

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВТОРИЧНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРУШЕНИЯ Λ-СТРУКТУРЫ

Г.Р. ГРЕК, М.М. КАТАСОНОВ, В.В. КОЗЛОВ, В.Г. ЧЕРНОРАЙ

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
Новосибирск*

В работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик развития Λ-структур и механизма их преобразования в турбулентные пятна. Показано, что уединенная Λ-структура может быть как затухающей, так и нарастающей вниз по потоку, трансформирующейся в турбулентное пятно. Структурно оба типа возмущений представляют собой два противоположно вращающихся вихря ("ноги" возмущения), замкнутых в области переднего фронта "головкой". Их топологическое различие состоит в том, что если затухающая Λ-структура больше напоминает шпильковый вихрь и не выходит за верхнюю границу пограничного слоя, то "головка" нарастающей Λ-структуры выходит за верхнюю границу пограничного слоя и возмущение приобретает вид греческой буквы Λ. Установлено, что нарастание Λ-структуры связано с развитием вторичного высокочастотного возмущения на "ногах" структуры. Причиной этого, по-видимому, является наличие локального поперечного градиента скорости $\partial u/\partial z$ в области "ног" Λ-структуры, создающего условия для развития на нем вторичных возмущений. Показано, что частота вторичного возмущения уменьшается вследствие непрерывного растяжения локализованного возмущения при его распространении вниз по потоку. Механизм вторичного высокочастотного разрушения Λ-структур наблюдается и при их периодической генерации.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое при низкой степени турбулентности набегающего потока происходит через процесс возникновения и развития волн неустойчивости — так называемых волн Толлмина — Шлихтинга (Т — Ш). На нелинейной стадии перехода, когда двумерная волна Т — Ш достигает больших амплитуд, начинается процесс ее трансформации в характерные трехмерные структуры, напоминающие при визуализации течения греческую букву Λ [2]. Развитие этих структур вниз по потоку приводит в итоге к турбулизации течения. Механизм развития и разрушения Λ-структур остается пока не совсем понятным. Для классического перехода, линейная стадия которого описывается линейной теорией устойчивости, известны два сценария возникновения Λ-структур на нелинейной стадии этого процесса: гармонический, так называемый клебановский, или К-режим [3, 4], когда структуры (при визуализации течения) расположены друг за другом [2], и субгармонический, или N-режим [7, 8], когда структуры располагаются в шахматном порядке [2]. С другой стороны, Λ-структуры наблюдаются также при визуализации течений, моделирующих другие сценарии перехода [5] и в естественных условиях [6].

Таким образом, роль продольных вихревых структур (Λ-структур) в процессе перехода весьма значительна, что и определяет важность их изучения.

Как в теоретическом, так и в экспериментальном плане многочисленные работы, связанные с попытками объяснения нелинейной стадии классического перехода, позволили значительно продвинуться в понимании этого механизма. В частности, установлено, что N -режим перехода реализуется через процесс нелинейного резонансного взаимодействия между основной и двумя наклонными волнами на частоте субгармоники [7, 8]. Сложнее оказалось объяснить K -режим перехода. Появление характерных высокочастотных всплесков, так называемых шипов, на осциллограммах связывалось с развитием вторичных высокочастотных возмущений на локальных искажениях профиля средней скорости, вызванных нелинейным развитием возмущения [3]. Это подтвердилось и в физическом эксперименте [9]. Однако позднее была предложена так называемая резонансно-волновая концепция [10], где появление шипов объяснялось не вторичной высокочастотной неустойчивостью, а генерацией солитонов в области верхней границы пограничного слоя. Процесс же турбулизации течения в этой модели происходил через механизм четырехволнового параметрического резонанса, результатом которого была и генерация солитонов. Данная концепция подтверждалась, в частности, и численным экспериментом [11]. Следует заметить, что экспериментальное подтверждение данного механизма турбулизации течения касается лишь начальных стадий нелинейного развития возмущений, которые еще могут быть описаны теоретически. Что касается более поздних стадий, на которых собственно и происходит переход течения в турбулентное состояние, то названная концепция требует как экспериментального, так и теоретического обоснования.

Моделирование классического перехода было связано главным образом с генерацией в пограничном слое периодических возмущений, т. е. введением гармонической волны. На нелинейной стадии перехода волна трансформировалась в массив трехмерных Λ -структур, развитие которых вниз по потоку приводило к турбулизации течения. Как известно, при исследовании “естественного” перехода установлено, что в подавляющем большинстве случаев переход происходит через стадию образования и развития турбулентных пятен, т. е. локализованных во времени и пространстве структур. Возникает вопрос, могут ли локализованные Λ -структуры трансформироваться в турбулентные пятна, так как в вышеуказанных экспериментах выделить данные структуры невозможно из-за плотной упаковки Λ -структур и, как следствие, их взаимовлияния друг на друга. Изучение механизма образования турбулентных пятен очень важно с точки зрения понимания всего процесса перехода в сдвиговых слоях. Обычно турбулентное пятно возбуждали мощным импульсным воздействием на пограничный слой [12], и поэтому вопрос о возможности возникновения турбулентного пятна через процесс эволюционного развития вихревого возмущения оставался открытым. В [13] была впервые смоделирована уединенная Λ -структура и показано, что она трансформируется вниз по потоку в уединенное турбулентное пятно. При снижении амплитуды на источнике возмущения затухало, но при увеличении амплитуды и скорости потока или при наложении высокочастотного периодического возмущения турбулентное пятно возникало вновь. В работах [14, 15] исследовался шпилькообразный вихрь, представляющий собой практически ту же Λ -структуру, но более вытянутую в продольном направлении. Было показано, что он представляет собой два противовращающихся вихря (“ноги” структуры), заканчивающихся “головкой”, выходящей за верхнюю границу пограничного слоя. В процессе развития структуры вниз по потоку в ее “голове” и “ногах” генерируются вторичные вихри, и она преобразуется в турбулентное пятно.

Цель данной работы состояла в более детальном изучении процесса преобразования уединенной Λ -структуры в турбулентное пятно и получении качественной и количественной информации о механизме данного явления.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН с поперечным сечением рабочей части 1000×1000 и длиной 4000 мм. В качестве модели использовалась плоская пластина (1) из оргстекла длиной 1500 мм, шириной 1000 мм и толщиной 10 мм, установленная вертикально в рабочей части трубы. Возмущения вводились в пограничный слой модели через щель (2) длиной 18, шириной 0,4 мм, расположенную на расстоянии 200 мм от передней кромки модели (рис. 1). Щель была спрофилирована с целью создания вдоль нее неравномерного распределения интенсивности вводимого возмущения (см. [13]). Введение возмущений осуществлялось с помощью динамических громкоговорителей (3, 4). Для генерации высокочастотного возмущения на динамик (3) подавался синусоидальный электрический сигнал частотой 200 – 250 Гц с выхода специального генератора. Импульсное локализованное возмущение для генерации уединенной Λ -структуры создавалось с помощью динамика (4), на который подавались короткие электрические импульсы частотой 0,5 – 1 Гц. Для генерации периодических Λ -структур частота этих импульсов составляла 60 Гц. Периодический и импульсный сигналы были синхронизованы друг с другом, так как их источником был один и тот же генератор. Скорость потока в данном эксперименте составляла 5,6 м/с, степень турбулентности набегающего потока не превышала 0,04 %. Распределение скорости в пограничном слое соответствовало течению Блазиуса.

Все измерения проводились с помощью однопиточного датчика термоанемометра постоянной температуры (5). Толщина нити датчика составляла 6 мкм, длина около 1 мм. Измерялись продольная компонента пульсационной составляющей скорости (u') и средняя скорость (\bar{u}) в различных точках по пространству x, y, z (см. рис. 1). Скорость набегающего потока в рабочей части аэродинамической трубы измерялась с помощью насадка Пито — Прандтля, соединенного с наклонным жидкостным микроанемометром. Датчик термоанемометра тарировался в свободном потоке напротив трубки Пито — Прандтля при скоростях потока в диапазоне 2 – 20 м/с таким образом, чтобы погрешность определения средней скорости была меньше 3 %. Тарировочная функция описывается формулой

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

где E и E_0 — выходные напряжения с анемометра при скорости потока U и в покое, k_1, k_2 и $1/n$ — константы, определяемые эмпирически. Первое слагаемое соответствует известному выражению Кинга, второе добавлено для учета свободной конвекции при малых скоростях потока [16].

Тарировка датчика термоанемометра, сбор, накопление и обработка измеряе-

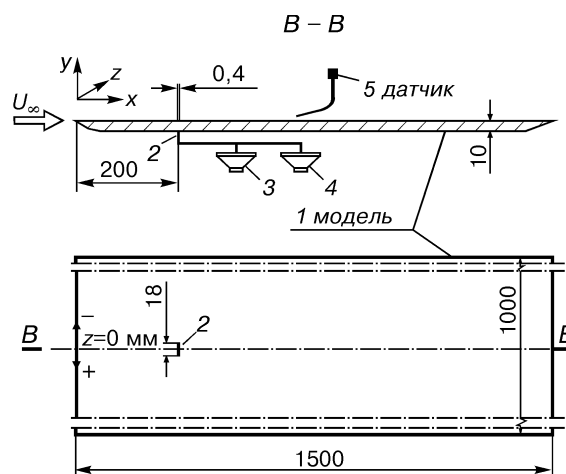


Рис. 1. Схема эксперимента.
Размеры в мм.

мой информации проводились с помощью персонального компьютера “Macintosh LC II”, соединенного с мостом термоанемометра фирмы DISA типа 55M01 аналого-цифровым преобразователем типа MacADIOS — ADIO (фирмы GW instruments). Полезный сигнал с датчика термоанемометра поступал на один вход аналого-цифрового преобразователя, а на его триггерный вход, с целью сохранения фазовой информации исследуемых возмущений, подавался сигнал с выхода низкочастотного источника (короткие импульсы частотой 0,5 – 1 Гц). Вводимые в компьютер единичные реализации процесса развития возмущений по пространству и времени осреднялись по ансамблю для улучшения соотношения сигнал/шум, что позволяло выделять достаточно слабый полезный сигнал из недетерминированных шумов. Осреднение проводилось по 5 – 100 единичным реализациям в зависимости от уровня как выделяемого сигнала, так и шума.

Измерения процесса развития возмущений по трансверсальной координате z проводились в области максимума их интенсивности по нормали y к поверхности пластины.

2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка результатов измерений проводилась на компьютере по программе пространственно-временного фурье-анализа. Над пространственно-временным распределением продольной компоненты скорости u' осуществлялось фурье-преобразование по пространственной координате z :

$$u'(t, \beta) = 1/z_0 \int_{-z_0/2}^{z_0/2} e^{-i\beta z} u'(t, z) dz. \quad (2)$$

Для различных координат x нормировка производилась на одну и ту же величину $z_0 = 128$ мм, что приводило к одному и тому же числу β -гармоник для разных сечений по продольной координате x (шаг по трансверсальной координате z был выбран постоянным и равнялся 1 мм). Если области измерений по z были меньше ± 64 мм, то слева и (или) справа добавлялись нулевые точки с тем, чтобы получить одну и ту же величину z_0 . Так как функция $u'(z, t)$ является действительной, то амплитудная часть $u'(t, \beta)$ симметрична относительно $\beta = 0$.

Результаты расчетов представлялись в виде контурных диаграмм изолиний пульсаций скорости в плоскостях $z - t$; $y - t$; $y - z$ для различных координат x . Сплошные изолинии отражали превышение скорости, а пунктирные — ее дефект. Уровни отклонений от средней скорости, показанные изолиниями, указаны в процентах к скорости набегающего потока (min — дефект скорости, max — превышение скорости, step — шаг изолиний); координата z указана в мм; ось времени t проградуирована в мс. Изолинии построены как с постоянным, так и с переменным шагом по амплитуде. В ряде случаев экспериментальная информация была представлена в виде распределений по трансверсальной и нормальной координатам максимальных амплитуд пульсаций скорости $A = f(z)$, $A = f(y)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Качественные характеристики развития и преобразования Λ -структуры в турбулентное пятно

Как уже было сказано во введении, первые результаты исследований по преобразованию уединенной Λ -структуры в турбулентное пятно были представлены в [13]. На рис. 2 показана картина визуализации данного процесса в



Рис. 2. Картина визуализации процесса трансформации Λ -вихря в турбулентное пятно [13].

1 — локализованное возмущение, 2 — Λ -вихрь; 3 — турбулентное пятно; вид в плоскости $x - z$.

плоскости $z - x$, взятая из этой работы. Видно, что хорошо идентифицируется как Λ -структура, так и турбулентное пятно. При снижении амплитуды возмущения на источнике турбулентное пятно не возникало, возмущение затухало вниз по потоку. На рис. 3, взятом из работы [14], показаны осциллограммы, измеренные в плоскости симметрии локализованного возмущения в зависимости от продольной координаты x для двух скоростей потока. При $U_\infty = 6,6$ м/с вблизи источника возмущений при $x = 240$ мм ($x_{\text{щели}} = 200$ мм) осциллограмма демонстрирует дефект скорости и наличие на переднем фронте высокочастотного естественного возмущения частотой $f \approx 170$ Гц, связанного с формированием Λ -структуры. Вниз по потоку, как видно из осциллограмм, возмущение затухает. При увеличении скорости потока до $U_\infty = 11$ м/с характер развития возмущения вниз по потоку резко меняется. Во-первых, амплитуда высокочастотной составляющей возмущения резко возрастает вблизи источника ($x = 240$ мм), а во-вторых, его развитие вниз по потоку трансформирует прежде затухающее локализованное возмущение в турбулентное пятно, как в ситуации на рис. 2. В процессе эволюции локализованного возмущения вниз по потоку частота развивающегося на нем высокочастотного вторичного возмущения уменьшается (до $f \approx 130$ Гц при $x = 468$ мм) вследст-

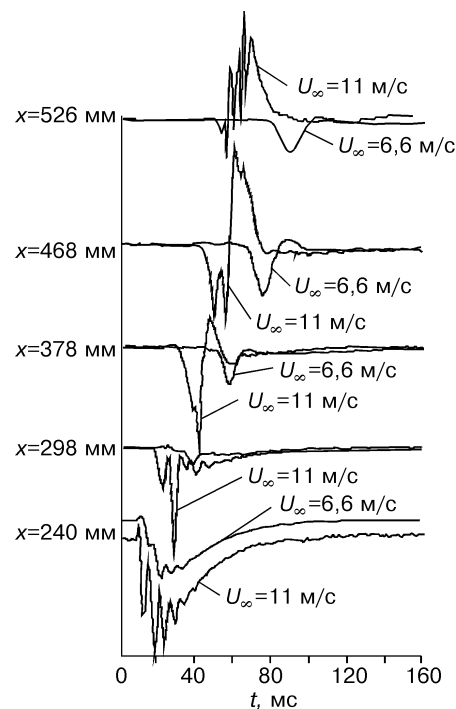


Рис. 3. Осциллограммы, показывающие развитие Λ -структуры при различной скорости набегающего потока при $z = 0$ мм.

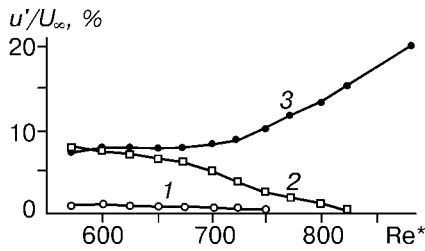


Рис. 4. Кривые нарастания возмущений. 1 — волна Толлмина — Шлихтинга, 2 — локализованное возмущение, 3 — взаимодействие волны Т — Ш с локализованным возмущением, $y = y(u_{max})$.

вие, по-видимому, продольного растяжения первого [17]. Что касается условий, обеспечивающих нарастание высокочастотного естественного возмущения на данной структуре, то его характеристики

будут детально рассмотрены в следующем разделе работы, при изучении развития искусственного возмущения, где сохранение фазовой информации дало возможность получить количественные данные.

На данном этапе мы оценили лишь общие, качественные характеристики процесса преобразования Λ -структуры в турбулентное пятно. Если выше была рассмотрена ситуация, обеспечивающая развитие естественной высокочастотной “затравки” на локализованном возмущении, то далее будут представлены результаты исследования взаимодействия затухающего локализованного возмущения с искусственно введенным высокочастотным возмущением. Результаты подобных исследований уже были опубликованы в [18], где показано, что при взаимодействии двух затухающих возмущений: волны Толлмина — Шлихтинга и Λ -структуры, возникает нарастающий волновой пакет частотой примерно в два раза меньшей, чем у волны Т — Ш, трансформирующийся вниз по потоку в турбулентное пятно (рис. 4). Осциллограммы, представленные на рис. 5 (также взят из работы [14]), хорошо демонстрируют как развитие вниз по потоку затухающего локализованного возмущения, так и его взаимодействие с волной Т — Ш ($f = 290$ Гц), заканчивающееся образованием турбулентного пятна. Качественно этот процесс аналогичен процессу развития естественной высокочастотной “затравки”, представленному выше (см. рис. 2).

Таким образом, по результатам исследований, представленным в данном разделе, можно констатировать следующее:

смоделирована уединенная Λ -структура, и качественно исследованы различные механизмы ее трансформации в турбулентное пятно;

показано, что Λ -структура может затухать вниз по потоку;

затухающая Λ -структура при возникновении условий для развития на ней высоко-

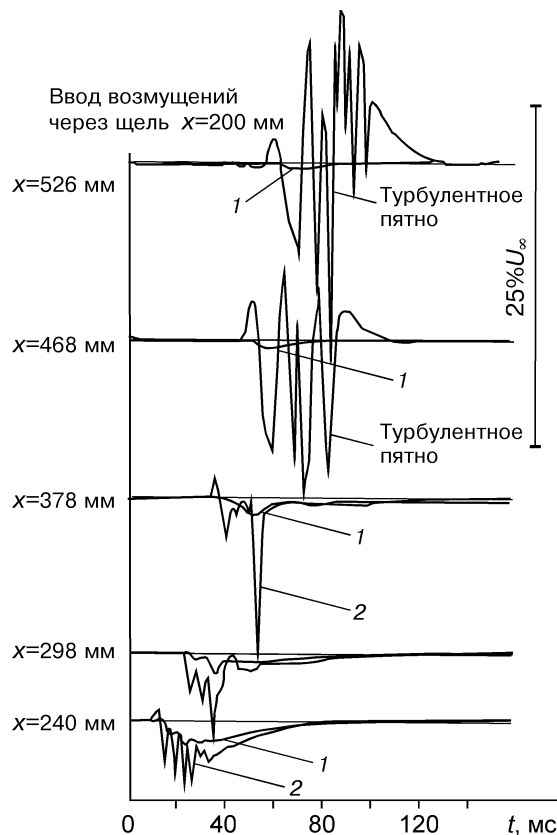


Рис. 5. Осциллограммы, показывающие развитие затухающей Λ -структуры (1) и Λ -структуры, взаимодействующей с высокочастотным возмущением (частотой $f = 290$ Гц) (2), при $z = 0$.

частотной “затравки” или в процессе ее взаимодействия с высокочастотной волной может трансформироваться в турбулентное пятно;

вследствие непрерывного растяжения Λ -структуры в сдвиговом слое частота развивающегося на ней высокочастотного возмущения уменьшается.

3.2. Количественные характеристики развития и преобразования Λ -структуры в турбулентное пятно

Следующий этап исследований механизма преобразования Λ -структуры в турбулентное пятно состоял в изучении более детальных, количественных, характеристик данного процесса. Эксперименты были проведены в тех же условиях, что и визуализация на рис. 2. Как уже сказано, в отсутствие возмущений в пограничном слое было реализовано ламинарное течение с профилем средней скорости, близким к Блазиусовскому. Измеренная толщина пограничного слоя на расстояниях x от передней кромки, равных 377, 480 и 587 мм составляла соответственно 5, 5,7 и 6,3 мм. (Отметим, что условия данного эксперимента и эксперимента, в котором производилась визуализация, представленная на рис. 2, одинаковы.)

Распределение интенсивности введенного в пограничный слой локализованного возмущения A_{\min}, A_{\max} по трансверсальной координате представлено на рис. 6, *a*. Как видно из графика, оно представлено пиком дефекта скорости в плоскости симметрии возмущения и двумя пиками превышения скорости, расположенными симметрично относительно пика с дефектом скорости. Данное распределение типично для возмущений типа двух противовращающихся вихрей (вихри Гертлера, шпилькообразные, лямбдаобразные вихри и т. д.). Из распределений также видно, что возмущение затухает вниз по потоку. Более наглядно структура данного затухающего локализованного возмущения представлена в изолиниях пульсаций скорости в плоскости $z - t$ при $y = y(u'_{\max})$ на рис. 6, *b - d*, где пунктирные линии отражают область дефекта скорости в плоскости симметрии, сплошные линии — две области превышения скорости. При этом можно наблюдать наклонные волны на краях возмущения в форме искривленных под некоторым углом изолиний (также пунктирные линии). Распространяясь вниз по потоку, возмущение затухает, что видно по изменению величины его максимальной амплитуды от 14 % при $x = 377$ мм (см. рис. 6, *b*) до 6 % при $x = 587$ мм (см. рис. 6, *d*).

При наложении высокочастотного периодического возмущения (волна частотой $f = 200$ Гц и амплитудой A_{RMS} менее 1%) происходит его взаимодействие с локализованным возмущением, что приводит к росту интенсивности последнего, особенно в области “ног”, т. е. на противовращающихся вихрях. Это видно как из распределения интенсивности локализованного возмущения и его взаимодействия с волной по трансверсальной координате при $x = 377$ мм (рис. 7, *a*), так и на картинах изолиний пульсаций скорости для взаимодействующих возмущений в плоскости $z - t$ при $y = y(u'_{\max})$ (рис. 7, *b - d*). Амплитуда локализованного возмущения при взаимодействии с волной возросла почти в четыре раза в области “ног” структуры (см. рис. 7, *a* при $z \sim \pm 5$ мм) по сравнению с амплитудой возмущения без волны. Структура “ног” возмущения приобрела подковообразный вид, на них можно наблюдать несколько периодов высокочастотного возмущения (см. рис. 7, *b - d*). Амплитуда возмущения (которая определяется как разница между \max и \min на каждом рисунке) вниз по потоку растет от 45 % при $x = 377$ мм до 56 % при $x = 480$ мм (см. рис. 7, *b, c*) до тех пор, пока не трансформируется практически в турбулентное пятно при $x = 587$ мм (см. рис. 7, *d*). “Ноги” локализованного возмущения растягиваются при его движении вниз по потоку, и по этой причине частота вторичного высокочастотного возмущения, развивающегося на них, непрерывно уменьшается.

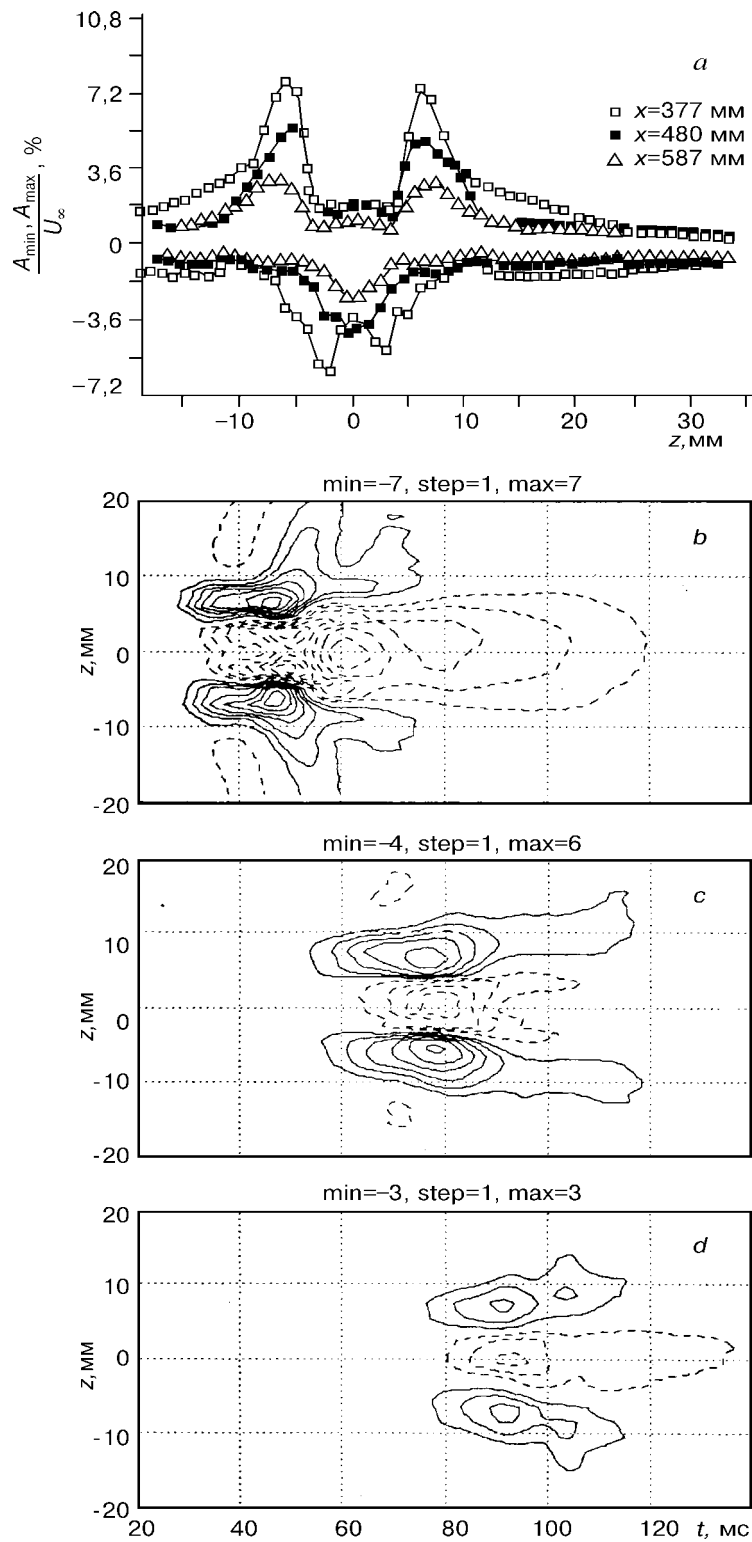


Рис. 6. Распределение интенсивности локализованного возмущения (Λ -вихря) по трансверсальной координате для различных значений x (a) и изолинии пульсаций продольной компоненты скорости в плоскости $z - t$ при $x = 377 \text{ мм}$ (b), 480 мм (c), 587 мм (d); $U_{\infty} = 5,6 \text{ м/с}$, $y = y(u'_{\max})$.

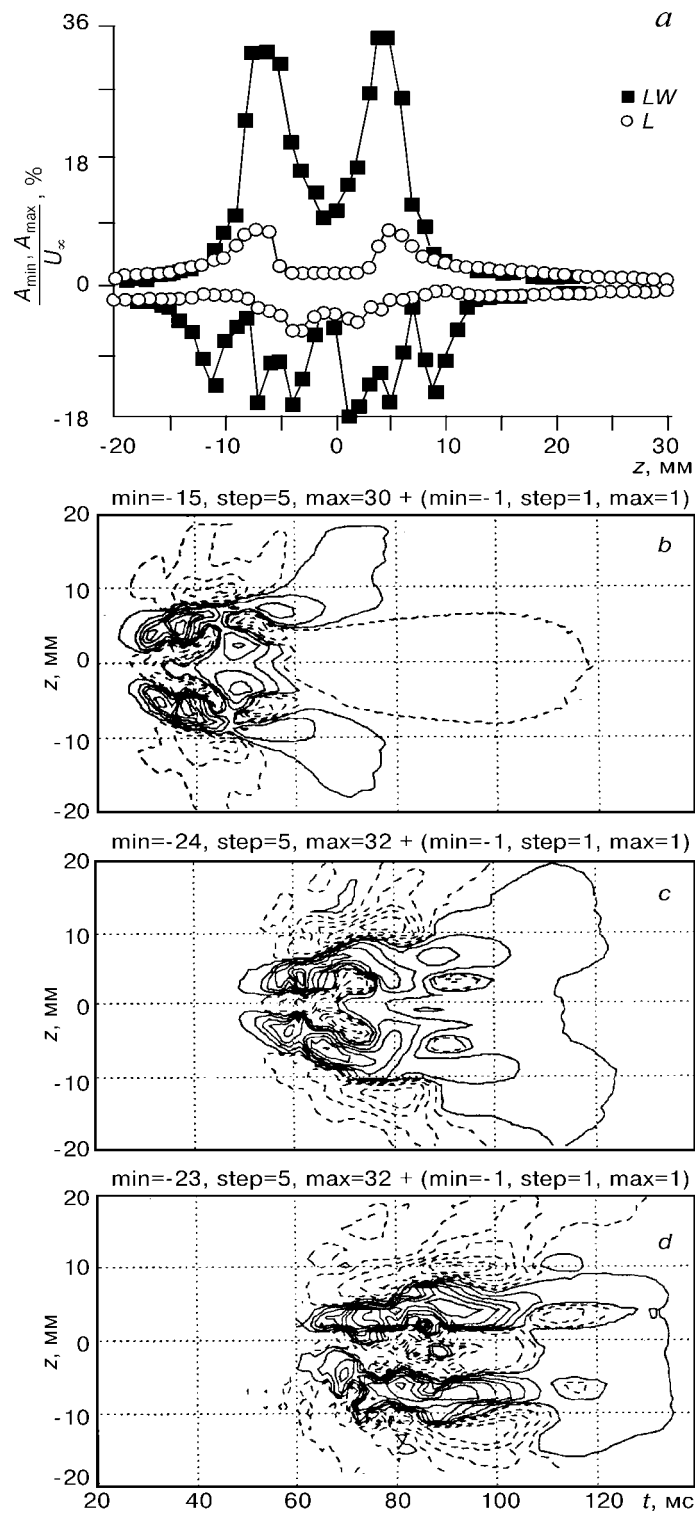


Рис. 7. Распределение интенсивности локализованного возмущения L и его взаимодействия с высокочастотной волной LW при $x = 377$ мм по трансверсальной координате (a) и изолинии пульсаций продольной компоненты скорости в плоскости $z - t$ Λ -вихря, взаимодействующего с высокочастотной волной ($f = 290$ Гц) при $x = 377$ мм (b), 480 мм (c), 587 мм (d); $U_\infty = 5,6$ м/с, $y = y(u'_{\max})$.

При сравнении распределений интенсивности локализованного возмущения и его взаимодействия с волной по нормали к поверхности для различных координат вниз по потоку (рис. 8) можно отметить следующие особенности.

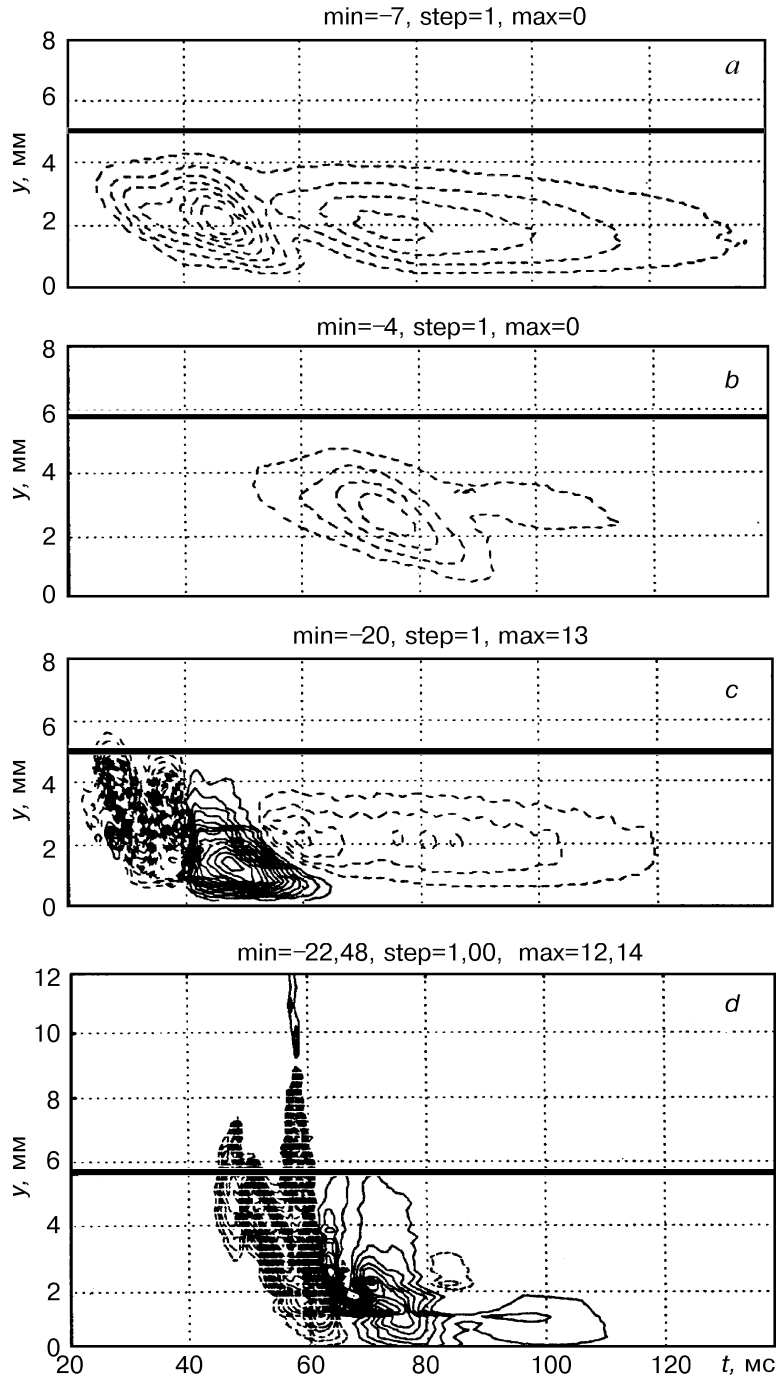


Рис. 8. Изолинии пульсаций продольной компоненты скорости в плоскости $y - t$ локализованного возмущения при $x = 377$ мм (a), 480 мм (b) и Λ -вихря, взаимодействующего с высокочастотной волной ($f = 200$ Гц) при $x = 377$ мм (c), 480 мм (d); $U_\infty = 5,6$ м/с, $z = 0$ мм.

Горизонтальная линия — верхняя граница пограничного слоя.

1) в области “ног” как “чистого”, так и провзаимодействовавшего с волной локализованного возмущения превалирует область с превышением скорости, максимум интенсивности которой расположен близко к стенке (более детально см. рис 25, 30 в работе [19]);

2) в плоскости симметрии, напротив, преобладает область дефекта скорости с максимумом вблизи верхней границы пограничного слоя (рис. 8, *a, c* при $x = 377$ мм). Вниз по потоку для локализованного возмущения, провзаимодействовавшего с высокочастотной волной, данная область начинает распространяться далеко за верхнюю границу пограничного слоя, демонстрируя тем самым, что “головка” структуры выходит из пограничного слоя (рис. 8, *d* при $x = 480$ мм). Затухающее же возмущение остается внутри пограничного слоя (рис. 8, *b*).

Выход “головки” нарастающей Λ -структуры за верхнюю границу пограничного слоя был отмечен и в исследованиях [15] (рис. 9).

Рассмотрим подробнее картину изолиний пульсаций скорости в плоскости $y - t$ при $x = 377, 480$ мм и трансверсальной координате $z = 0$ мм. Структура затухающего локализованного возмущения при указанных значениях x (см. рис. 8, *a, b*) практически не меняется. Значительные изменения происходят, когда на локализованное возмущение накладывается высокочастотная волна. “Головка” структуры приближается к верхней границе пограничного слоя, возникает несколько замкнутых областей изолиний как с дефектом, так и превышением скорости (см. рис. 8, *c* при $x = 377$ мм). При движении вниз по потоку “головка” выходит далеко за пределы пограничного слоя (см. рис. 8, *d* при $x = 480$ мм).

Таким образом, можно констатировать, что структура как затухающего локализованного возмущения, так и его взаимодействия с высокочастотной волной представляет собой два противорвращающихся вихря (“ноги”), заканчивающихся “головкой”. Разница состоит в том, что в первом случае возмущение не выступает за границы пограничного слоя и затухает вниз по потоку, а во втором “головка” возмущения выходит из пограничного слоя и возмущение вниз по потоку преобразуется в турбулентное пятно.

Для более детального понимания структуры этих двух возмущений были проведены измерения распределений интенсивности пульсаций скорости по трансверсальной координате z для различных позиций по нормали к поверхности y при $x = 480$ мм. Контурные изолинии пульсаций скорости затухающего локализованного возмущения по трансверсальной координате (рис. 10, *a, b*) подтверждают вышеуказанные характеристики данного возмущения. Структура затухающего возмущения представляет собой, по-видимому, два противорвращающихся вихря, заканчивающихся “головкой”. “Головка” структуры находится внутри пограничного слоя, “ноги” имеют слабый наклон в сторону “головки”, и поэтому в топологическом плане возмущение скорее напоминает “шпильковый вихрь”, чем Λ -вихрь. Максимальная ширина структуры составляет приблизительно 25 мм.

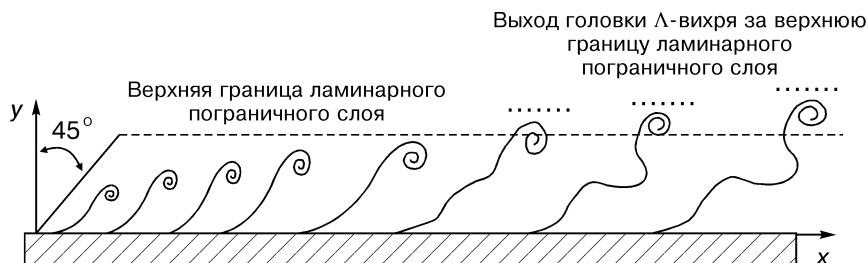


Рис. 9. Схема развития нарастающего вниз по потоку Λ -вихря в ламинарном пограничном слое [15].

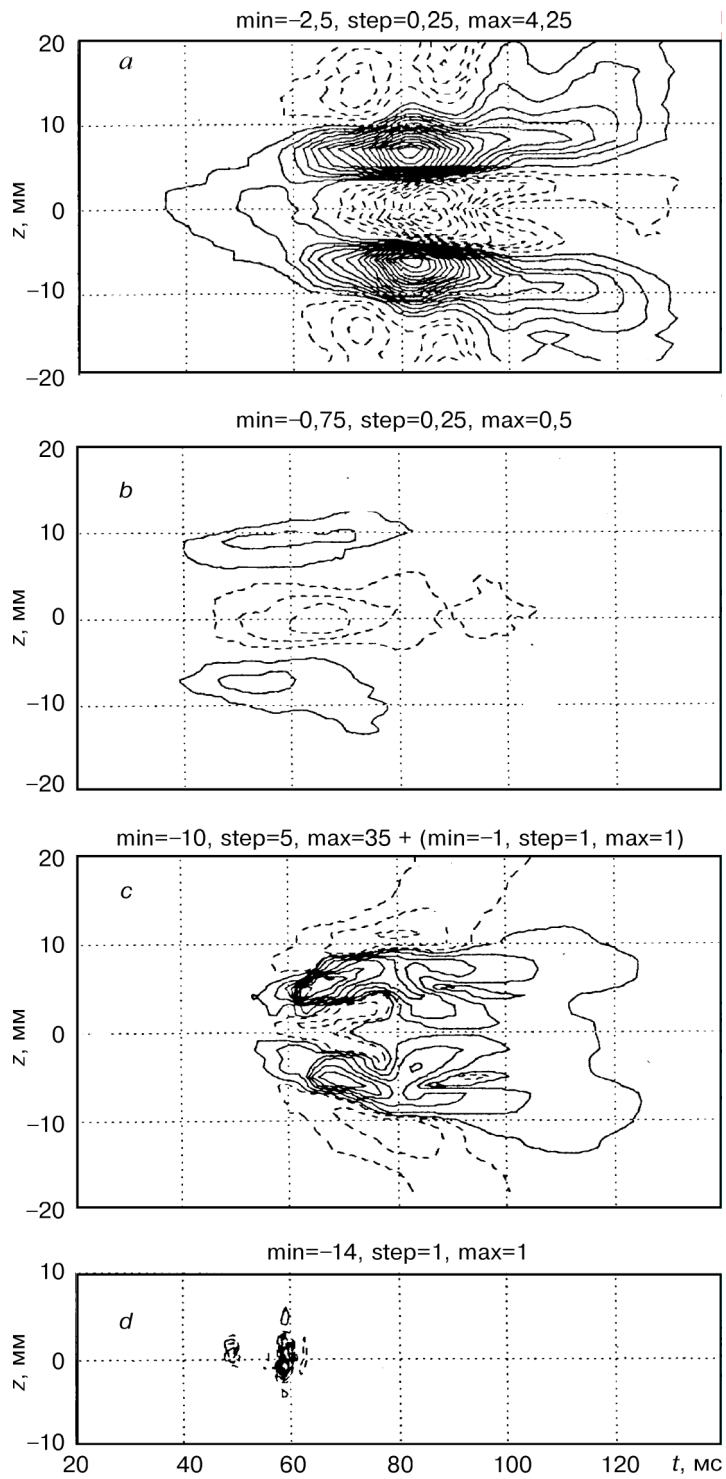


Рис. 10. Изолинии пульсаций продольной компоненты скорости в плоскости $z - t$ локализованного возмущения при $y = 1,25$ мм (а), 5,0 мм (б) и Λ -вихря, взаимодействующего с высокочастотной волной ($f = 200$ Гц) при $y = 1,25$ мм (с), $y = 8,5$ мм (д); $U_\infty = 5,6$ м/с, $x = 480$ мм.

На том же расстоянии от передней кромки ($x = 480$ мм) контурные изолинии пульсаций скорости локализованного возмущения, взаимодействовавшего с высокочастотной волной, показывают (см. рис.10, *c, d*), что на периферии по трансверсальной координате формируются два пика с дефектом скорости. Это означает уширение структуры в области ее “ног” (приблизительно до 35 мм), которые искривляются подковообразно, при этом их интенсивность увеличивается. Здесь же можно наблюдать и формирование наклонных волн на краях Λ -структуры. Вне пограничного слоя (см. рис. 10, *d* при $y = 8,5$ мм) структура становится узкой (около 5 мм) с максимумом амплитуды в плоскости ее симметрии. Это позволяет сделать вывод о том, что в топологическом плане это возмущение больше напоминает классическую Λ -структуру (см. рис. 2), чем в первом случае, хотя источник порождения и того и другого возмущения был один и тот же. Разница состоит лишь в том, что в последней ситуации на локализованное затухающее возмущение наложена вторичная высокочастотная волна. Их взаимодействие, вероятно, привело к тому, что развитие вторичного возмущения на “ногах” структуры, как это происходит при развитии вторичных возмущений на стационарных вихрях [20] или полосчатых структурах (“паффах”) [14, 21], создало условия для перекачки энергии среднего потока в противовращающиеся вихри (“ноги” структуры). Данный процесс в свою очередь привел к росту интенсивности возмущения в целом и выходу его “головки” за верхнюю границу пограничного слоя.

Следует заметить, что картина визуализации процесса трансформации уединенной Λ -структуры в турбулентное пятно, представленная на рис. 2, отражает именно процесс взаимодействия возмущений. Вторичные возмущения, развивающиеся на “ногах” Λ -структуры, можно наблюдать при визуализации процесса ее развития в водяном канале, которая приведена в работе [19] (см. рис. 40). Примерная топологическая схема затухающей и нарастающей Λ -структуры, представление о которой сложилось в результате проведенных исследований и анализа исследований других авторов, показана на рис. 11.

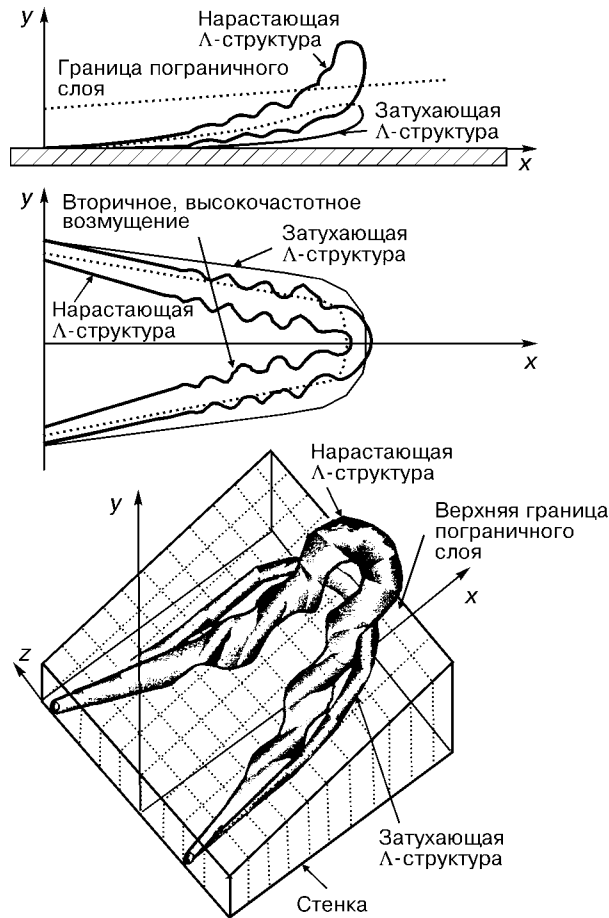


Рис. 11. Пространственная схема локализованного возмущения типа Λ -структуры.

3.3. Характеристики процесса развития периодических Λ -структур и их взаимодействия с высокочастотной волной

Как было показано выше, уединенная Λ -структура может быть затухающей и нарастающей, в частности, в силу ее взаимодействия с высокочастотным возмущением. Развитие последней вниз по потоку приводит к образованию турбулентного пятна. Возникает вопрос, могут ли периодические Λ -структуры, т. е. структуры, моделирующие K - или N -режимы перехода, быть затухающими и при взаимодействии с высокочастотным вторичным возмущением турбулизовать течение? С целью ответа на этот вопрос был поставлен эксперимент на той же модели (см. рис. 1) и в тех же условиях, но генерированы периодические Λ -структуры частотой $f = 60$ Гц и высокочастотные возмущения частотой 240 Гц. На рис. 12 представлены осциллограммы процесса развития вниз по потоку как затухающих периодических Λ -структур, так и их взаимодействия с высокочастотным возмущением. Видно, что при введении в пограничный слой высокочастотного возмущения с уровнем амплитуды значительно ниже 1 % оно начинает взаимодействовать с Λ -структурами, и, как результат, последние становятся нарастающими и трансформируются в отдельные по времени турбулентные образования. В “естественных” условиях, без введения высокочастотных колебаний, этот процесс наблюдается, например, в работе [22]. Таким образом, по-видимому, как и в предыдущем случае, периодические Λ -структуры также могут быть затухающими и при определенных условиях (в данной ситуации с введением высокочастотного возмущения) начинают нарастать и приводят к турбулизации течения. Связано это, как показывают данные исследования, с возможностью развития вторичных высокочастотных возмущений на “ногах” затухающей Λ -структуры. Условием для нарастания вторичных возмущений, вероятно, может быть наличие локального поперечного градиента скорости $\partial u/\partial z$ в области “ног” структуры. Таким же образом развиваются вторичные высокочастотные возмущения в течениях, модулированных в поперечном направлении полосчатыми структурами (“паффами”) [21] и стационарными вихрями [20].

В заключение отметим следующее. Известно: для того, чтобы целенаправленно управлять процессом ламинарно-турбулентного перехода, необходимо знать ответственные за данный процесс механизмы. С этой точки зрения исследования [14, 20, 21, 23 – 25], показавшие роль поперечного градиента скорости $\partial u/\partial z$ для развития на нем вторичных высокочастотных возмущений в различных трехмерных течениях, явились существенным толчком для изучения методов управления, связанных с воздействием на градиент $\partial u/\partial z$. В трехмерных течениях, модулированных в поперечном направлении продольными стационарными вихрями типа вихрей Гертлера и “crossflow”-вихрей, вторичные высокочастотные бегущие возмущения могут возникать, развиваться и приводить к переходу в зависимости от величины градиента $\partial u/\partial z$. Снижение интенсивности стационарных вихрей, в частности, с помощью риблет [26] или

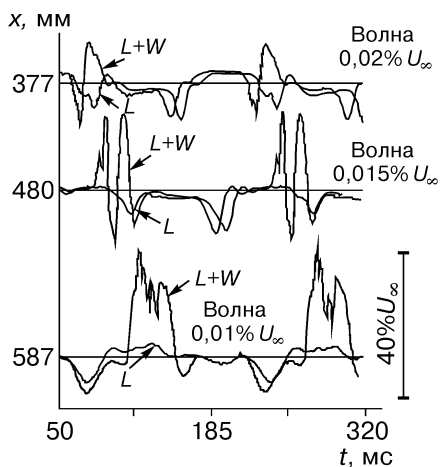


Рис. 12. Осциллограммы, показывающие развитие периодических ($f = 60$ Гц) затухающих Λ -структур (L) и периодических Λ -структур (L), взаимодействующих с высокочастотным возмущением ($f = 240$ Гц) ($L + W$) при $U_\infty = 5,6$ м/с, $x_{\text{щели}} = 200$ мм, $z = 0$ мм.

локального отсоса [27] приводило к уменьшению градиента du/dz , прекращению или затягиванию развития вторичных возмущений и, в итоге, предотвращению перехода. С другой стороны, бегущие локализованные возмущения типа Λ -вихрей, “паффов” (полосчатых структур) и т. д. также представляют собой продольные вихри или полосы ускоренной и замедленной жидкости, которые, как и стационарные вихри, создают поперечную модуляцию течения, только локально во времени и пространстве. Градиент du/dz , имеющий место и в данной ситуации, также может быть причиной развития на нем вторичных возмущений. Исследования по управлению процессом трансформации Λ -вихрей в турбулентные пятна с помощью риблет [28] показали, что интенсивность “ног” Λ -структур уменьшалась, вследствие чего снижался градиент du/dz , а развитие вторичных возмущений либо замедлялось, либо прекращалось вообще. Данный процесс проявлялся в прекращении генерации вторичных вихрей как над “головкой” первичного вихря, так и в области его “ног”, что приводило к затягиванию трансформации Λ -вихря в турбулентное пятно. Аналогичный результат был получен при изучении влияния риблет, поперечных колебаний стенки и локального отсоса на процесс развития вторичных возмущений на “паффах” (полосчатых структурах) [29, 30].

Таким образом, работы, связанные с проблемой управления развитием и преобразованием в турбулентность различных продольных вихревых структур, позволили опосредованно подтвердить один из возможных механизмов турбулизации ламинарного течения через процесс развития вторичных высокочастотных возмущений на локальных градиентах скорости du/dz , создаваемых модуляцией течения в трансверсальном направлении этими структурами.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований процесса преобразования Λ -структур в турбулентные пятна можно сделать следующие выводы.

1. Локализованные возмущения типа Λ -вихрей могут быть как затухающими, так и нарастающими. В топологическом смысле и те и другие представляют собой два противовращающихся вихря (“ноги”), замкнутые в области переднего фронта “головкой”. Различие состоит лишь в том, что топология первого близка к форме “шпилькового” вихря и возмущение не выходит за верхнюю границу пограничного слоя, а топология второго соответствует форме греческой буквы Λ и “головка” возмущения выходит далеко за верхнюю границу пограничного слоя.

2. Трансформация Λ -структуры в турбулентное пятно происходит в результате развития вторичных высокочастотных возмущений в области ее “ног”, т. е. в районе максимального локального градиента скорости du/dz . Данный процесс может происходить либо в условиях развития естественного высокочастотного возмущения, “затравка” которого может существовать в подобных локализованных возмущениях, либо через механизм взаимодействия возмущений. Главное условие реализации данного механизма — соответствующая величина градиента du/dz , которая в основном связана как с уровнем интенсивности локализованного возмущения, так и с периодичностью противовращающихся вихрей (“ног”) по трансверсальной координате.

3. Частота вторичного высокочастотного возмущения, развивающегося на “ногах” структуры, вследствие постоянного растяжения локализованного возмущения в сдвиговом слое изменяется в сторону уменьшения.

4. В процессе развития вторичного возмущения оно способствует перекачке энергии среднего течения в низкочастотные возмущения (“ноги” Λ -структуры). Интенсивность “ног” растет, что в свою очередь вызывает выход “головки” Λ -структуры за верхнюю границу пограничного слоя.

5. Механизм разрушения периодических Λ -структур, типичных для K - и N -режимов перехода, как и в случае разрушения уединенной Λ -структуры или полосчатых структур (streaky structures), связан с развитием на них вторичных высокочастотных возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Гранты № 96-01-01892, 96-15-96310, 99-01-00591).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов Ю.С., Козлов В.В., Левченко В.Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое.— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. — 151 с.
2. Козлов В.В., Левченко В.Я., Сарик В.С. Образование трехмерных структур при переходе в пограничном слое // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1984.— № 6.— С. 42 – 50.
3. Klebanoff P.S., Tidstrom K.D., Sargent L.M. The three-dimensional nature of boundary layer instability // J. Fluid Mech. — 1962. — Vol. 12, Pt 1.— P. 1 – 34.
4. Качанов Ю.С., Козлов В.В., Левченко В.Я., Рамазанов М.П. Природа K -разрушения ламинарного пограничного слоя: Обзор // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1989. — Вып. 2.— С. 124 — 158.
5. Elofsson P.A. Experiments on oblique transition in wall bounded shear flows: Doctoral Thesis. — Stockholm, Royal Institute of Technology, Dept. of Mechanics, 1998.
6. Knapp C.F., Roache P.J. A combined visual and hot-wire anemometer investigation of boundary layer transition // AIAA J.— 1968. — Vol. 6, No. 1.— P. 29 – 36.
7. Качанов Ю.С., Козлов В.В., Левченко В.Я. Нелинейное развитие волны в пограничном слое // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1977. — № 3. — С. 49 – 58.
8. Kachanov Y.S., Levchenko V.Y. The resonant interaction of disturbances at laminar-turbulent transition in a boundary layer // J. Fluid Mech.— 1984. — No. 138. — P. 209 – 247.
9. Nishioka M., Asai M., Iida S. An experimental investigation of the secondary instability // Laminar-Turbulent Transition / Eds Eppler & Fasel. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980. — P. 37 – 46.
10. Kachanov Y.S. On the resonant nature of the breakdown of a laminar boundary layer // J. Fluid Mech. — 1987. — No. 184. — P. 43 – 74.
11. Rist U., Fasel H. Spatial three-dimensional numerical simulation of laminar-turbulent transition in a flat-plate boundary layer // Boundary Layer Transition & Control Conf. — Cambridge U.K.: Royal Aerou. Soc. — P. 25.1 – 25.9.
12. Wygnanski I., Haritonidis J.H., Zilberman H. On the spreading of a turbulent spot in the absence of a pressure gradient // J. Fluid Mech. — 1982. — No. 123. — P. 69 – 90.
13. Грек Г.Р., Козлов В.В., Рамазанов М.П. Моделирование возникновения турбулентного пятна из нелинейного волнового пакета // Моделирование в механике. Т. 3(20), № 1. — Новосибирск: Изд. ИТПМ и ВЦ СО АН СССР, 1989. — С. 46 – 60.
14. Чернорай В.Г., Бакчинов А.А., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В. Экспериментальное исследование процесса образования “зарождающегося турбулентного пятна” и турбулентного пятна // Тез. докл. IV Сибирского семинара Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей. — Новосибирск, 1997. — С. 100 – 101.
15. Acarlar M.S., Smith C.R. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Pt 2. Hairpin vortices generated by fluid injection // J. Fluid Mech. — 1987. — Vol. 175. — P. 43 – 83.
16. Johansson A.V., Alfredson P.H. On the structure of turbulent channel flow // Ibid. — 1982. — Vol. 122. — P. 295 – 314.
17. Бакчинов А.А., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В. Экспериментальное исследование процесса развития и структуры локализованных вихревых возмущений в пограничном слое на плоской пластине. — Новосибирск, 1997. — 55 с. — (Препр./ ИТПМ СО РАН; № 1-97).
18. Grek H.R., Dey J., Kozlov V.V., Ramazanov M.P. & Tughto O.N. Experimental analysis of the process of the formation of turbulence in the boundary layer at higher degree of turbulence of windstream: Rep. 91-FM-2, 560012. — Bangalore: Indian Inst. Science, 1991.— P. 37.
19. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В., Чернорай В.Г. Экспериментальное исследование процесса развития уединенной Λ -структуры и механизма ее трансформации в турбулентное пятно. — Новосибирск, 1998. — 40 с. — (Препр. / ИТПМ СО РАН).
20. Bakchinov A.A., Grek H.R., Klingmann B.G.B., Kozlov V.V. Transition experiments in a boundary layer with embedded streamwise vortices // Phys. Fluids. — 1995. — No 7 (4). — P. 820 – 832.
21. Bakchinov A.A., Grek G.R., Katasonov M.M., Kozlov V.V. Experimental study of the interaction between streaky structures and high-frequency disturbances // Proc. of the Third Intern. Conf. on Experimental Fluid Mech. — Korolev, Moscow region, 1997. — P. 28 – 33.
22. Matsui T., Okude M. Visualization of generation process of a turbulent spot // Laminar-Turbulent Transition / Ed. V.V. Kozlov. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1985. — P. 625 – 633.

23. **Boiko A.V., Kozlov V.V., Syzrantsev V.V., Scherbakov V.A.** Experimental study of secondary instability and breakdown in a swept wing boundary layer // IUTAM Symp., Sendai/Japan / Ed. R. Kobayashi. Springer-Verlag, 1995. — P. 289 – 295.
24. **Kohama Y.** Some expectation on the mechanism of cross-flow instability in a swept wing flow // Acta Mech. — 1987. — No. 66. — P. 21.
25. **Kohama Y., Saric W. S. & Hoos J. A.** A high-frequency, secondary instability of crossflow vortices that leads to transition // Proc. Boundary Layer Transition and Control. — London: Royal Aeron. Soc., 1991. — P. 4.1 – 4.13.
26. **Grek G.R., Kozlov V.V., Klingmann B.G.B. & Titarenko S.V.** The influence of riblets on a boundary layer with embedded streamwise vortices // Phys. Fluids. — 1995. — Vol. 7(10). — P. 2504 – 2506.
27. **Бойко А.В., Козлов В.В., Сызранцев В.В., Щербakov В.А.** Методы управления вторичной неустойчивостью в трехмерном пограничном слое // Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей: Тез. докл. IV Сибирского семинара. — Новосибирск, 1997. — С. 20 – 21.
28. **Grek G.R., Kozlov V.V. & Titarenko S.V.** An experimental study on the influence of riblets on transition // J. Fluid Mech. — 1996. — Vol. 315. — P. 31 – 49.
29. **Катасонов М.М., Козлов В.В.** Управление развитием продольных структур в пограничном слое с использованием риблет и поперечных колебаний стенки // Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей: Тез. Докл. IV Сибирского семинара. — Новосибирск, 1997. — 57 с.
30. **Bakchinov A.A., Katasonov M.M., Alfredsson P.H., Kozlov V.V.** Control of boundary layer transition at high FST by localized suction // Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей: Тр. V Междунар. семинара. — Новосибирск, 1998. — С. 63 – 68.

Статья поступила в редакцию 29 октября 1998 г.