

УДК 532.526

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТАЦИОНАРНЫХ И БЕГУЩИХ МОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА

В.И. БОРОДУЛИН, В.Р. ГАПОНЕНКО, Ю.С. КАЧАНОВ

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
Новосибирск*

Впервые в условиях контролируемого эксперимента проведено прямое исследование нелинейного взаимодействия стационарных и бегущих нормальных мод неустойчивости поперечного течения в трехмерном пограничном слое на модели скользящего крыла. Обнаружено, что в результате взаимодействия возбуждаются и усиливаются комбинационные волны. При этом инкременты нарастания взаимодействующих мод практически не изменяются, в то время как одна из комбинационных волн, быстро затухающая в линейном случае, становится близкой к нейтрально устойчивой, а другая, близкая к нейтрально устойчивой в линейном случае, начинает быстро нарастать. Показано, что в обнаруженном взаимодействии выполняются условия фазового синхронизма в двух несимметричных триплетах, а само взаимодействие носит резонансный характер.

ВВЕДЕНИЕ

Предыдущие исследования (см., например, [1 – 5]) показали, что в ламинарно-турбулентном переходе пограничного слоя на скользящем крыле, как и в двумерных пограничных слоях, можно выделить три основных этапа: преобразование внешних возмущений в моды неустойчивости пограничного слоя, линейное развитие этих мод по законам линейной теории устойчивости, их нелинейное взаимодействие и окончательный переход к турбулентности. Кроме того, было установлено, что ввиду сильного отличия характера перехода в трехмерных пограничных слоях от двумерного случая роль нелинейных взаимодействий в предсказании положения перехода в таких течениях намного более существенна, чем в двумерных пограничных слоях. Дело в том, что на начальных стадиях перехода в пограничном слое скользящего крыла стационарные возмущения (вихри неустойчивости поперечного течения) обычно доминируют в большинстве реальных ситуаций [6 – 8]. Однако без взаимодействия с некоторыми нестационарными возмущениями они, конечно, не могут привести к переходу к турбулентности.

Экспериментальному исследованию взаимодействий такого рода посвящено небольшое количество работ (см. обзоры [2, 3, 5]). В работах [8 - 10] изучалось взаимодействие в “естественном” переходе, что сильно затрудняет интерпретацию результатов и сравнение с теоретическими моделями из-за одновременного действия различных физических механизмов. В то же время в этих экспериментах был получен ряд принципиальных результатов. Так, в [8] обнаружено быстрое нарастание низкочастотных нестационарных возмущений, когерентных со стационарными вихрями, обусловленное, по-видимому, нелинейным взаимодействием. В экспериментах [9, 10] найден механизм бурного усиления высокочастотных возмущений, локализованных в

определенных местах пространства относительно положения стационарных вихрей. Первые эксперименты в контролируемых условиях были проведены в работе [11], где изучалось взаимодействие вихрей поперечного течения с квази-двумерными высокочастотными бегущими волнами. В частности, был обнаружен необычный механизм усиления стационарных вихрей бегущими возмущениями сравнительно малой амплитуды. Однако авторы исследования [11] были существенно ограничены в своих возможностях ввиду отсутствия в то время методики возбуждения трехмерных нестационарных нормальных мод неустойчивости поперечного течения.

Ранее проведенные исследования показали, что в случае небольших уровней внешних возмущений (характерных для условий полета) наиболее существенными, по-видимому, являются взаимодействия стационарных вихрей с бегущими волнами неустойчивости поперечного течения, наклоненными под большими углами к потоку (около $83 - 85^\circ$), поскольку именно по отношению к этим модам пограничный слой скользящего крыла обычно наиболее неустойчив в линейном смысле. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию указанных выше взаимодействий в контролируемых условиях с использованием специального генератора возмущений, позволяющего возбудить в трехмерном пограничном слое практически произвольный начальный спектр нестационарных мод неустойчивости.

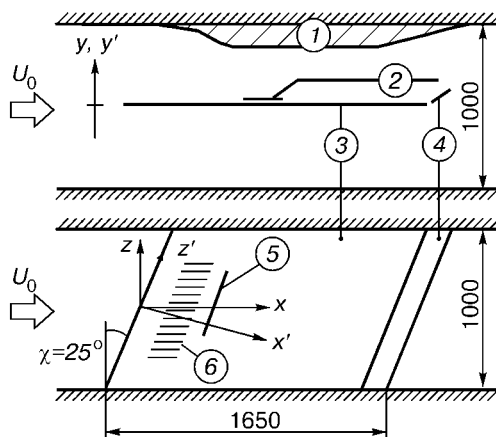
1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Экспериментальная модель

Эксперименты проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск). Рабочая часть трубы имеет сечение 1×1 м и длину 4 м. В условиях эксперимента уровень турбулентности внешнего потока не превышал $0,065\%$ в диапазоне частот выше 1 Гц.

Схема экспериментальной модели приведена на рис. 1. Как и в ряде предыдущих экспериментов (см. [7 – 17]), трехмерный пограничный слой на разгонном участке скользящего крыла моделировался с помощью плоской пластины со скошенными кромками, над которой помещалась профилированная ложная стенка, создающая над поверхностью пластины отрицательный градиент давления. Угол скольжения передней и задней кромок пластины и ложной стенки $\chi = 25^\circ$.

В работе использованы следующие системы координат (см. рис. 1). Ось x направлена вниз по потоку вдоль оси рабочей части ($x = 0$ на передней кромке пластины на оси модели), ось x' — вдоль хорды модели, ось z — параллельно пластине, по нормали к набегающему потоку, ось z' — параллельно передней кромке модели. В локальной системе координат ось x^* направлена параллельно местному вектору скорости на границе пограничного слоя, z^* — перпенди-



кулярно пластине, по нормали к набегающему потоку, ось z' — параллельно передней кромке модели. В локальной системе координат ось x^* направлена параллельно местному вектору скорости на границе пограничного слоя, z^* — перпенди-

Рис. 1. Схема эксперимента и системы координат.

1 — ложная стенка, 2 — координатник с датчиком термоанемометра, 3 — скользящая пластина, 4 — закрывок, 5 — “линейный” генератор бегущих волн, 6 — щелевой генератор стационарных вихрей.

кулярно оси x^* . Ось y направлена нормально к поверхности пластины. Кроме этого, в работе использовалась координата $x_c = x'/\cos\chi$, которая соответствует оси x , но начинается на передней кромке модели. Скорость потенциального потока на границе пограничного слоя в опорной точке ($x' = 528,8$ мм) составляла 7,0 м/с.

Подробное исследование характеристик трехмерного поля скоростей над используемой моделью как в потенциальном потоке, так и внутри пограничного слоя было проведено с помощью V - и X -образных датчиков термоанемометра в работах [12, 14]. Некоторые дополнительные параметры среднего течения, измеренные для условий данных экспериментов однониточным датчиком термоанемометра, приведены в [16 - 18]. В результате проведенных экспериментов установлено, что характеристики потенциального потока над моделью практически не зависят от трансверсальной координаты z' в диапазоне измерений $z = \pm 100$ мм от средней линии пластины. Эксперименты [12, 14] также показали, что структура потенциального потока над моделью не зависит от скорости набегающего потока в диапазоне (по крайней мере) от 3 до 11 м/с. Сравнение профилей продольной и поперечной компонент скорости потока в пограничном слое с расчетами Федорова [12] подтвердило локальную адекватность исследуемого течения течению на скользящем крыле в области ускорения потока.

1.2. Генерация возмущений и процедура измерений

Стационарные вихри неустойчивости поперечного течения (далее — мода S) вводились с помощью щелевого источника, описанного в [13, 14] и использовавшегося в этих работах для изучения линейной устойчивости течения на модели скользящего крыла. Возбуждение вихрей производилось с помощью слабого стационарного вдува-отсоса воздуха через ряд щелей на поверхности пластины, ориентированных вдоль потока (см. рис. 1) (вдув через четные щели, отсос — через нечетные). Щели длиной 100 мм располагались с шагом 12,5 мм по оси z , их ближние к передней кромке концы находились на расстоянии $x_c = 150$ мм.

Бегущая нормальная волна неустойчивости поперечного течения фиксированной частоты (далее мода T) вводилась с помощью специального “линейного” генератора, описанного в работах [16, 17] и используемого в них для получения характеристик линейной устойчивости течения. Восемь громкоговорителей вводили в пограничный слой периодическое во времени возмущение (на частоте $f = \omega/2\pi = 8,3$ Гц) через 83 трубочки, помещенные под щелью в поверхности пластины, параллельной передней кромке модели. Щель длиной 160 мм и шириной 0,7 мм располагалась на расстоянии $x_c = 490$ мм. Специальное электронное устройство обеспечивало необходимые фазовые соотношения между сигналами, подаваемыми на трубочки, соответствующие трехмерным волнам (распространяющимся под углом к потоку) с требуемым поперечным волновым числом β' .

Было исследовано три основных режима: 1 — в поток вводилась только мода S (режим S), 2 — только мода T (режим T), 3 — в поток вводились одновременно обе моды (режим $S + T$). Структура среднего течения и возмущений скорости определялись с помощью термоанемометра. В эксперименте применялся однониточный датчик, измеряющий x -компоненту вектора средней скорости и вектора пульсаций. Датчик был изготовлен из омедненной пластины. Размеры рабочего участка датчика: диаметр 6 мкм, длина 0,3 мм. Координатное устройство имело три степени свободы и обеспечивало точность установки датчика $\pm 0,005$, $\pm 0,1$ и $\pm 0,1$ мм в направлении осей y , x и z соответственно. Сигнал термоанемометра линеаризовался и регистрировался с помощью АЦП и компьютера. При линеаризации показания термоанемомет-

ра сравнивались со скоростью, измеренной трубкой Пито — Прандтля; отклонение не превышало 0,5 % во всем исследованном диапазоне скоростей.

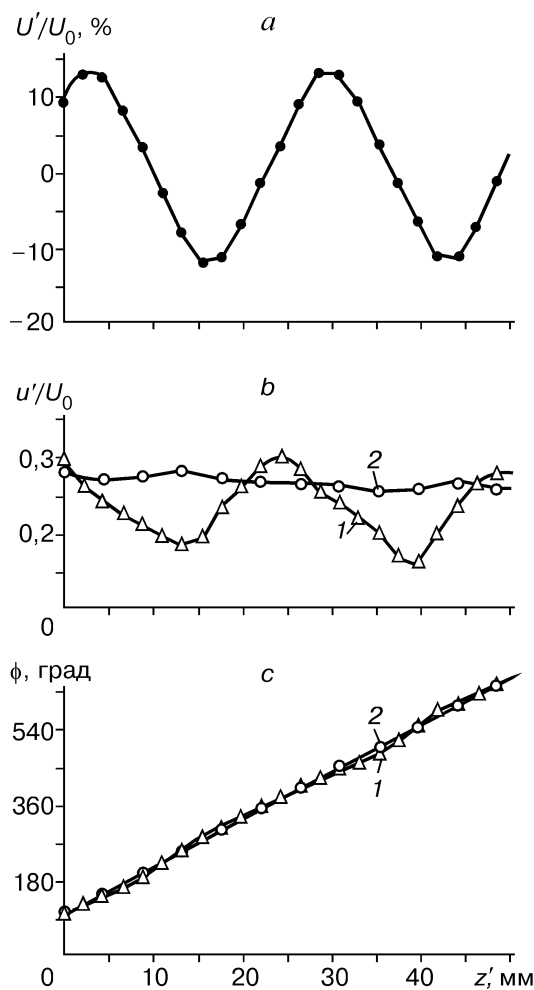
2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Поперечные распределения

Ряд типичных распределений амплитуд и фаз возмущений по размаху модели приведен на рис. 2 для продольной координаты $x' = 673,8$ мм ($x = 743,5$ мм при $z = 0$). Показанное на рис. 2, *a* распределение продольной компоненты средней скорости соответствует стационарной моде возмущений поперечного течения (вихрям поперечного течения) в режиме *S*. Обнаружено, что в режиме *S + T* эти вихри остаются такими же, так как бегущие моды не оказывают на них заметного влияния. Вихри имеют довольно большие амплитуды и поперечное (вдоль z') волновое число $\beta'_S = 0,228$ рад/мм.

В отсутствие стационарной моды *S* бегущая волна *T* представляет собой практически “чистую” нормальную наклонную моду (рис. 2, *b, c*). Амплитуда ее практически постоянна, а фаза линейно растет в направлении размаха модели. Скорость нарастания фазы моды *T* вдоль координаты z' соответствует поперечному волновому числу $\beta'_T = 0,196$ рад/мм.

В случае одновременного возбуждения обеих мод (режим *S + T*) бегущая волна оказывается существенно модулированной по амплитуде и фазе в поперечном направлении с пространственным периодом моды *S*: $\lambda'_z = 27,6$ мм, $\lambda_z = 25$ мм. Фурье-анализ по волновым числам показал, что эта модуляция соответствует наличию в спектре новых мод, а именно — с комбинационными поперечными волновыми числами $\beta'_- = \beta'_T - \beta'_S = -0,031$ и $\beta'_+ = \beta'_T + \beta'_S = 0,424$ рад/мм (далее — моды *C_-* и *C_+*). Эти моды могут возбуждаться в потоке как вследствие нелинейной генерации непосредственно на источнике бегущих волн (в присутствии стационарных вихрей, вводимых выше по потоку), так и в силу нелинейного взаимодействия мод неустойчивости поперечного течения внутри пограничного слоя вниз по потоку от обоих источников. Последующий анализ показал, что в потоке реализуются оба механизма.



речном направлении с пространственным периодом моды *S*: $\lambda'_z = 27,6$ мм, $\lambda_z = 25$ мм. Фурье-анализ по волновым числам показал, что эта модуляция соответствует наличию в спектре новых мод, а именно — с комбинационными поперечными волновыми числами $\beta'_- = \beta'_T - \beta'_S = -0,031$ и $\beta'_+ = \beta'_T + \beta'_S = 0,424$ рад/мм (далее — моды *C_-* и *C_+*). Эти моды могут возбуждаться в потоке как вследствие нелинейной генерации непосредственно на источнике бегущих волн (в присутствии стационарных вихрей, вводимых выше по потоку), так и в силу нелинейного взаимодействия мод неустойчивости поперечного течения внутри пограничного слоя вниз по потоку от обоих источников. Последующий анализ показал, что в потоке реализуются оба механизма.

Рис. 2. Поперечные распределения возмущений при $x_c = 743,5$ мм.

a — стационарные вихри (средняя скорость), *b, c* — бегущие волны (пульсации скорости) при наличии стационарных вихрей (1) и без них (2); *b* — амплитуды, *c* — фазы.

2.2. Эволюция нормальных мод вниз по потоку

С помощью фурье-анализа распределений типа показанных на рис. 2 для различных положений вниз по потоку определялись амплитуды B и фазы ϕ всех исследуемых мод частотно-волнового спектра (т.е. S , T , C_- и C_+). Их эволюция вдоль координаты x_c показана на рис. 3 в отсутствие взаимодействия (режимы S и T) и на рис. 4 — в присутствии взаимодействия (режим $S + T$).

Вихри поперечного течения нарастают вниз по потоку экспоненциально (рис. 3, *a*) от амплитуд $B \approx 7\%$ до $B \approx 11\%$ в зависимости от скорости потенциального течения. Распределение фаз моды S (рис. 3, *b*) хорошо аппроксимируется прямой линией, что дает возможность легко определить ее продольное волновое число $\alpha_{rS} = 0,0130$ рад/мм.

По известным значениям продольного волнового числа α_r (определенным в системе координат x, z) и поперечного волнового числа β' (определенным в системе координат x', z') нетрудно найти значения продольных волновых чисел в системе координат x', y', z' по формуле $\alpha'_r = \alpha_r / \cos \chi - \beta' \operatorname{tg} \chi$. После этого угол наклона волны к потоку (в локальной системе координат x^*, z^*) может быть определен по формуле $\theta' = \operatorname{arctg}(\beta' / \alpha'_r)$, $\theta^* = \theta' - \chi - \gamma$, где γ — угол поворота потенциального потока в центре области взаимодействия ($x_c = 743,5$ мм), равный $-2,91^\circ$ [12, 18]. Для моды S вышеуказанные значения волновых чисел соответствуют углу наклона волнового вектора $\theta^* \approx 89^\circ$, что согласуется с предыдущими измерениями и расчетами для линейных стационарных мод неустойчивости поперечного течения [13, 14].

Бегущая мода T , возбуждаемая отдельно (режим T), близка к нейтрально устойчивой, ее амплитуда остается постоянной и составляет около $0,3\%$. Изменение фазы моды T во всем диапазоне измерений по продольной координате можно аппроксимировать параболой. Однако, как будет показано ниже, самое сильное взаимодействие стационарных и бегущих мод происходит в диапазоне $x_c = 643 - 843$ мм, поэтому наиболее интересны локальные величины продольных волновых чисел из этого диапазона. Линейная аппроксимация фазовых распределений в указанном диапазоне, показанная на рис. 3, *b* линией 3, дает значение продольного волнового числа $\alpha_{rT} = 0,0241$ рад/мм, что соответствует углу наклона волнового вектора $\theta^* = 86^\circ$, типичному для наиболее неустойчивых бегущих волн поперечного течения [15, 16].

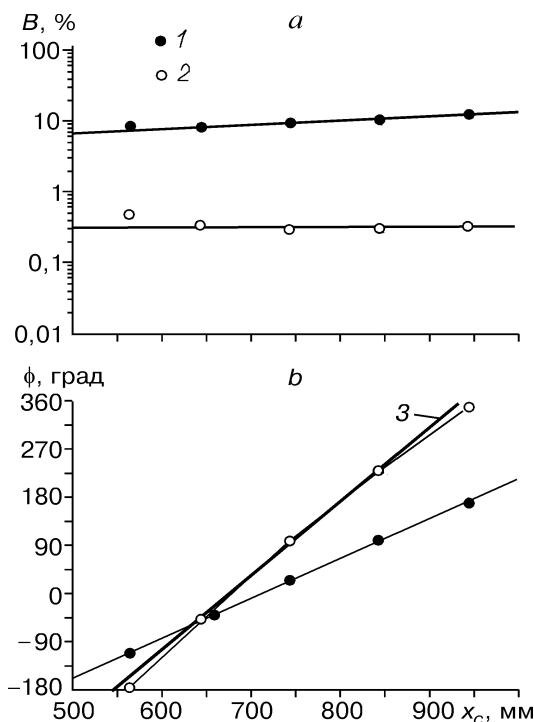


Рис. 3. Эволюция вниз по потоку амплитуд (*a*) и фаз (*b*) стационарных вихрей (1) и бегущих мод неустойчивости поперечного течения (2).

Прямая линия 3 аппроксимирует данные и 3 диапазона $x_c = 643 - 843$ мм.

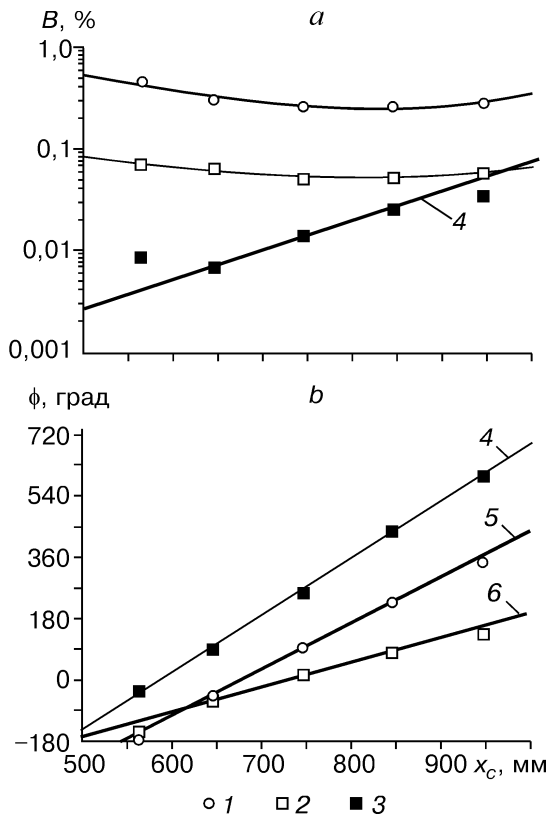


Рис. 4. Эволюция бегущих мод вниз по потоку при взаимодействии со стационарными продольными вихрями.

a — амплитуды, b — фазы. 1 — мода T , 2 — мода C_- , 3 — мода C_+ . Прямые линии 4 — 6 аппроксимируют данные из диапазона $x_c = 643$ –843 мм.

В случае одновременного возбуждения мод S и T (режим $S + T$) эволюция вихрей (т. е. моды S) не отличается от случая возбуждения только стационарной моды (режим S). То же справедливо и для моды T : в указанной выше области взаимодействия она остается почти нейтрально устойчивой (рис. 4, a) и имеет точно такие же значения продольного волнового числа (определенное по рис. 4, b), равное 0,0241 рад/мм, и угла наклона волны к потоку. В то же время поведение комбинационных мод C_- и C_+ отличается от типичного для линейно развивающихся волн неустойчивости поперечного течения и соответствует нелинейному взаимодействию.

В самом деле, в линейной задаче, согласно измерениям [15, 16], мода C_- , имеющая очень малое поперечное волновое число, должна быстро затухать вниз по потоку, однако в режиме $S + T$ этого не наблюдается (см. рис. 4, a). Вследствие взаимодействия эта мода становится близкой к нейтрально устойчивой. Более того, в режиме $S + T$ комбинационная мода C_+ быстро нарастает вместо поведения, близкого к нейтральному, характерного в случае отсутствия взаимодействия (см. [15, 16]). Наиболее быстрый экспоненциальный рост C_+ наблюдается в области $x_c \approx 640 - 840$ мм (см. рис. 4, a). В этом диапазоне были определены скорости нарастания мод T , C_+ и C_- (см. раздел 2.3).

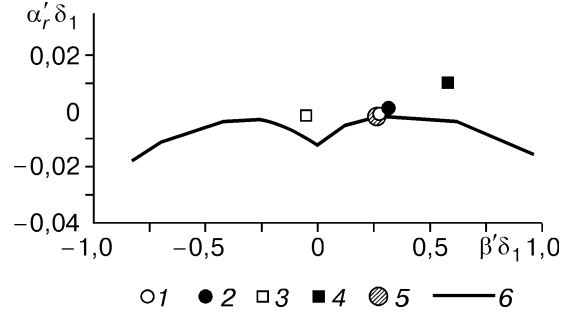
С помощью приведенных на рис. 4, b фазовых распределений мод C_- и C_+ по продольной координате были определены их продольные волновые числа в диапазоне наиболее интенсивного взаимодействия: $\alpha_{r(-)} = 0,0132$ и $\alpha_{r(+)} = 0,0297$ рад/мм. Эти значения использовались для сопоставления с дисперсионными характеристиками линейных мод неустойчивости поперечного течения, полученными в [15, 16] (см. ниже). Для мод C_- и C_+ вышеуказанные значения волновых чисел соответствуют углам наклона их волновых векторов $\theta^* \approx -69$ и $+89^\circ$ соответственно. (Отметим, что угол наклона моды C_+ почти совпадает с углом наклона стационарных вихрей.)

2.3. Скорости нарастания и условия фазового синхронизма

Прямое сопоставление инкрементов нарастания возмущений, измеренных в условиях настоящего эксперимента (включая режим со взаимодействием

Рис. 5. Сравнение скоростей нарастания возмущений, измеренных в условиях настоящего эксперимента, с линейным развитием нормальных мод поперечного течения, полученным в работах [12 – 15].

1 — бегущая волна (мода T), 2 — стационарный вихрь (мода S), 3 — комбинационная мода C_- , 4 — комбинационная мода C_+ , 5 — линейный рост моды T [14, 15], 6 — линейное развитие нормальных бегущих мод [12, 13].



ем $S + T$), с инкрементами, измеренными в предыдущих экспериментах [15, 16] для линейных нормальных мод неустойчивости поперечного течения, приведено на рис. 5. Видно, что как в режиме T , так и в режиме $S + T$ скорости нарастания моды T совпадают с полученными ранее для линейной задачи.

В то же время моды C_- и C_+ соответствуют гораздо более неустойчивым (или менее устойчивым) возмущениям, чем линейные моды с теми же частотами и волновыми числами в отсутствие взаимодействия. Нелинейное взаимодействие делает моду C_- , которая бурно затухала, близкой к нейтрально устойчивой, а моду C_+ , близкую к нейтральной, — быстро нарастающей.

Обнаруженное увеличение скоростей нарастания мод C_- и C_+ при почти нейтральном поведении первичных (вводимых в пограничный слой) мод S и T можно объяснить резонансным взаимодействием в двух триплетах:

$$\begin{aligned} &(\omega_S, \beta_S, \alpha_{rS}), \\ &(\omega_T, \beta_T, \alpha_{rT}), \\ &(\omega_-, \beta_-, \alpha_{r-}), \end{aligned} \quad (1)$$

и

$$\begin{aligned} &(\omega_S, \beta_S, \alpha_{rS}), \\ &(\omega_T, \beta_T, \alpha_{rT}), \\ &(\omega_+, \beta_+, \alpha_{r+}). \end{aligned} \quad (2)$$

Механизм такого взаимодействия может быть эффективным при выполнении следующих условий фазового синхронизма для взаимодействующих в триплетах мод:

$$\begin{aligned} \omega_T - \omega_S &= \omega_-, \\ \beta_T - \beta_S &= \beta_-, \\ \alpha_{rT} - \alpha_{rS} &= \alpha_-, \end{aligned} \quad (3)$$

и

$$\begin{aligned} \omega_T + \omega_S &= \omega_+, \\ \beta_T + \beta_S &= \beta_+, \\ \alpha_{rT} + \alpha_{rS} &= \alpha_+, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\omega_S = 0$, $\omega_+ = \omega_- = \omega_T = \omega$. Входящие в (3) и (4) условия на поперечные волновые числа выполняются автоматически ввиду того, что моды с индексами $-$ и $+$ — комбинационные. Выполнение же условий синхронизма для продоль-

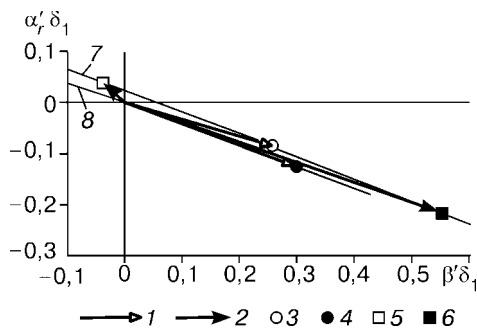


Рис. 6. Волновые векторы возмущений.

1 — вводимые в поток возмущения (концы векторов отмечены точками 3 и 4); 2 — комбинационные возмущения (концы векторов отмечены точками 5 и 6); 3 — бегущая волна с частотой 8,3 Гц; 4 — стационарный вихрь (частота 0 Гц); 5, 6 — комбинационные моды; 7 — дисперсионная кривая для частоты 8,3 Гц, 8 — дисперсионная кривая для частоты 0 Гц. Резонансные триплеты (3, 4, 5) и (3, 4, 6).

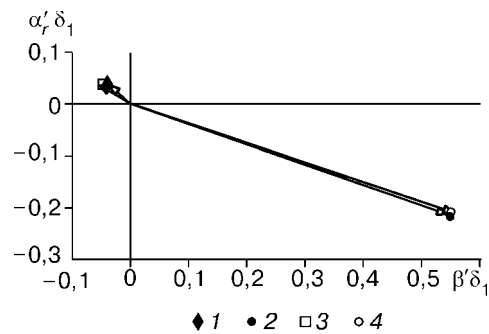


Рис. 7. Сравнение волновых векторов усиливаемых мод (1, 2) с комбинационными волновыми векторами; 3, 4 — соответственно разность и сумма волновых векторов бегущей и стационарной мод.

1 — k_- , 2 — k_+ , 3 — $k_T - k_S$, 4 — $k_T + k_S$.

ных волновых чисел должно быть проверено экспериментально, что и было сделано.

Резонанс может быть эффективным, если дисперсионные характеристики всех взаимодействующих мод совпадают с таковыми у собственных нормальных мод неустойчивости поперечного течения. Такое совпадение было обнаружено. Действительно, из рис. 6 видно, что концы волновых векторов всех четырех мод, участвующих во взаимодействии, лежат на соответствующих дисперсионных кривых для нулевой частоты и частоты $f = 8,3$ Гц, полученных из результатов измерений [15, 18], проведенных в условиях линейного развития нормальных мод неустойчивости.

На рис. 7 приведены волновые векторы комбинационных мод C_+ и C_- , обозначенные как k_+ и k_- соответственно, вместе с суммой и разностью $k_T + k_S$ и $k_T - k_S$ — волновых векторов мод T и S , которые возбуждались в потоке. Сопоставление показывает практически полное выполнение условий фазового синхронизма в триплетах (1) и (2), поскольку совпадение соответствующих пар векторов (C_+ с $(k_T + k_S)$ и C_- с $(k_T - k_S)$) равносильно выполнению условий (3) и (4) как для продольных, так и для поперечных волновых чисел.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко результаты данной работы можно сформулировать следующим образом.

1. В условиях контролируемого эксперимента впервые проведено прямое исследование нелинейного взаимодействия бегущих и стационарных нормальных мод неустойчивости поперечного течения в трехмерном пограничном слое на модели скользящего крыла. Рассмотрены три режима: возбуждение только стационарной моды, возбуждение только бегущей моды и возбуждение обеих мод одновременно.

2. Обнаружено, что взаимодействие бегущей моды (ω_T, β_T) (амплитуда около 0,3 %) и стационарной моды ($0, \beta_S$) (амплитуда около 10 %) приводит к возбуждению в пограничном слое комбинационных мод частотно-волнового спектра (ω_+, β_+) и (ω_-, β_-), где $\omega_+ = \omega_- + \omega_T, \beta_+ = \beta_T + \beta_S$ и $\beta_- = \beta_T - \beta_S$.

3. Показано, что взаимодействие практически не влияет на инкременты нарастания вводимых стационарной S и бегущей T мод, поведение которых близко к нейтрально устойчивому. В то же время оно сильно изменяет поведение комбинационных мод C_+ и C_- ; быстро затухающая в линейной задаче мода C_- становится нейтрально устойчивой, а слабо затухающая мода C_+ начинает интенсивно нарастать.

4. Установлено, что для двух взаимодействующих триплетов, состоящих из мод $[S, T, C_+]$ и $[S, T, C_-]$, выполняются условия фазового синхронизма и дисперсионные характеристики всех четырех мод практически совпадают с линейными, что свидетельствует в пользу резонансного механизма взаимодействия волн неустойчивости в этих триплетах и объясняет наблюдаемые результаты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 96-01-01654).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигулев В.Н., Тумин А.М. Возникновение турбулентности. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987.
2. Reed H.L., Saric W.S. Stability of three-dimensional boundary layers // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 1989. — Vol. 21. — P. 235 – 284.
3. Bippes H. Instability features appearing on swept wing configuration // *Laminar-Turbulent Transition* / Eds. D. Arnal, R. Michel. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1990. — P. 419 – 430.
4. Arnal D., Casalis G., Juillen J.C. Experimental and theoretical analysis of natural transition on “infinite” swept wing // *Ibid.* — P. 311 – 325.
5. Kachanov Y.S. Generation, development and interaction of instability modes in swept-wing boundary layer // *Nonlinear Instability and Transition in Three-Dimensional Boundary Layers* / Eds. P.W. Duck & P. Hall. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. — P. 115 – 132.
6. Michel R., Arnal D., Coustols E., Juillen J. C. Experimental and theoretical studies of boundary layer transition on a swept infinite wing // *Laminar Turbulent Transition* / Ed. V.V. Kozlov. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1985. — P. 553 – 561.
7. Saric W.S., Yeates L.G. Generation of crossflow vortices in a three-dimensional flat-plate flow // *Laminar Turbulent Transition* / Ed. V.V. Kozlov. — *Ibid.* — P. 429 – 437.
8. Nitschke-Kowsky B., Bippes H. Instability and transition of a three-dimensional boundary layer on a swept flat plate // *Phys. Fluids.* — 1988. — Vol. 31. — P. 786 – 795.
9. Kohama Y. Some expectations on the mechanism of cross-flow instability in a swept wing flow // *Acta Mech.* — 1987. — Vol. 66. — P. 21 – 38.
10. Kohama Y., Saric W.S., Hoos J.A. A high-frequency, secondary instability of crossflow vortices that leads to transition // *Proc. of the Royal Aeronautical Society Conf. on Boundary-Layer Transition and Control.* — Cambridge University, 1991.
11. Качанов Ю.С., Тарарыкин О.И. Взаимодействие стационарных и бегущих волн неустойчивости на скользящем крыле // *Методы аэрофизических исследований* / Под ред. А.М. Харитонова. — Новосибирск: Изд. ИТПМ СО АН СССР, 1990. — С. 138 – 143.
12. Качанов Ю.С., Тарарыкин О.И., Федоров А.В. Экспериментальное моделирование пограничного слоя на скользящем крыле в области формирования вторичного течения // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.* — 1989. — Вып. 3. — С. 44.
13. Качанов Ю.С., Тарарыкин О.И., Федоров А.В. Исследование устойчивости к стационарным возмущениям пограничного слоя на модели скользящего крыла // *Там же.* — 1990. — С. 11.
14. Kachanov Y.S., Tararykin O.I. The experimental investigation of stability and receptivity of a swept-wing flow // *Laminar-Turbulent Transition* / Eds. D. Arnal, R. Michel. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1990. — P. 499.
15. Gaponenko V.R., Ivanov A.V., Kachanov Y.S. Experimental study of cross-flow instability of a swept-wing boundary layer with respect to traveling waves // *Laminar-Turbulent Transition* / Ed. R. Kobayashi. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1995. — P. 373 – 380.
16. Borodulin V.I., Gaponenko V.R., Kachanov Y.S. Method of introduction of normal instability modes into 3d boundary layer // *Intern. Conf. on Methods of Aerophysical Research.: Proc. P II.* — Novosibirsk: Inst. Theor. & Appl. Mech., 1996. — P. 39 – 45.
17. Бородулин В.И., Гапоненко В.Р., Качанов Ю.С. Исследование нормальных мод неустойчивости в трехмерном пограничном слое // *Теплофизика и аэромеханика.* — 1998. — Т. 5, № 1. — С. 25 – 36.
18. Гапоненко В.Р., Иванов А.В., Качанов Ю.С. Экспериментальное исследование устойчивости пограничного слоя скользящего крыла по отношению к нестационарным возмущениям // *Там же.* — 1995. — Т. 2, № 4. — С. 333 – 359.

Статья поступила в редакцию 5 ноября 1998 г.