

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН Института

теоретичес

им. С

доктор С

чл.-корр. РАН _____

«17» января 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по диссертации Литвиненко Ю.А. «Экспериментальное исследование развития симметричной и несимметричной моды неустойчивости в пограничном слое, струйных течениях и микроструйном диффузионном горении» на соискание степени доктора физико-математических наук, выполненной в Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Литвиненко Юрий Алексеевич, 1979 года рождения, в 1999 г. был принят в лабораторию №10 на должность лаборанта-исследователя, после окончания НГТУ в 2002г. по специальности «авиа- и ракетостроение», зачислен в аспирантуру ИТПМ СО РАН. С 2003г. по 2007 г. работал в должности младшего научного сотрудника. В 2006 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Исследование развития и управления вторичной неустойчивостью продольной структуры в пограничных слоях» по специальности 01.02.05 (диплом ДКН № 007055, выданный 13 октября 2006 г.). В 2007г. переведен на должность научного сотрудника, с 2011г. старший научный сотрудник в составе лаборатории №8 «Аэрофизических исследований дозвуковых течений» ИТПМ СО РАН.

Научный консультант: Грек Генрих Рувимович, доктор физико-математических наук, лауреат диплома 2степени им. Н.Е. Жуковского, ведущий научный сотрудник в составе лаборатории №8 ИТПМ СО РАН.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Диссертация посвящена экспериментальному исследованию развития симметричной и несимметричной моды неустойчивости в пограничном слое, струйных течениях и микроструйном диффузионном горении.

2. Актуальность темы.

Современный этап развития техники, в частности, авиационного моторостроения и др., поставил перед инженерами и конструкторами ряд проблем, тесно связанных с устойчивостью и турбулизацией пристенных (пограничные слои) и свободных сдвиговых течений (струи) и возможностью управления данными процессами. Решение этих проблем зависит, во многом,

от понимания механизма ламинарно-турбулентного перехода, влияние на который оказывают многообразные 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 пристальное внимание исследователей обращено на роль локализованных продольных вихревых структур, так называемых полосчатых структур (английский термин «*streaky structures*») в процессе турбулизации как пристенных, так и свободных сдвиговых течениях. Их роль в механизме перехода, как и собственно представление о структуре и законах развития данных образований остаются не ясными и мало исследованными. Исследования процесса перехода в течениях с наличием подобных вихревых структур являются в настоящее время актуальными. С другой стороны, проблема устойчивости и турбулизации макро – и микроструйных течений, как и проблема устойчивости горения различных топлив в микроструях также являются актуальными задачами и их решение требует проведения новых, поскольку они до сих пор являются нерешенными, как теоретических, так и экспериментальных исследований. Актуальность проблемы управления процессами развития макро – и микроструйных течений, а также горения последних связана, прежде всего, с тем, что пока отсутствует полное понимание физических основ этих процессов, что требует получения и накопления новых знаний о них.

Анализ экспериментальных работ посвященных исследованиям струйных течений показал что, как правило, исследования проводятся при так называемых «естественных» условиях, и выводы делаются по осредненным характеристикам потока. Между тем, наличие когерентных структур определяет необходимость использовать иной методический подход для изучения таких течений. 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 метода контролируемых возмущений и синхронизацией процесса сбора данных в трехмерном объеме.

Для подготовки диссертации соискатель Литвиненко Ю.А. использовал научные результаты, полученные им при выполнении работ в рамках:

- грант РФФИ 2014-2015г.(14-08-31166 мол_a - «Устойчивость микроструйных течений при низком числе Рейнольдса и диффузионном горении в акустическом поле»

- грант РНФ 16-19-10330 «Влияние начальных и граничных условий на процессы перехода к турбулентности и горение в сдвиговых слоях сопровождающиеся возникновением и развитием локализованных возмущений»

Представленные результаты исследований являются Важнейшими научными достижениями Института Теоретической и Прикладной Механики им. С.А.

Христиановича СО РАН за 2007 год по комплексной программе "Механика жидкостей и газов".

3. Основные цели работы:

Исследовать развитие нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое; изучить физические процессы, ответственные за развитие и разрушение дозвуковой круглой макроструи; исследовать влияние начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструй; изучить этапы развития вихревых когерентных структур в свободной круглой струе и круглой струе в поперечном потоке; исследовать развитие дозвуковой круглой и плоской макро- и микроструи при воздействии акустического поля; исследовать факторы влияющие на устойчивость дозвуковых макро- и микроструй включая газовые струи при диффузионном горении.

4. Научная новизна работы.

- Обоснована и развита методика экспериментальных исследований с использованием искусственных возмущений, т.е. при «контролируемых» условиях.

- Установлено, что механизм нелинейного разрушения полосчатой структуры связан с процессом развития на ней вторичного высокочастотного возмущения и образованием когерентных структур типа Λ – вихрей как для синусоидальной, так и варикозной мод неустойчивости.

- Предложен и исследован механизм взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами в круглой макроструе с ударным профилем скорости на срезе сопла, приводящий к возникновению азимутальных «лучей» типа Λ , Ω -образных структур, интенсифицирующих процесс смещения струи с окружающим газом и ее быструю турбулизацию.

- Детально исследован механизм неустойчивости круглой макроструи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла. Показано, что он связан с неустойчивостью Кельвина - Гельмгольца.

- Исследован механизм неустойчивости круглой макроструи с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Показано, что в данной ситуации возникает область чисто ламинарного течения большой дальности при отсутствии кольцевых 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 как единое целое. Показано, что взаимодействие полосчатых структур с вихревыми структурами ламинарной плоской струи приводит к генерации азимутальных Λ , Ω – образных вихрей, способствующих интенсификации процесса смещения струи с окружающим газом и ускорению турбулизации струи.

- Установлено, что круглая струя с параболическим профилем скорости на срезе сопла в поперечном сдвиговом потоке подвергается сворачиванию в два стационарных противовращающихся вихря. Показано, что наиболее

неустойчивые глобальные моды с высокими частотами представляют собой волновые пакеты на паре противовращающихся вихрей, эти моды связаны с Ω -образными вихревыми структурами на слое сдвига струи. С другой стороны показано, что глобальные моды на низких частотах также имеют значительную амплитуду в следе струи ближе к стенке. Обнаружен рост проникновения струи в сдвиговой поперечный поток и подсос жидкости из поперечного потока в ближнем поле для параболической струи.

- Выявлено, что 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. Показано, что характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струи к акустическим возмущениям близки.

- Установлено, что механизм развития микроструи как с ударным, так и с параболическим профилем скорости на срезе сопла кардинально меняется по сравнению с макроструей. Обнаружено новое явление, связанное с трансформацией круглой микроструи в плоскую микрострую под воздействием поперечного акустического поля.

- Обнаружена бифуркация микроструи под воздействием поперечного акустического поля.

- Установлена принципиальная разница при 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.

- Показано, что новые явления, обнаруженные в процессе исследований развития как круглой, так и плоской микроструй, обусловлены соизмеримостью энергии поперечного акустического поля с энергией самих микроструй.

- Установлено, что пламя при горении круглой и плоской микроструи пропана и водорода подвержено бифуркации в поперечном акустическом поле.

5. Достоверность результатов подтверждена использованием отработанных методов измерений и алгоритмов обработки данных, повторяемостью результатов. Полученные данные хорошо согласуются с известными экспериментальными и расчетными результатами.

6. Научная и практическая значимость работы.

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. Знания, полученные при этом, дали возможность детально понять все особенности механизма развития и разрушения уже микроструйных течений, в том числе и их горение. Экспериментально исследованы и впервые выявлены основные особенности воздействия профиля скорости на срезе сопла и акустики на устойчивость и характеристики развития макро – и микроструй. Выявлены основные особенности горения микроструй и

воздействия акустики на пламя, связанное с уплощением круглой микроструи, синусоидальным колебанием и бифуркацией как микроструи, так и пламени. Впервые детально исследованы характеристики развития «области перетяжки пламени» и показана ее роль в процессе горения микроструй водорода.

Экспериментальные данные, полученные в работе, могут быть использованы для апробации развиваемых методов теоретических расчетов по устойчивости и эволюции микрострунных течений и их горению. Результаты исследований позволяют дать рекомендации по разработке и совершенствованию различных микрогорелочных устройств, особенно при горении водорода.

7. Личный вклад автора

Экспериментальные данные, представленные в работе, получены Литвиненко Ю.А. как лично, так и в составе различных авторских коллективов. Соискатель провел анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных, сформулировал заключения и выводы послужившие основной диссертации. Постановка экспериментальных задач осуществлялась соискателем лично и при согласовании с научным руководителем д.ф.-м.н. Г.Р. Греком. Автор принимал непосредственное участие при сборке экспериментальных установок, самостоятельно производил сборку отладку измерительного оборудования, производил измерения и обработку данных. Подготовка публикаций производилась как в коллективе соавторов, так и лично. Представление материалов диссертации согласовано с соавторами.

8. Положения, выносимые на защиту:

- 1. Разработка методики и установок для генерации и исследования процесса развития макро – и микроструйных течений и их горения.
- 2. Исследование нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости полосчатых структур в пограничном слое.
- 3. Исследования физических процессов, ответственных за развитие и разрушение дозвуковой круглой макроструи.
- 4. Исследования влияние начальных условий на срезе сопла на структуру и характеристики развития макроструи.
- 5. Исследования вихревых когерентных структур в свободной круглой струе и круглой струе в поперечном потоке.
- 6. Исследования дозвуковой круглой и плоской макро – и микроструи в поперечном акустическом поле.
- 7. Исследования по диффузионному струйному горению микроструи пропана, водорода при воздействии акустического поля.

9. Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на 24 российских и 13 международных конференциях.

10. Публикации.

Всего по теме диссертации опубликовано 65 печатных работ, 60 из них изданы в реферируемых журналах, рекомендованных для публикации ВАК РФ. Наиболее значимые из них:

Монография

1. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of Conventional and Combusting Subsonic Jet Instabilities. –Dordrecht: Springer International Publishing, 2016. –P. 126.DOI: 10.1007/978-3-319-26958-0_2 (BAK)

Журнальные издания

2. 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, No.4. -С. 559-567. (BAK)
3. 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, No.1. -С. 13-22. (BAK)
4. 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, No.3. -С. 339-364. (BAK)
5. Чернорай В.Г., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Лефдаль Л., Грек Г.Р., Чун Х.Х. Управление трансформацией L-структуры в турбулентное пятно с помощью риблет. // Теплофизика и аэромеханика. -2005. -Т.12, No.4. -С. 575-585. (BAK)
6. 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, No.3. -С. 359-376. (BAK)
7. 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, No.4. -С. 545-553. (BAK)
8. 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, No.1. -С. 47-53. (WoS, Scopus Q3)
9. 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, No.5. -С. 562-566. (WoS, Scopus Q2)
10. 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, No.2. -С. 166-171. (WoS, Scopus Q3)
11. Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л.Л., Грек Г.Р., Чун Х.Х. Влияние риблет на развитие л-структуры и ее преобразование в турбулентное пятно. // Доклады Академии наук. -2006. -Т.407, No.2. -С. 194-197 (WoS, Scopus Q3)
12. 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, No.2. -С. 189-192. (WoS, Scopus Q3)

13. Козлов В.В., Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Явление запырания микросопла при диффузионном горении водорода. // Доклады Академии наук. -2018. -Т.480, No.1. -С. 34-39. (WoS, Scopus Q2)
14. 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. (WoS, Scopus Q3)
15. Litvinenko Ya.A., Chernoray V.G., Kozlov V.V., Grek G.R., Lofedahl 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. (WoS, Scopus Q1)
16. Chernoray V.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Y.A. Spatial hot-wire visualization of the lambda-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. (BAK)
17. 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. (WoS, Scopus Q3)
18. 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. (BAK)
19. 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, No.3. (BAK)
20. 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. (BAK)
21. Chernoray V.G., Dovgal A.V., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A., Lofedahl 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. (BAK)
22. 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. (BAK)
23. 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. (BAK)
24. 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. (WoS, Scopus Q1)
25. 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. (WoS, Scopus Q1)
26. 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 (WoS, Scopus Q1)
27. 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. (WoS, Scopus Q1)
28. Kozlov V.V., Litvinenko Y.A., Chernoray V.G., Loefdahl 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. (WoS, Scopus Q4)
29. 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. (WoS, Scopus Q2)

1. УЧИТЫВАЯ ВЫШЕИЗЛОЖЕННОЕ, ПОСТАНОВИЛИ:

– диссертация Литвиненко Ю.А. является законченной научной работой, содержащей новые результаты по актуальной теме, выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук; опубликованные по теме диссертации научные работы отражают ее содержание;

– диссертация «Экспериментальное исследование развития симметричной и несимметричной моды неустойчивости в пограничном слое, струйных течениях и микроструйном диффузионном горении» Литвиненко Юрия Алексеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – “механика, жидкости, газа и плазмы”.

Заключение принято на заседании семинара "Теоретическая и прикладная механика" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

На заседании присутствовали: чл.-корр РАН А.Н. Шиплюк (председатель семинара), д.ф.-м.н. Гапонов С.И., д.ф.-м.н. Козлов В.В., д.т.н. Третьяков П.К., д.ф.-м.н. Косинов А.Д., д.ф.-м.н. Семенов Н.В., д.ф.-м.н. Поздняков Г.А., д.ф.-м.н. Хмель Т.А., д.ф.-м.н. Тупикин А.В., д.т.н. Бардаханов С.П., к.ф.-м.н. Краус Е.И., к.ф.-м.н. Литвиненко М.В., к.ф.-м.н. Зверков И.Д. и другие, всего 16 сотрудников с учёной степенью. Результаты голосования: "за" – 16 чел., "против" – 0 чел., "воздержалось" – 0 чел., протокол № 58 от 17 января 2020 г.

Зам. председателя семинара
Академик РАН

В.М. Фомин

Секретарь семинара
к.ф.-м.н.

Е.И. Головнева