

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию *Колосова Глеба Леонидовича* «Экспериментальное исследование развития контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Колосова Глеба Леонидовича посвящена экспериментальному исследованию ламинарно-турбулентного перехода вызванного неустойчивостью поперечного течения в пограничном слое на скользящем крыле при сверхзвуковой скорости потока.

Актуальность. С практической точки зрения, актуальность работы связана с разработкой сверхзвуковых пассажирских самолетов с ламинарным обтеканием части поверхности крыла и оперения. Даже небольшое снижение сопротивления за счет ламинаризации обтекания относительно малой части поверхности может заметно повысить дальность полета, что весьма важно для этого типа самолетов. Проектирование ламинарного крыла сверхзвукового самолета требует надежных методов предсказания линии ламинарно-турбулентного перехода на крыле относительно малого удлинения и сложной формы в плане. На нем могут развиваться, по крайней мере, два типа неустойчивых возмущений: волны Толлмина-Шлихтинга и вихри неустойчивости поперечного течения. Последние часто являются доминирующим типом возмущений, приводящим к разрушению ламинарного режима течения в пограничном слое. Механизм перехода вызванного неустойчивостью поперечного течения при сверхзвуковой скорости потока практически не исследован. Не ясно, какие возмущения – стационарные или нестационарные – доминируют в конкретных условиях эксперимента либо в полете. Также неизвестен механизм нелинейного развития возмущений, приводящий непосредственно к турбулизации

течения. Диссертация Колосова Г.Л. представляет собой важный шаг в изучении механизма ламинарно-турбулентного перехода вызванного неустойчивостью поперечного течения. Метод контролируемых возмущений, примененный в ней, дал возможность, во-первых, получить характеристики волн неустойчивости поперечного течения при линейном их развитии, а, во-вторых, изучить возможные механизмы их нелинейного взаимодействия. Исследование этих механизмов является важной частью фундаментальной проблемы описания ламинарно-турбулентного перехода. Это означает, что диссертация Колосова весьма актуальна и с точки зрения фундаментальной науки.

Научная новизна. Новизна работы состоит в том, что в ней впервые получены подробные характеристики нестационарных мод неустойчивости поперечного течения для сверхзвукового пограничного слоя при их действительно линейном развитии. С помощью измерений термоанемометром постоянного сопротивления при разных перегревах нити выполнено разделение возмущений на пульсации массового расхода и температуры торможения. Таким образом, получены данные по линейному развитию нестационарных мод неустойчивости поперечного течения пригодные для количественного сравнения с линейной теорией устойчивости. Также впервые методом контролируемых возмущений исследованы нелинейные эффекты, связанные с взаимодействием бегущих мод с частотами 10 и 20кГц между собой. Роль нелинейности убедительно продемонстрирована сравнением результатов для разной начальной амплитуды возмущений между собой. Показано, что часть нелинейных эффектов описывается механизмом субгармонического резонанса. Кроме того, впервые показано, что взаимодействие стационарных и бегущих мод происходит по механизму характерному для «наклонного перехода».

Научная и практическая значимость. Продемонстрирована эффективность применения методики введения контролируемых возмущений

посредством периодического разряда в случае пространственного трехмерного сверхзвукового пограничного слоя. Показано, что максимум пульсаций с частотами 10 и 20 кГц расположен при одном и том же значении координаты y . Этот факт упрощает проведение экспериментов по исследованию эволюции искусственных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое стреловидного крыла, т.к. внутри пограничного слоя измерения параллельно передней кромке достаточно проводить при одном значении координаты y . Экспериментальным путем получены количественные характеристики, описывающие линейное развитие возмущений с частотами 10 и 20 кГц (частотные параметры $F=0,23; 0,46 \times 10^{-4}$ соответственно). Полученные данные будут использованы для сравнения и проверки линейной теории гидродинамической устойчивости в пространственном сверхзвуковом пограничном слое. Экспериментально обнаружены механизмы взаимодействия бегущих и стационарных возмущений в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое по типу субгармонического и наклонного перехода в двумерном течении. В целом, полученные экспериментальные данные должны способствовать совершенствованию практических способов предсказания положения перехода в трехмерных сверхзвуковых пограничных слоях.

Достоверность работы обеспечивается использованием надежных апробированных методик и средств измерений, повторяемостью результатов, полученных в разное время.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы.

Введение представляет собой обзор предшествующих работ, описание актуальности работы, ее научной новизны и практической значимости. Также во введении сформулированы цели работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации.

В первой главе дается описание экспериментального оборудования, методики проведения экспериментов и обработки полученных данных;

представлена модель скользящего крыла. В первой главе приводится структура среднего течения в пограничном слое скользящего крыла и показана его однородность в измерительной области при числе Маха 2. Также в первой главе из анализа развития естественных возмущений показано, что возмущения с частотами 10 и 20 кГц являются неустойчивыми и усиливаются вниз по потоку. Показано, что источник возмущений расположен в области линейного развития возмущений.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментального исследования пространственно-волновой структуры контролируемых неустойчивых бегущих возмущений при числе Маха 2. Показано, что положение максимума амплитуды искусственных пульсаций локализовано по нормальной координате относительно поверхности крыла как для пространственных распределений, так и для энергонесущей части волновых спектров. Также во второй главе при помощи метода сканирования по перегревам датчика термоанемометра проведена процедура разделения возмущений на пульсации массового расхода и температуры торможения, показано, что внутри пограничного слоя отношение пульсаций составляет величину $-0,15$.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования линейной эволюции контролируемых бегущих возмущений в пространственном сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2. Экспериментальным путем определены основные пространственно-временные и спектрально-волновые характеристики развития волнового пакета неустойчивых возмущений с частотами 10 и 20 кГц. Показана несимметричность распределений как в пространстве, так и в волновом представлении, что демонстрирует существенную роль наличия поперечного течения в трехмерном пограничном слое.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментов в нелинейной области развития неустойчивых возмущений в пограничном слое скользящего крыла при числах Маха 2 и 2,5. Показано, что на начальном

этапе нелинейного развития пульсаций происходит взаимодействие бегущих возмущений подобно механизму субгармонического резонанса, а также взаимодействие бегущих и стационарных возмущений подобно механизму наклонного перехода. В экспериментах с периодическими наклейками на поверхности крыла наблюдалась интенсификация механизма взаимодействия бегущих и стационарных возмущений.

В заключении формулируются основные выводы работы.

Список использованных источников состоит из 173 ссылок.

В целом можно сказать, что диссертация представляет собой законченную работу, а полученные в ней результаты соответствуют поставленным целям и задачам. Тема диссертации полностью соответствует научной специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Основные результаты диссертации опубликованы в 9-ти статьях в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК. Всего публикаций по теме диссертации – 31.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.

Диссертация Колосова Г.Л., без сомнения, является законченным научным исследованием, содержащим решение задачи экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода, вызванного неустойчивостью поперечного течения на скользящем крыле при сверхзвуковой скорости потока. Работа выполнена на высоком методическом уровне, достоверность ее результатов не вызывает сомнения. Результаты, описанные в диссертации, помимо фундаментальной значимости, имеют очевидное практическое применение. Диссертация содержит обширный обзор литературы и четкую постановку задачи. Результаты, полученные лично автором диссертации, четко выделены в тексте работы. Материал диссертационной работы изложен достаточно ясно и подробно проиллюстрирован рисунками. Части работы логически связаны и создают целостную картину исследуемого явления. Содержание работы позволяет

сделать заключение, что ее автор провел целенаправленную работу по изучению линейного развития, а также механизмов нелинейного взаимодействия неустойчивых возмущений в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла.

Диссертация не лишена некоторых недостатков и в качестве замечаний можно высказать следующее:

1. При анализе нелинейного взаимодействия нестационарных возмущений с частотами 10 и 20кГц не объяснено появление максимума в β -спектре субгармоники в районе $\beta' = 1.6 - 1.8$ рад/мм. Величина этого максимума существенно больше амплитуды максимума при $\beta' \sim 0.2$, появление которого объясняется трехволновым резонансом. Это же справедливо и для скорости нарастания возмущений, которая при $\beta' = 1.8$ примерно вдвое выше, чем при $\beta' \sim 0.2$ (см. рис. 4.7).
2. Вывод о трехволновом резонансе не подкреплён измерениями фаз отдельных волн, участвующих в этом взаимодействии (хотя фазовые спектры измерялись и такие данные, наверное, имеются). Согласно теоретическим представлениям разность фаз участвующих в трехволновом резонансе возмущений должна оставаться постоянной.
3. Нет данных о том, ускоряют ли выявленные нелинейные взаимодействия нарастание возмущений. Инкременты нарастания основной волны и субгармоники при их линейном и нелинейном развитии, показанные на рис. 3.12 и 4.7 соответственно, приведены в разных единицах измерения. Судя по рис. 4.19, взаимодействие стационарных и нестационарных мод по механизму «наклонного перехода» лишь замедляет рост нестационарной моды. Это заставляет усомниться в том, что обнаруженные в работе нелинейные механизмы могут служить непосредственной причиной ламинарно-турбулентного перехода в условиях естественного развития возмущений.

4. Не ясно, каким образом определены спектральные плотности пульсаций скорости A_f и A_{fb} . В работе они являются безразмерными величинами. Однако, если интеграл от их квадрата по размерным частоте или частоте и волновому числу должен быть равен квадрату безразмерных пульсаций скорости, то эти величины должны иметь размерность $A_f [cek^{-1/2}]$; $A_{fb} [m^{-1/2}cek^{-1/2}]$. Очевидно, безразмерная спектральная плотность должна соответствовать спектру по безразмерным же частоте и волновому числу. Однако способ введения этих безразмерных параметров не описан. Неопределенность в определении спектральной плотности не дает возможности оценить уровень амплитуды возмущений, при котором начинаются нелинейные взаимодействия. В связи с этим не ясно, как выполнялось сравнение результатов эксперимента с расчетом развития триплета по слабонелинейной теории.
5. В работе практически нет сравнения результатов эксперимента с расчетами по линейной теории устойчивости, хотя эти расчеты были выполнены Б.В. Смородским. В частности отсутствует сравнение дисперсионного соотношения и формы профилей пульсаций массового расхода и температуры. На единственном рисунке 4.15, где приведены инкременты нарастания, рассчитанные по линейной теории, отсутствует масштаб.

Заключение

Указанные недостатки, по сути являются предложениями по дальнейшей обработке результатов эксперимента и сравнению их с данными расчета. Они не умаляют значение представленной работы и не влияют на ее оценку. Диссертация Колосова Г.Л. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является завершенной научно-квалификационной работой, которая является цельным и законченным научным исследованием. Работа имеет четкую цель, ее результаты обладают несомненной новизной и представляют значительный интерес. Работа прошла достаточную

апробацию, опубликована в ведущих журналах и доложена на многих конференциях.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа Колосова Глеба Леонидовича полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

д.ф.-м.н.

Устинов М.В.

«13» марта 2018г.

Устинов Максим Владимирович

д.ф.-м.н.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

Телефон: 8 (495) 5564564

E-mail: ustinov@tsagi.ru

Наименование организации: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Должность: заместитель начальника НИО-8

Интернет страница: <http://www.tsagi.ru>, телефон: 8(495) 5564205

Подпись д.ф.-м.н. Устинова Максима Владимировича удостоверяю

Ученый секретарь Ученого Совета ФГУП «ЦАГИ»

Д.т.н., доцент

Таковицкий С.А.



Председателю
диссертационного совета
Д 003035.02
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, Устинов Максим Владимирович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Колосова Глеба Леонидовича на тему: «Экспериментальное исследование развития контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю: доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, старший научный сотрудник.

Тел: (495) 5564564, E-mail: ustinov@tsagi.ru

заместитель начальника НИО-8

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

телефон: 8 (495) 556-42-05

адрес электронной почты: info@tsagi.ru

www-страница: <http://www.tsagi.ru/>

По теме рассматриваемой диссертации имею 39 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1) М. Н. Коган, В.М. Литвинов, А.А. Успенский, М.В. Устинов Снижение сопротивления трения при ламинаризации пограничного слоя с помощью диэлектрического барьерного разряда//Изв. РАН, МЖГ, 2012, №4, с. 62-74.

2) М.В. Устинов Восприимчивость пограничного слоя к нелинейно развивающейся турбулентности набегающего потока//Изв. РАН, МЖГ, 2013, № 5, с. 62-78.

3) М.В. Устинов Статистическое описание ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое при повышенной степени турбулентности потока// Изв. РАН, МЖГ, 2013, № 2, с. 60-69.

4) М.В. Устинов Генерация волн Толлмина-Шлихтинга турбулентностью потока// Изв. РАН, МЖГ, 2014, №4, с. 58-72

5) М.В. Устинов Устранение неустойчивости поперечного течения в пограничном слое на скользящем крыле с помощью диэлектрического барьерного разряда// Ученые записки ЦАГИ, 2015, Т. 46, №8, с. 3-15.

6) М.В. Устинов Ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое(обзор). Часть 1. Основные виды ламинарно-турбулентного перехода// Ученые зап. ЦАГИ, 2013, т.XLIV, №1, с.3-41

7) Устинов М.В. Ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое (обзор). Часть 2. Расчет положения перехода и методы ламинаризации обтекания крыла// Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 6. С. 3-27.

8) С.В. Мануйлович, М.В. Устинов Влияние подвода тепла на устойчивость поперечного течения в пространственном пограничном слое// Изв.РАН. Механика жидкости и газа,2014, № 5, с. 45–51

9) Ustinov, M.V., Uspensky, A.A., Urusov, A.Yu., Rusianov, D.A. Laminar-turbulent transition control by dielectric barrier discharge, Theory and experiment// 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014

10) Influence of turbulence scale and shape of leading edge on FST-induced laminar-turbulent transition// 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012, ICAS 2012, pp. 1071-1080.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

25 декабря 2017

Подпись