

УДК 532.517.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ВОГНУТОЙ СТЕНКЕ К НЕОДНОРОДНОСТЯМ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОРОЖДЕНИИ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА

© 2011 г.

Д.А. Мищенко

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

misch2005@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведено экспериментальное исследование задачи восприимчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к неоднородностям поверхности при порождении нестационарных вихрей Гёртлера. Эксперименты проведены с использованием метода контролируемых нестационарных возмущений для неоднородностей двух поперечных длин волн 8 и 12 мм, в диапазоне частот 2–14 Гц. Получены независимые от конкретной формы неоднородностей линейные коэффициенты восприимчивости, которые могут быть использованы для верификации различных теорий. Амплитуды коэффициентов относительно невелики. Они нарастают с увеличением частоты вибраций поверхности и на высоких частотах существенно зависят от поперечного масштаба неоднородностей. Фазы коэффициентов тоже нарастают с частотой. Показано, что в реальных условиях присутствие нестационарных гёртлеровских вихрей может быть значительным за счет большей восприимчивости пограничного слоя к высокочастотным вибрациям поверхности.

Ключевые слова: пограничный слой, вогнутая стенка, нестационарные вихри Гёртлера, неоднородности поверхности, механизмы восприимчивости.

В результате действия неустойчивости Гёртлера в пограничных слоях на вогнутой поверхности могут возникать продольные потоку вихри. Эти вихри способны нарастать вниз по потоку и существенно влиять на параметры пограничного слоя. Вследствие этого, характеристики стационарной и нестационарной гёртлеровской неустойчивости чрезвычайно важны для целого ряда аэродинамических устройств. Несмотря на большую практическую важность, из-за многих технических трудностей неустойчивость Гёртлера до недавнего времени оставалась недостаточно изученной. Только совсем недавно, благодаря применению метода контролируемых нестационарных возмущений удалось показать, что линейная теория правильно описывает развитие стационарной и нестационарной неустойчивости Гёртлера [1]. Вместе с тем, из-за отсутствия количественных экспериментальных данных о восприимчивости пограничного слоя к различным внешним возмущениям при порождении гёртлеровских вихрей, до настоящего времени не существует теорий, способных предсказать положение ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на вогнутой поверхности. Одним из возможных механизмов возникновения гёртлеровских вихрей в пограничном слое является

восприимчивость пограничного слоя к неоднородностям поверхности. В настоящей работе эта задача исследуется экспериментально с применением метода контролируемых нестационарных возмущений.

Измерения были проведены при помощи термоанемометра в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости набегающего потока $U_e = 9.18$ м/с. Эксперименты выполнены с использованием новой высокоточной экспериментальной модели, которая представляет собой вогнутую цилиндрическую поверхность (радиус закругления $R = 8370$ мм) протяженностью 2380 мм в продольном направлении и 1000 мм в направлении размаха. Над рабочей поверхностью модели была установлена регулируемая ложная стенка, которая обеспечивала практически нулевой продольный градиент давления в области основных измерений. Конструкция экспериментальной модели позволяет минимизировать неконтролируемые неоднородности поверхности в поперечном направлении и обеспечивает высокую степень постоянства кривизны на всем ее протяжении.

Для моделирования локальных неоднородностей поверхности был разработан специальный источник возмущений. Во время экспери-

ментов он был установлен заподлицо с поверхностью экспериментальной модели на расстоянии 290 мм от ее передней кромки (локальное число Гёртлера $Gö = (U_e \delta^* / \nu)(\delta^* / R)^{1/2} = 8.16$; δ^* – толщина вытеснения пограничного слоя). Источник представляет собой ряд локализованных вибраторов в виде набора одинаковых эластичных, круглых мембран, расположенных с фиксированным шагом вдоль размаха модели. Мембраны выполнены из латексной пленки толщиной около 80 мкм и возбуждаются с помощью блока из 8 заглушенных динамиков, расположенного вне рабочей части аэродинамической трубы. Динамики соединены с полостями под мембранами гибкими пневмотрассами и создают пульсации давления, приводящие мембраны источника в колебательное движение с амплитудами, составляющими несколько десятков микрон. Вариация диаметра мембран источника позволят задавать поперечную длину волны вводимых возмущений. В настоящей работе для генерации волн неустойчивости с поперечными длинами волн $\lambda = 8$ и 12 мм использовались источники с диаметром мембран соответственно 4 и 6 мм. Измерения были проведены в нескольких режимах вибрации мембран в диапазоне частот $f = 2-14$ Гц. (Соответствующие безразмерные параметры генерируемых вихрей: поперечная длина волны $\Lambda = (U_e \lambda / \nu)(\lambda / R)^{1/2} = 149$ и 274, частота $F = 2\pi f \nu / U_e^2 \cdot 10^6 = 2.27-15.88$. Здесь ν – кинематическая вязкость воздуха).

Форма моделируемых неоднородностей была тщательно промерена в каждом из исследованных режимов генерации исследуемых возмущений. Фурье-обработка полученной информации, позволила получить параметры гармоник частотно-волнового спектра, резонансных порождаемым в пограничном слое вихрям, ко-

торые необходимы для определения комплексных коэффициентов восприимчивости течения $\bar{G}_r(f, \Lambda)$. (Здесь коэффициенты восприимчивости определены как

$$\bar{G}_r(f, \Lambda) = \bar{A}_{in}(f, \Lambda) / \bar{A}_{sur}(f, \Lambda),$$

где $\bar{A}_{in}(f, \Lambda)$ – комплексная амплитуда моды неустойчивости пограничного слоя в положении источника, а $\bar{A}_{sur}(f, \Lambda)$ – комплексная амплитуда резонансного спектра неоднородностей поверхности, моделируемых источником.)

Как показали исследования, работа источника приводила к порождению в пограничном слое контролируемых нестационарных вихрей Гёртлера с амплитудой, составляющей десятые и сотые доли процента от скорости потока. Их экспериментальные характеристики (собственные функции и кривые нарастания вниз по потоку) хорошо согласуются в дальнем поле источника с расчетами, выполненными по различным линейным теориям устойчивости: локальной параллельной и нелокальной непараллельной.

Так как непосредственно над источником и в некоторой области за ним в пограничном слое наблюдается смесь большого количества транзитных и исследуемых мод, амплитуды, фазы и продольное волновое число возбуждаемых гёртлеровских вихрей в положении источника были получены экстраполяцией экспериментальных данных вверх по потоку. Эта экстраполяция была выполнена с помощью линейной теории устойчивости.

Полученные данные впервые позволили определить коэффициенты восприимчивости пограничного слоя на вогнутой стенке к локальным неоднородностям поверхности при возбуждении нестационарных вихрей Гёртлера (рис. 1а – амплитуды, б – фазы, $Gö = 8.16$).

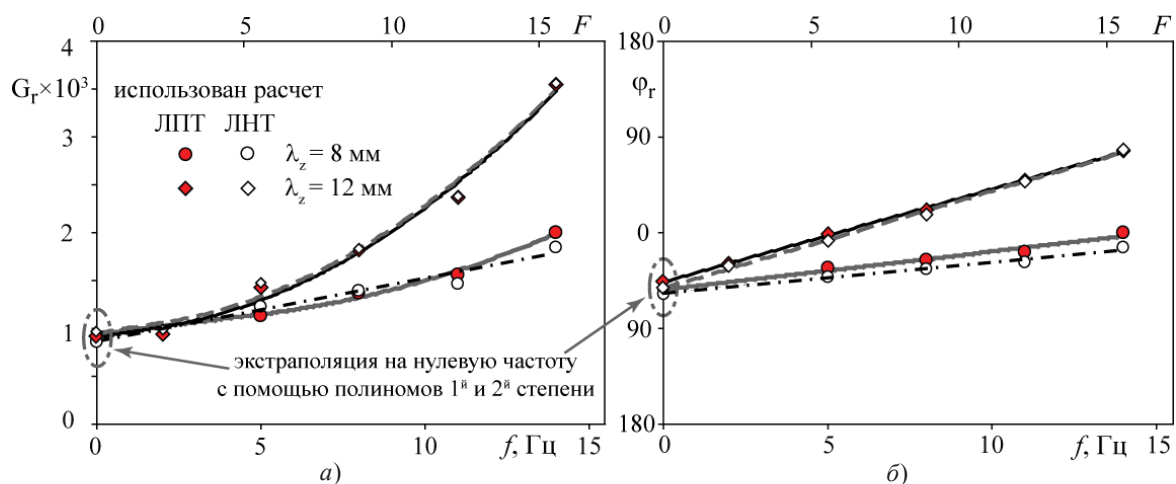


Рис. 1

На рис. 1 обозначено: точки – эксперимент, линии – экстраполяция экспериментальных значений на нулевую частоту с помощью полиномов 1 и 2-й степени. Результаты такой экстраполяции обведены пунктиром. Экстраполяция полученных распределений на нулевую частоту возмущений позволила определить коэффициенты восприимчивости и для стационарных неровностей поверхности.

Амплитуды коэффициентов нарастают с частотой, и на высоких частотах превышают величины, оцененные для стационарных вихрей в несколько раз. Фазы слабо нарастают с частотой. Увеличение поперечного масштаба неоднородностей слабо влияет на амплитуды и фазы коэффи-

циентов на нулевой частоте, но приводит к их росту на высоких частотах. Полученные результаты показывают, что в реальных условиях присутствие нестационарных вихрей Гёртлера может быть значительным за счет большей восприимчивости пограничного слоя к высокочастотным вибрациям поверхности.

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

Список литературы

1. Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A. // Eur. J. Mech., B/Fluids. 2010. V. 29, No 1. P. 43–66.

INVESTIGATION OF THE RECEPTIVITY OF A BOUNDARY LAYER ON A CONCAVE WALL TO SURFACE NON-UNIFORMITIES AT EXCITATION OF GOERTLER VORTICES

D.A. Mischenko

The problem of boundary layer receptivity on concave walls to surface non-uniformities causing excitation of the instable Goertler vortices was experimentally investigated. Experiments were carried out using the method of controlled unsteady perturbations for non-uniformities of waves with 8 and 12 mm width in a frequency range between 2 and 14 Hz. The linear receptivity coefficients independent of the specific shape of the non-uniformities are obtained and can be used for verification of various theories. Magnitudes of the coefficients are relatively low. They increase along the frequency of surface vibrations, and at high frequencies they depend on the lateral dimensions of the non-uniformities. The phases of coefficients also raise with the frequency. It is shown that in real life conditions the presence of unsteady Goertler vortices can be significant due to greater receptivity of the boundary layer to high-frequency surface vibrations.

Keywords: boundary layer, concave wall, unsteady Goertler vortices, surface non-uniformities, receptivity mechanisms.