

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН Института
теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН,
доктор физико-математических наук,

чл.-корр. РАН  А.Н. Шиплюк

«16» 08 2019г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции волнового пакета в сверхзвуковых пограничных слоях» выполнена в лаборатории №14 «Волновых процессов в сверхзвуковых течениях» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Яцких Алексей Анатольевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, в лаборатории №14 «Волновых процессов в сверхзвуковых течениях», в должности старшего лаборанта с высшим профессиональным образованием и младшего научного сотрудника.

В 2014 г. окончил физический факультет Новосибирского Государственного Университета по направлению «физика». В 2018 окончил аспирантуру в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по направлению 01.06.01 – Математика и механика.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов №778 от 23 сентября 2019 г. выдана Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией №14 «Волновых процессов в

сверхзвуковых течениях» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

- 1. Диссертация посвящена** экспериментальному исследованию развития контролируемых локализованных по времени и пространству возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла.
- 2. Актуальность темы.**

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

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

Для моделирования *естественного* сценария ламинарно-турбулентного перехода необходимо изучать эволюцию контролируемых возмущений, обладающих широким как пространственным, так и частотным спектральным составом (*волновые пакеты*). Контролируемые волновые пакеты с широким частотным и волновым составом могут быть искусственно возбуждены в пограничном слое с помощью локализованного во времени и

пространстве воздействия. Экспериментальные исследования с помощью контролируемых локализованных возмущений при малых дозвуковых скоростях потока позволили достичь значительного прогресса в понимании процессов ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях. Изучение развития локализованных волновых пакетов является эффективным и необходимым инструментом, позволяющим получать детальные и обширные данные по процессу турбулизации течений в пограничных слоях.

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

3. Научная новизна работы.

В работе экспериментальным путем впервые:

- Получены данные по пространственно-временному развитию локализованных волновых пакетов в пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла с углом стреловидности 40° при числе Маха 2;
- Изучено влияние временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего разряда на возбуждаемые с поверхности локализованные возмущения в сверхзвуковом пограничном слое при числах Маха 2, 3 и 4;
- Определены скорости распространения локализованных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины при числах Маха 2, 3 и 4;
- Определены нарастающие моды волнового пакета в пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла при числе Маха 2.

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

многочисленных российских и международных научных конференциях, а также публикациях в рецензируемых журналах.

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

6. Личный вклад автора.

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

7. Автором представляется к защите:

- Метод возбуждения контролируемых волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое с помощью импульсного тлеющего разряда, зажигаемого на поверхности экспериментальной модели;
- Результаты экспериментального исследования влияния временных и энергетических характеристик импульсного разряда на генерируемые им локализованные возмущения в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины при числах Маха 2, 3 и 4;
- Результаты по изучению пространственно-временного развития локализованных волновых пакетов в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2;
- Результаты экспериментальных исследований пространственно-временного развития контролируемых локализованных волновых пакетов в пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2.

8. Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре «Механика вязкой жидкости и турбулентность» ИТПМ СО РАН, а также на многочисленных российских и международных научных конференциях: Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2012; 2013; 2014; 2016; 2017), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Ижевск, 2014; Омск, 2015), Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2012; 2014; Шерегеш, 2017; 2018), Чаплыгинские чтения (Новосибирск, 2015), Международная конференция по методам аэрофизических исследований ICMAR (Новосибирск, 2014; Пермь, 2016), Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2017; 2019), Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды» (Новосибирск, 2017), International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM) (Монреаль, Канада, 2016), European Conference For Aeronautics And Space Sciences (EUCASS) (Милан, Италия, 2017), Нелинейные Задачи Теории Гидродинамической Устойчивости (НеЗаТеГиУс) (Звенигород, 2018), Модели и Методы Аэродинамики (Евпатория, 2019).

9. Публикации.

По теме диссертации опубликована 38 работ, в том числе 8 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

1. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Возбуждение и развитие волновых пакетов в сверхзвуковом сдвиговом слое // Вестник НГУ. Сер. Физика. - 2013. -Т.8, No.2. -С. 70-78.
2. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Теплофизика и аэромеханика. - 2015. -Т.22, No.1. -С. 17-28.
3. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. О пространственной структуре волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2015. -Т.58, No.7-2. - С. 132-136
4. Yermolaev Yu.G., Yatskikh A.A., Kosinov A.D., Semionov N.V. Wave analysis of the evolution of a single wave packet in supersonic boundary layer // 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR2016) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016): AIP Conference Proceedings. -Vol.1770. -S.l., 2016. -030037 p.
5. Yatskikh A.A., Rumenskikh M.S., Yermolaev Y.G., Kosinov A.D., Semionov N.V. Excitation of localized wave packet in swept-wing supersonic boundary layer // MATEC Web of Conferences: XXXIII Siberian Thermophysical Seminar (STS-33) (Russia, Novosibirsk, 6 - 8 Jun., 2017): Proceedings. -Vol.115, No.02015-paper. -S.l., 2017. -P. 1-4
6. Yermolaev Y.G., Yatskikh A.A., Kosinov A.D., Semionov N.V. Propagation of the wave packet in a boundary layer of swept wing at Mach number 2 // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017): Dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Russia, Novosibirsk, 5–9 Jun., 2017): AIP Conference Proceedings. -Vol.1893, No.1. -S.l.: AIP Publishing, 2017. -020007 p.
7. Yatskikh A.A., Ermolaev Y.G., Kosinov A.D., Semionov N.V. Hot-wire visualization of the evolution of localized wave packets in a supersonic flat-plate boundary layer // Journal of Visualization. - 2017. -Vol.20, No.3. -P. 549–557.
8. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Исследование влияния параметров импульсного разряда на порождаемые в сверхзвуковом пограничном слое локализованные возмущения // Письма в журнал технической физики. - 2019. -Т.45, No.5. -С. 59-62.

Учитывая вышеизложенное, постановили:

Диссертация Яцких Алексея Анатольевича «Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции волнового пакета в сверхзвуковых пограничных слоях» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Диссертация является законченной научной работой, содержащей новые результаты по актуальной теме. Опубликованные по теме диссертации научные работы отражают ее содержание.

Диссертация Яцких Алексея Анатольевича «Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции волнового пакета в сверхзвуковых пограничных слоях» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата 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 Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

На заседании присутствовали: чл.-корр. РАН Шиплюк А.Н., академик РАН Фомин В.М., д.ф.-м.н. Гапонов С.А., д.ф.-м.н. Козлов В.В., д.ф.-м.н. Семенов Н.В., д.ф.-м.н. Косинов А.Д., д.т.н. Запрыгаев В.И., д.ф.-м.н. Катасонов М.М., д.ф.-м.н. Качанов Ю.С., д.ф.-м.н. Лысенко В.И., д.ф.-м.н. Бойко В.М., к.ф.-м.н. Павленко А.М., к.ф.-м.н. Ермолаев Ю.Г., к.ф.-м.н. Поливанов П.А., к.ф.-м.н. Колосов Г.Л., к.ф.-м.н. Громько Ю.В. и другие, всего 16 сотрудников с учёной степенью. Результаты голосования: "за" – 16 чел., "против" – 0 чел., "воздержалось" – 0 чел., протокол № 53 от 16 августа 2019 г.

Зам. председателя семинара

Академик РАН

Секретарь семинара

к.ф.-м.н.



В.М. Фомин

Е.И. Головнева