

УДК 532.526

**АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВТОРИЧНОЙ  
НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ В ТРЕХМЕРНОМ  
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

**А.В. БОЙКО, В.В. КОЗЛОВ, В.В. СЫЗРАНЦЕВ, В.А. ЩЕРБАКОВ**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
Новосибирск*

Исследована вторичная неустойчивость на группе вихрей, развивающихся в пограничном слое. Показано, что для бегущих волн существует область линейного развития и темпы роста возмущений существенно зависят от расстояния между вихрями. Предложены и обоснованы методы управления вторичной неустойчивостью этих вихрей с помощью контролируемой волны и локализованного отсоса.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Большинство методов управления переходом к турбулентности в пристенных течениях, хорошо развитых для двумерных течений, являются пассивными, поскольку при их применении не существует цепи обратной связи для детектирования и манипулирования структурой течения, т. е. отсутствует возможность изменить степень воздействия на поток. Наиболее известные среди этих методов — отсос пограничного слоя, охлаждение или нагрев поверхности, создание благоприятных градиентов давления. Так, в работе [1] было показано, что щелевой отсос способен значительно снизить амплитуду двумерной волны неустойчивости — волны Толлмина — Шлихтинга (ТШ) — и затянуть переход к турбулентности. При этом отмечено, что воздействие оказывается существенным лишь на стадии линейного нарастания волн; если в течении наблюдаются нелинейные взаимодействия и происходит формирование трехмерных структур, то щелевой отсос оказывается не столь эффективным. Часто используются также устройства типа риблет [2, 3], которые располагают в пограничном слое с целью подавления формирования или взаимодействия организованных трехмерных структур, например  $\Lambda$ -вихрей.

Одним из альтернативных методов в рассматриваемой проблеме является использование непосредственного воздействия на волны ТШ, развивающиеся в течении. При таком подходе возмущения гасятся или по крайней мере ослабляются вследствие суперпозиции линейных волн, причем можно использовать различные способы возбуждения управляющих волн в пограничном слое. Для этого необходимо создать воздействующее устройство, которое эффективно генерирует другую волну той же амплитуды, но с противоположной фазой. Так, в работах [4 – 7] возмущения в пограничном слое возбуждались вибрирующей лентой и проволокой, системой нагревательных элементов, звуком, вдувом-отсосом через ряд отверстий. Управляющая волна, созданная либо вторым волнообразователем, расположенным ниже по потоку, либо вибрацией поверхности, используется для минимизации амплитуды первичной волны ТШ. Эти эксперименты показали реальную возможность разрушения двумерных волн ТШ в пограничном слое путем введения управляющей волны подходящей амплитуды.

Между тем в ряде случаев стадия развития двумерной неустойчивости может быть очень коротка или отсутствовать вовсе. В качестве примеров приведем

трехмерные течения на скользящем крыле, вращающемся диске, вогнутой поверхности. В этих случаях развитие неустойчивости сильно зависит от локальных условий в возникающих стационарных вихрях: волны, развивающиеся в соседних вихрях, могут иметь различные амплитуды [8]. Неоднородность поля возмущений приводит к тому, что переход к турбулентности обычно происходит на каждом из вихрей независимо от соседних, что создает характерную зубчатую форму линии перехода. Для таких течений применение двумерных пассивных методов управления зачастую неэффективно, поскольку приводит к различному воздействию в разных точках потока.

Для управления неустойчивостью в такого рода трехмерных течениях тоже можно применять активные методы. Принципиальная схема системы активного управления неустойчивостью состоит в следующем [9]. Получая сигналы с датчиков, расположенных в потоке, анализирующее устройство проводит обработку сигналов и определяет амплитуды, фазы и другие характеристики возмущений. Далее воздействующие устройства либо возбуждают в течении трехмерные возмущения с такими же характеристиками, но с противоположной фазой, либо производят локализованный отсос или иные локальные по пространству воздействия на течение. Датчики и воздействующие устройства должны располагаться вблизи друг друга, чтобы по возможности избежать изменения свойств течения на участке между ними.

Развитие подобных методов управления требует применения специальной, например микромашиной, технологии [9, 10], которая позволяет изготавливать отдельные узлы и даже целые устройства очень малых размеров. Более того, можно достичь интерактивного распределенного управления объединением на одной поверхности датчиков, воздействующих устройств и микропроцессоров.

Данная работа является продолжением цикла исследований [2, 11, 12], где проведено изучение свойств волн и механизмов вторичной неустойчивости первичных стационарных вихрей, расположенных в пограничном слое. Предлагаются два метода активного управления переходом в таком течении — взаимогашение волн и локализованный отсос; в работе также определены характеристики возмущений, нарастающих в системе стационарных вихрей.

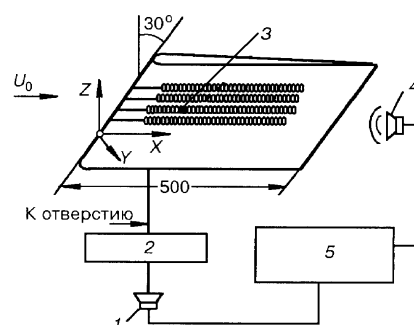
## 2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Эксперименты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Аэродинамическая труба Т-324 — замкнутого типа с рабочей частью сечением  $1 \times 1$  м и длиной 4 м. Степень турбулентности потока в рабочей части не превышала 0,04 % скорости набегающего потока ( $U_0 = 8,5$  м/с).

В качестве рабочей модели выбран высоконесущий крыловой профиль С-12 с углом скольжения  $30^\circ$  и хордой 500 мм. Профиль состоит из симметричного оживального носика толщиной в самой широкой части, составляющей 16 % хорды, и длиной 56 мм, 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 плоскость, расположенную под нулевым углом атаки. Такое крепление, во-первых, обеспечивало возможность перемещать датчик термоанемометра параллельно поверхности модели с высокой точностью, а во-вторых, упрощало анализ обтекания модели, поскольку кривизна была существенна лишь вблизи носика крыла и локальный отрыв потока в области середины хорды крыла, возникающий обычно при небольших углах атаки, отсутствовал. Использованное координатное устройство позволяло перемещать датчик термоанемометра по координатам  $X$ ,  $Z$ ,  $Y$  с точностью соответственно 0,5; 0,2 и 0,01 мм. Специальные исследования [11, 12] показали, что в области измерений ( $X > 130$  мм) продольный градиент скорости отсутствовал, а профиль средней скорости  $U(Y)$  был близок к профилю Блазиуса. Все измерения средней скорости и ее возмущений проводились в области линейного развития бегущих волн.

Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — динамик для возбуждения волн вдувом-отсосом, 2 — фазовращение, 3 — отверстие, 4 — динамик для возбуждения волн звуком, 5 — генератор сигналов.



Стационарные возмущения развивались за элементами шероховатости, приклеенными к поверхности. Их положение на крыле показано на рис. 1, а форма и размеры были аналогичны принятым в [12]. Во избежание срывов потока с расположенного выше по потоку конца выступа, последний был продолжен на нерабочую сторону крыла; другой его конец, находящийся ниже по потоку, был сглажен. В большинстве измерений расстояние между элементами шероховатости составляло 13 мм, что, как показали специальные измерения, близко к характерному расстоянию для естественных вихрей на данном скользящем крыле и при данных условиях течения.

Для возбуждения бегущих волн из диапазона неустойчивости стационарных вихрей с контролируемыми значениями амплитуды и фазы использовался звук, который генерировался динамическим громкоговорителем, находившимся за моделью, в диффузоре трубы, и излучавшим звук против направления потока. Частота и амплитуда звука задавались с помощью генератора звуковых сигналов.

Для введения подавляющего сигнала использовалось возбуждение волн вдувом-отсосом через круглое отверстие диаметром 0,8 мм, расположенное по трансверсальной координате под одним из вихрей на расстоянии  $X = 170$  мм. Посредством пневмотрассы отверстие соединялось с динамическим громкоговорителем, который вызывал периодические пульсации давления. Амплитуда этого сигнала задавалась тем же генератором звуковых сигналов, но вместе с тем имелась дополнительная возможность изменять фазу вводимого возмущения, изменяя в определенных пределах длину пневмотрассы. Это же отверстие использовалось для проведения локализованного отсоса.

Средняя  $U$  и пульсационная  $u'$  составляющие продольной компоненты скорости измерялись одноточечным датчиком термоанемометра постоянной температуры. Сигналы определялись с помощью моста термоанемометра DISA 55M01, откуда они поступали в аналогоцифровой преобразователь (АЦП), а затем в персональный компьютер, где в ходе эксперимента линейризовывались и подвергались дальнейшей обработке по специально разработанной программе.

Датчик термоанемометра тарировался в свободном потоке напротив трубки Пито — Прандтля при скоростях потока в диапазоне 2 – 20 м/с, погрешность определения средней скорости была меньше 1%. Тарировочная функция описывается формулой

$$U = k_1 (E^2 - E_0^2)^{1/2} + k_2 (E - E_0)^{1/2},$$

где  $E$  и  $E_0$  — выходные напряжения с термоанемометра при скорости потока  $U$  и в покое соответственно,  $k_1$ ,  $k_2$  и  $n$  — константы, определяемые эмпирически. Первый член соответствует известному выражению Кинга, второй добавлен для учета свободной конвекции при малых скоростях потока. Величина  $1/n$  была близка к 0,5.

Для измерения  $V$ -компоненты вектора средней скорости использовался  $X$ -образный двухниточный датчик. Его чувствительные элементы представляли собой вольфрамовые нити диаметром 5 мкм и длиной 1 мм, расстояние между центрами нитей составляло 1 мм, угол между нитями был равен  $90^\circ$ ; нити располагались

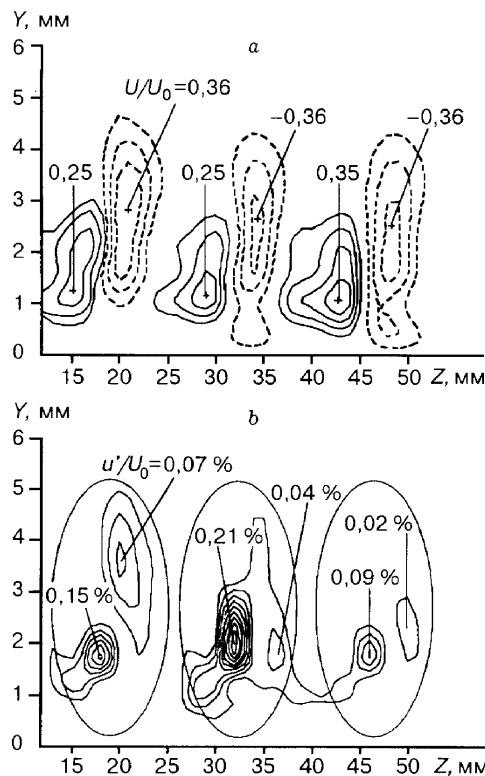
в плоскости, перпендикулярной модели. Напряжения с нитей определялись с помощью пары независимых термоанемометров DISA 55M01, откуда они поступали через блок смещения постоянного напряжения в АЦП; в дальнейшем сигналы обрабатывались так же, как при измерении  $U$  и  $u'$ . Измерения скорости набегающего потока в процессе тарировки проводились по перепаду статического давления между форкамерой и рабочей частью трубы в диапазоне скоростей 1 – 10 м/с и углов  $\pm 30^\circ$ .

Линеаризация сигналов при двухниточных измерениях представляет значительную трудность, причем основная ошибка эксперимента обычно связана именно с качеством линеаризации. Важными элементами использованной программы обработки являются способ прямого соответствия между напряжениями с мостов термоанемометров и получаемыми значениями компонент скорости, а также методика пространственного совмещения нитей датчика, которое необходимо при сильном поперечном градиенте скорости, создаваемом вихрями. Подробно использованный метод линеаризации данных при двухниточных измерениях описан в [13].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1.1. Характеристики волн, развивающихся на группе вихрей

Как отмечалось выше, за каждым элементом шероховатости образовывался стационарный продольный вихрь, на котором развивались собственные бегущие волны. Распределения дефекта продольной скорости относительно невозмущенного пограничного слоя  $\Delta U/U_0$  и пульсаций на частоте возбуждаемого звука представлены на рис. 2. Сплошной линией показаны условные контуры вихрей; расстояние между ними составляло 13 мм. Распределение дефекта продольной компоненты скорости представляет собой пары избытка и недостатка скорости,

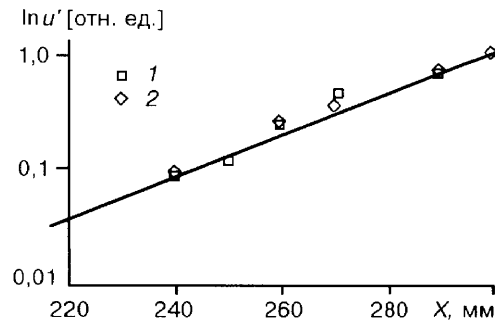


каждая из которых характеризует один стационарный вихрь. Их амплитуда  $\Delta U = (U_{\max} - U_{\min})/U_0$  составляет диапазон 0,30 – 0,35, причем значения дефектов для разных вихрей близки. Между тем интенсивности пульсаций в соседних вихрях заметно различаются (рис. 2, b). Такое различие, по-видимому, объясняется несколькими разными условиями, которые формируют стационарные вихри, и качественно совпадает с результатами других экспериментов [8]. Как было показано в [12], развитие возмущений может быть очень чувствительно к локальным условиям на крыле, полный контроль за которыми затруднен, из-за чего и может возникнуть столь заметное различие в амплитуде волн.

Рис. 2. Распределение дефектов продольной компоненты скорости (a) и пульсаций на частоте звукового возбуждения (b) в системе вихрей.

Овалами схематически изображены контуры вихрей.

Рис. 3. Нарастание вторичных волн, возбуждаемых звуком, на наборе стационарных вихрей при различной амплитуде возбуждения.  
Прямая линия — экспоненциальный закон.



В условиях контролируемого возбуждения волн был исследован вопрос о линейности волн, возникающих на наборе вихрей. На рис. 3 представлены кривые нарастания интенсивности волн при амплитуде возбуждения волны к концу участка измерения 0,87 % (1) и 0,27 % (2). Значения  $u'$  нормированы на максимальное. Измерения проводились в ядре вихря при варьировании амплитуды звука в одной точке пространства, что позволило устранить возможные ошибки, связанные с установкой датчика. Как видно из рис. 3, в обоих случаях кривые нарастания совпадают друг с другом, что говорит об амплитудной независимости роста возмущений на наборе вихрей. Некоторые отличия от экспоненциального закона роста можно объяснить неточностями установки датчика в точку максимума пульсаций. Никаких свидетельств возникновения в данных условиях разностных гармоник или иных нелинейных эффектов получено не было.

Из распределения фаз пульсаций скорости получено, что при обоих значениях амплитуды вводимого звука скорость распространения собственных возмущений вдоль вихря остается неизменной (как и в случае одиночного вихря), составляя 0,6 скорости набегающего потока. Выяснено, что темп роста возмущений чувствителен к изменению сдвига средней скорости в трансверсальном направлении в зависимости от расстояния между стационарными вихрями. На рис. 4 представлены инкременты естественных бегущих возмущений  $\alpha_i$  в диапазоне  $X = 210 - 250$  мм для нескольких расстояний между стационарными вихрями  $\Delta Z$ ; значения  $\alpha_i$  нормированы на толщину вытеснения пограничного слоя  $\delta^*$ . Расстояние между стационарными вихрями  $\Delta Z$  идентично расстоянию между наклейками (шероховатостями). В качестве сравнения приведена также зависимость  $\alpha_1(f)$  для одиночного вихря. Для сопоставления зависимостей по аналогии с числом Струхала введен частотный параметр  $K = f\Delta/U_0$ , где величина  $\Delta = U_0(dU/dZ|_{\max})^{-1}$  характеризует сдвиг скорости в трансверсальном направлении [14]. Как видно, диапазон  $K$  остается почти постоянным для всех рассмотренных случаев.

Из рис. 4 становится ясно, что при сближении вихрей амплитуда пульсаций заметно снижается по всему спектру неустойчивости. Например, при изменении  $\Delta Z$  с 16 до 8 мм коэффициент нарастания наиболее неустойчивой волны в пакете снижается с 0,08 до 0,03. Нужно отметить, что, несмотря на такое изменение амплитуды, пакет возмущений ведет себя как единое целое и изменение темпов роста происходит во всем диапазоне неустойчивости.

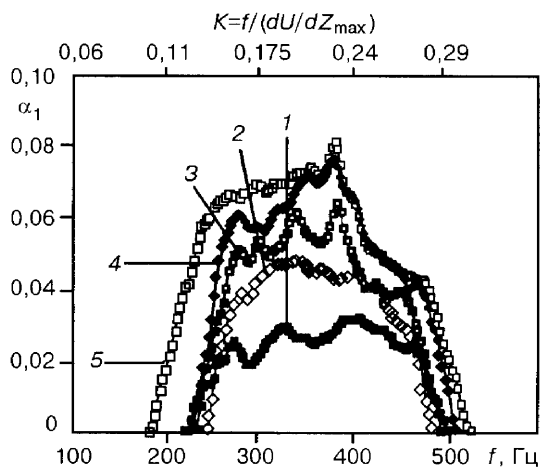


Рис. 4. Зависимость коэффициентов нарастания пакета возмущений от расстояния между вихрями.  
1 - 5 —  $\Delta Z = 8, 10, 13, 16$  мм,  $\infty$ .

### 3.1.2. Исследование взаимодействия соседних вихрей

Для анализа полученной зависимости инкрементов от  $\Delta Z$  были проведены двухточечные измерения: X-образным датчиком измерялись  $U$ - и  $V$ -компоненты скорости в системе вихрей. Измерения проводились при перемещении датчика параллельно поверхности (при постоянном  $Y$ ) вдоль оси  $Z$  с шагом 1 мм для 10 значений  $Y$ . Промежуточные значения получены путем интерполяции данных кубическими сплайнами.

На рис. 5 приведены распределения дефектов продольной составляющей средней скорости  $U$  (a) и нормальной  $V$ -компоненты скорости (b) при  $\Delta Z = 13$  и 16 мм в сечении  $X = 245$  мм. Видно, что при сближении вихрей  $V$ -компонента заметно уменьшается. Так, при  $\Delta Z = 16$  мм ее максимум составляет 2,98, а при  $\Delta Z = 13$  мм — 1,76 %. Такое ослабление  $V$ -компоненты приводит к уменьшению дефектов  $U$ -компоненты, иначе говоря, при сближении возникает взаимовлияние вихрей друг на друга. Однако сближение вихрей мало влияет на форму распределения дефектов скорости. Сравнение рис. 5, I, a и 5, II, a показывает почти неизменные распределения максимумов и минимумов  $U$ -компонент, характеризующих вихри, и порождающие их восходящие и нисходящие потоки  $V$ -компоненты при сохранении общей формы изолиний. Так, для  $\Delta Z = 16$  мм отрицательный дефект скорости (максимум) составляет 0,31, а для  $\Delta Z = 13$  мм — 0,27 скорости набегающего потока. При сближении вихрей до  $\Delta Z = 8$  мм эта величина уменьшается до 0,23  $U_0$ . Таким образом, происходит снижение амплитуды вихря и соответственно “сильных” слоев сдвига скорости, определяющих развитие неустойчивости в данном течении [12], вследствие чего при сохранении общей картины течения рост вторичных возмущений замедляется, что может существенно затян timer переход. Поэтому изменение расстояния между соседними вихрями в

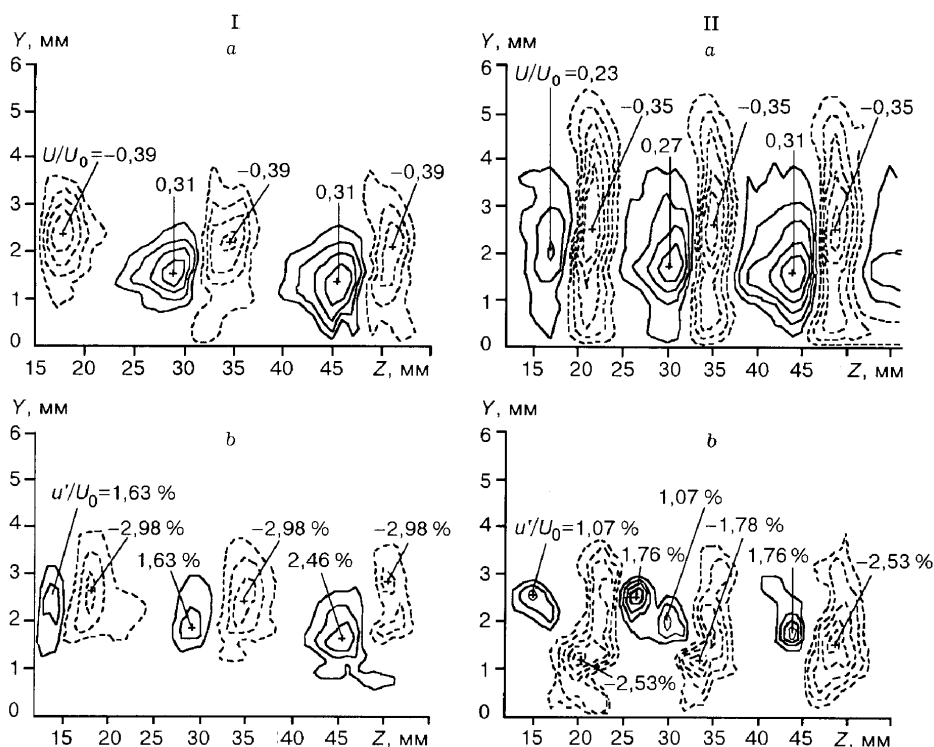


Рис. 5. Распределение дефектов  $U$ - (a) и  $V$ -компонент (b) скорости в наборе стационарных вихрей в сечении  $X = 245$  мм при  $\Delta Z = 13$  мм (I), 16 мм (II).

“естественном” случае может играть роль заметного фактора в развитии вторичных волн.

### 3.1.3. Распространение бегущих возмущений по системе вихрей

Важными аспектами картины неустойчивости представляются также возможности перехода возмущений с одного вихря на другой и взаимодействия волн, развивающихся на разных вихрях. Для изучения этих вопросов было использовано возбуждение волн неустойчивости с помощью локального периодического вдува-отсоса в сравнении со звуковым возбуждением. Измерения проведены в сечении  $X = 270$  мм на расстоянии 100 мм от отверстия. Распределения пульсаций скорости в системе вихрей на частоте возбуждения при введении их акустическим полем и периодическим вдувом-отсосом представлены на рис. 6. Видно, что волна неустойчивости при вдуве-отсосе возникает только на одном (центральном) вихре, под которым расположено отверстие, причем распределения пульсаций при обоих методах возбуждения аналогично случаю одиночного [12].

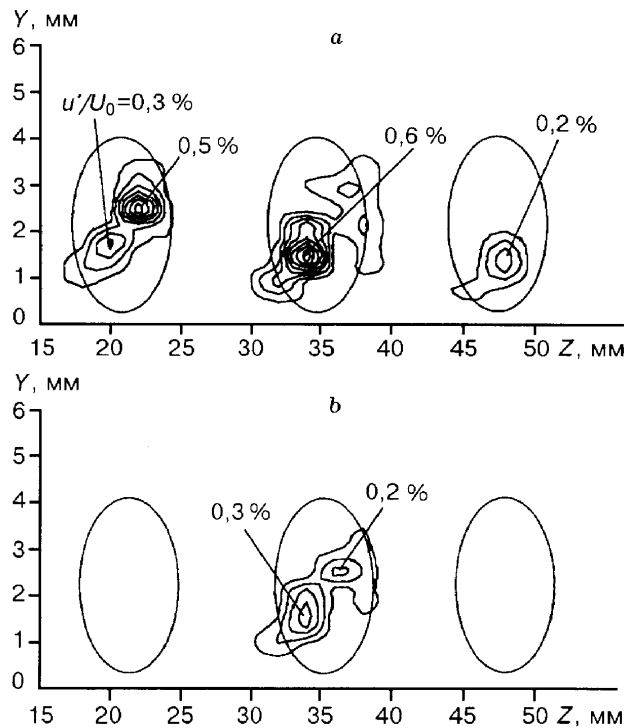


Рис. 6. Распределение возмущений в наборе вихрей при возбуждении волн звуком (а), вдувом-отсосом (б).

Овалами схематически показаны контуры вихрей.

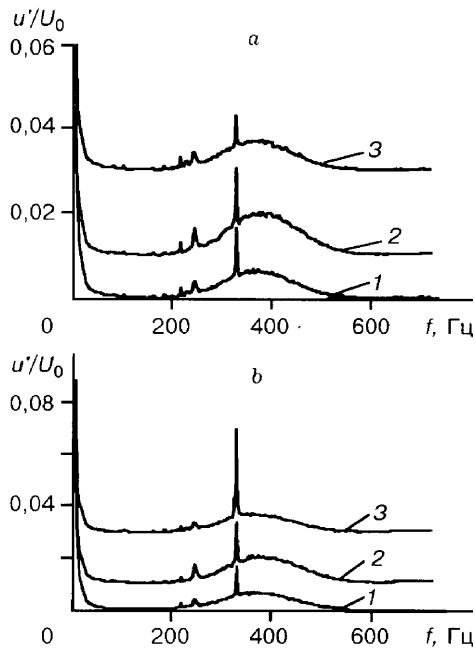


Рис. 7. Спектры возмущений в центре вихря. Сложение волн в противофазе (а) и в фазе (b);  $X = 270$  мм.

На основе изученных в предыдущем разделе свойств волн можно предложить метод локального активного управления неустойчивостью на одном из вихрей: при соответствующем подборе фазы и амплитуды возмущения, вводимого периодическим вдувом-отсосом, можно управлять развитием волн, возбуждаемых извне, например, звуком.

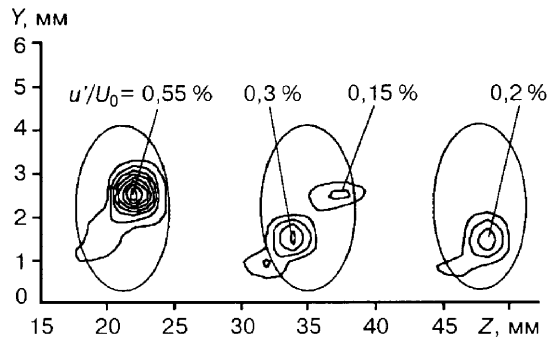
На рис. 7 показаны результаты измерения спектров пульсаций скорости в центральной части одного из исследуемых вихрей. Представленные данные иллюстрируют принципиальную возможность изменения амплитуды возмущений при наложении волн одинаковых частот, возбуждаемых разными источниками. На рисунке

приведены спектры возмущений при возбуждении волн частоты  $f = 320$  Гц звуком (1) и периодическим вдувом-отсосом через отверстие (2) по отдельности и совместно (3) в противофазе (а) и синфазно (b). Видно, что в результате наложения в противофазе амплитуда суммарного сигнала равна 0,14 %, что ниже исходных значений (0,2 % и 0,23 % в случае возбуждения волны соответственно звуком и вдувом-отсосом), т. е. амплитуда волн, возбужденных звуком, уменьшилась. Наоборот, если возмущения вводились синфазно, то их результирующая амплитуда заметно росла и составила 0,45 % (вводились волны с амплитудами 0,2 % от акустического источника и 0,27 % вдувом-отсосом).

Более детально картина взаимодействия волн, возбуждаемых указанными выше способами в противофазе, представлена на рис. 8. Параметры отдельно возбуждаемых волн полностью соответствовали приведенным на рис. 6. Амплитуда волн, возбуждаемых звуком, равная 0,6 % (см. рис. 6, а), уменьшилась по всей занимаемой вихрем области в соответствии с амплитудой подавляющего сигнала 0,3 % (см. рис. 6, b) и составила 0,3 % (см. рис. 8). Нужно отметить, что вычитание волн происходит по всему занимаемому вихрем пространству, что видно на примере второго бокового максимума. Его амплитуда также изменилась с 0,2 % при вдуве-отсосе до 0,14 % при суммарном возбуждении, при этом амплитуда возмущений на соседних вихрях, как и предполагалось, не изменилась, так как на них возмущения вдувом-отсосом не возбуждались. При более точном подборе фаз, видимо, возможно более сильное подавление возмущений.

Таким образом, в исследуемом трехмерном течении показана возможность управления развитием неустойчивости

Рис. 8. Распределение возмущений в наборе вихрей при совместном возбуждении волн в противофазе: звуком и вдувом-отсосом. Овалами схематически показаны контуры вихрей.





через взаимогашение возмущений путем дополнительного возбуждения волн в противофазе. Если предполагаемый источник будет способен воспроизвести весь пакет волн с заданными частотно-амплитудными характеристиками, то возможно почти полное их подавление и значительное затягивание перехода к турбулентности в вихре.

### 3.3. Локализованный непрерывный отсос

В описываемых ниже экспериментах (за исключением одного) все измерения проведены в условиях, когда отсос располагался непосредственно под одним из вихрей. Зависимость амплитуды волн вторичной неустойчивости от величины отсоса показана на рис. 9. Здесь представлены распределения пульсаций, возбуждаемых звуком поперек течения, содержащего стационарные вихри. Измерения сделаны в сечении  $X = 270$  мм при  $Y = 2$  мм. Видно, что отсос оказывает заметное влияние на амплитуду пульсаций в ядре вихря и чем больше эта величина, тем сильнее воздействие. Даже при самом слабом отсосе, когда его значение сопоставимо с используемым в двумерном течении [1], разница в амплитудах волн была весьма существенна. Это показывает, что в таком трехмерном течении, например на нескольких последовательных отверстиях, можно эффективно применять такой небольшой отсос.

Спектральные измерения в ядре вихря показали, что отсос воздействует на весь спектр волн неустойчивости, поэтому, очевидно, воздействие, как и в случае пограничного слоя Блазиуса, осуществляется прежде всего опосредованно, через изменение характеристик течения в стационарных вихрях. Для выяснения этого вопроса было проведено сравнительное измерение средней скорости и пульсаций в плоскости  $YZ$  при  $X = 270$  мм. Для повышения точности измерения проводились в одной точке пространства путем включения и выключения отсоса. Результаты эксперимента с отсосом показаны на рис. 10. При сопоставлении с рис. 2, где приведены результаты эксперимента без отсоса, видно, что локальное воздействие отсоса приводит к снижению амплитуды пульсаций на среднем вихре примерно в 10 раз. В то же время воздействие на соседние вихри оказывается незначительным и может быть сравнимо с общей ошибкой измерений либо с некоторым воздействием на вихри, расположенные рядом, при большой амплитуде отсоса.

Как и предполагалось, отсос оказывает сильное воздействие на распределение средней скорости в том вихре, под которым расположено отверстие. При этом воздействие на структуру вихря оказывается несимметричным. Более всего оно сказывается на величине отрицательного дефекта скорости, кото-

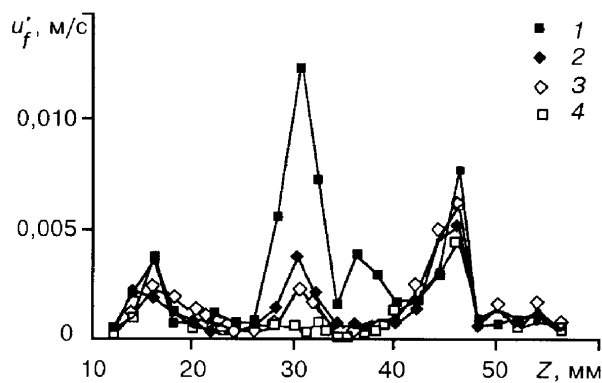


Рис. 9. Распределение возмущений в системе вихрей (возбуждение звуком).  
1 — отсоса нет, 2 – 4 — среднерасходная скорость отсоса в отверстии  $\Delta U/U_0$  равна соответственно 0,38; 0,66 и 1,93.

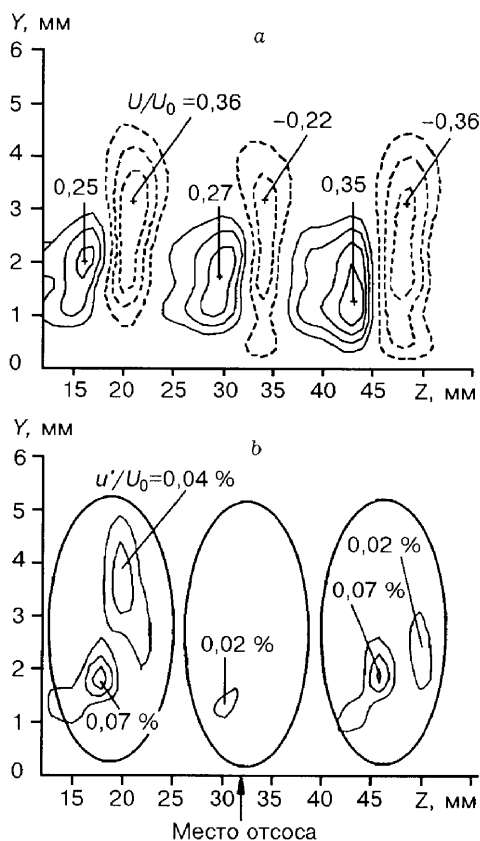


Рис. 10. Распределение дефекта средней скорости (а) и бегущих возмущений (б) в системе вихрей при отсосе.

Среднерасходная скорость отсоса в отверстии  $U/U_0 = 1,2$ .

рое уменьшается на  $0,15U_0$ , тогда как положительный дефект увеличивается лишь на  $0,02U_0$ . Такая несимметрия может быть объяснена, в частности, бóльшим воздействием на поперечную компоненту скорости в пристенной области, чем во внешней. Вероятно, отсос может заметно ослабить восходящий от стенки поток и, следовательно, уменьшить именно отрицательную часть дефекта скорости. Итоговый сдвиг скорости, создаваемый вихрем, снижается с  $0,61U_0$  до  $0,49U_0$ , т. е. примерно на 25 % своей первоначальной величины.

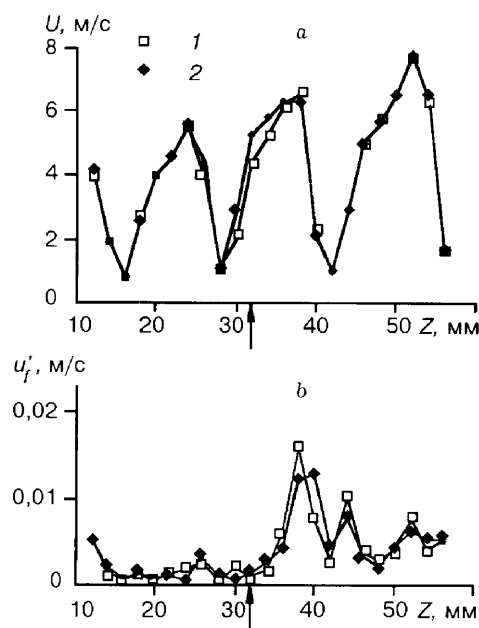
Таким образом, структура вихря подвергается сильному воздействию на стадии линейного развития бегущих волн. Как и в двумерном случае [1], это приводит к изменению условий устойчивости в течении и, как следствие, к снижению уровня пульсаций. Такая зависимость интенсивности роста возмущений от

величины сдвига скорости, порождаемого вихрем, была исследована в [12]. Хорошо видно, что существенная часть воздействия осуществляется в центральном вихре, в соседних же вихрях оно практически не заметно и составляет не более  $0,02U_0$ . В результате, как показывает рис. 10, воздействие на возмущения в соседних вихрях незначительно даже при такой большой величине отсоса.

Описанная локальность воздействия отсоса определяет необходимость изучения влияния местоположения точки отсоса на снижение возмущений. Были проведены измерения для точки отсоса, смещенной на половину трансверсального периода следования вихрей и расположенной, таким образом, между ними (в действительности смещались сами наклейки относительно неподвижного

Рис. 11. Влияние отсоса между вихрями на распределение средней скорости (а) и пульсаций (б) в системе вихрей ( $Y = 2$  мм).

1 — без отсоса, 2 — с отсосом. Стрелка указывает место отсоса.



отверстия в крыле). Результаты измерений приведены на рис. 11, где показаны сравнительные распределения продольных компоненты скорости  $U(a)$  и пульсаций на частоте возбуждения звуком ( $b$ ) для случая отсоса между вихрями ( $Y = 2$  мм). Видно, что хотя искажение средней скорости и сохраняется, амплитуда бегущих волн практически не меняется. Вероятно воздействие, оказываемое на вихри, не затрагивает ту часть течения, которая ответственна за генерацию неустойчивости [12]. В частности, величина сдвига скорости в центре вихря остается прежней, несмотря на некоторое искажение течения на его периферии.

### ВЫВОДЫ

Для группы вихрей, развивающихся в пограничном слое, установлено, что нарастающие на них бегущие волны имеют такие же амплитудные и фазовые характеристики, что и на одиночном вихре; существует также область линейного развития бегущих волн. В то же время показано, что темпы роста возмущений существенно зависят от расстояния между вихрями, что объясняется взаимодействием соседних вихрей.

Предложены и обоснованы методы управления вторичной неустойчивостью стационарных продольных вихрей в пограничном слое:

показано, что с помощью контролируемой волны, возбуждаемой в вихре за счет периодического вдува-отсоса через отверстие, можно активно воздействовать на развитие естественных волн на участке линейного роста и замедлить их нарастание, что указывает на возможность применения MEMS-технологии; отмечена локализация этого воздействия в пределах одного из вихрей;

обнаружено, что отсос способен заметно ослабить вторичную неустойчивость посредством локализованного воздействия на структуру течения. Отмечено, что степень воздействия зависит от местоположения отсоса относительно ядра вихревых структур; максимальное воздействие оказывается при отсосе непосредственно под вихрем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Гранты № 96-01-01892 и 96-15-96310), а также Сибирского отделения РАН (в рамках молодежного проекта СО РАН).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.В., Левченко В.Я., Щербаков В.А. Развитие возмущений в пограничном слое при щелевом отсасывании // Уч. зап. ЦАГИ. — 1978. — Т. IX, № 2. — С. 99 – 105.
2. Boiko A.V., Kozlov V.V., Syzrantsev V.V., Scherbakov V.A. Transition control by riblets in swept wing boundary layer with embedded streamwise vortex // Eur. J. Mechanics, B/Fluids. — 1997. — Vol. 16, No. 4. — P. 465 – 482.
3. Grek G.R., Kozlov V.V., Titarenko S.V., Klingmann B.G.B. The influence of riblets on a boundary layer with embedded streamwise vortices // Phys. Fluids A. — 1995. — Vol. 7, No. 10. — P. 2504 – 2506.
4. Milling R.W. Tollmien-Schlichting wave cancellation // Phys. Fluids. — 1981. — Vol. 24. — P. 979 – 981.
5. Gilev V.M. Tollmien-Schlichting wave excitation on the vibrator and laminar-turbulent transition control // Laminar-Turbulent Transition / Ed. V.V. Kozlov. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1985. — P. 243 – 248.
6. Kozlov V.V., Levchenko V.Ya. Laminar-Turbulent Transition Control by Localized Disturbances // IUTAM Symp. on Turbulence Management and Relaminarization Proc. / Eds. H.W. Liepmann, R. Narasimha. — Bangalore, 1987.
7. Гилев В.М., Козлов В.В. Влияние периодического вдува-отсоса на процесс перехода в пограничном слое. — Новосибирск, 1985. — (Препр. / СО АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТ-ПМ; № 1).
8. Swearingen J.D., Blackwelder R.F. The growth and breakdown of streamwise vortices in the presence of the wall // J. Fluid Mech. — 1987. — Vol. 182. — P. 255 – 290.
9. Boiko A.V., Kozlov V.V. Methods of controlled disturbances for laminar-turbulent transition research and control // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research.: Proc. Pt 1. — Novosibirsk, 1996. — P. 25 – 33.

10. **Ho Ch.-M., Tau Yu-Ch.** MEMS: Science and technology // Application of Microfabrication to Fluid Mech. — 1994. — Vol. 197. — P. 39 – 48.
11. **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. — № 1. — С. 72 – 84.
12. **Бойко А.В., Козлов В.В., Сызранцев В.В., Щербаков В.А.** Исследование влияния внутренней структуры продольного вихря на развитие бегущих возмущений в нем // Теплофизика и аэромеханика. — 1997. — Т. 4, № 3. — С. 369 – 380.
13. **Boiko A.V., Syzrantsev V.V., Scherbakov V.A.** Investigation of streamwise stationary vortex by double-wire hot-wire anemometer probe // Intern. Conf. Methods Aerophys. Research.: Proc. Pt 1. — Novosibirsk, 1996. — P. 34 – 39.
14. **Bottaro A., Klingmann B.G.B.** On linear breakdown of Goertler vortices // Eur. J. Mech., B/Fluids. — 1996. — Vol. 15, No. 3. — P. 301 – 330.

*Статья поступила в редакцию 9 февраля 1998 г.*