

УДК 532.517.3;532.517.4

ПОРОЖДЕНИЕ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА ЗА СЧЕТ РАССЕЙНИЯ ВИХРЕЙ СВОБОДНОГО ПОТОКА НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ ПОВЕРХНОСТИ

© 2011 г.

А.В. Иванов

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

andi@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведено экспериментальное исследование порождения нестационарных вихрей Гёртлера в процессе рассеяния возмущений свободного потока на неоднородностях поверхности. Эксперименты проведены с использованием контролируемых нестационарных возмущений. Показано, что исследуемый механизм восприимчивости относительно слаб, однако благодаря высокой точности применяемой экспериментальной методики, возбуждаемые вихри Гёртлера уверенно измеряются в пограничном слое с помощью термоанемометра. Получена вся информация для получения количественных характеристик исследуемой задачи восприимчивости пограничного слоя.

Ключевые слова: пограничный слой, вогнутая стенка, нестационарные вихри Гёртлера, вихри свободного потока, механизмы восприимчивости.

Неустойчивость Гёртлера может возникать в пограничных слоях на вогнутой поверхности и в случаях, когда неустойчивость достаточно интенсивна, может приводить к более раннему переходу к турбулентности по сравнению с аналогичным пограничным слоем на плоской пластине. Это происходит за счет образования продольных потоку так называемых гёртлеровских вихрей. Эти вихри могут нарастать вниз по потоку до значительных амплитуд, что приводит к началу нелинейных взаимодействий возмущений, а затем и к переходу течения к турбулентному состоянию. В зависимости от преобладания различных механизмов порождения, описываемых задачей восприимчивости пограничного слоя, вихри Гёртлера могут быть как стационарными, так и нестационарными [1]. Задача восприимчивости относится к самой первой стадии развития ламинарно-турбулентного перехода и описывает механизмы проникновения в пограничный слой различных внешних (по отношению к пограничному слою) возмущений и порождение в нем гёртлеровских вихрей.

Турбулентность набегающего (потенциального) потока может являться одним из важных факторов ответственных за порождение гёртлеровских вихрей в пограничном слое на вогнутых поверхностях. Известно, что в результате действия неустойчивости Гёртлера в пограничном слое нарастают возмущения с параметрами, соответствующими довольно узкому ди-

апазону частотно-волнового спектра. Вследствие этого, вопрос о преобразовании широкого спектра возмущений турбулентного свободного потока в собственные моды колебаний пограничного слоя становится очень важным. Один из возможных механизмов такого преобразования может быть связан с взаимодействием турбулентности свободного потока с локализованными неоднородностями поверхности, или другими словами, с рассеянием вихрей свободного потока на неоднородностях поверхности (неровностях, вибрациях). Экспериментальному исследованию указанного механизма восприимчивости и посвящено настоящее исследование.

Эксперименты были выполнены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости набегающего потока 9.18 м/с. Экспериментальная модель представляла собой вогнутую цилиндрическую поверхность (с радиусом кривизны $R = 8.37$ м) протяженностью 2380 мм в продольном потоку направлении и 1000 мм по размаху. Регулируемая ложная стенка была установлена в рабочей части аэродинамической трубы непосредственно над вогнутой поверхностью модели. Ее форма была задана таким образом, чтобы в области основных измерений обеспечить течение с нулевым продольным градиентом давления. Как показали измерения, пограничный слой на экспериментальной модели соответствовал пограничному слою Блазиуса.

Эксперименты были проведены с использованием контролируемых нестационарных возмущений: и вихри свободного потока, и неоднородности поверхности модели формировались с помощью специальных источников возмущений. Вихри свободного потока создавались с помощью тонкой вибрирующей проволоочки, которая была установлена в потенциальном течении выше по потоку от экспериментальной модели, параллельно ее передней кромке. Колебания проволоочки (в плоскости, нормальной направлению потока и передней кромке модели) были вынужденными и задавались двумя миниатюрными шаговыми двигателями. Режимы их работы контролировались аппаратно с помощью управляющей компьютерной программы. В результате колебаний проволоочки в свободном потоке возникала вихревая дорожка с малой амплитудой возмущений заданной частоты f_{vor} и поперечным волновым числом, равным нулю ($\beta = 0$). Выбранное направление колебаний проволоочки приводило к формированию в свободном потоке вихрей с поперечной потоку ориентацией вектора завихренности.

Локализованные неоднородности поверхности (вибрации) моделировались специальным устройством, вмонтированным в экспериментальную модель на расстоянии $x_s = 290$ мм от передней кромки модели. Источник представлял собой набор осциллирующих круглых мембран, установленных заподлицо с ее поверхностью. Мембраны источника, изготовленные из тонкого латекса, располагались равномерно по размаху с шагом $\lambda_{z1}/2$, а их колебания вынуждались с помощью флуктуаций давления, которые создавались набором мощных динамиков и передавались в герметизированные полости под мембранами с помощью гибких пневмотрасс. Таким образом, моделируемые вибрации поверхности были периодическими по поперечной координате с длиной волны λ_{z1} , локализованы по продольной потоку координате, имели заданную частоту и амплитуду колебаний (десятки микрон). Соседние мембраны колебались в противофазе, моделируя неоднородности поверхности в виде стоячей волны по размаху модели. Волновой спектр от формы таких неоднородностей поверхности содержит 2 основные моды с поперечными волновыми числами $\pm\beta_1 = \pm 2\pi/\lambda_{z1}$.

Согласно линейной теории восприимчивости, взаимодействие вихрей свободного потока с поперечным волновым числом $\beta_{\text{vor}} = 0$ и частотой f_{vor} с вибрациями поверхности частоты

f_{sur} и поперечным волновым числом $\pm\beta_1$ приводит к генерации двух наборов нестационарных вихрей Гёртлера на комбинационных частотах: вихрей суммарной моды ($f_+, \pm\beta_1$) и вихрей разностной моды ($f_-, \pm\beta_1$). (Здесь $f_+ = f_{\text{sur}} + f_{\text{vor}}$ и $f_- = f_{\text{sur}} - f_{\text{vor}}$). В отличие от задачи рассеяния вихрей свободного потока на стационарных неоднородностях поверхности (т.е. на ее неровностях), поставленная экспериментальная задача восприимчивости имеет огромное преимущество. Оно заключается в том, что все виды исследуемых возмущений имеют свои собственные частоты, что позволяет легко отделить все исследуемые моды друг от друга и одновременно обеспечить высокую точность измерений в исследуемой задаче.

На первой стадии проведенных экспериментов было показано, что описанный выше механизм восприимчивости действительно приводит к порождению нестационарных вихрей Гёртлера, соответствующих первой моде дискретного спектра задачи на собственные значения гёртлеровской неустойчивости.

Исследуемый механизм восприимчивости оказался достаточно слаб и амплитуды порождаемых в пограничном слое возмущений невелики, однако, благодаря используемому высокоточному экспериментальному подходу, при заданных экспериментальных условиях эти возмущения уверенно измеряются в пограничном слое.

Основные измерения и в пограничном слое, и в свободном потоке были выполнены при помощи термоанемометра. Измерения в пограничном слое проводились в нескольких положениях вниз по потоку от области восприимчивости (т.е. источника). Датчик термоанемометра в этих измерениях позиционировался на расстоянии от стенки, соответствующем безразмерной скорости $U/U_e = 0.6$, т.е. в максимуме возмущений скорости, соответствующих вихрям Гёртлера (см. [1]). Дополнительные профили по нормали к стенке были измерены в положении источника непосредственно над осциллирующими мембранами (для определения фазы осцилляций), а также ниже по потоку для сравнения профилей возмущений с собственными функциями гёртлеровских мод. С помощью термоанемометрических измерений, проведенных в свободном потоке, была получена детальная информация о возмущениях набегающего потока. Было показано, что эти возмущения представляют собой вихревую дорожку из расположенных в ряд противовращающихся вихрей, которые распространяются в

пространстве вдоль границы пограничного слоя со скоростью, практически совпадающей со скоростью свободного потока.

Для того чтобы количественно решить задачу восприимчивости и получить коэффициенты восприимчивости (см., например, [2]), необходимо иметь точную информацию о форме контролируемых неоднородностей поверхности. Соответствующие измерения были проведены с использованием бесконтактного лазерного измерителя смещений.

Полученные результаты дают возможность экспериментально оценить эффективность порождения гёртлеровских вихрей в процессе рас-

сеяния возмущений турбулентного набегающего потока на неоднородностях обтекаемой поверхности. Такого сорта механизм может быть важен при исследованиях задачи ламинарно-турбулентного перехода в турбомашинах.

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.
2. Gaponenko V.R., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Crouch J.D. // J. Fluid Mech. 2002. V. 461. P. 93–126.

EXCITATION OF GOERTLER VORTICES DUE TO SCATTERING OF FREE-STREAM VORTICES ON SURFACE NON-UNIFORMITIES

A.V. Ivanov

The experimental investigation of the generation of instable Goertler vortices during the dissipation process of free stream disturbances on non-uniform surface was conducted. The experiments were performed in controlled disturbance conditions. It was demonstrated that the receptivity mechanism used is relatively weak. However, due to application of the high-precision experimental technique, the Goertler vortices excited in the boundary layer can be measured reliably by a hot-wire anemometer. A detailed information required for determination of quantitative characteristics of the boundary-layer receptivity problem under study is obtained.

Keywords: boundary layer, concave wall, unsteady Goertler vortices, free-stream vortices, receptivity mechanisms.