

УДК 532.526

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВТОРИЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА ****А. В. Бойко, В. В. Козлов, В. В. Сызранцев, В. А. Щербаков**Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск*

Введение. Одна из часто встречающихся особенностей перехода к турбулентности в пристенных течениях — появление локализованных в пространстве вихревых структур, к которым можно отнести Λ -образные вихри на плоской пластине, вихри Гёртлера на искривленных поверхностях, вихри неустойчивости поперечного течения на скользящем крыле и т. п. При всем разнообразии механизмов, порождающих подобные структуры, сами они характеризуются сильной локализацией в трансверсальном и большой протяженностью в продольном относительно скорости местного течения направлениях, достигая амплитуд 10 % и более от этой скорости. Их квазистационарность в продольном направлении является необходимым условием возникновения на них вторичных высокочастотных неустойчивостей [1, 2], развитие которых ниже по потоку может приводить к окончательной стохастизации течения. В частности, в течении на скользящем крыле это способствует переходу даже при докритических (относительно неустойчивости невозмущенного пограничного слоя) числах Рейнольдса [2–4].

Большую роль в процессе развития вторичных возмущений играет начальный уровень неоднородности потока [5], регламентирующий амплитуду стационарных вихрей и возмущений на них, что определяет их суммарное воздействие на процесс перехода. Это приводит к тому, что при проведении экспериментов в недостаточно контролируемых или «естественных» условиях переход к турбулентности может происходить по-разному, что затрудняет сравнение результатов, полученных в различных работах. В частности, в экспериментах [4] обнаружено наличие двух различных типов усиливающихся вниз по потоку возмущений, каждое из которых, вероятно, в тех или иных условиях может доминировать в процессе перехода. Однако детальное исследование относительного влияния этих возмущений на переход к турбулентности не было проведено.

Появление нескольких типов неустойчивости обнаружено и в расчетах [6] при достижении амплитудами стационарных вихрей на скользящем крыле значений, превышающих 10 % от местной скорости внешнего потока U_0 , причем их характерные частоты и коэффициенты усиления могли отличаться в несколько раз. Сходная ситуация наблюдается и на вихрях Гёртлера, где также существует несколько типов возмущений, определяющих переход на каждой отдельной паре вихрей [7, 8]. Видимо, существование нескольких усиливающихся вихревых мод является характерной чертой для целого класса течений пограничного слоя, содержащих стационарные или сильно вытянутые в продольном направлении вихри.

Экспериментальное моделирование подобных течений в контролируемых условиях, например, использованное применительно к изучению вто-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-17359).

ричной неустойчивости на скользящем крыле в [9], дает возможность выделять эти неустойчивости и изучать их как по отдельности, так и при взаимодействии друг с другом, со средним течением и возмущениями других типов.

Данная работа является непосредственным продолжением [9] и сделана на тем же коллективом авторов. В [9] описаны динамика развития одного из типов вторичных возмущений и их влияние на процесс перехода в условиях больших (до 30 % от скорости внешнего течения U_0) амплитуд стационарных вихрей. В настоящих экспериментах ставилась цель попытаться смоделировать развитие иного типа бегущих волн, порождающихся на отдельном стационарном вихре в пограничном слое скользящего крыла, и оценить его влияние на переход к турбулентности.

Методика экспериментов в целом совпадает с описанной в [9]. Эксперименты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Аэродинамическая труба Т-324 замкнутого типа с закрытой рабочей частью квадратного сечения 1×1 м и длиной 4 м. Степень турбулентности потока в рабочей части при скорости проведения эксперимента 7 м/с не превышала 0,04 % от скорости набегающего потока U_∞ .

Схема эксперимента приведена на рис. 1. В качестве рабочей модели выбран высоконесущий крыло-профиль типа С-12 [10] с углом скольжения 30° и хордой 500 мм. Профиль состоит из симметричного оживального носика толщиной 16 % хорды и длиной 5,6 см, переходящего в две одинаковые сходящиеся плоские поверхности. Профиль располагался вертикально и жестко крепился к горизонтальным стенкам рабочей части, так, чтобы рабочая поверхность профиля представляла собой плоскую пластину, расположенную под нулевым углом атаки.

Стационарные возмущения развивались за выступом, приклеенным к поверхности, форма, размеры и положение которого на крыле показаны на рис. 1. Во избежание срывов потока один конец выступа был продолжен на нерабочую сторону крыла, а другой сглажен.

Использовалась система координат, в которой ось X направлена параллельно набегающему потоку, ось Z (вдоль размаха модели) — в сторону тока поперечного течения, ось Y отсчитывается от поверхности крыла по нормали к ней. Координатное устройство, удерживавшее датчик, было модифицировано по сравнению с [9], что позволило снять некоторые ограничения на перемещения в плоскости XZ . Оно обеспечивало перемещение вдоль поверхности крыла с точностью 0,5 мм, а по нормали к крылу — 0,01 мм. Координата $Y = 0$ определялась визуально с точностью $\approx 0,1$ мм и более точно путем линейной экстраполяции до нуля невозмущенных профилей средней скорости ламинарного пограничного слоя.

Основные термоанемометрические измерения велись в центральной части модели, где вторичное течение уже практически отсутствовало. Измерялись только продольные компоненты средней и пульсационной скоростей U и u' . Эти величины определялись с помощью термоанемометра, откуда они поступали через аналого-цифровой преобразователь в персональный компьютер, где сигналы в ходе эксперимента линейаризовывались и подвергались дальнейшей обработке по специально разработанной про-

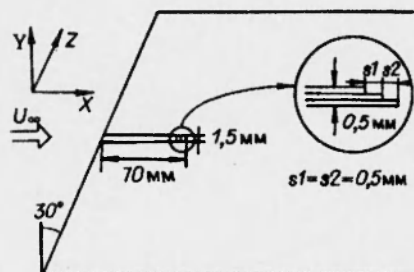


Рис. 1

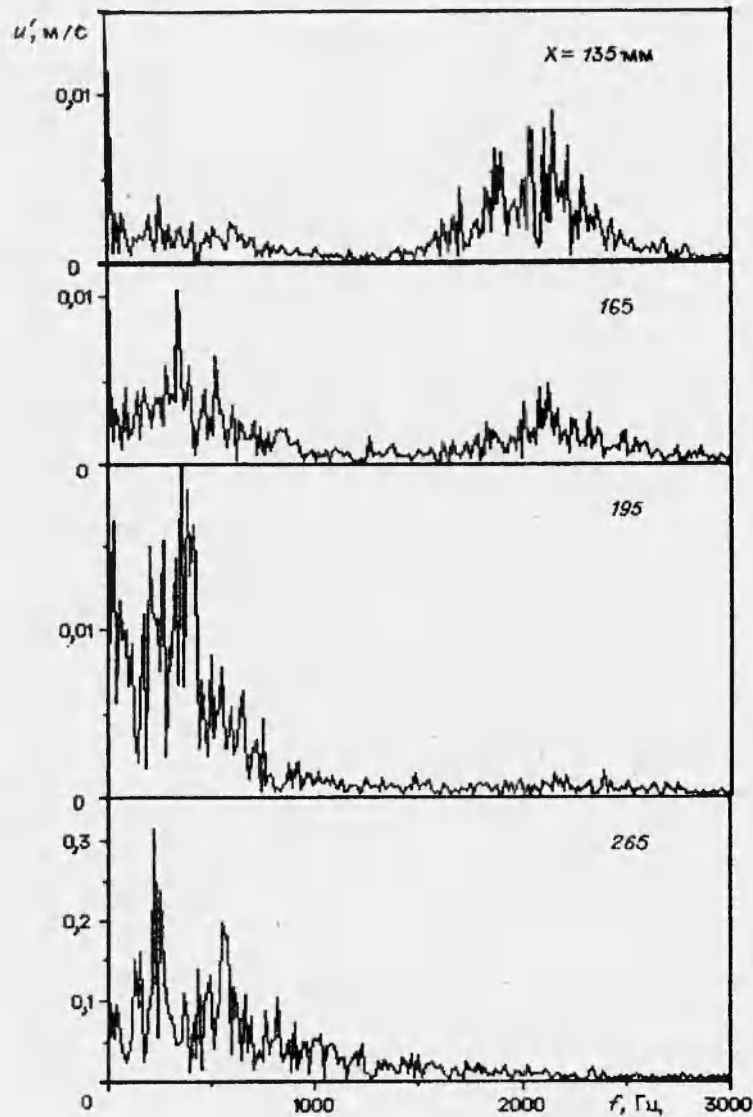


Рис. 2

грамме. Фазовое детектирование позволяло получить количественную информацию о поведении контролируемых волн в вихре, даже если их амплитуда оказывалась значительно ниже фоновых возмущений.

Для возбуждения бегущих волн в пристенном течении использовалась методика преобразования звуковых колебаний в вихревые возмущения сдвигового слоя на локальной неоднородности поверхности, описанная в [11]. Акустические колебания генерировались двумя динамическими громкоговорителями, находившимися за моделью в диффузоре трубы и излучавшими звук против направления потока. Частоты, подаваемые на динамики, задавались с помощью генераторов звуковых сигналов.

Существование высокочастотных возмущений. Спектральные измерения показали, что в вихре формируются несколько (по крайней мере, два) пакетов возмущений с центральными частотами вблизи $f = 400$ и 1800 Гц, что демонстрируется набором спектрограмм на рис. 2, полученных в различных положениях по X при фиксированном Y вблизи макси-

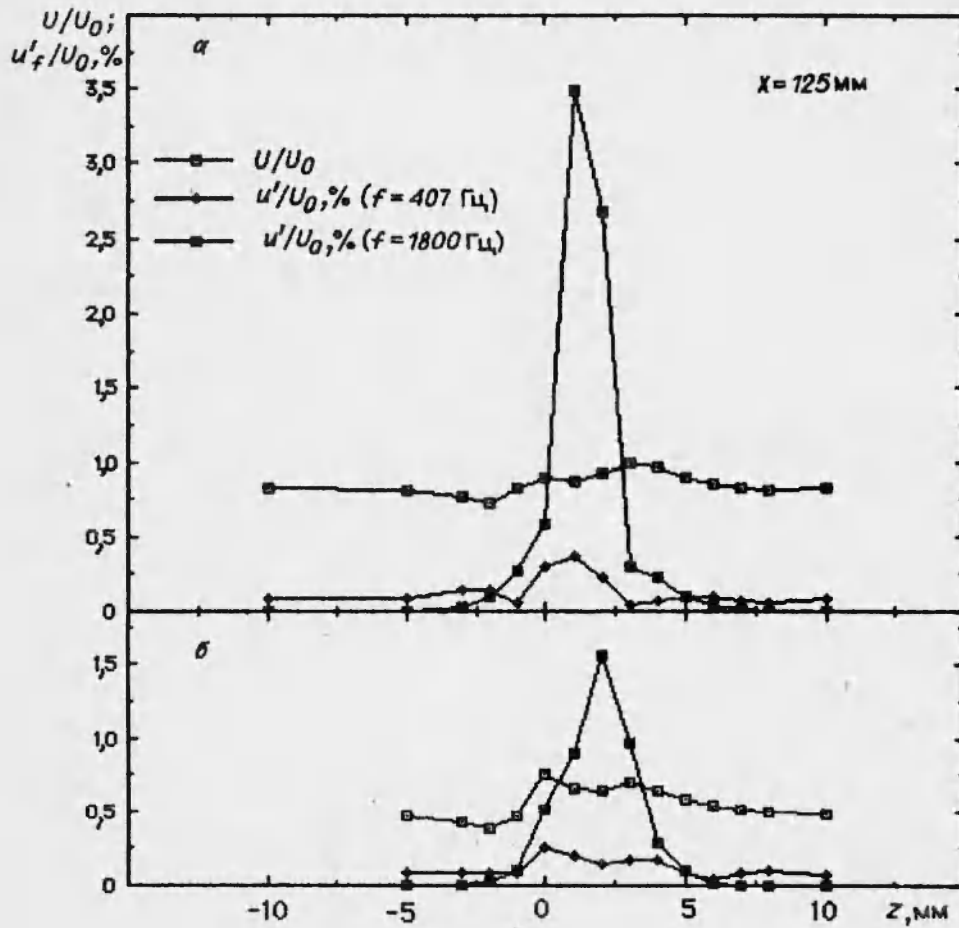


Рис. 3

му интегральных пульсаций внутри вихря. Отметим, что спектры для $X=135; 165; 195$ мм приведены в одном масштабе, а для $X = 265$ мм — в другом.

Видно, что если при $X = 135$ мм в спектре выделяется пакет с центральной частотой вблизи 1800 Гц, то ниже по потоку к $X = 195$ мм он постепенно затухает, но уже при $X = 165$ мм начинают усиливаться более низкочастотные колебания с центральной частотой около 400 Гц, которые при $X = 265$ мм и ниже по потоку приводят к постепенному заполнению спектра. В дальнейшем для краткости эти пакеты различаются как высокочастотный и низкочастотный соответственно.

Развитие низкочастотного пакета в контролируемых условиях изучалось в [9]. Повторим, что та же методика измерений применялась и здесь для изучения характеристик высокочастотных колебаний и их влияния на развитие низкочастотных возмущений и переход к турбулентности. В качестве затравочных были выбраны частоты 1800 и 410 Гц, близкие к центральным частотам пакетов волн.

В [9] обнаружено, что максимум низкочастотных колебаний наблюдается вблизи перегиба или максимального градиента в трансверсальном распределении средней скорости. Осредненные распределения средней скорости $U(Z)$ (ограниченность такого представления обсуждается в следующем пункте) и возбуждаемых возмущений обеих частот $u'_f(Z)$, измеренные в полосе 4 Гц, для $X = 125$ мм приведены на рис. 3, а для

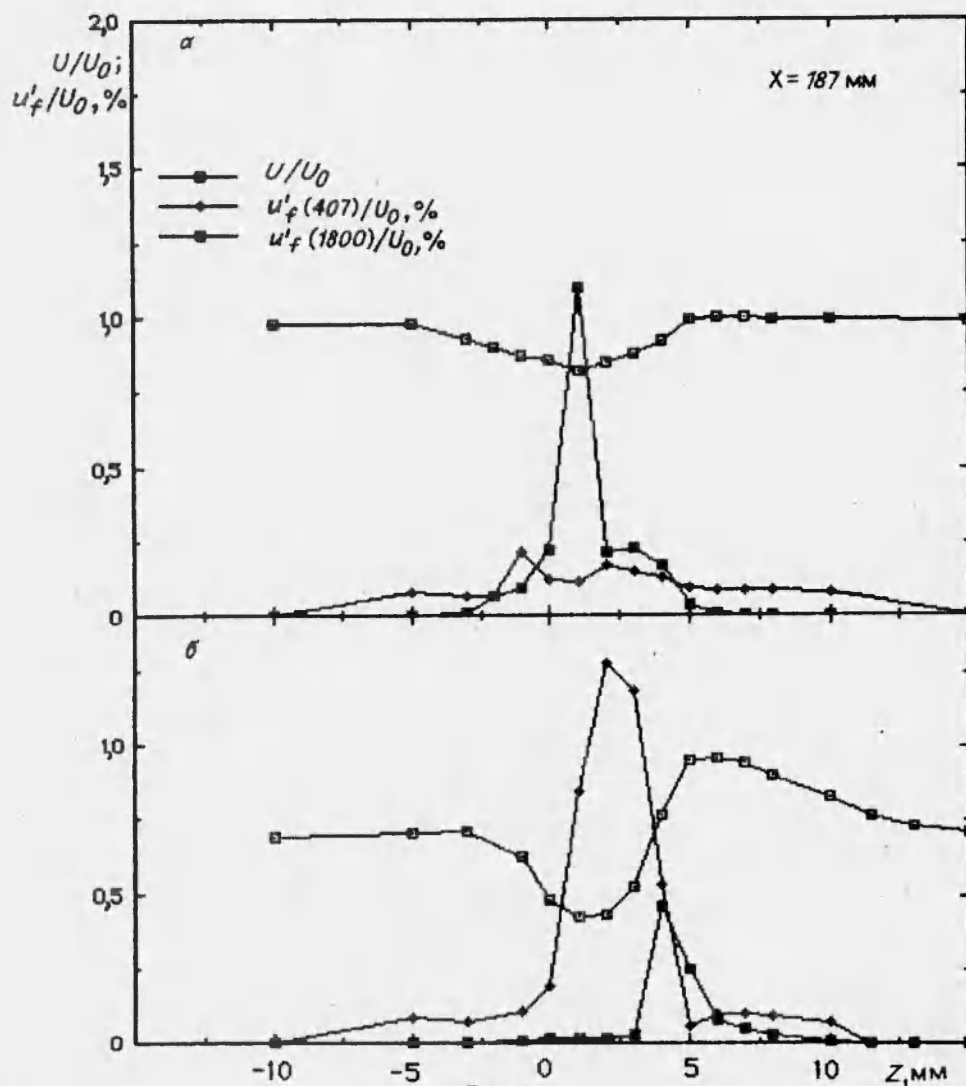


Рис. 4

$X = 187$ мм — на рис. 4, т. е. в точках из области по X , где оба возмущения сосуществуют и четко детектируются. Измерения проводились в двух сечениях по Y — приблизительно в центре (δ) и на внешней границе пограничного слоя (a). Распределения скорости $U(Z)$ нормированы на U_0 , а $u'_f(Z)$ даны в процентах от U_0 . Видно, что возмущения локализованы по-разному как по Z , так и по Y . В частности, высокочастотное колебание имеет значительно большую интенсивность в верхней части вихря, тогда как низкочастотное тяготеет к поверхности.

При $X = 125$ мм максимум возмущений частоты 1800 Гц в распределении по Z находится вблизи небольшого провала в распределении скорости $U(Z)$, достигая при выбранной интенсивности звука 3,5 %. Амплитуды низкочастотных колебаний существенно меньше, и их максимум $u'_f \approx 0,3$ % выражен значительно слабее. К $X = 187$ мм провал в распределении средней скорости постепенно исчезает и одновременно происходят затухание высокочастотной волны до $u'_f \approx 1,0$ % и усиление низкочастотной до 1,3 %. Сходный провал в трансверсальном распределении средней скорости наблюдался в [4], где был приписан нелинейному искажению

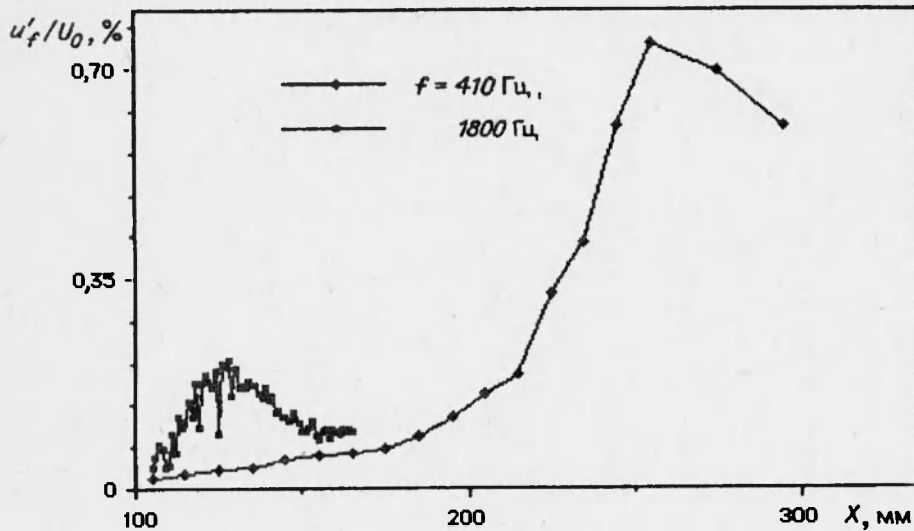


Рис. 5

формы вихря в результате образования на нем гребня и его обрушения, приводящего к вторичному притоку низкоскоростной жидкости к поверхности.

На данном этапе исследований нельзя сделать определенных выводов относительно причинно-следственной связи между появлением провала в распределении средней скорости и развитием высокочастотного возмущения. В частности, можно предположить, что в верхней части стационарного вихря существует еще один сильно локализованный вихрь, диссипирующий вниз по потоку. Вместе с тем результаты, излагаемые в следующем пункте, показывают, что появление этого провала может быть итогом сильного воздействия естественных высокочастотных возмущений на среднее течение.

Влияние высокочастотных возмущений на переход. Как уже обсуждалось выше, в естественном случае изначально могут существовать, по крайней мере, два волновых пакета, которые претерпевают вниз по потоку различную эволюцию. Амплитуда низкочастотных возмущений растет, и происходит постепенное заполнение спектра. Высокочастотный пакет постепенно затухает и в переходе непосредственного участия не принимает.

Кривые усиления исследуемых частот в полосе 4 Гц, снятые при фиксированном расстоянии от поверхности модели вблизи максимумов вводимых по отдельности возмущений частот 410 и 1800 Гц, показаны на рис. 5. Как и в естественном случае, переход происходит через нарастание низкочастотных пульсаций в области по X , когда высокочастотное возмущение уже практически не регистрируется, причем инкременты низкочастотных колебаний в несколько раз больше, чем для высокочастотных. В то же время фазовые скорости возмущений обеих частот оказались близкими к $\approx 0,56$ от U_0 на большом участке развития волн, что указывает на возможность эффективного нелинейного взаимодействия при передаче энергии между возмущениями в области их сосуществования.

В дальнейшем большинство измерений проводилось в диапазоне $X = 100-200$ мм, т. е. в области, захватывающей неустойчивость высокочастотной волны. Интенсивность этой волны была такой же, как и для рис. 5.

Известно, что введение новых, пусть и малых, возмущений может в

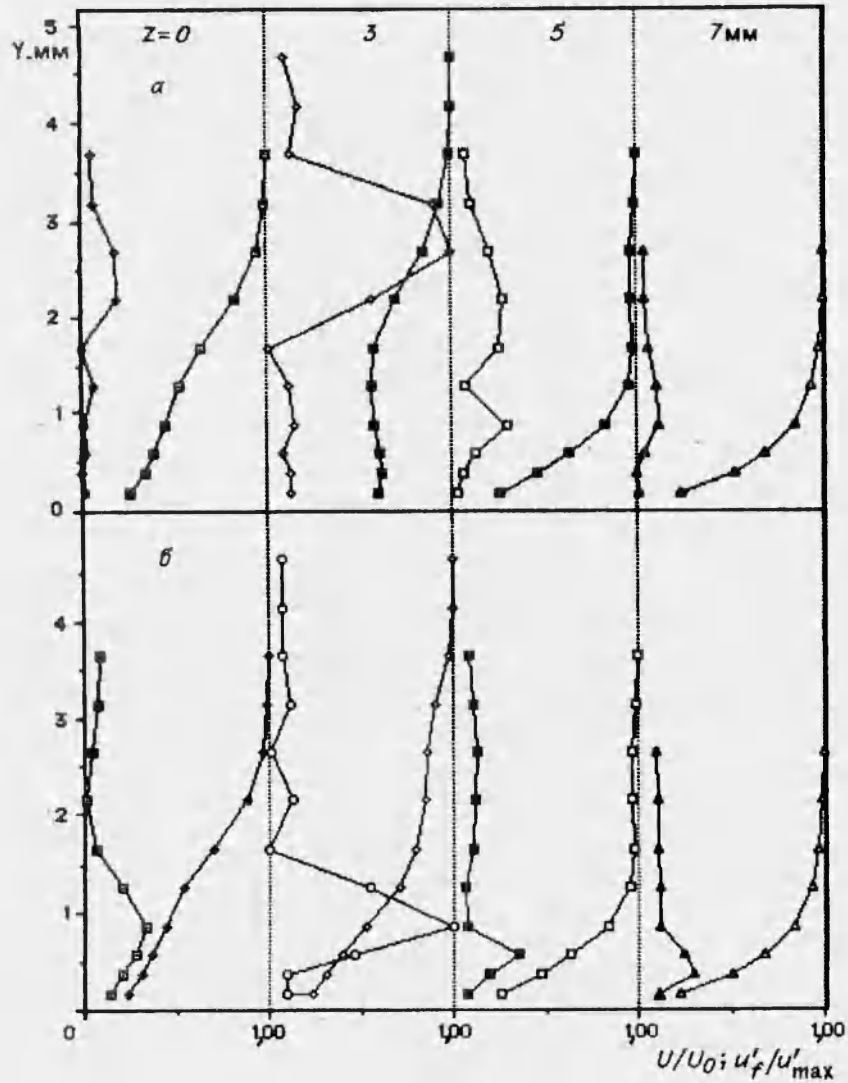


Рис. 6

некоторых случаях влиять на среднее течение в сдвиговом слое [12], меняя сам объект исследования. Ранее [9] для низкочастотных возмущений было обнаружено, что даже при введении возмущений с амплитудой в максимуме пульсаций в вихре около 1 % от U_0 , при которой обычно начинают наблюдаться нелинейные явления, не происходит заметного искажения вихря.

В отличие от низкочастотных колебаний, возбуждение частоты 1800 Гц оказывает на поток мощное воздействие. На рис. 6 для $X = 187$ мм показаны профили пульсаций $u'_z(Y)$, измеренные при возбуждении высокой (а) и низкой (б) частот, снятые в полосе 4 Гц, и соответствующие им профили средней скорости $U(Y)$. Пульсации нормированы на максимумы $u'_{max} = 1,4$ % для высокочастотной волны и $u'_{max} = 0,5$ % для низкочастотной, а профили средней скорости — на U_0 .

Сопоставление рис. 4 и 6 показывает, что максимумы обоих возмущений достигаются приблизительно в одном сечении при $Z = 3$ мм. Кроме того, в дополнение к рис. 3 и 4 эти профили иллюстрируют, что максимум высокочастотного возмущения достигается дальше от поверхности крыла, чем максимум низкочастотного. Однако видно, что возбуждение

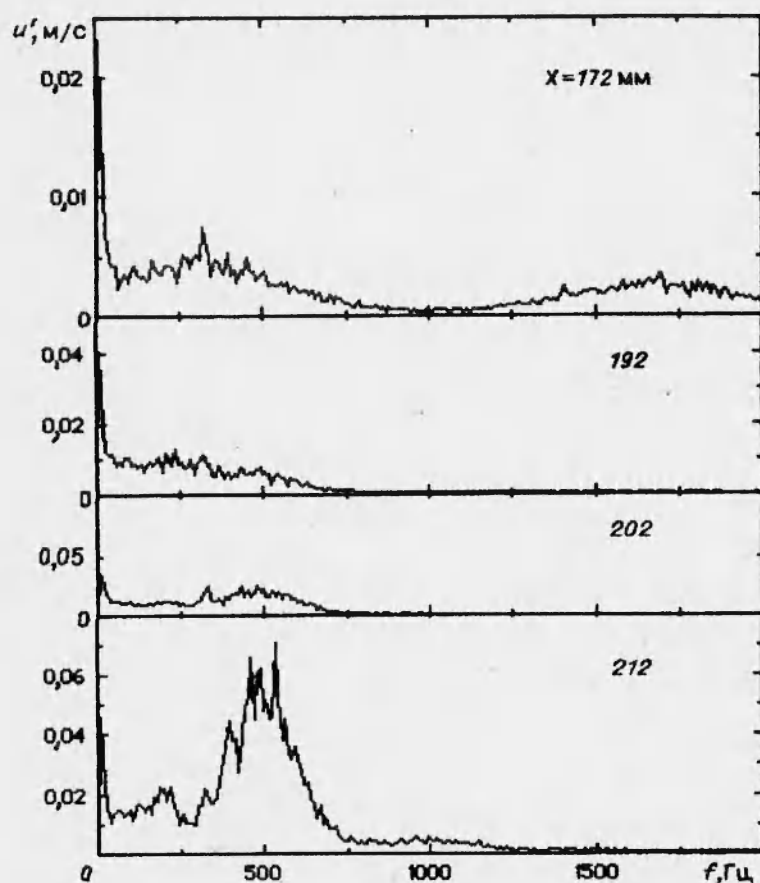


Рис. 7

частоты 1800 Гц приводит к тому, что профиль в сечении $Z = 3$ мм из наполненного становится перегибным. В других сечениях по Z этот эффект практически незаметен. Такая локализация приводит, в частности, к тому, что при измерениях по Z при фиксированном Y (как на рис. 3 и 4) этот эффект трудно обнаружить. С другой стороны, следует отметить, что подобное влияние на профили средней скорости, будучи локальным по Z , нелокально в том смысле, что его присутствие оказывает влияние на события, происходящие в области по X , где возмущение высокой частоты уже затухло.

На рис. 7 и 8 представлены наборы спектров, полученных соответственно в естественном случае и при возбуждении в потоке высокочастотных колебаний, снятые в одних и тех же точках потока вблизи максимума интегральных пульсаций скорости. В обоих случаях переход к турбулентности происходит через усиление низкочастотного пакета, но усиление возмущений и заполнение спектра происходят раньше при возбуждении высокочастотной волны. Причем в первом сечении при $X = 172$ мм наблюдается обратное явление — подавление фоновых пульсаций — эффект, известный и для других сдвиговых течений с преобладанием невязкой неустойчивости [13]. Из рис. 5 видно, что сечение $X = 172$ мм соответствует области затухания высокочастотной волны, поэтому дальнейший бурный рост низкочастотного пакета, заметный уже при $X = 192$ мм, вряд ли связан с прямой передачей энергии между возмущениями, а скорее — с изменением среднего течения, на фоне которого развивается и приводит к

переходу низкочастотный пакет волн.

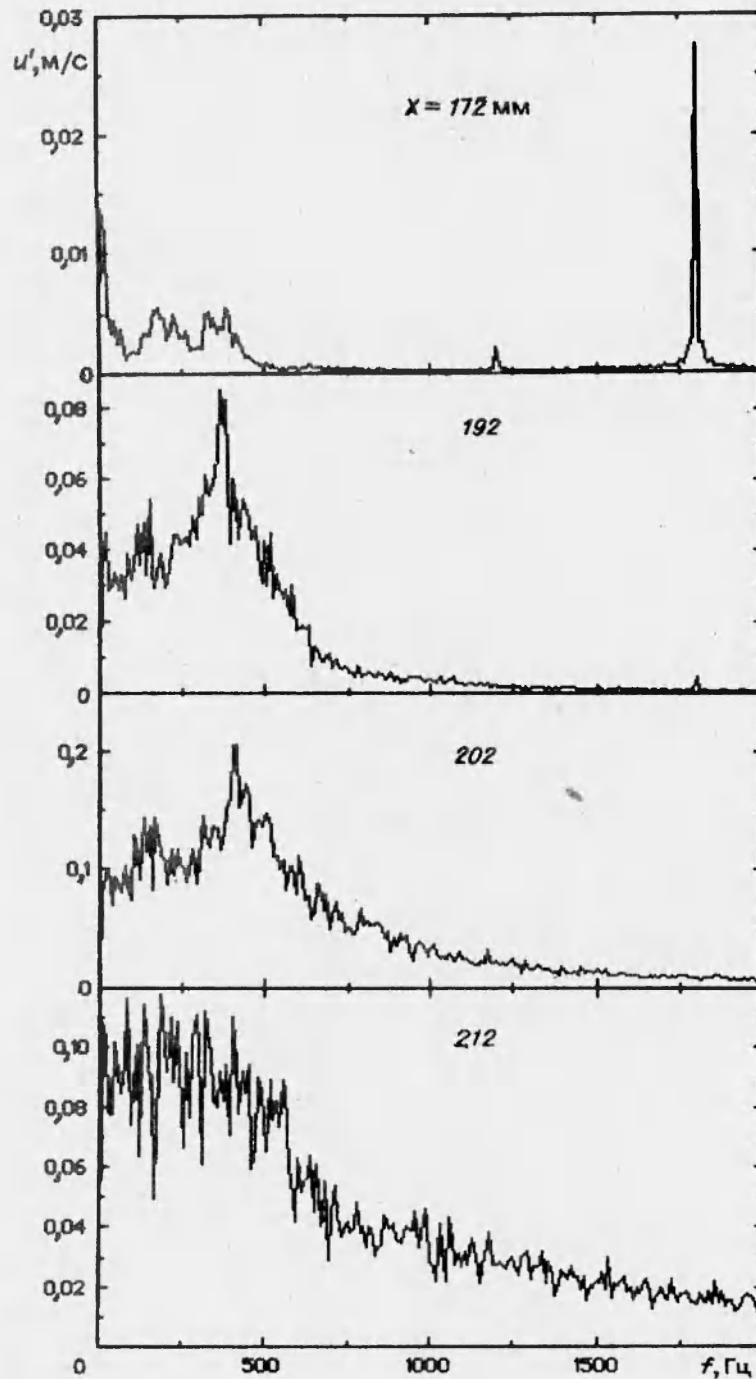


Рис. 8

Выводы. Таким образом, показано, что на исследуемом вихре образуются два пакета пульсаций, причем их характерные диапазоны частот и инкременты отличаются в несколько раз. Также по-разному пакеты локализованы в вихре, однако скорости их распространения вдоль оси вихря в исследуемых условиях оказались практически одинаковыми. Отмечено,

что раннее нарастание высокочастотных колебаний не приводит к самостоятельному переходу к турбулентности, однако их возбуждение оказывает на него ускоряющее воздействие, изменяя профили средней скорости, на фоне которых развивается низкочастотная неустойчивость, что является основной причиной более быстрого усиления низкочастотных возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Reed H. L., Saric W. S.** Stability of three-dimensional boundary layers // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1989. V. 21. P. 235–284.
2. **Kohama Y.** Some expectation on the mechanism of cross-flow instability in a swept wing flow // *Acta Mech.* 1987. V. 66. P. 21–38.
3. **Dagenhart J. R., Saric W. S., Hoos J. A., Mousseux M. C.** Experiments on swept-wing boundary layers // *Laminar-Turbulent Transition: IUTAM Symp.*, Toulouse, 1989. Berlin: Springer-Verl., 1990.
4. **Kohama Y., Saric W. S., Hoos J. A.** A high-frequency, secondary instability of crossflow vortices that leads to transition // *Boundary Layer Transition and Control: Proc. conf.*, Cambridge, 1991. London, 1991.
5. **Bippes H.** Experiments on transition in three-dimensional accelerated boundary layer flows // *Boundary Layer Transition and Control: Proc. conf.*, Cambridge, 1991. London, 1991.
6. **Fisher T. M., Hein S., Dallman U.** A theoretical approach for describing secondary instability features in three-dimensional boundary-layer flows. N. Y., 1993. (Paper/AIAA; N 93-0080).
7. **Floryan J. M.** On the Goertler instability of boundary layers. Tokyo, 1991. (Tech. Rept/Nat. Aerospace Lab.; N 1120 T).
8. **Xiuyang Y., Liu J. T. C.** The secondary instability in Goertler flow // *Phys. Fluids.* 1991. V. A3, N 8.
9. **Бойко А. В., Козлов В. В., Сызранцев В. В., Щербаков В. А.** Экспериментальное исследование процесса перехода к турбулентности на одиночном стационарном возмущении в пограничном слое скользящего крыла // *ПМТФ.* 1995. Т. 35, № 1. С. 72–84.
10. **Занин Б. Ю., Лушин В. Н.** Сравнительные исследования обтекания профиля крыла в двух аэродинамических трубах // *Сиб. физ.-техн. журн.* 1991. Вып. 2. С. 99–103.
11. **Айзин Л. Б., Поляков Н. Ф.** Генерация волн Толлмина — Шлихтинга звуком на отдельной неровности поверхности, обтекаемой потоком. Новосибирск, 1979. (Препр./ АН СССР. Сиб. отд.-ние. ИТПМ; № 17).
12. **Бойко А. В.** Развитие вихревых возмущений в локальных отрывных течениях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1992.
13. **Boiko A. V., Dovgal A. V., Scherbakov V. A., Simonov O. A.** Effects of laminar-turbulent transition in separation bubble // *Separated Flows and Jets: IUTAM Symp.*, Novosibirsk, 1990. Berlin: Springer-Verl., 1991.

Поступила в редакцию 15/VII 1994 г.