

УДК: 532.526

Механизмы распределенного и локализованного порождения нестационарных гёртлеровских мод вихрями набегающего потока*

А.В. Иванов, Ю.С. Качанов, Д.А. Мищенко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: D.A.Mischenko@itam.nsc.ru

Настоящая работа посвящена изучению нескольких, предположительно наиболее эффективных, механизмов порождения нестационарных вихрей Гёртлера в ламинарном пограничном слое над вогнутой стенкой (т.е. механизмов вихревой восприимчивости) при рассеянии двух- и трехмерных вихрей свободного течения на трех- и двумерных неоднородностях поверхности (локализованных в продольном направлении) и потока. Эксперименты проведены с использованием метода контролируемых нестационарных возмущений. Обнаружено, что взаимодействие распространяющихся вниз по потоку трехмерных вихрей свободного течения с нарастающим пограничным слоем (естественной двумерной неоднородностью потока) приводит к весьма эффективному порождению нестационарных гёртлеровских мод. Найдено, что в этом случае механизм распределенной восприимчивости способен значительно изменять скорости нарастания порождаемых нестационарных гёртлеровских вихрей по сравнению с законами линейной устойчивости. В работе даны определения и получены оценки величин соответствующих коэффициентов распределенной вихревой восприимчивости. Несмотря на высокую точность измерений и довольно широкий диапазон исследованных параметров задачи, порождения вихрей Гёртлера другими исследованными механизмами зафиксировано не было.

Ключевые слова: ламинарный пограничный слой, вогнутая стенка, неоднородности поверхности, нестационарная неустойчивость Гёртлера, вихревая восприимчивость, коэффициенты распределенной восприимчивости.

Введение

Неустойчивость Гёртлера может возникать в ламинарном пограничном слое на вогнутой поверхности и существенно влиять на его характеристики: приводить к более ранней турбулизации (по сравнению со случаем пограничного слоя на плоской стенке), усиливать тепло- и массоперенос, изменять сопротивление трения и т.д. Неустойчивость проявляется в усилении параллельных потоку так называемых гёртлеровских вихрей (см., например, обзор [1]). За последние годы в экспериментальных исследованиях гёртлеровской неустойчивости достигнуты значительные успехи. В работе [2] была предложена новая методика экспериментального изучения гёртлеровских вихрей, которая впервые позволила измерить с большой точностью характеристики вихрей Гёртлера очень малых амплитуд (десятые и сотые доли процента от скорости потока), а также дала возможность изучать нестационарную гёртлеровскую неустойчивость. Под нестационарными вихрями Гёртлера здесь и в предшествующих работах понимаются вихри

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-01-00109).

со знакопеременным, осциллирующим во времени направлением их вращения вокруг продольных потоку осей. Суть метода заключается в использовании квазистационарных, а также существенно нестационарных контролируемых возмущений взамен традиционно используемых стационарных, что на практике дает возможность за счет использования техники осреднения по ансамблям повторяющихся реализаций и Фурье-анализа на несколько порядков увеличить точность измерений и одновременно на 2–3 порядка уменьшить характерные амплитуды контролируемых возмущений по сравнению с другими экспериментальными подходами. Благодаря применению указанной экспериментальной методики в работе [2] была впервые надежно исследована линейная стадия развития неустойчивости Гёртлера и проведена верификация нескольких линейных теорий устойчивости. Расчеты [3], проведенные независимо от работы [2], также показали хорошее согласование с полученными экспериментальными данными.

За последнее 20 лет были разработаны новые экспериментальные подходы к исследованию механизмов локализованной и распределённой восприимчивости течений к различным внешним возмущениям потока и стенки, а также их комбинаций (см. работы [4–12] и др.). В частности, в задачах локализованной восприимчивости созданы и успешно применены методики нахождения амплитуд и фаз коэффициентов линейной восприимчивости в частотно-волновом Фурье-пространстве. Эти коэффициенты не зависят от конкретной формы и амплитуд внешних возмущений в физическом пространстве и могут напрямую использоваться для оценок начальных амплитуд возбуждаемых мод неустойчивости (например, волн Толлмина–Шлихтинга, вихрей и волн неустойчивости поперечного течения) и для верификации соответствующих теорий восприимчивости. Были созданы методы количественного исследования задач распределённой (по продольной координате) восприимчивости течений к возмущениям потока и стенки, введены понятия коэффициентов линейной распределённой восприимчивости, разработаны и успешно применены в ряде задач способы нахождения амплитуд и фаз этих коэффициентов в Фурье-пространстве по экспериментальным данным путем аппроксимации полученных экспериментальных распределений аналитическими решениями соответствующих эволюционных уравнений с неизвестными коэффициентами. Полученные в этих работах результаты, а также подходы, предложенные в [2], впервые дали возможность приступить к количественным экспериментальным исследованиям механизмов порождения нестационарных (в общем случае) гёртлеровских вихрей под действием внешних возмущений. Так, эксперименты [13] посвящены изучению восприимчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к неоднородностям поверхности. В работе получены соответствующие коэффициенты восприимчивости, которые могут быть использованы для оценок эффективности порождения гёртлеровских мод и верификации теорий восприимчивости.

Известно, что влияние турбулентности набегающего потока (ТНП) также может являться одним из важных факторов, ответственных за порождение вихрей Гёртлера. Эксперименты [14, 15] показали, что ТНП может существенно влиять на характеристики стационарных гёртлеровских мод. Последующие эксперименты [16] были направлены на изучение этого явления. В этих экспериментах использовалась сеточная турбулентность, причем интенсивность и масштаб ТНП варьировались за счет изменения размера ячеек сеток, а также за счет расстояния до передней кромки модели, на котором они были установлены. В случае, когда сетки располагались на слишком большом расстоянии от передней кромки, интенсивность ТНП быстро ослабевала за счет диссипации и порождения гёртлеровских мод в пограничном слое не наблюдалось и, напротив, в случае, когда сетки располагались вблизи передней кромки, регистрировалось достаточно эффективное порождение гёртлеровских мод, причем поперечная длина порождаемых возмущений изменялась с изменением размера ячейки сеток. Эти исследования показывают, что поток с повышенной степенью турбулентности действительно способен приводить к порождению гёртлеровских вихрей.

Вопрос об эффективности преобразования широкого спектра возмущений свободного потока в собственные моды возмущений пограничного слоя (в гёртлеровские моды) является весьма актуальным, так как многие практически важные аэрогазодинамические устройства функционируют в условиях повышенной степени турбулентности свободного потока (типичным примером может служить работа лопаток турбомашин.) Один из возможных механизмов такого преобразования может быть связан со взаимодействием ТНП с локализованными (по продольной координате) неоднородностями поверхности или, другими словами, с рассеянием вихрей свободного потока на неоднородностях поверхности (неровностях или вибрациях). Такие механизмы относятся к задачам локализованной восприимчивости. С другой стороны, продольные вихри свободного потока могут возбуждать моды неустойчивости пограничного слоя за счет взаимодействия таких вихрей с естественной неоднородностью нарастающего пограничного слоя и влиять на развитие порождаемых возмущений вниз по потоку. Задачи такого рода принято относить к механизмам распределенной восприимчивости; они решались ранее экспериментально для механизмов возбуждения волн Толлмина–Шлихтинга [6, 7] и мод неустойчивости поперечного течения [8, 9]. В теоретической работе [3] рассматривался также третий — смешанный вариант порождения гёртлеровских мод. Здесь вихри набегающего потока проникают в пограничный слой, в зоне, непосредственно прилегающей к передней кромке модели (соответствующей малым числам Гёртлера — основного параметра соответствующей задачи устойчивости), приводят к порождению полосчатых структур, которые затем преобразуются в моды гёртлеровской неустойчивости. При этом далее ТНП уже не оказывает на развитие гёртлеровских мод заметного влияния. Исследованию задач восприимчивости первых двух типов из числа вышеотмеченных и посвящены данные эксперименты.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования четырех возможных механизмов возбуждения нестационарных вихрей Гёртлера за счет: (а) — рассеяния двумерных вихрей набегающего потока на локализованных по продольной координате трехмерных неоднородностях поверхности; (б) — рассеяния трехмерных вихрей набегающего потока на локализованных по продольной координате двумерных (т.е. однородных по размаху) неоднородностях поверхности; (с) — рассеяния двумерных вихрей набегающего потока на «естественных», неконтролируемых трехмерных неоднородностях основного течения (например, неконтролируемой модуляции толщины пограничного слоя в направлении размаха, искажениях среднего потока, вызванных усиливаемыми неустойчивостью неконтролируемыми стационарными вихрями Гёртлера и др.); (д) — рассеяния трехмерных вихрей набегающего потока на естественной двумерной неоднородности основного течения, обусловленной присутствием нарастающего пограничного слоя. Случаи (а) и (б) представляют собой локализованные (по продольной координате) механизмы вихревой восприимчивости, в то время как (с) и (д) соответствуют распределенным механизмам вихревой восприимчивости. Измерения проведены в широком диапазоне параметров задачи с использованием метода контролируемых возмущений.

1. Условия и методика экспериментов

Эксперименты проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости среднего течения на границе пограничного слоя $U_e = 9,18$ м/с и степени турбулентности на входе рабочей части трубы, не превышающей 0,02 % в частотном диапазоне выше 1 Гц. Основные измерения выполнены термоанемометром. Температура потока составляла примерно 21 °С.

Исследуемое течение представляло собой пограничный слой, близкий к течению Блазиуса, развивающийся на вогнутой поверхности (2) высокоточной экспериментальной модели (рис. 1) с радиусом закругления $R = 8,37$ м, длиной 2,38 м и шириной (по размаху) 0,996 м. Установленная над моделью регулируемая ложная стенка (5) обеспечивала

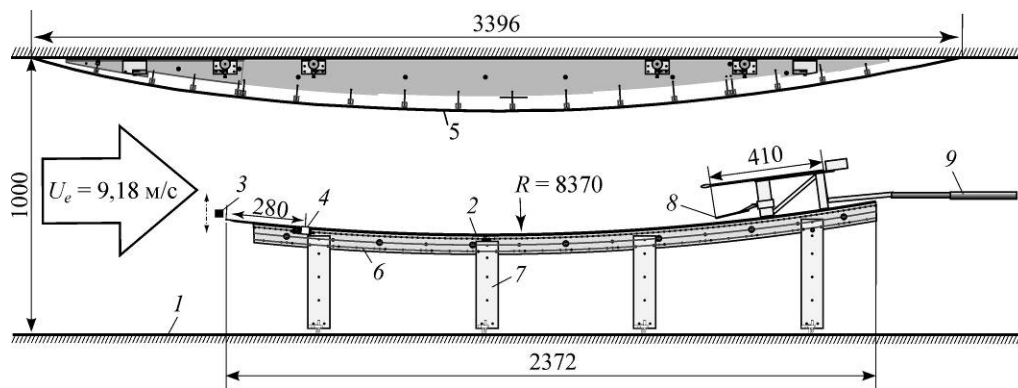


Рис. 1. Схема экспериментальной модели.

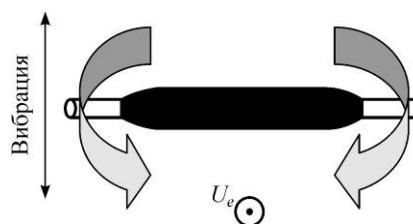
1 — стенка аэродинамической трубы, 2 — вогнутая поверхность экспериментальной модели, 3 — источники вихрей набегающего потока (вибрирующие проволоочки), 4 — источники неоднородностей поверхности (вибраторы), 5 — адаптивная ложная стенка, 6 — жесткий каркас из нервюр заданного радиуса закругления, 7 — несущие опоры (плоские пластины, установленные параллельно потоку), 8 — датчик термоанемометра, 9 — координатное устройство.

практически нулевой продольный градиент статического давления в условиях эксперимента. Строго фиксированную кривизну рабочей поверхности модели задавал жесткий каркас из собранного в блок набора дюралюминиевых дугообразных нервюр (6). К каркасу была притянута пластина из оргстекла толщиной 8 мм. По ее поверхности передвигалось координатное устройство (9), которое позволяло позиционировать датчик термоанемометра (8) в любой точке области измерений. Пластина имела утонченную (до 3-х мм) носовую часть с цилиндрической передней кромкой. Конструкция модели обеспечивала высокую степень постоянства кривизны обтекаемой поверхности на всем её протяжении и в то же время позволяла минимизировать неконтролируемые неоднородности стенки по размаху, которые могли служить затравками для развития естественных, т.е. неконтролируемых, гёртлеровских вихрей. В принятой системе координат ось x является криволинейной (параллельна вогнутой поверхности) и направлена вниз по потоку, ось z — направлена по размаху модели, а ось y — всегда нормальна к поверхности модели. Точка $(x = 0, z = 0)$ находится на середине передней кромки модели.

В проведенных экспериментах область основных измерений находилась в диапазоне продольных координат $x = 312 \div 1050$ мм, что соответствует диапазону чисел Гёртлера $G^* = (U_e \delta^* / \nu) \sqrt{\delta^* / R} = 7,4 \div 21,3$, где $\delta^* = 1,08 \div 2,19$ — толщина вытеснения пограничного слоя, ν — кинематическая вязкость воздуха. В отличие от многих других проблем гидродинамической устойчивости число Рейнольдса $Re^* = (U_e \delta^* / \nu) = 649 \div 1318$ не является определяющим параметром исследуемой задачи.

Двумерные (т.е. однородные по размаху) вихревые возмущения свободного течения генерировались вибрирующей проволоочкой (3) диаметром либо 50, либо 200 мкм, натянутой параллельно передней кромке модели на расстоянии 27 мм вверх по потоку от ее передней кромки. Проволочка приводилась в движение двумя миниатюрными шаговыми двигателями, смонтированными на боковых стенках аэродинамической трубы (см. [6, 7]). Гармонические колебания проволоочки по нормали к потоку и к передней кромке модели приводили к образованию в потенциальном течении контролируемой антисимметричной вихревой дорожки типа дорожки Кармана, но очень малой амплитуды. Положение вибрирующей проволоочки относительно поверхности модели было настроено так, чтобы генерируемая ею вихревая дорожка распространялась вблизи внешней границы нарастающего пограничного слоя.

Рис. 2. Схема возбуждения трехмерных вихрей в набегающем потоке вибрирующей проволокой с локальной неоднородностью.



Трехмерные (т.е. неоднородные по размаху) вихревые возмущения свободного потока со значительной величиной продольной завихренности создавались при помощи локализованной неоднородности, нанесенной на изначально однородную вибрирующую проволоку диаметром 50 мкм. Диаметр неоднородности составлял 100 мкм, а ее длина — 4,5 мм (рис. 2). Трехкомпонентные термоанемометрические измерения подтвердили, что возмущения потока, образующиеся в следе за такой неоднородностью, имеют значительную продольную компоненту завихренности (сбоку от неоднородности вихревая дорожка оставалась двумерной).

Контролируемые неоднородности поверхности располагались на расстоянии 280 мм от передней кромки модели (см. 4 на рис. 1) и создавались специальными вибраторами двух типов. Вибратор первого типа был аналогичен тем, что использовались в работе [13], и представлял собой набор одинаковых эластичных круглых мембран, расположенных с фиксированным шагом вдоль размаха модели на предельно близком расстоянии друг от друга (рис. 3). Колебания мембран, сделанных из латексной пленки толщиной около 80 мкм, возбуждались с помощью блока из восьми заглушенных динамических громкоговорителей, которые были расположены вне рабочей части аэродинамической трубы и соединялись с полостями под мембранами гибкими пневмотрассами. Передаваемые пневмотрассами пульсации давления приводили мембраны в колебательное движение. Соседние мембраны колебались в противофазе. Создаваемые таким образом неоднородности поверхности были существенно трехмерными и периодическими по размаху модели. В настоящем эксперименте использовался источник, способный моделировать трехмерные неоднородности с поперечной длиной волны $\lambda_z = 8$ мм (рис. 3). Вибратор второго типа создавал двумерные неоднородности поверхности. Он имел похожее устройство, однако его поверхность представляла собой одну вытянутую по размаху модели мембрану шириной 9 мм и длиной 160 мм.

Во время основных измерений сигнал с выхода термоанемометра (как и сигналы платинового термометра сопротивления и электронного манометра, измерявших температуру и скорость потока) подавался на персональный компьютер синхронно с опорным сигналом источника возмущений через восьмиканальный BNC-2120 коннектор и 16-битный аналого-цифровой преобразователь PCI-6035E National Instruments. Сбор экспериментальных данных и линеаризация сигнала термоанемометра осуществлялись с помощью компьютерных программ, реализованных в среде MATLAB с использованием констант закона Кинга. Эти константы получались в процессе тарировки датчика, которая проводилась в аэродинамической трубе периодически, непосредственно перед каждой серией измерений. Линеаризованный сигнал подвергался осреднению

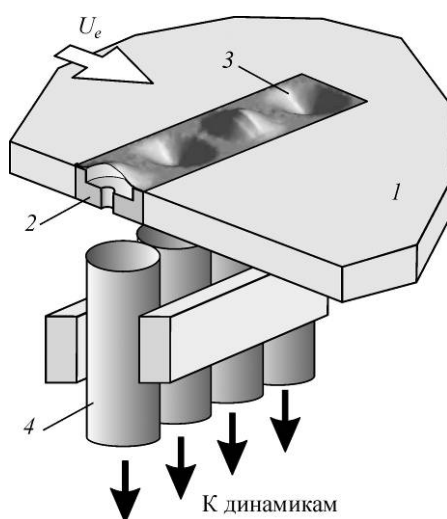


Рис. 3. Схема источника локализованных неоднородностей поверхности.

1 — поверхность модели, 2 — специальная вставка, 3 — мембраны, 4 — пневмотрассы.