

УДК 532.517.3

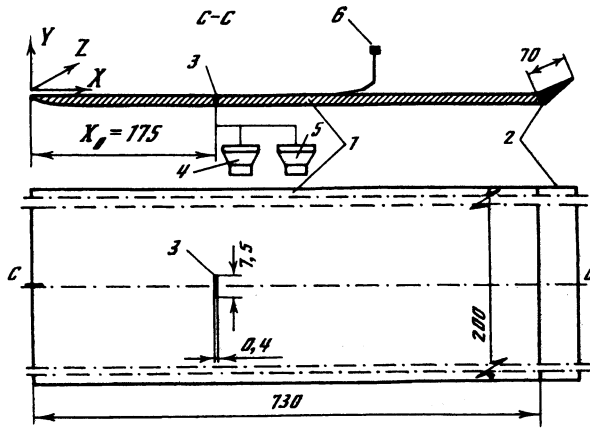
© 1998 г. А.А. БАКЧИНОВ, Г.Р. ГРЕК, М.М. КАТАСОНОВ, В.В. КОЗЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНЫХ "ПОЛОСЧАТЫХ" СТРУКТУР С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ВОЗМУЩЕНИЕМ

В модельном эксперименте изучен механизм начала образования турбулентного пятна через процесс взаимодействия локализованного продольного вихря типа "полосчатой" структуры с высокочастотным возмущением. Исследованы качественные и количественные характеристики и структура как локализованного продольного возмущения, так и высокочастотного волнового пакета. Проведен пространственно-временной фурье-анализ возмущений, развивающихся в пограничном слое в данной ситуации. Анализ показал, что в процессе взаимодействия возмущений происходит "перекачка" энергии потока как в высокочастотные возмущения, так и в продольные структуры.

Визуализация дымом процесса ламинарно-турбулентного перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока в "естественных" условиях показывает, что пограничный слой модулирован в трансверсальном направлении некими продольными локализованными структурами, вытянутыми вниз по потоку [1–3]. В литературе они идентифицируются как полосчатые структуры (streaky structures), или "пафф"-структуры [4]. При развитии этих структур вниз по потоку, как показывает визуализация, на них возникают турбулентные пятна. Механизм появления полосчатых структур, характеристики их развития и процесс генерации турбулентных пятен в таком течении не удается объяснить на основе информации, получаемой в экспериментах, проводимых в естественных условиях. В таких исследованиях получены данные, указывающие на существование возмущений с характеристиками развития, отличными от волн Толлмина – Шлихтинга [1, 5], и делается вывод о том, что механизм перехода при низкой ($\epsilon \leq 0,04\%$) и повышенной ($\epsilon \geq 1\%$) степени турбулентности набегающего потока принципиально отличаются друг от друга. По классификации [6] это так называемый "by-pass"-переход. Тем не менее невозможность объяснить целый ряд явлений, присущих переходу в данных условиях, дало основание отметить в [7], что "механизм перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока остается до сих пор непонятным".

Определенные новые данные, касающиеся перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока, получены в модельных экспериментах, т.е. в контролируемых условиях. Показано, что свойства пограничного слоя позволяют существовать, развиваться и оказывать влияние на переход волнам Толлмина – Шлихтинга как в градиентном, так и безградиентном течениях до $\epsilon = 4\%$ [8–12]. Введением возмущений от различных источников, в том числе и из набегающего потока, что моделирует возмущения внешней турбулентности, искусственно генерированы в пограничном слое продольные локализованные вихревые структуры и изучены их интегральные характеристики [13–16]. Исследован один из механизмов взаимодействия локализованного возмущения с волной Толлмина – Шлихтинга, приводящий к возникновению турбулентного пятна через процесс образования и развития высокочастотного волнового пакета [14, 17, 18]. Визуализация дымом продольных



Фиг. 1. Схема эксперимента: 1 – плоская пластина, 2 – интерцептор (закрылок), 3 – поперечная щель, 4 – динамический громкоговоритель ($f = 205$ Гц), 5 – динамический громкоговоритель ($f = 2$ Гц), 6 – датчик термоанемометра

локализованных структур, генерированных как на стенке модели [3], так и введением возмущений из набегающего потока [2], показала, то они могут быть идентифицированы как полосчатые структуры, наблюдаемые в естественном переходе при $\epsilon \geq 1\%$.

С другой стороны, при визуализации естественного перехода до появления турбулентных пятен ясно выделяются высокочастотные пакеты волн на полосчатых структурах [2]. Аналогичная картина наблюдается и при введении искусственных волн Толлмина – Шлихтинга [3], которые, взаимодействуя с полосчатыми структурами, генерируют на них высокочастотные возмущения, трансформирующиеся в турбулентные пятна.

Таким образом, можно предположить, что данное моделирование механизма перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока, связанное с преобразованием внешних локализованных вихревых возмущений в специфические продольные локализованные структуры, на которых могут возникать высокочастотные волновые пакеты, трансформирующиеся в турбулентные пятна, отражает процессы, происходящие в естественных условиях.

Цель данной работы состояла в исследовании процесса взаимодействия продольных локализованных структур с высокочастотным возмущением и получении детальной информации о структуре и характеристиках развития реализуемых в данной ситуации возмущений.

1. Экспериментальное оборудование и методика проведения измерений. Исследования проводились в аэродинамической трубе МТ-324 ИТПМ СО РАН с размерами рабочей части: поперечное сечение 200×200 мм, длина 800 мм. В качестве модели использовалась плоская пластина 1 из оргстекла длиной 730, шириной 200 и толщиной 10 мм, установленная горизонтально в рабочей части трубы (фиг. 1). С целью предотвращения срывов потока на острой передней кромке сзади на модели был установлен под определенным углом интерцептор 2. Возмущения вводились в пограничный слой модели через поперечную щель 3, расположенную на расстоянии 175 мм от передней кромки модели. Введение возмущений осуществлялось с помощью динамических громкоговорителей 4, 5. Высокочастотный синусоидальный электрический сигнал ($f = 205$ Гц) подавался на 4, а низкочастотный ($f = 2$ Гц) – на 5. Низкочастотный сигнал представлял собой короткий электрический импульс длительностью примерно 5 мс, который подавался на динамический громкоговоритель. За счет инерционности динамического громкоговорителя в пограничном слое был реализован сигнал на "вдуве" газа длительностью примерно 40 мс в точке ввода возмущений. Таким образом, пограничный слой в данном случае возбуждался коротким импульсным вдувом

газа с очень большим периодом следования импульсов. Источники возмущений были синхронизованы друг с другом, что позволяло выделять детерминированные составляющие полезного сигнала. Скорость набегающего потока $U_\infty = 6,6$ м/с, его степень турбулентности в полосе 0,5–5000 Гц не превышала 0,1%.

Все измерения проведены с помощью однопиточного датчика 5 термоанемометра постоянного сопротивления фирмы DISA. Измерялись продольная компонента пульсационной составляющей скорости u' и средняя скорость $\langle u \rangle$ в различных точках по пространству X, Y, Z (фиг. 1). Измерения по трансверсальной координате Z проводились в области максимумов интенсивности по нормали Y к поверхности пластины. Расстояние от передней кромки модели до источника ввода возмущений $X_0 = 175$ мм, координаты в точках измерений вниз по потоку указаны на графиках как расстояние от передней кромки модели X . Скоростной напор набегающего потока измерялся с помощью насадка Пито – Прандтля, соединенного с наклонным жидкостным микроанемометром.

Тарировка датчика термоанемометра, сбор, накопление и обработка измеряемой информации проводились с помощью персонального компьютера "Macintosh LC II", соединенного с мостом термоанемометра аналого-цифровым преобразователем "MacADIOS-ADIO (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 генератора возмущений ($f \approx 2$ 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 от 50 до 300 единичных реализаций в зависимости от уровня как выделяемого сигнала, так и шума.

2. Методика обработки результатов измерений. Результаты измерений обрабатывались на компьютере по программе пространственно-временного фурье-анализа. Над пространственно-временным распределением продольной компоненты скорости u' осуществлялись два типа фурье-анализа.

1. Фурье-преобразование по пространственной координате Z

$$u'(t, \beta) = \frac{1}{Z_0} \int_{-Z_0/2}^{Z_0/2} e^{-i\beta Z} u'(t, Z) dZ$$

Нормировка для различных координат X осуществлялась на одну и ту же величину $Z_0 = 128$ мм, что приводило к одному и тому же числу β -гармоник для различных сечений по продольной координате X (шаг по трансверсальной координате $Z = 1$ мм). Если размеры области измерений по Z были меньше 128 мм слева (и/или), справа добавлялись нулевые точки, чтобы получить то же самое Z_0 . Так как функция $u'(Z, t)$ действительная, то амплитудная часть $u'(t, \beta)$ симметрична относительно $\beta = 0$.

2. Второй фурье-анализ осуществлялся с помощью преобразования

$$u'(f, \beta) = \frac{1}{Z_0 T_0} \int_{-Z_0/2}^{Z_0/2} e^{-i\beta Z} \int_0^{T_0} e^{-ift} u'(t, Z) dt dZ$$

т.е. сначала проводилось фурье-преобразование по времени (внутренний интеграл), затем брались амплитудные и фазовые спектры, соответствующие только положительным частотам, а потом над ними осуществлялось второе фурье-преобразование по трансверсальной координате Z . Поперечное волновое число β или в данном случае параметр, характеризующий периодичность возмущения по трансверсальной координате, везде ниже нормировано на местную толщину пограничного слоя δ .

3. Результаты измерений. Введение в пограничный слой плоской пластины локализованных возмущений через поперечную щель различной длины и результаты исследований характеристик их развития по пространству в зависимости от амплитуды возбуждения, скорости набегающего потока, размеров щели и "вдува" или "отсоса" газа представлены в

[19]. Исследования в [19] проведены в ламинарном пограничном слое с профилем средней скорости, близким к распределению Блазиуса. Показано [19], что характеристики развития формируемых пограничным слоем возмущений качественно не зависят от изменений перечисленных выше параметров. В процессе развития возмущения вниз по потоку формируются две области с превышением скорости на концах щели и область с дефектом скорости между ними при вдуве газа. Пространственным фурье-анализом в [19] установлено выделение двух характерных типов возмущений с различной периодичностью $\beta\delta$ по трансверсальной координате: продольные локализованные вихревые структуры, формирующиеся на краях щели, с периодичностью по $\beta\delta = \pm 0,5$ и наклонные волны, генерируемые ими на периферии по Z , с периодичностью по $\beta\delta = \pm 0,2$.

Интегральные характеристики развития продольных локализованных структур в [19] соответствовали характеристикам "паффов" [13–16]: локализация (нерасплывание) возмущения в трансверсальном направлении; максимум интенсивности по нормали к стенке располагался значительно выше, чем для двумерной волны Толлмина – Шлихтинга; скорость развития переднего фронта возмущения достигает в пределе значения $\approx 0,8U_\infty$, а заднего фронта – значения $\approx 0,5U_\infty$, за счет чего возмущение непрерывно растягивается и деформируется вдоль потока, слабо затухая вниз по потоку.

Возмущение такого типа реализовано в данной работе и исследован механизм его взаимодействия с высокочастотным возмущением. Следует отметить, что аналогичный механизм взаимодействия "паффа" с волной Толлмина – Шлихтинга исследовался ранее [14, 17, 18], но были получены лишь интегральные, главным образом качественные, характеристики процесса. На фиг. 2 представлены осциллограммы, отражающие процесс взаимодействия возмущений в плоскости их симметрии $Z = 0$ мм на расстоянии от стенки $Y = Y(u'_{\max})$ при различных позициях X вниз по потоку.

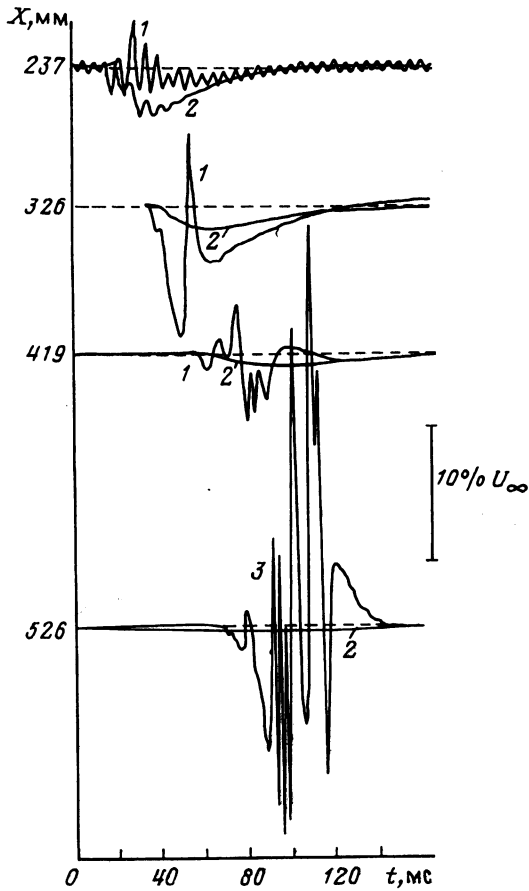
Осциллограмма турбулентного пятна демонстрирует единичную реализацию, а все остальные осциллограммы представляют осредненные по ансамблю реализации. Из осциллограмм видно, что низкочастотное локализованное возмущение без контролируемого высокочастотного возмущения затухает вниз по потоку, а при введении высокочастотной волны на нем формируется волновой пакет, трансформирующийся вниз по потоку в турбулентное пятно.

Необходимо отметить, что амплитуда высокочастотной волны, вводимой в поток отдельно, не превышала 0,5% вблизи источника возмущений и затухала вниз по потоку. Высокочастотный сигнал ($f \approx 150$ Гц) на осциллограмме при $X = 237$ мм, появление которого связано с конструктивными особенностями данного источника возмущений (щель, воздухопровод и динамический громкоговоритель), затухает вниз по потоку в отсутствие высокочастотной контролируемой волны (см. фиг. 2, где осциллограммы без волны).

Амплитуда искусственного высокочастотного возмущения в области его взаимодействия с низкочастотным возмущением (фиг. 2, $X = 237$ мм, $t \approx 30$ – 50 мс) более чем в 4 раза превышала амплитуду естественного высокочастотного волнового пакета ($f \approx 150$ Гц). В амплитудном же спектре взаимодействующих возмущений при $X = 237$ мм амплитуды сигнала на частоте естественного волнового пакета $f \approx 150$ Гц вообще не наблюдалось.

Следует отметить, что при определенных экспериментальных условиях (большая скорость потока или амплитуда локализованного возмущения) высокочастотный, неконтролируемый сигнал может нарасти сам и привести к образованию турбулентного пятна. В данном же случае цель исследования состояла в изучении именно механизма взаимодействия контролируемых возмущений – как низкочастотного (локализованная структура), так и высокочастотного, что позволяло получить количественную информацию о данном процессе.

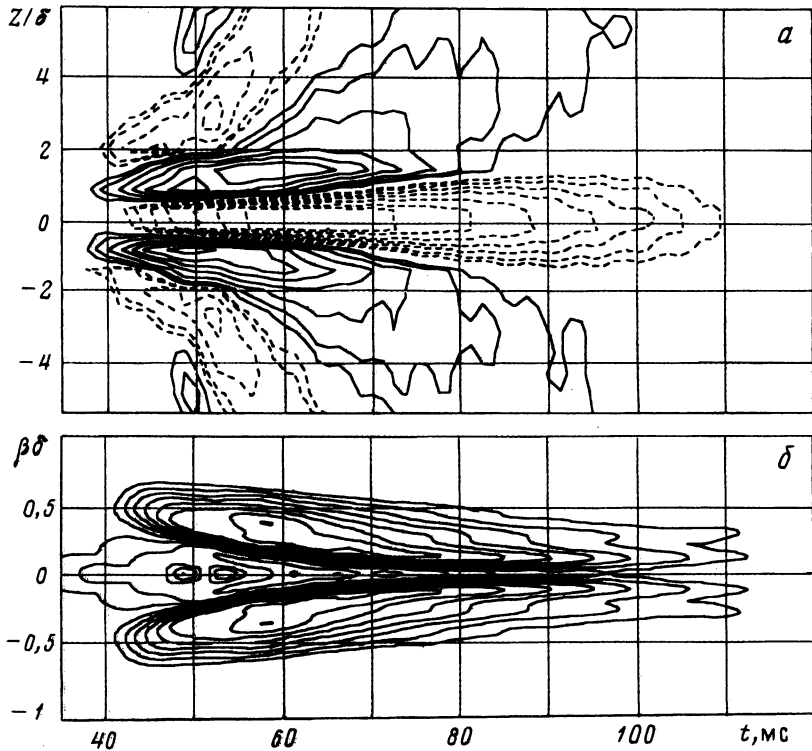
Рассмотрим структуру контролируемых возмущений, представленную на фиг. 3, 4 в виде контурных диаграмм изолиний пульсаций скорости в плоскости $Z/\delta - t$, где Z/δ – текущая трансверсальная координата, нормированная на толщину пограничного слоя



Фиг. 2. Осциллограммы процесса взаимодействия высокочастотного (волна) и низкочастотного (локализованная структура) возмущений $Z = 0$ мм, $Y = Y(u'_{\max})$, 1 – с волной $f = 205$ Гц, 2 – без волны, 3 – турбулентное пятно

$\delta = 3,8$ мм, и t – время, при $Y = Y(u'_{\max})$ на $X = 335$ мм. Измерения проведены в области максимума амплитуды возмущений по нормали к поверхности пластины $Y(u'_{\max})/\delta \approx 0,5$ и числе Рейнольдса $Re_x = 147400$.

Структура возмущения, генерированного через поперечную щель в отсутствие высокочастотной волны, представлена двумя областями с превышением скорости, формируемыми на краях источника ($Z/\delta = \pm 1$), и областью с дефектом скорости между ними ($Z/\delta = 0$) (фиг. 3, а). Можно сделать вывод, что в пограничном слое сформировались несколько слоев сдвига переменного знака, модулирующих течение в трансверсальном направлении. Причем модуляция течения локализована в трансверсальном направлении и составляет примерно 10 мм пространства по Z . Это указывает на сильные градиенты скорости $\partial(u)/\partial Z$ в данном направлении. Максимальные градиенты скорости по Z расположены на расстоянии $Z/\delta \approx \pm 0,7$ при максимуме амплитуды возмущения, равном $3\%U_\infty$ (фиг. 3, а). Пространственный размер структур с превышением скорости 5 мм в ширину и 120 мм в длину, что соответствует результатам измерений и визуализации процесса развития таких же возмущений в [19], где они идентифицированы как полосчатые структуры, наблюдаемые в естественном переходе при повышенной степени турбулентности набегающего потока.

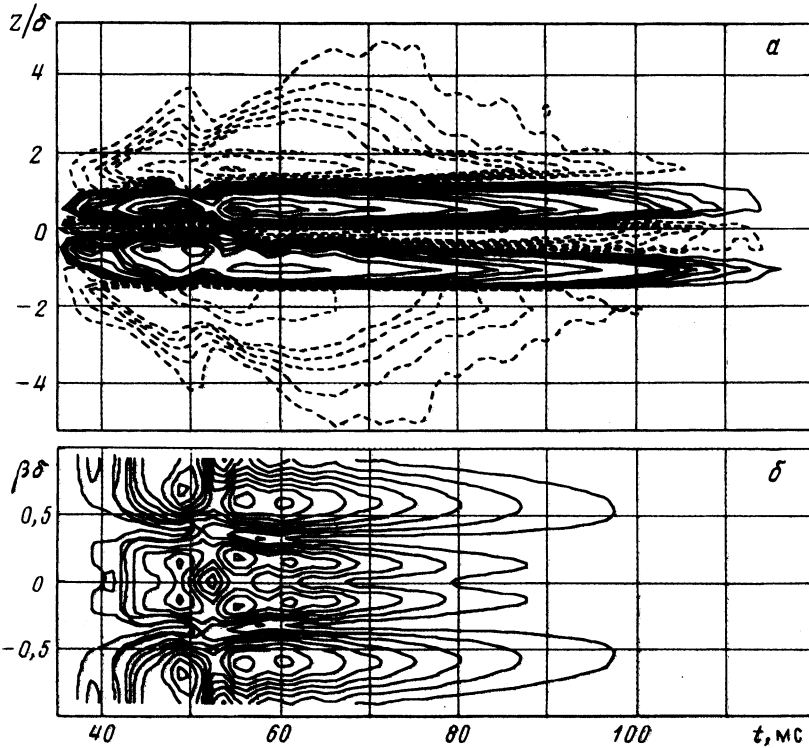


Фиг. 3. Изолинии пульсаций скорости локализованного возмущения в плоскости $Z/\delta - t$: сплошные и штриховые линии – уровни отклонения от средней скорости в сторону ее увеличения ($\max = +1,5\%U_\infty$) и уменьшения ($\min = -1,5\%U_\infty$) соответственно, так изолиний $0,25\%U_\infty$ (а) и спектр данного возмущения по поперечному волновому числу β в плоскости $\beta\delta - t$, шаг изолиний $0,003\%U_\infty$, $\max = 0,025\%U_\infty$ (б); $X = 335$ мм, $Y = Y(u'_{\max})$

Зависимость $\beta\delta = f(t)$ (фиг. 3, б) отражает распределение амплитуд β -гармоник возмущения, формирующегося в пограничном слое, по времени. Поперечное волновое число β указывает на определенную периодичность в распределении того или иного возмущения по трансверсальной координате. Чем больше масштаб периодичности (шаг по Z), тем меньше β , и наоборот, т.е. величина β в данном случае отражает степень локализации возмущения по трансверсальной координате. Пространственный фурье-анализ демонстрирует, что выделяются две характерные периодичности по трансверсальной координате с $\beta\delta = \pm 0,5$ при $t = 40-60$ мс и с $\beta\delta = \pm 0,2$ при $t = 75-110$ мс.

В [20], где рассматривается динамика развития локализованного возмущения, расчетом показано, что периодичность полосчатых структур по Z составляет 0,5, а наклонных волн 0,2. Таким образом, возмущение с периодичностью $\beta\delta = \pm 0,5$ представляет собой продольные локализованные структуры, а возмущение с периодичностью $\beta\delta = \pm 0,2$ – наклонные волны, генерированные продольными структурами в процессе их движения вниз по потоку. Они представлены на фиг. 3, а группой изолиний, расположенных на периферии основного возмущения (от $Z/\delta = \pm 2$ до $Z/\delta = \pm 6$). Известно, что уединенная лямбда-структура [21] или турбулентное пятно [22] генерируют на своих краях по трансверсальной координате наклонные волны. Повидимому, возникновение подобных возмущений в данной ситуации может быть также связано с аналогичным механизмом.

Рассмотрим структуру возмущения, образовавшегося в результате взаимодействия высокочастотной волны с затухающими продольными локализованными структурами,



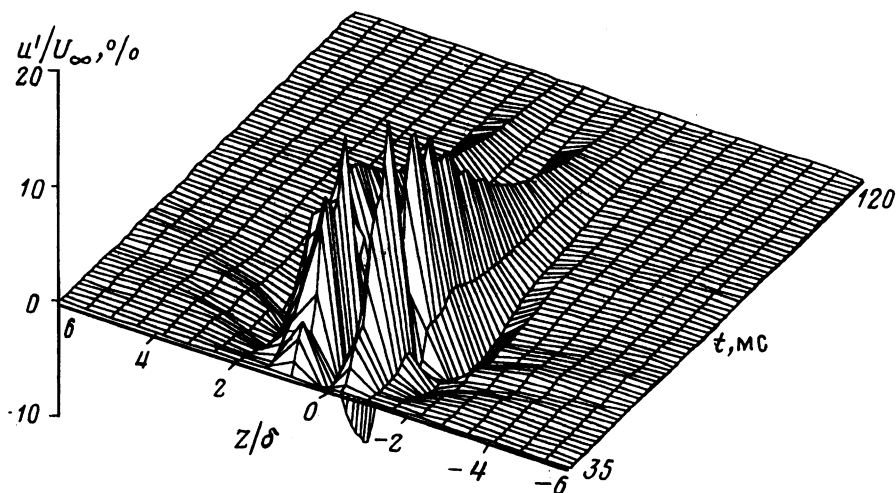
Фиг. 4. Изолинии пульсаций скорости локализованного возмущения, взаимодействующего с высокочастотной волной в плоскости $Z/\delta - t$, $X = 335$ мм, $Y = Y(u'_{\max})$: сплошные и штриховые линии – уровни отклонения от средней скорости в сторону ее увеличения ($\max = +26\%U_{\infty}$) и уменьшения ($\min = -12\%U_{\infty}$) соответственно, шаг изолиний $1,5\%U_{\infty}$ (а) и спектр данного возмущения по поперечному волновому числу β в плоскости $\beta\delta - t$, шаг изолиний $0,075\%U_{\infty}$, $\max = 0,768\%U_{\infty}$ (б)

в той же точке пространства по X (фиг. 4). Видно, что структура возмущения резко изменилась. Возросла локализация возмущения по Z , что видно как из фиг. 4, а ($Z/\delta = 0,65$ по сравнению с $\pm 0,9$ без волны), так и из распределения $\beta\delta = f(t)$ на фиг. 4, б ($\beta\delta = \pm 0,6$ по сравнению с $\pm 0,5$ без волны). Амплитуда возмущения увеличилась более чем в 10 раз ($38\%U_{\infty}$ в данном случае против $3\%U_{\infty}$ в предыдущем).

Особенно большое влияние взаимодействие возмущений оказало на структуру областей с превышением скорости, которые как раз и идентифицируются как полосчатые структуры. Наряду с ростом их интенсивности и большей локализацией по Z увеличилась их временная протяженность ($t = 80$ мс вместо 40 мс, фиг. 4, а и 3, а соответственно), что равнозначно увеличению их пространственной протяженности вниз по потоку.

Волновой пакет, возникающий в процессе взаимодействия возмущений, развивается именно на полосчатых структурах, что хорошо демонстрируют фиг. 4, а и 5, где представлена пространственно-временная поверхность $u' = f(Z, t)$ для случая развития возмущения с высокочастотной волной. Наличие волнового пакета с частотой примерно 170 Гц отражает зубчатый характер искажения поверхности $u' = f(Z, t)$ в области максимальной амплитуды возмущений – вершины полосчатых структур (фиг. 5).

Вероятно, что интенсивность высокочастотных возмущений будет иметь свой максимум не в области дефекта скорости, где профиль градиента средней скорости по нормали к поверхности $\partial(u)/\partial Y$ наиболее неустойчив, согласно линейной теории, а в области максимального градиента скорости по трансверсальной координате $\partial(u)/\partial Z$. Это



Фиг. 5. Пространственно-временная поверхность $u' = f(Z, t)$ взаимодействия локализованного возмущения с высокочастотной волной; $X = 335$ мм, $Y = Y(u'_{\max})$

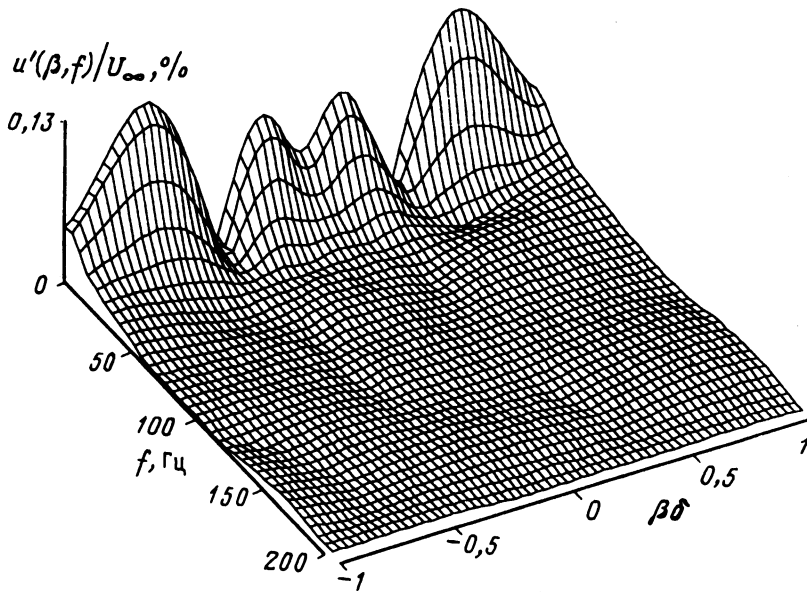
предположение подтверждается тем, что расстояния по трансверсальной координате между максимумами интенсивности возмущений (фиг. 4, а) и между положением максимальных градиентов скорости в этом направлении (фиг. 3, а) были одинаковыми: $Z/\delta = \pm 0,6$. Максимальный рост вторичных, высокочастотных возмущений в зависимости от градиента скорости $\partial\langle u \rangle / \partial Z$, а не $\partial\langle u \rangle / \partial Y$ отмечен и в [23], где исследовалась устойчивость продольных стационарных вихрей.

Исследованиями развития β -гармоник в зависимости от частоты установлено, что высокочастотное возмущение способствует перекачке энергии от среднего течения в низкочастотную часть спектра, что видно из графика зависимости поперечного волнового числа от частоты $\beta\delta = F(f)$ (фиг. 6). Распределение $\beta\delta = F(f)$ показывает, что максимальные амплитуды возмущения сосредоточены в области низких частот ($f \approx 0-25$ Гц), особенно для возмущений с периодичностью по $\beta\delta = \pm 0,6$ (фиг. 6), которая относится к продольным локализованным структурам. Перенос энергии среднего потока в низкочастотные возмущения косвенно подтверждается резким возрастанием интенсивности продольных локализованных структур, на которых и происходят генерация и развитие высокочастотного волнового пакета (фиг. 4, а).

Таким образом, при импульсном воздействии на ламинарный пограничный слой в нем генерируются специфические продольные локализованные структуры, которые могут быть идентифицированы как полосчатые структуры, наблюдаемые в естественном переходе при повышенной степени турбулентности набегающего потока.

Процесс возникновения турбулентных пятен на данных структурах может происходить в результате их взаимодействия с различными типами высокочастотных возмущений, в том числе и с волнами Толлмина – Шлихтинга [13, 14, 17]. При этом возникает высокочастотный волновой пакет, "сидящий" на "паффе", пространственная эволюция которого способствует, с одной стороны, перекачке энергии среднего течения в низкочастотные возмущения, что приводит к усилению интенсивности полосчатых структур, а с другой – локализация максимума интенсивности в узкой области переднего фронта полосчатых структур создает условия для возникновения турбулентного пятна в данном месте.

Механизм перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока, моделируемый в данном случае, может быть представлен как процесс преобразования внешних локализованных возмущений в возмущения, присущие сдвиговому течению – пограничному слою: полосчатые структуры, волны Толлмина – Шлихтинга и т.д. На



Фиг. 6. Амплитудный частотно-волновой спектр локализованного возмущения, взаимодействующего с высокочастотной волной; $X = 335$ мм, $Y = Y(u'_{\max})$

полосчатых структурах в процессе их развития генерируются вторичные высокочастотные возмущения, эволюция которых и приводит к возникновению турбулентных пятен. Механизм же генерации высокочастотных волновых пакетов на затухающих полосчатых структурах, по-видимому, может быть различным, в том числе и в результате взаимодействия волн Толлмина – Шлихтинга или других высокочастотных возмущений с ними, как в данной модели.

Отметим еще ряд особенностей процесса развития высокочастотного волнового пакета и его трансформации в турбулентное пятно. Начальный этап развития волнового пакета и структура возмущений в данной точке пространства ($X = 335$ мм) представлены выше. Характеристики развития данного высокочастотного волнового пакета вниз по потоку указывают на его идентичность так называемому зарождающемуся турбулентному пятну (incipient spot [24]).

Структура возмущения, оставаясь детерминированной, приобретает характерные особенности, присущие турбулентному пятну (стреловидная форма в плоскости $Z - t$, размер в плоскости $Y - t$ превышает толщину ламинарного пограничного слоя и т.д.). Механизм развития непосредственно турбулентного пятна начинается, вероятно, вследствие формирования каскада вторичных вихрей на периферии первичного волнового пакета по схеме, предложенной в [25]. Этот процесс приводит к окончательному структурированию данного типа возмущений, турбулизации течения внутри его границ и эволюции вниз по потоку в соответствии с законами развития турбулентного пятна.

Данный механизм хорошо демонстрирует дымовая визуализация процесса перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока в естественных условиях [2], где видно появление вторичных вихрей, уширение и приобретение характерной для турбулентного пятна стреловидной формы. Естественно, что данный сценарий эволюции высокочастотного волнового пакета в турбулентное пятно требует дальнейших, более детальных исследований.

Заключение. В дополнение к ранее изученным характеристикам процесса взаимодействия локализованных продольных возмущений с высокочастотными волнами в данной работе получены новые результаты, касающиеся структуры и пространственного спектра исследуемых возмущений.

Процесс взаимодействия затухающих вниз по потоку продольных локализованных возмущений типа streaky structures с высокочастотной волной приводит к генерации высокочастотного волнового пакета, трансформирующегося вниз по потоку в турбулентное пятно.

В процессе взаимодействия возмущений возрастает локализация продольных структур в трансверсальном направлении ($\beta\delta = \pm 0,6$), растет их амплитуда, увеличивается длина и наблюдается появление высокочастотного колебания в области их переднего фронта.

Интенсивность продольных локализованных структур резко возрастает за счет перекачки энергии среднего течения высокочастотным возмущением низкочастотному.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 96-01-01892 и 96-15-96310).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А.Н., Козлов В.Е., Кузнецов В.Р. и др. Взаимодействие ламинарного пограничного слоя с внешней турбулентностью // Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 5. С. 55–65.
2. Alfredsson P.H., Bakchinov A.A., Kozlov V.V., Matsubara M. Laminar-turbulent transition at a high level of a free stream turbulence // IUTAM. Proc. Symp. on Nonlinear Instability and Transition in Three-Dimensional Boundary Layers: Manchester, U.K. 1995. Dordrecht: Kluwer, 1996. P. 423–436.
3. Matsubara M., Kozlov V.V., Alfredsson P.H. et al. On flat plate boundary layer perturbations at a high free stream turbulence level // Proc. Intern. Conf. Methods Aerophys. Res.: Novosibirsk, 1996. Pt 1. P. 174–179.
4. Grek G.R., Kozlov V.V., Ramazanov M.P. Three types of disturbances from the point source in the boundary layer // Laminar-Turbulent Transition / Ed. V.V. Kozlov. Berlin: Springer, 1985. P. 267–272.
5. Косорыгин В.С., Поляков Н.Ф., Сунрун Т.Т., Эпик Э.Я. Влияние турбулентности потока на структуру возмущений в ламинарном пограничном слое // Пристенные турбулентные течения / Ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 79–84.
6. Morkovin M.V. Bypass transition to turbulence and research desiderata // Transition in Turbines. NASA Conf. Publ. 1984. № 2386. P. 161–204.
7. Sader K.L., O'Brien J.E., Reshotko E. Experimental study of bypass transition in a boundary layer // NASA Technical Memorandum 1988. № 100913. 189 p.
8. Грек Г.Р., Козлов В.В., Рамазанов М.П. Ламинарно-турбулентный переход при повышенной степени турбулентности набегающего потока: Препринт № 8. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики, 1987. 10 с.
9. Грек Г.Р., Козлов В.В., Рамазанов М.П. Ламинарно-турбулентный переход при повышенной степени турбулентности набегающего потока // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 6. С. 34–41.
10. Грек Г.Р., Козлов В.В., Рамазанов М.П. Ламинарно-турбулентный переход при повышенной степени турбулентности набегающего потока в градиентном течении // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1989. Вып. 3. С. 66–70.
11. Grek H.R., Kozlov V.V., Ramazanov M.P. Receptivity and stability of the boundary layer at a high turbulence level // Laminar-turbulent transition: IUTAM Symp., Toulouse, France. Berlin: Springer, 1990. P. 511–522.
12. Грек Г.Р., Козлов В.В., Рамазанов М.П. Исследование устойчивости пограничного слоя при повышенной степени турбулентности набегающего потока в градиентном течении // Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 2. С. 52–58.
13. Dey J., Grek G.R., Jahanmiri M. et al. On one possible mechanism of formation of a turbulent spot // Proc. 1st Intern. Conf. on Experimental Fluid Mechanics. Chengdu, China, 1991. P. 94–99.
14. Грек Г.Р., Козлов В.В., Рамазанов М.П. Ламинарно-турбулентный переход при повышенной степени турбулентности набегающего потока (Обзор) // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1991. Вып. 6. С. 106–137.
15. Бакчинов А.А., Грек Г.Р., Козлов В.В. Развитие локализованных возмущений типа

- "пафф" и "зарождающееся" пятно в безградиентном пограничном слое // Сиб. физ.-техн. журн. 1993. Вып. 6. С. 11–21.
16. Бакчинов А.А., Грек Г.Р., Козлов В.В. Экспериментальное изучение локализованных возмущений в ламинарном пограничном слое // Теплофизика и аэромеханика. 1994. Т. 1. № 1. С. 51–58.
 17. Grek G.R., Dey J., Kozlov V.V. et al. 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, Indian Inst. Sci., Bangalore-560012. 1991.
 18. Grek G.R. Laminar-turbulent transition at higher free stream turbulence and disturbances development control occurring at the present conditions // Proc. Intern. Conf. Methods Aerophys Res. Novosibirsk IUTAM, Novosibirsk, August 22–26 1994. Pt 1. P. 110–117.
 19. 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: Препринт № 1-97. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики, 1997, 55 с.
 20. Breuer K.S., Landahl M.T. The evolution of a localized disturbance in a laminar boundary layer. Pt 2. Strong disturbances // J. Fluid Mech. 1990. V. 220. P. 595–621.
 21. 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: ИТПМ и ВЦ СО АН СССР, 1989. С. 46–60.
 22. Wygnanski I., Haritonidis J.H., Kaplan R.E. On a Tollmien-Schlichting wave packet produced by a turbulent spot // J. Fluid Mech. 1979. № 92. Pt 3. P. 505–528.
 23. Bakchinov A.A., Grek G.R., Klingmann B.G.B., Kozlov V.V. Transition experiments in a boundary layer with embedded streamwise vortices // Phys. Fluids. 1995. V. 7. № 4. P. 820–832.
 24. Amini J., Lespinard G. Experimental study of an "incipient spot" in a transitional boundary layer // Phys. Fluids. 1982. V. 25. № 10. P. 1743–1750.
 25. De Bruin A.C. The effect of a single cylindrical roughness element of boundary layer transition in a favourable pressure gradient // Laminar-Turbulent Transition: IUTAM Symp., Toulouse, France. Berlin: Springer, 1990. P. 645–655.

Новосибирск

Поступила в редакцию
11.III.1997