

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

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

misch2005@yandex.ru

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОД ГЁРТЛЕРОВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ВОГНУТОЙ СТЕНКЕ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА *

Представлены результаты первого экспериментального исследования распределенного порождения гёртлеровских мод за счет действия механизма распределенной восприимчивости пограничного слоя на вогнутой поверхности к продольным вихрям набегающего потока. Исследования проведены в следующем диапазоне параметров задачи: чисел Гёртлера $G^* = 7,4 \div 21,3$, частоты $f_v = 15, 20$ и 26 Гц (безразмерный частотный параметр $F = 17,04; 22,72$ и $29,54$) и широком диапазоне поперечных потоку масштабов возмущений $\lambda_z = 8 \div 24$ мм (безразмерный масштаб $\Lambda = 149 \div 774$). Обнаружено, что этот механизм является достаточно эффективным и способен приводить к усилению нестационарных гёртлеровских вихрей даже в тех режимах, в которых пограничный слой является линейно устойчивым к таким возмущениям. В работе впервые получены оценки количественных характеристик исследуемого физического явления – комплексных значений коэффициентов распределенной вихревой восприимчивости. Обнаружено, что исследуемый механизм наиболее эффективен для вихрей с поперечными длинами волн близким к наиболее «опасным» с точки зрения линейной теории устойчивости. Найдено, что амплитуды коэффициентов восприимчивости убывают с продольной координатой.

Ключевые слова: механика вязкой жидкости, пограничный слой, переход к турбулентности, вихревая распределённая восприимчивость, нестационарная неустойчивость Гёртлера.

Введение

Задача гёртлеровской неустойчивости является составной частью более общей проблемы возникновения турбулентности и имеет большое фундаментальное и прикладное значение (см., например, обзор в [1]). Эта неустойчивость может возникать в широком классе сдвиговых течений с искривленными линиями тока в результате сильной неоднородности действия центробежных сил. В частности, хорошо известно, что ее появление в пограничном слое над вогнутой поверхностью способно существенно влиять на его характеристики: приво-

дить к более ранней турбулизации (по сравнению со случаем пограничного слоя над плоской и выпуклой поверхностями), усиливать тепло- и массоперенос, изменять сопротивление трения и т. д. Эти явления происходят вследствие усиления параллельных потоку гёртлеровских вихрей. В настоящее время в исследовании гёртлеровской неустойчивости наметились значительные успехи. В работе [1] была предложена новая методика экспериментального изучения гёртлеровских мод, которая впервые позволила с большой точностью измерить характеристики вихрей очень малых амплитуд (десятые и сотые доли процента от скорости

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-01-31211).

потока), а также дала возможность изучать нестационарную гёртлеровскую неустойчивость. Новые экспериментальные подходы, разработанные в последние годы для исследования механизмов восприимчивости течений к разнообразным внешним возмущениям (см. [2; 3] и др.), а также подходы, предложенные в [1], впервые дают возможность приступить к количественным экспериментальным исследованиям механизмов порождения нестационарных (в общем случае) гёртлеровских вихрей. Так, в работе [4] экспериментально исследована восприимчивость пограничного слоя на вогнутой стенке к локализованным (в направлении потока) неоднородностям поверхности. В результате найдены соответствующие коэффициенты восприимчивости, которые, будучи определёнными в Фурье-пространстве, не зависят от конкретной формы неоднородностей и могут быть использованы для оценок эффективности порождения гёртлеровских вихрей и верификации теорий восприимчивости.

Влияние турбулентности набегающего потока также может являться одним из основных факторов, ответственных за порождение вихрей Гёртлера. Известно, что в результате действия механизма неустойчивости, в пограничном слое нарастают возмущения с параметрами, соответствующими определённой области частотно-волнового спектра. Изучение различных механизмов преобразования широкого спектра возмущений свободного потока в собственные моды возмущений пограничного слоя (в частности, в гёртлеровские моды) является важной научной задачей. Один из возможных механизмов такого преобразования может быть связан с взаимодействием турбулентности свободного потока 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 порождать гёртлеровские вихри за счёт взаимодействия с естественной неоднородностью нарастающего пограничного слоя, и влиять на развитие последних вниз по потоку. Задачи такого рода принято относить к механизмам распределённой восприимчиво-

сти; они решались ранее экспериментально для механизмов возбуждения волн Толлмина – Шлихтинга [5; 6] и мод неустойчивости поперечного течения [7; 8]. Исследование этих задач является весьма актуальным, так как многие практически важные аэродинамические устройства функционируют в условиях повышенной степени турбулентности свободного потока. (Типичным примером может служить работа лопаток турбомашин.)

В данной работе экспериментально исследован практически важный случай рассеяния трехмерных, продольных потоку вихрей основного течения на естественной двумерной неоднородности пограничного слоя, нарастающего на вогнутой стенке. Эксперименты проведены с использованием метода контролируемых нестационарных возмущений в широком диапазоне параметров. Обнаружено, что действие указанного механизма восприимчивости приводит к весьма эффективному порождению гёртлеровских мод.

Экспериментальная модель и режимы измерений

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

Исследования проведены в пограничном слое Блазиуса, развивающемся на поверхности высокоточной экспериментальной модели (рис. 1). Ее рабочая поверхность представляет собой вогнутую цилиндрическую стенку (2) с радиусом закругления $R = 8,37$ м, длиной 2,38 м и шириной (по размаху) 0,996 м. Установленная над ней регулируемая ложная стенка (4) обеспечивает практически нулевой продольный градиент статического давления в условиях эксперимента. Строго фиксированную кривизну рабочей поверхности модели задает жесткий каркас из собранного в блок набора дюралюминиевых дугообразных нервюр (5). К каркасу притянута пластина из оргстекла толщиной 8 мм. По ее поверхности передвигается координатник (8), который позволяет

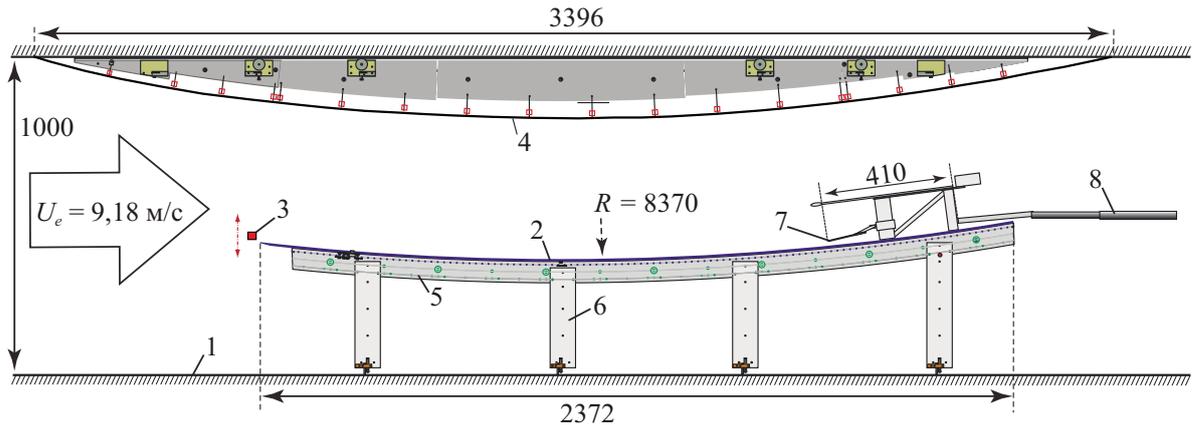


Рис. 1. Схема экспериментальной модели: 1 – стенка аэродинамической трубы; 2 – вогнутая поверхность экспериментальной модели; 3 – источник вихрей набегающего потока (вибрирующая проволочка); 4 – адаптивная ложная стенка; 5 – жесткий каркас из нервюр заданного радиуса закругления; 6 – несущие опоры (плоские пластины, установленные параллельно потоку); 7 – датчик термоанемометра; 8 – координатное устройство

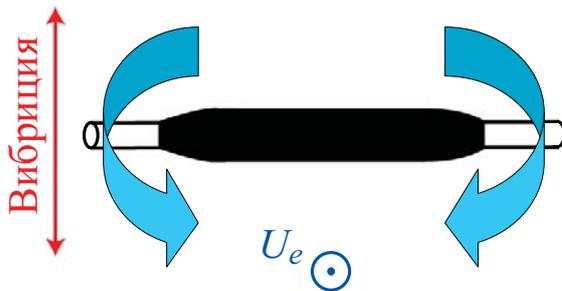


Рис. 2. Схема возбуждения 3D-вихрей вибрирующей проволочкой с локальной неоднородностью

$$G^* = (U_e \delta^* / \nu) \sqrt{\delta^* / R} = 7,4 \div 21,3.$$

Здесь δ^* – толщина вытеснения пограничного слоя, ν – кинематическая вязкость воздуха.

Трехмерные возмущения свободного потока с продольной завихренностью создавались специальным источником – вибрирующей проволочкой (3) диаметром 50 мкм с нанесенной на нее локальной неоднородностью длиной $L = 4,5$ мм и диаметром $D = 100$ мкм (рис. 2). Проволочка была натянута параллельно передней кромке модели на некотором расстоянии от нее вверх по потоку и приводилась в движение двумя миниатюрными шаговыми двигателями, смонтированными на боковых стенках аэродинамической трубы (см. [5; 6]). Как показали трехкомпонентные термоанемометрические измерения, гармонические колебания такой проволочки в нормальной потоку и параллельной передней кромке плоскости приводили к образованию (в следе за локальной неоднородностью) контролируемой вихревой дорожки со значительной продольной потоку компонентой завихренности. (Сбоку от неоднородности создаваемые проволочкой возмущения оставались двумерными и представляли собой антисимметричную вихревую дорожку типа дорожки Кармана, но очень малой амплитуды.) Положение вибрирующей проволочки относительно поверхности модели было выбрано так, чтобы генерируемые ею вихревые

позиционировать датчик термоанемометра (7) в любой точке области измерений. Пластина имеет утонченную (до 3 мм) носовую часть с цилиндрической передней кромкой. Конструкция модели обеспечивает высокую степень постоянства кривизны обтекаемой поверхности на всем протяжении модели и в то же время позволяет минимизировать неконтролируемые неоднородности поверхности по размаху, которые могут служить затравками для «естественных», т. е. неконтролируемых, гёртлеровских вихрей.

В проведенных экспериментах область основных измерений находилась в диапазоне продольных криволинейных (параллельных вогнутой поверхности) координат $x = 312 \div 1050$ мм, отсчитываемых от передней кромки, что соответствует диапазону чисел Гёртлера

возмущения распространялась вблизи внешней границы нарастающего пограничного слоя.

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 по ансамблю реализаций синхронно с опорным сигналом источника возмущений. В результате полученные сигналы были синхронизированы по времени и содержали как амплитудную, так и фазовую информацию. Эти сигналы подвергались Фурье-преобразованию по времени, с тем чтобы получить амплитуды и фазы возмущений на частоте возбуждения вихрей свободного потока f . При дальнейшей обработке измеренные по размаху модели распределения амплитуд и фаз возмущений подвергались пространственному Фурье-анализу с целью получения амплитуд и фаз мод частотно-волнового спектра. Скорость среднего потока измерялась в течение $10 \div 15$ секунд в каждой точке пространства.

Исследования проведены для трех частот возмущений $f_v = 15, 20$ и 26 Гц (безразмерный частотный параметр $F = 2\pi f v / U_e \cdot 10^6 = 17,04; 22,72; 29,54$) в широком диапазоне значений поперечных волновых чисел возмущений. В исследованном диапазоне чисел Гёртлера ($G^* = 7,4 \div 21,3$) и безразмерных поперечных длин волн $\Lambda = (U_e \lambda_z / v) \cdot (\lambda_z / R)^{1/2} = 149 \div 774$ (соответствующие размерные величины $\lambda_z = 8 \div 24$ мм) порождаемые гёртлеровские вихри, согласно линейной теории устойчивости, соответствовали либо нарастающим, либо нейтрально устойчивым, либо затухающим вниз по потоку (см. [1]).

Порождение и развитие возмущений пограничного слоя

Измерения показали, что возмущения, возникающие в пограничном слое в результате действия механизма распределенной восприимчивости, были локализованы в направлении размаха модели в области существования продольных, трехмерных контролируемых вихрей набегающего потока. На рис. 3, а показан типичный профиль возмущений, измеренный в пограничном слое вдоль размаха модели (координата z) – амплитуды (левая шкала) и фазы (правая шкала) возмущений продольной скорости потока. Измерения проведены на расстоянии от стенки, примерно соответствующем максимуму амплитуд нестационарных гёртлеровских вихрей, $-U(y)/U_e = 0,6$ [1] (здесь $U(y)$ – локальная продольная компонента скорости потока на расстоянии от стенки y). Измеренные возмущения представляют собой локализованный по размаху волновой пакет. Положение максимумов его амплитуд по размаху соответствует положению пары контролируемых трехмерных (продольных) вихрей свободного потока, создаваемых неоднородностью вибрирующей проволоочки, описанной выше.

На рис. 3, б показаны нормальные стенке профили амплитуд и фаз возмущений, измеренные вдали от положения неоднородности вибрирующей проволоочки, т. е. вдали от положения пары 3D-вихрей свободного потока (в сечении I рис. 3, а). Вертикальной штрихпунктирной линией показано примерное положение границы пограничного слоя ($y = \delta$). Вибрирующая проволоочка без неоднородности приводит к возникновению в потоке антисимметричной вихревой дорожки, амплитудный профиль которой имеет два «горба», колеблющихся в противофазе. Такие неоднородности свободного потока не приводят к порождению возмущений в пограничном слое (см. рис. 3, б) – амплитуды монотонно убывают в пристенной области с уменьшением расстояния до поверхности модели.

Совершенно другая картина наблюдается в области, соответствующей положению продольных вихрей, генерируемых в свободном потоке неоднородностью. На рис. 3, в приведены соответствующие профили, измеренные в сечении II рис. 3, а. Здесь в пограничном слое зафиксировано порождение

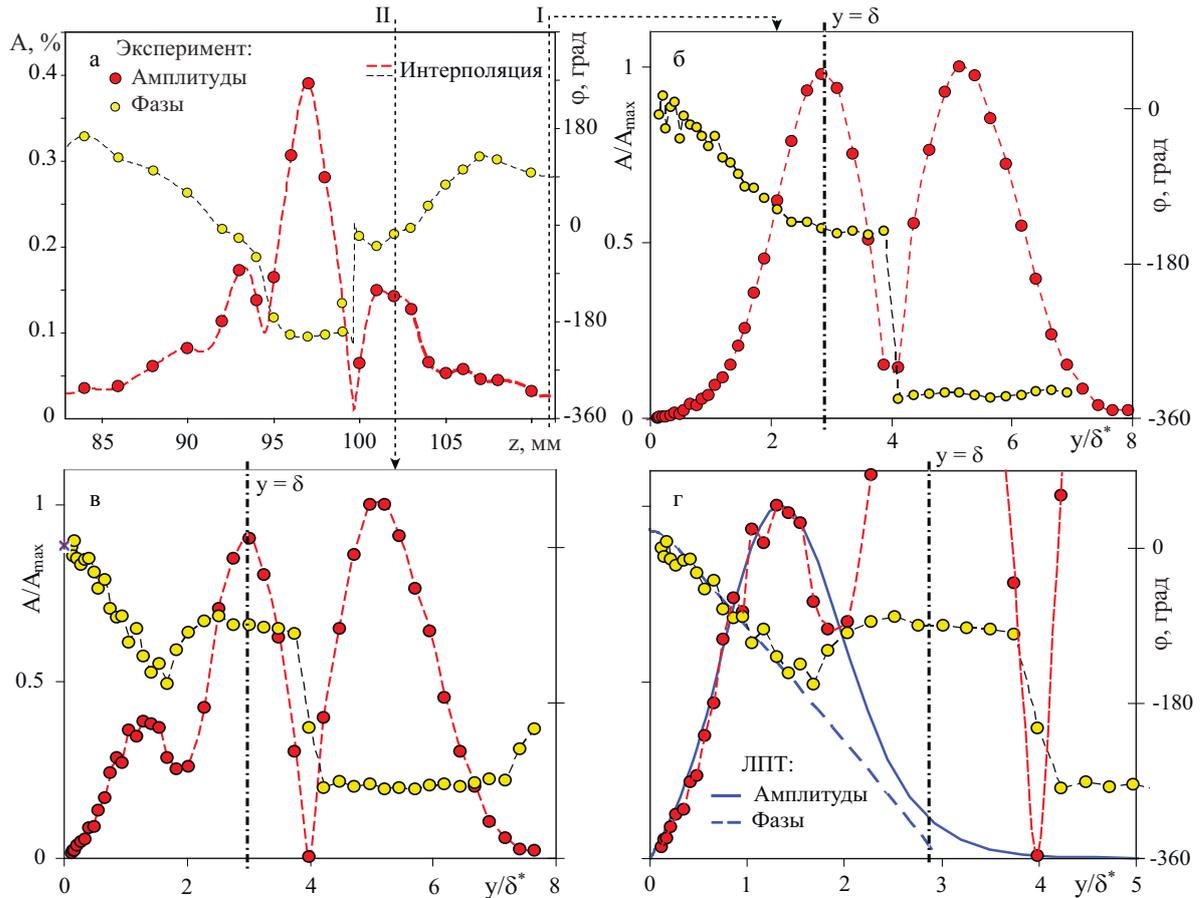


Рис. 3. Амплитуды и фазы возмущений пограничного слоя: *a* – типичный профиль возмущений, измеренный по размаху модели при $U/U_e = 0,6$; *б* – нормальный стенке профиль возмущений, измеренный в сечении I рис. 3, *a*; *в* – нормальный стенке профиль, измеренный в сечении II рис. 3, *a*; *г* – подробное изображение пристенной области рис. 3, *в*. Жирными сплошными линиями и пунктиром показан ЛПТ-расчет, выполненный для наиболее быстрорастущих вихрей Гёртлера ($\lambda_z = 10$, $\Lambda = 208$). Вертикальной штрихпунктирной линией показано примерное положение границы пограничного слоя. $x = 900$ мм ($G^* = 18,8$), $f = 20$ Гц ($F = 22,72$)

возмущений достаточно большой интенсивности. В результате в пристенной области профиля амплитуд появляется еще один, дополнительный, максимум. Фазы в пограничном слое практически линейно убывают с ростом расстояния от стенки.

На рис. 3*d* подробно показана пристенная часть экспериментальных профилей амплитуд и фаз, приведённых на рис. 3*c*. (Амплитуды нормированы на максимум амплитуд возмущений в пограничном слое). Кроме экспериментальных точек, здесь линиями показан результат расчета собственных функций первой моды нестационарной неустойчивости Гёртлера, выполненный по линейной локальной параллельной теории устойчивости (ЛПТ). (Расчет сделан с использованием программ А.В. Бойко [1], для

наиболее «опасных» гёртлеровских вихрей с поперечной длиной волной $\lambda_z = 10$ мм, $\Lambda = 208$. Стоит отметить, что в частотном режиме $F = 22,72$ исследуемый пограничный слой является линейно устойчивым к гёртлеровским вихрям всех поперечных масштабов, начиная с чисел Гёртлера $G^* \approx 12,5$, $x \approx 550$ мм.) Положение максимумов амплитуд расчетного и экспериментального профилей, а также форма профилей амплитуд вблизи стенки хорошо согласуются друг с другом. В пристенной области измеренные в эксперименте фазы также хорошо согласуются с линейной теорией устойчивости. Эти наблюдения свидетельствуют в пользу того, что порождаемые в результате действия механизма распределенной восприимчивости пограничного слоя возмущения, представ-

ляют собой именно нестационарные гёртлеровские вихри.

Это предположение подтверждается результатами, приведенными на рис. 4. Здесь показан типичный Фурье-спектр возмущений в пограничном слое по поперечным длинам волн – амплитуды (сплошная линия) и фазы (пунктир). Легко увидеть, что наибольшую амплитуду имеют возмущения с поперечным масштабом $\lambda_z = 9 \div 14$ мм ($\Lambda = 178 \div 345$). Согласно линейной теории устойчивости и результатам измерений [1], нестационарные гёртлеровские вихри именно этих длин волн являются наиболее быстрорастущими в пограничном слое.

Для всех исследованных частотных режимов распределенной генерации гёртлеровских вихрей в различных положениях по продольной координате в пограничном слое были измерены наборы распределений амплитуд и фаз возмущений по размаху модели. Все измерения выполнены на расстоянии от стенки, соответствующем $U/U_e = 0,6$. Пространственное преобразование Фурье позволило получить кривые нарастания амплитуд и фаз возмущений вниз по потоку для вихрей различных поперечных масштабов. На рис. 5 приведены кривые нарастания амплитуд (точки) в сравнении с результатами расчетов, выполненных по ЛПТ (линии). Результаты приведены для двух характерных случаев ($f = 15$ Гц, $F = 17,04$): $\lambda_z = 10$ мм ($\Lambda = 208$) – а, $\lambda_z = 14$ мм ($\Lambda = 345$) – б. Соот-

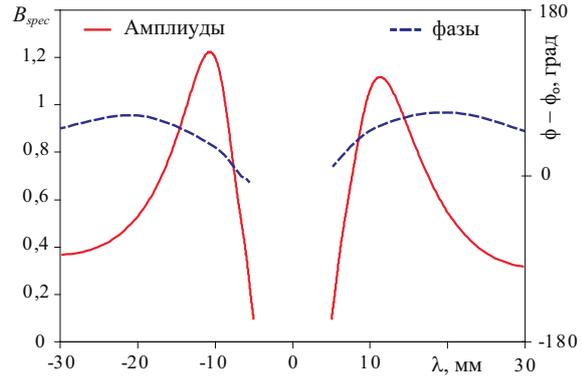


Рис. 4. Типичный спектр возмущений, измеренных в пограничном слое: амплитуды (сплошная линия) и фазы (пунктир), в зависимости от поперечной длины волны. $x=750$ ($G^* = 16,2$), $f = 20$ Гц ($F = 22,72$)

ветствующие кривые нормированы на значения, полученные в начале области измерений. Как можно увидеть, благодаря действию механизма распределенной восприимчивости пограничного слоя в эксперименте вихри нарастают значительно быстрее, чем в ЛПТ. (В отсутствие распределенной генерации хорошее согласование экспериментальных и рассчитанных по ЛПТ кривых нарастания было показано в [1; 4].)

Аналогичные результаты получены для всех исследованных частотных режимов во всем изученном диапазоне поперечных длин волн. На рис. 6 приведены соответствующие кривые нарастания порождаемых распреде-

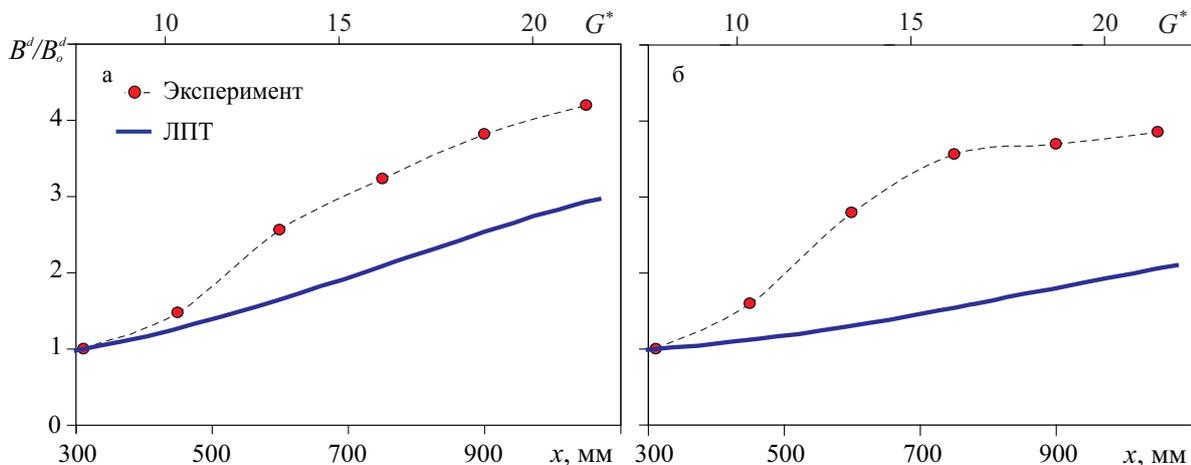


Рис. 5. Типичные кривые нарастания амплитуд порождаемых распределенным образом нестационарных вихрей Гёртлера и их сравнение с ЛПТ. Соответствующие кривые нормированы на первую точку области измерений: а – $\lambda_z = 10$ мм ($\Lambda = 208$); б – $\lambda_z = 14$ мм ($\Lambda = 345$). $f = 15$ Гц ($F = 17,04$), $U/U_e = 0,6$

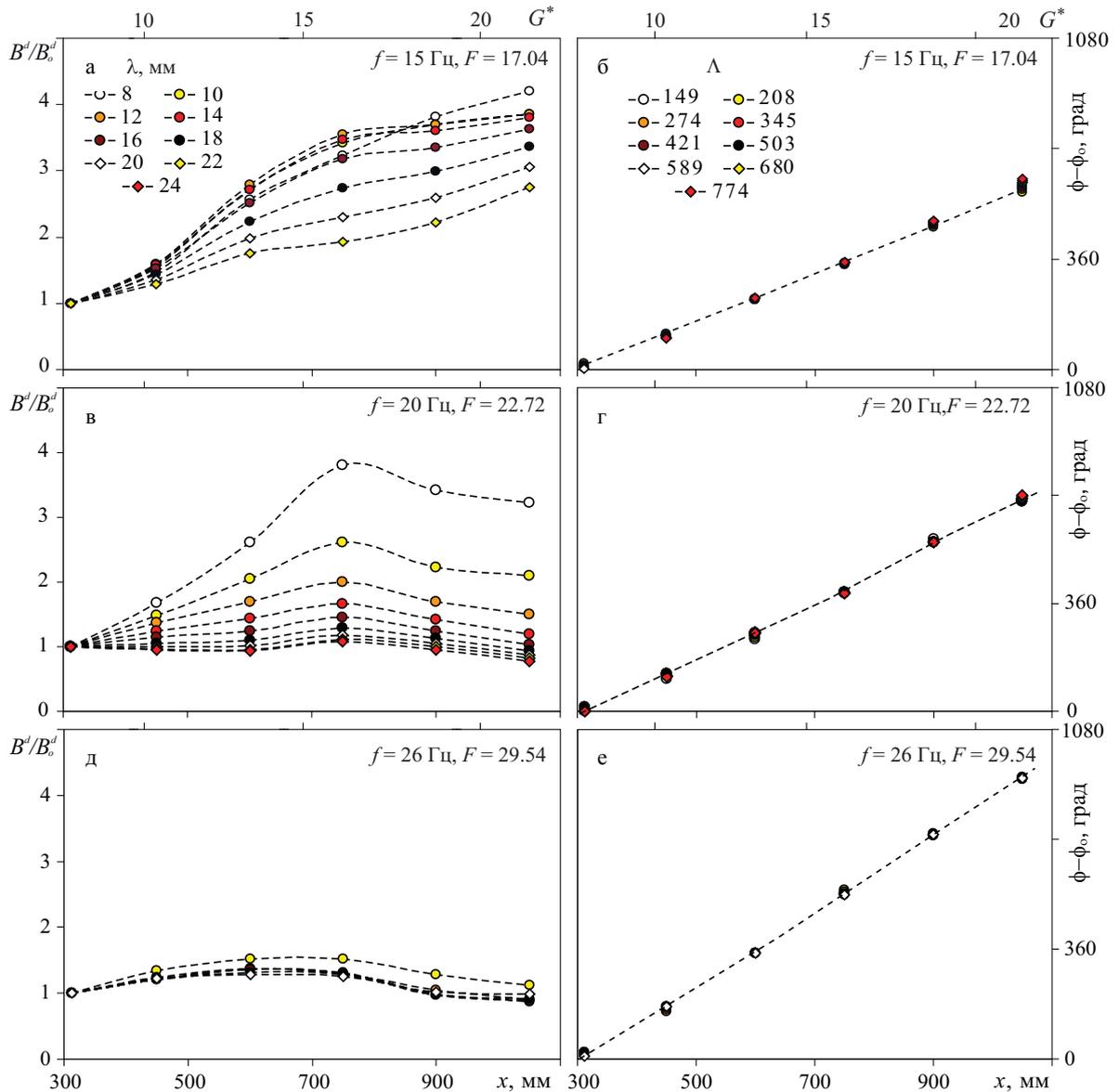


Рис. 6. Кривые нарастания амплитуд (а, в, д) и фазы (б, г, е) порождаемых распределенным образом нестационарных вихрей Гёртлера. Соответствующие кривые нормированы на первую точку области измерений. $U/U_c = 0,6$

ленным образом вихрей Гёртлера: амплитуды (слева) и фазы (справа). Как видно, под действием механизма распределенной восприимчивости нестационарные гёртлеровские вихри нарастают в пограничном слое во всех исследованных частотных режимах, несмотря на то что этот пограничный слой является линейно устойчивым к вихрям Гёртлера (всех поперечных масштабов) с частотами более 20 Гц [1]. Фазовые скорости возмущений близки к 0,65 от скорости потока, что согласуется характерными значениями фазовых скоростей, полученных

для линейных нестационарных гёртлеровских вихрей [1].

Коэффициенты распределенной восприимчивости

Полученные экспериментальные данные позволили впервые оценить величины коэффициентов распределенной восприимчивости пограничного слоя при порождении гёртлеровских вихрей возмущениями набегающего потока. Эти коэффициенты были определены примерно так же, как и в соот-

ветствующих экспериментах по порождению волн ТШ [5; 6] и мод неустойчивости поперечного течения [7; 8].

Дифференциальное уравнение описывает эволюцию комплексных амплитуд нестационарных возмущений продольной компоненты скорости в пограничном слое, ассоциируемых с вихрями Гёртлера, \bar{B}^d с координатой x :

$$\frac{d\bar{B}^d(x, y_m)}{dx} = \overbrace{i\bar{\alpha}(x)\bar{B}^d(x, y_m)}^I + \overbrace{\bar{B}_v(x, y)|_{y=\delta} \bar{G}_v^d(x)}^{II}. \quad (1)$$

За нарастание вихрей в пограничном слое отвечают два механизма: I – механизм линейной неустойчивости пограничного слоя к таким возмущениям ($\bar{\alpha}(x)$ – комплексное продольное волновое число), а также II – механизм распределенной восприимчивости пограничного слоя к продольным вихрям набегающего потока ($\bar{B}_v(x, y)|_{y=\delta}$ – комплексная амплитуда таких вихрей, измеренная на границе пограничного слоя; $\bar{G}_v^d(x)$ – искомый комплексный коэффициент восприимчивости).

Уравнение (1) (которое можно рассматривать как определение понятия коэффициента распределенной восприимчивости) является классическим примером неоднородного дифференциального уравнения с разделяющимися переменными; его решение подробно разобрано в литературе (см., например, [9]). Ниже это решение записано для случая, когда продольное волновое число $\bar{\alpha}(x)$ считается постоянным (т. е. осредненной на области измерений величиной):

$$\bar{B}^d(x^*) = e^{i\bar{\alpha}x^*} \left\{ \int_0^{x^*} \bar{B}_v(s) \bar{G}_v^d(s) e^{-i\bar{\alpha}s} ds + \bar{B}_0^d \right\}, \quad (2)$$

а также в полном виде:

$$\bar{B}^d(x^*) = e^{\bar{A}(x^*)} \left\{ \int_0^{x^*} \bar{B}_v(s) \bar{G}_v^d(s) e^{-\bar{A}(s)} ds + \bar{B}_0^d \right\}, \quad (3)$$

$$\bar{A}(x^*) = \int_0^{x^*} \bar{\alpha}(s) ds.$$

Для удобства, в выражениях (2) и (3) за начало продольной координаты принято положение первой экспериментальной точки в области измерений (координата x^*).

Величина B_0^d представляет собой «начальную» комплексную амплитуду возмущений в пограничном слое.

Для каждого заданного значения частоты и поперечного масштаба возмущений, неизвестные функции $\bar{G}_v^d(x^*)$ и \bar{B}_0^d могут быть найдены за счет аппроксимации измеренных в эксперименте распределений $\bar{B}^d(x^*)$ приближенным (2) или полным (3) аналитическим решением (аналогично экспериментам [5–8]).

Указанная аппроксимация была проведена с использованием средств решения задач оптимизации (градиентный, симплексный и генетический алгоритмы), реализованных в среде MATLAB. Комплексные функции восприимчивости $\bar{G}_v^d(x^*)$ искались в виде широкого набора элементарных функций: (а) комплексных экспонент, (б) полиномов первой и второй степени, (в) констант, (г) корневой и обратной корневой зависимости, (д) гиперболической функции и их комбинаций. Решение задачи оптимизации выполнено для двух различных критериев сходимости (простой нормы разности экспериментальных и аналитических кривых нарастания комплексных амплитуд возмущений вниз по потоку и более сложного критерия, предложенного в работе [5]) с применением нескольких подходов аппроксимации, основанных на учете экспериментальных, а также приближенных и полных теоретических характеристик нарастания гёртлеровских вихрей в линейной задаче устойчивости.

Как показали подробные исследования, в изученном диапазоне продольных координат (чисел Гёртлера $G^* = 7,4 \div 21,3$), поставленная задача оптимизации имеет, по всей видимости, единственное, физически обоснованное решение. Было показано, что в этом случае вид функции $\bar{G}_v^d(x)$ хорошо описывается экспонентой, а итоговые аналитические кривые нарастания гёртлеровских вихрей хорошо аппроксимируют экспериментальные данные (рис. 7).

Значения амплитуд и фаз коэффициентов распределенной восприимчивости представляют собой наиболее важный результат настоящей работы. Они приведены на рис. 8 для частоты 15 Гц в зависимости от поперечной длины волны порождаемых вихрей Гёртлера. Соответствующие величины по-

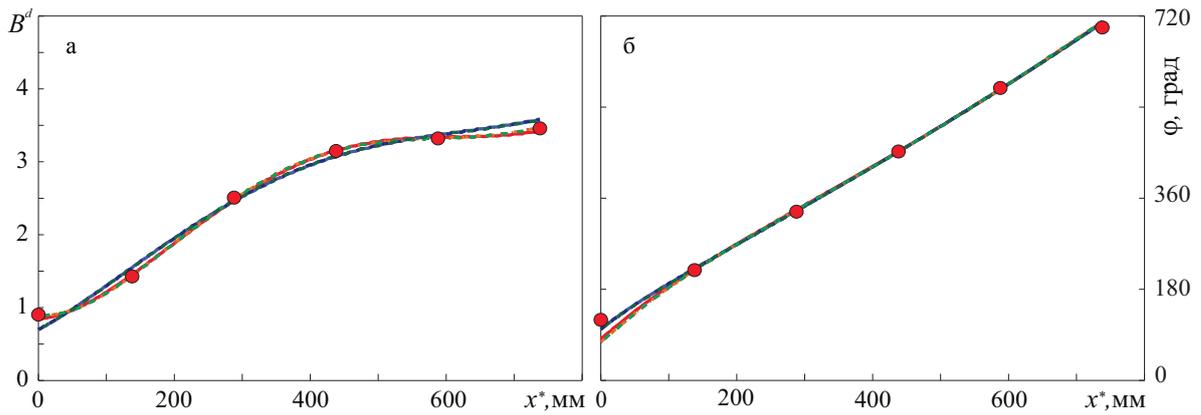


Рис. 7. Характерный пример аппроксимации экспериментальных кривых нарастания гёртлеровских вихрей (точки) аналитическими решениями, выбранными при помощи различных алгоритмов и критериев оптимизации (линии): $\lambda_z = 13$ мм ($\Lambda = 309$), $f = 15$ Гц ($F = 17,04$)

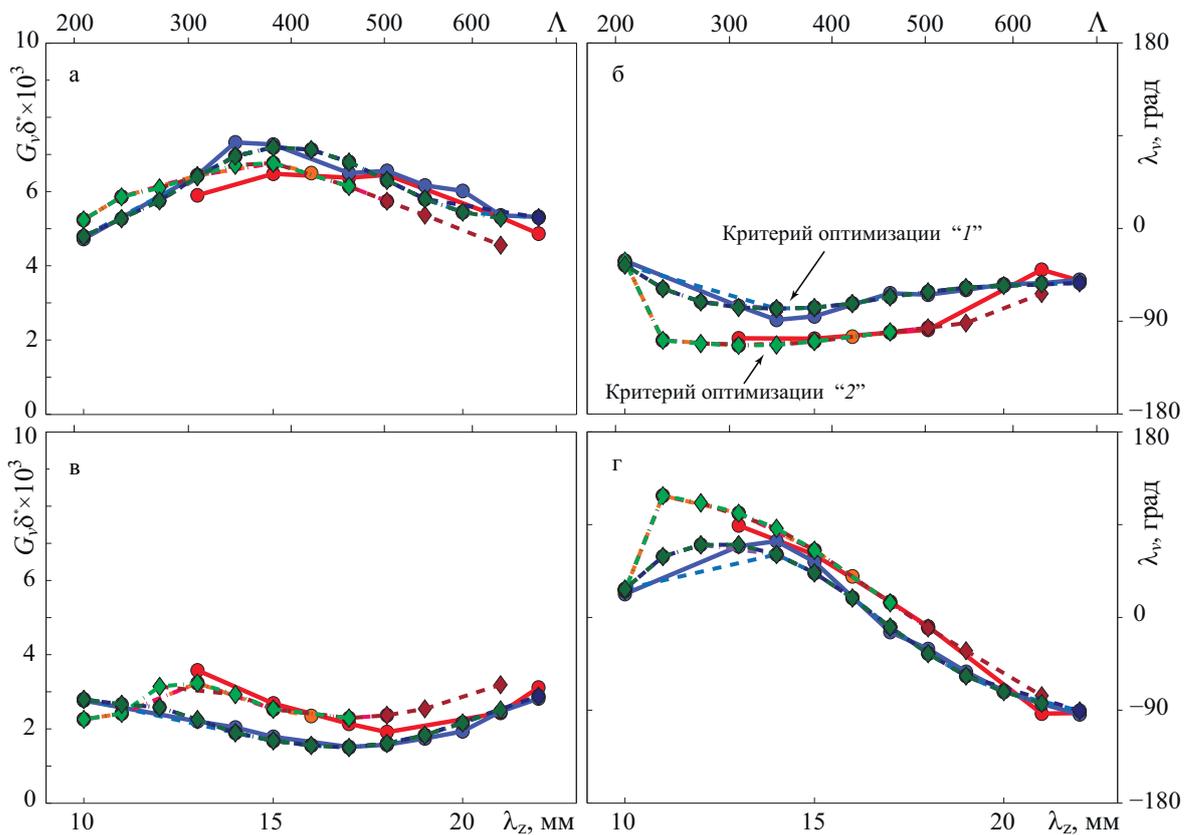


Рис. 8. Амплитуды (а, в) и фазы (б, г) коэффициентов распределенной восприимчивости пограничного слоя на вогнутой поверхности к продольным вихрям свободного потока в зависимости от поперечной длины волны порождаемых вихрей Гёртлера с частотой 15 Гц ($F = 17,04$): а, б – $x = 312$ мм ($G^* = 7,4$); в, г – $x = 1050$ мм ($G^* = 21,3$). Различные кривые обозначают результаты, полученные с помощью применения разных алгоритмов и критериев оптимизации

лучены в начале (рис. 8, а, б) и в конце (рис. 8, в, г) области измерений (т. е. для $x = 312$ и 1050 мм). Разными кривыми пока-

заны результаты, полученные с применением различных алгоритмов и критериев оптимизации. Разные критерии дают несколько

отличающиеся значения коэффициентов – эти результаты представляют собой оценку погрешности определения величин.

В начале области измерений (рис. 8, а) механизм распределенной восприимчивости пограничного слоя наиболее сильно воздействует на гёртлеровские вихри с поперечной длиной волны $\lambda_z = 10 \div 19$ мм. Вихри таких поперечных масштабов являются одновременно наиболее быстрорастущими и с точки зрения линейной теории устойчивости. Таким образом, механизмы распределенной восприимчивости и неустойчивости способны усиливать друг друга. Амплитуды коэффициентов экспоненциально убывают с продольной координатой и к концу области измерений уменьшаются примерно в 2–3 раза. В конце области измерений эффективность исследованного механизма распределенной вихревой восприимчивости в пределах точности измерений практически уже не зависит от поперечного масштаба.

Выводы

1. Впервые экспериментально изучен механизм распределенного порождения нестационарных вихрей Гёртлера в пограничном слое на вогнутой стенке под воздействием трехмерных, продольных вихрей набегающего потока. Обнаружено, что этот механизм является весьма эффективным и способен не только генерировать нестационарные вихри Гёртлера, но и значительно изменять скорости их нарастания по сравнению с механизмом линейной неустойчивости и, в частности, усиливать гёртлеровские вихри, затухающие по линейным законам.

2. Даны определения и экспериментально получены оценки величин коэффициентов распределенной вихревой восприимчивости пограничного слоя при порождении гёртлеровских вихрей вихрями набегающего потока (за счет их рассеяния на естественной неоднородности пограничного слоя).

3. Обнаружено, что в начальной области быстрого нарастания пограничного слоя исследованный механизм распределенной вихревой восприимчивости наиболее эффективен для вихрей с поперечными длинами волн близкими к наиболее «опасным» с точки зрения механизма линейной неустойчивости. Найдено, что амплитуды коэффициентов восприимчивости убывают с продольной координатой.

Список литературы

1. Boiko A. V., Ivanov A. V., Kachanov Yu. S., Mischenko D. A. Steady and Unsteady Görtler Boundary-Layer Instability on Concave Wall // *European Journal of Mechanics. B/Fluids*. 2010. Vol. 29. P. 61–83.
2. Kachanov Yu. S. Three-Dimensional Receptivity of Boundary Layers // *Eur. J. Mech. B/Fluids*. 2000. Vol. 19. No. 5. P. 723–744.
3. Gaponenko V. R., Ivanov A. V., Kachanov Yu. S., Crouch J. D. Swept-Wing Boundary-Layer Receptivity to Surface Non-uniformities // *J. Fluid Mech.* 2002. No. 461. P. 93–126.
4. Иванов А. В., Качанов Ю. С., Мищенко Д. А. Порождение нестационарных вихрей Гёртлера локальными неоднородностями поверхности. Коэффициенты восприимчивости // *Теплофизика и Аэромеханика*. 2012. Т. 19, № 5. С. 19–37.
5. Бородулин В. И., Иванов А. В., Качанов Ю. С., Комарова В. Ю. Распределенная двумерная восприимчивость пограничного слоя к нестационарным вихревым возмущениям в присутствии неровностей поверхности // *Теплофизика и аэромеханика*. 2006. Т. 13, № 2. С. 199–224.
6. Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Yu. S., Fedenkova A. A. Three-Dimensional Distributed Receptivity of a Boundary Layer to Unsteady Vortex Disturbances // *XIII International Conference on Methods of Aerophysical Research. Proceedings. Part III. Novosibirsk: Publ. House «Parallel», 2007. P. 45–50.*
7. Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Yu. S. Distributed Receptivity of Swept-Wing Boundary Layer to Streamwise Vortices. Part. 1. Experimental Approach // *XV Intl. Conf. on Methods of Aerophysical Research. Proceedings ISBN 978-5-98901-085-1 / Ed. by V. M. Fomin. Novosibirsk, 2010.*
8. Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Yu. S. Distributed Receptivity of Swept-Wing Boundary Layer to Streamwise Vortices. Part. 2. Receptivity characteristics // *XV Intl. Conf. on Methods of Aerophysical Research. Proceedings ISBN 978-5-98901-085-1 / Ed. by V. M. Fomin. Novosibirsk, 2010.*
9. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1982.

A. V. Ivanov, Yu. S. Kachanov, D. A. Mischenko

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

misch2005@yandex.ru

**QUANTITATIVE STUDY
OF EXCITATION OF UNSTEADY GÖRTLER INSTABILITY MODES
IN CONCAVE-WALL BOUNDARY LAYER BY FREE-STREAM TURBULENCE**

The paper is devoted to the first experimental study of distributed excitation of Görtler instability modes due the distributed mechanism of receptivity of a concave-wall boundary layer to streamwise freestream vortices. Experiments are carried out in the following range of problem parameters: Görtler numbers $G^* = 7,4 \div 21,3$, frequencies $f = 15, 20, \text{ and } 26$ Hz (nondimensional frequency parameters are $F = 17,04; 22,72 \text{ and } 29,54$), and a broad range of spanwise scales of disturbances $\lambda_z = 8 \div 24$ мм (nondimensional scales are $\Lambda = 149 \div 774$). It is found that this receptivity mechanism is quite efficient and can lead to amplification of unsteady Görtler vortices even in regimes where the boundary layer is linearly stable to these boundary-layer disturbances. Estimations of quantitative characteristics of the investigated physical phenomenon: the complex values of the distributed vortex receptivity coefficients are obtained in the present study for the first time. It is found that examined receptivity mechanism is especially effective for vortices with spanwise wavelengths close to the most dangerous in terms of the linear stability theory. The amplitudes of the receptivity coefficients are found to decrease with the streamwise coordinate.

Keywords: boundary layer, concave wall, laminar-turbulent transition, unsteady Görtler instability, distributed vortex receptivity.