко Юрия Алексеевича

«Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя, струйных течений и микроструйного горения»,

представленную на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Литвиненко Юрия Алексеевича «Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя, струйных течений и микроструйного горения» посвящена исследованиям свойств струйных течений. Исследования проведены при различных начальных условиях, а также изучено их влияния на процессы диффузионного струйно-факельного горения.

Для выполнения этой задачи были проведены многочисленные эксперименты, в которых варьировались входные параметры: размеры сопел и длины каналов, вплоть до микронных размеров. Полученные результаты дали возможность провести систематизацию и выявить характерные различия в развитии неустойчивости макро- и микроструйных течений.

Метод пространственно-временной термоанемометрической визуализации с использованием так называемого фазового осреднения, представленный и используемый соискателем позволил в трехмерном виде наблюдать развитие неустойчивости в круглой макро- и микроструе. Использование миниатюрных горелочных устройств в энергопреобразующих элементах сопровождалось многочисленными проблемами, связанными, в частности, с отрывом факела и неравномерностью теплоотвода.

Отмечаю, что в настоящее время в мире исследования струйных течений ведутся многими научными группами и интерес к таким исследованиям постоянно возрастает. Особенно к исследованиям, связанным с микроструйным истечением и горением. Результаты данной работы демонстрируют возможность увеличения площади фронта пламени, интенсивности горения и, несомненно, являются востребованными и актуальными.

Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитируемой литературы из 182 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 278 страниц, в том числе 166 иллюстраций. Это содержание работы отражает очень большой объем проведенных исследований. Структура диссертации логически соответствует проведенному научному поиску. Представленная работа является серьезным завершённым научным исследованием.

Во введении приводится обоснование актуальности исследований, особенности выбранных методических подходов, формулируются цели и

задачи, кратко представлено содержание глав диссертации, формулируются основные научные результаты, выносимые автором на защиту.

В главе 1 представлены общая характеристика проблемы и обзор основных работ, в которых обсуждаются теоретические и экспериментальные исследования механизма неустойчивости различных сдвиговых течений. Особое внимание уделено макро- и микроструйным течениям, в том числе при микроструйном горении в соответствии, что соответствует теме диссертационной работы. Более подробно 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 смещения 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 лазерное - 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 Хелена – 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 микроструй при диффузионном горении. Показаны режимы возникновения бифуркации пламени круглой микроструи, при воздействии

периодическим возмущением. Получен целый ряд оригинальных результатов:

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.

Представляется, что результаты, изложенные в главах 5-8, имеют серьезное теоретическое представление экспериментальных исследований автора диссертации.

Особо отмечаю многообразие использованных методик при проведении исследований. Это бесконтактные методы диагностики потоков-PIV-метод, шпирен-метод и зондовые – термоанемометрический метод. Последний использовался в виде автоматизированного комплекса по сбору данных не только по сечениям, но и в объёме. В результате полученные данные могут быть представлены в виде объемных структур, характеризующих ту или иную неустойчивость, и в тоже время в каждой точке объема имеется количественная информация, что позволяет проводить сравнения и валидацию расчетных методов.

В целом, использованные автором экспериментальные методы достоверны и многократно апробированы. Полученные в диссертации результаты логичны и физически непротиворечивы.

Достоверность полученных результатов также подтверждается многочисленными публикациями в реферируемых журналах и

выступлениями на конференциях. По теме диссертации опубликовано 65 печатных работ, результаты работы докладывались на 37 конференциях различного уровня.

К диссертационной работе имеются некоторые замечания.

Хотелось бы, чтобы в работе было большее сравнение полученных в диссертации результатов с другими теоретическими результатами в исследуемом направлении.

Естественно, что использование многочисленных терминов требует более четкого их разграничения.

Данные замечания не являются достаточно существенными и не снижают общую положительную оценку представленной диссертации.

Учитывая актуальность, новизну и практическую ценность полученных результатов, можно утверждать, что диссертационная работа Литвиненко Юрия Алексеевича на тему «Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя, струйных течений и микроструйного горения», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «механика жидкости, газа и плазмы» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а Литвиненко Юрий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доктор физико-математических наук
профессор

Баутин Сергей Петрович
17 сентября 2021 года

Баутин С.П. – профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» дисциплин Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Снежинский физико-технический институт – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СФТИ НИЯУ МИФИ), 456776, Челябинская область, г. Снежинск, ул. Комсомольская, д. 8.

Электронный адрес: srbautin@mail.ru

Телефон: 8 912 77 87 054

Подпись профессора Баутина С.П. заверяю.

Магальник Ольга Прокопьевна
17.09

Председателю
диссертационного совета
Д 003035.02
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, Баутин Сергей Петрович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Литвиненко Юрия Алексеевича на тему: «Экспериментальные исследования неустойчивости пограничного слоя, струйных течений и микроструйного горения» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф.-м.н., дифференциальные уравнения; математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; механика жидкости, газа и плазмы
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.01.02 – дифференциальные уравнения, 1977 01.01.02 – дифференциальные уравнения, 1989
Ученое звание	Профессор
Академическое звание	
Тел:	8 (912) 77 87 054
E-mail:	spbautin@mail.ru
Должность	Профессор
Подразделение организации	Кафедра «Высшая и прикладная математика»
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Снежинский физико-технический институт
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: почтовый индекс, город, улица, дом	456776, г. Снежинск Челябинской области, ул. Комсомольская, д. 8
Web-сайт организации.	
Телефон организации.	8 (35146) 9 24 22
E-mail организации.	sfti@mephi.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 46 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название	Издательство,	Вид, год
---	--------	----------	---------------	----------

			журнал, год, №, страницы	
1	Баутин С.П., Макаров В.В.	Создание потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра	Вестник УрГУПС. 2016. № 4 (32). С. 39- 45.	Статья, 2016
2	Баутин С.П., Рощупкин А.В.	Численное моделирование движения воздушных потоков	Екатеринбург: УрГУПС, 2017. 42 с.	Препринт, 2017
3	Баутин С.П., Дерябин С.Л., Мезенцев А.В.	Моделирование стационарных восходящих закрученных потоков газа в окрестности контактной поверхности	Вычислительные технологии. 2018. Том 28, № 1. С. 19- 32.	Статья, 2018
4	Баутин С.П., Обухов А.Г., Баранникова Д.Д.	Численное моделирование огненных вихрей при учете сил тяжести и Кориолиса	Теплофизика высоких температур. 2018. Том 56, № 2. С. 241-246.	Статья, 2018
5	Баутин С.П., Николаев Ю.В.	Численное решение задачи о сжатии газа из покоя в покой	Вычислительные технологии. 2020, т.25, № 5. С. 55-65.	Статья, 2020
6	Баутин С.П., Обухов А.Г.	Численное моделирование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа	Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – 290 с.	Монография, 2020
7	Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г.	Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков	Екатеринбург: УрГУПС, 2020. 400 с.	Монография, 2020

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

Дата: 01.07.2021

*Подпись Баутин
Коральник от
Дроскуринка А.С.*

*товарищу
по и безопасности*