

УДК: 532.526

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ “ПОЛОСЧАТЫХ СТРУКТУР”**

**Д.С. СБОЕВ, Г.Р. ГРЕК, В.В. КОЗЛОВ**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
Новосибирск*

Проведено исследование внутренней структуры и характеристик развития локализованных в пространстве и во времени возмущений пограничного слоя на плоской пластине. Пограничный слой возбуждался контролируемыми локализованными вихревыми возмущениями, вводимыми во внешнее течение выше по потоку от передней кромки модели. Показано, что ориентация и направление распространения внешних возмущений относительно направления средней скорости потока оказывают существенное влияние на внутреннюю структуру возмущений пограничного слоя. При этом возмущения пограничного слоя имеют одинаковые интегральные характеристики развития. Это указывает на универсальность порождаемых в пограничном слое возмущений.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Как известно [1], при возрастании степени турбулентности набегающего потока  $\varepsilon$  наблюдается уменьшение числа Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое. Визуализация течения [2 – 4] в пограничном слое при высоких значениях  $\varepsilon$  порядка 1 % от скорости набегающего потока показала существование в нем вытянутых в продольном и локализованных в трансверсальном направлении структур, получивших название полосчатых (streaky structures). В дальнейшем на этих структурах возникают высокочастотные вторичные колебания, приводящие к образованию турбулентных пятен [4]. Измерения [2, 5, 6] в “естественных” условиях позволили установить, что масштаб полосчатых структур в трансверсальном направлении коррелирует с толщиной пограничного слоя. Максимум пульсаций лежит вблизи середины пограничного слоя, а в спектрах преобладают низкие частоты, которые, согласно линейной теории устойчивости, при докритических числах Рейнольдса должны сильно затухать. Возникновение полосчатых структур связывается с проникновением вихрей из внешнего потока в пограничный слой и их последующим преобразованием в возмущения пограничного слоя [3, 7].

Поскольку характеристики полосчатых структур значительно отличаются от характеристик пакетов волн Толлмина — Шлихтинга (ТШ), можно предполагать, что механизм их развития иной. Таким механизмом может быть так называемый эффект опрокидывания (lift-up effect), или алгебраический рост в сдвиговых слоях [8]. Основная идея работы [8] состоит в следующем: перемещение жидкой частицы в нормальном к сдвиговому слою направлении приводит к возникновению возмущений продольной компоненты скорости, так как частица первоначально сохраняет свой импульс в горизонтальном направлении. Таким образом, в пограничном слое перенос замедленной жидкости из пристеночной области к внешней границе слоя вызывает появление областей с дефектом мгновенной скорости относительно средней в данной

точке потока и, наоборот, при переносе высокоскоростной жидкости от внешней границы к стенке возникают области с превышением скорости. При своем развитии вниз по потоку возмущения не расплываются в трансверсальном направлении. Передний фронт возмущения распространяется вниз по потоку с более высокой скоростью (порядка средней скорости у внешней границы пограничного слоя), чем задний, что приводит к непрерывному растяжению возмущения. Растяжение вызывает нарастание энергии возмущения, по крайней мере, линейное со временем. В вязких потоках время роста энергии ограничено, поэтому если при нарастании возмущения не эволюционировало к турбулентному пятну, то оно всегда будет затухать. Данный механизм наиболее эффективен при очень малых значениях продольного волнового числа ( $\alpha \rightarrow 0$ ). Кроме того, возмущения, возникающие в результате эффекта опрокидывания, можно рассматривать как состоящие из недиспергирующей конвективной части, имеющей высокую скорость распространения, и волновой части с характеристиками, близкими к характеристикам пакетов волн ТШ [9, 10]. Эти особенности нашли свое подтверждение в модельных экспериментах [9 – 12].

В работах [11, 12] возмущения, подобные полосчатым структурам, были инициированы при взаимодействии с пограничным слоем искусственно введенного во внешний поток возмущения, которое распространялось перпендикулярно передней кромке модели. Показано, что структура возмущений представляет собой три чередующиеся области замедленной и ускоренной жидкости. Строение полосчатых структур имеет важное значение для задач активного управления их развитием с целью затягивания или ускорения перехода (изложение современных концепций активного управления переходом можно найти в [13]). Структура возмущений, возникающих при взаимодействии внешней турбулентности с пограничным слоем, зависит, очевидно, от существенно трехмерного характера этого взаимодействия, т. е. от масштаба, пространственной ориентации, направления вектора скорости распространения внешнего вихревого возмущения относительно модели и направления средней скорости течения. Эти характеристики поля внешних вихревых возмущений в свою очередь зависят от степени анизотропии турбулентности внешнего потока. Ламинарно-турбулентный переход при повышенной степени турбулентности внешнего потока наиболее распространен во внутренних течениях, таких как течения в рабочих трактах газотурбинных двигателей, где степень анизотропии внешней турбулентности достаточно высока. Поэтому представляется важным исследовать в модельном эксперименте влияние перечисленных выше характеристик локализованных вихревых возмущений внешнего потока на структуру вызываемых ими возмущений пограничного слоя.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данной работе представлены результаты двух серий экспериментов. Первая серия выполнена в аэродинамической трубе МТ-324 с размерами рабочей части  $0,2 \times 0,2 \times 0,8$  м. Применена описанная в [12] методика введения контролируемых возмущений во внешний поток. Условия экспериментов были такими же, что и в работе [12]. В частности, использовались те же модель плоской пластины и источник внешних возмущений; скорость набегающего потока  $U_\infty$  составляла 6,6 м/с. Как показано в [12], при этих условиях на пластине развивался пограничный слой Блазиуса. Контролируемые возмущения вводились во внешнее течение по методике вдув-отсос при помощи трубки, установленной выше по потоку от передней кромки пластины и соединенной с герметичной камерой громкоговорителя, на который подавался электрический импульсный сигнал частотой 0,5 Гц. Трубку можно было устанавливать под различными углами  $\theta$  к передней кромке модели в плоскости ( $Z, X$ ) (рис. 1). Все измерения выполнены в режиме вдува. Точность измерения угла  $\theta$

Рис. 1. Первая серия экспериментов. Схема ввода возмущений.

1 — модель, 2 — трубка. Размеры в мм.

составляла  $0,5^\circ$ . Амплитуда поступающего на громкоговоритель сигнала при различных углах установки трубки поддерживалась постоянной. Измерения показали отсутствие влияния источника на среднее течение в пограничном слое. Подробнее методика этих экспериментов описана в [12].

Вторая серия экспериментов проведена в аэродинамической трубе Т-324 (размеры рабочей части  $1 \times 1 \times 4$  м). Модель — плоская пластина с эллипсообразным носиком — устанавливалась вертикально в рабочей части трубы и имела размеры  $1500 \times 1000 \times 10$  мм (рис. 2). Угол атаки был нулевым. Эксперименты проводились при скорости набегающего потока  $U_\infty = 6$  м/с; в этом случае степень турбулентности набегающего потока не превышала  $0,02\%$ . Как показали измерения, на пластине развивался Блазиусовский пограничный слой. Возмущения вводились в развитый пограничный слой через продольно ориентированную профилированную щель по методике вдув-отсос. Выбранная форма щели (см. рис. 2) позволяла получать инжектируемую струю газа, направленную не перпендикулярно к поверхности пластины, а под углом к ней, т. е. был создан несимметричный относительно плоскости  $XU$  источник возмущений. Вдув-отсос осуществлялся при помощи динамического громкоговорителя, герметичная полость которого соединялась полихлорвиниловой трубкой с успокоительной камерой щели. На громкоговоритель подавался импульсный сигнал. Частота следования импульсов составляла  $0,5$  Гц. Все измерения были выполнены в режиме вдува.

Измерения средней и пульсационной составляющих продольной компоненты скорости проводились при помощи одноточечного датчика термоанемометра постоянного сопротивления с измерительным мостом 55M10 фирмы DISA. Сигнал с выхода моста подавался на вход аналого-цифрового преобразователя Mac-ADIOS adio (GW Instruments), запуск которого осуществлялся по сигналу синхронизатора, т. е. фазовая информация в ходе эксперимента

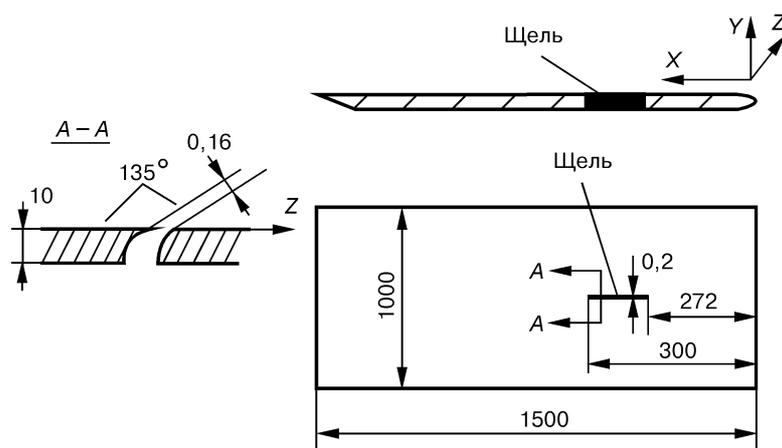


Рис. 2. Вторая серия экспериментов. Модель плоской пластины. Размеры в мм.

сохранялась. Сбор и обработка данных производились при помощи персонального компьютера Macintosh LC II. Для уменьшения влияния стохастических возмущений и увеличения отношения сигнал/шум применялась операция осреднения по ансамблю реализаций. Число реализаций изменялось от 30 до 300. Подробнее приборы и техника измерений описаны в [12].

Над пространственно-временными распределениями пульсаций продольной компоненты скорости осуществлялось двойное преобразование Фурье по времени и трансверсальной координате  $Z$  (см. [12]) и преобразование Фурье по трансверсальной координате:

$$u'(\beta, t) = 1/Z_0 \int_{-Z_0/2}^{Z_0/2} e^{-i\beta z} u'(z, t) dz.$$

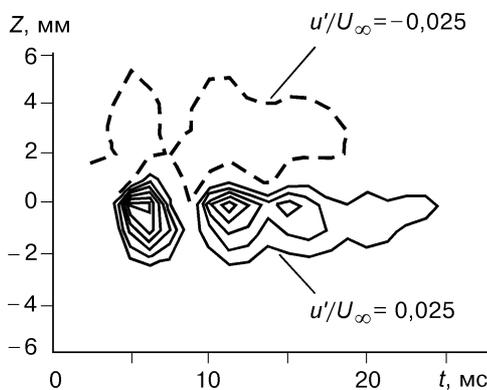
Для возможности прямого численного сравнения результатов спектрального анализа различных распределений все параметры этих преобразований (такие, как тип и ширина спектральных окон) были постоянными.

Результаты измерений и расчетов представлены в виде контурных диаграмм изолиний пульсаций скорости в плоскостях  $Z, t$  и  $\beta, t$  для различных координат  $X$ . На этих диаграммах сплошными линиями показано превышение мгновенной скорости над местной средней скоростью, штриховыми — ее дефект. На некоторых графиках даны также численные значения максимального и минимального отклонений (min — дефект скорости, max — превышение скорости). Шаг изолиний равен указанным на графиках значениям.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1. Первая серия экспериментов

На рис. 3 показана в плоскости  $Z, t$  структура возмущений, вводимых во внешний поток при угле установки трубки  $\theta = 40^\circ$ . При  $\theta = 0$  вводимые возмущения симметричны относительно оси  $Z$  и распространяются вдоль потока (см. [12]). Измерения показали, что в случае  $\theta = 40^\circ$  внешнее возмущение состоит из области интенсивных положительных пульсаций и слабо выраженной области отрицательных пульсаций. Это возмущение имеет довольно значительную скорость распространения по трансверсальной координате. Последнее следует из того, что локализованные возмущения регистрировались в пограничном слое не напротив среза трубки по координате  $Z$ , а на некотором расстоянии в стороне от него. Это наблюдение и показанные на рис. 3 данные позволяют предполагать, что возмущение, вводимое в поток при  $\theta = 40^\circ$ , является струей газа, распространяющейся под некоторым углом к направлению средней скорости потока. Характерные масштабы этого возмущения (4 – 6 мм по оси  $Z$ , 3 – 4 мм по оси  $Y$ , 20 –



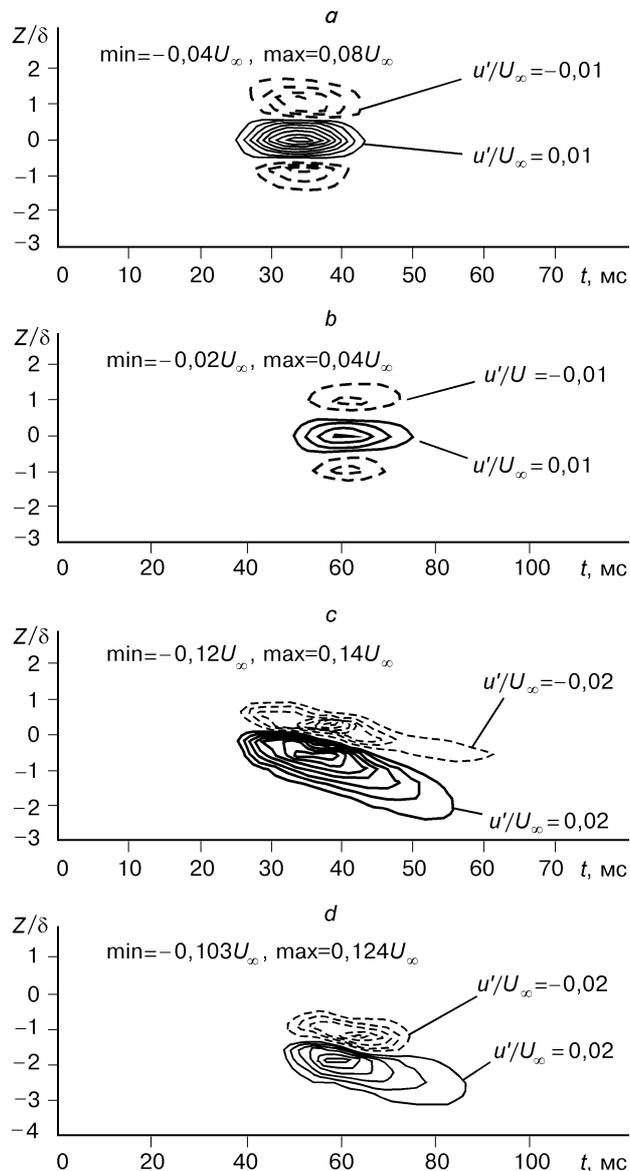
30 мс) соответствуют измеренным в [6] масштабам турбулентности ( $\varepsilon = 1,35\%$ ), генерируемой установленными в рабочей части аэродинамической трубы сетками. Кроме того, характерные масштабы внешних возмущений, вводимых в поток при  $\theta = 0$  (см. [12]) и  $40^\circ$ , также близки.

Рис. 3. Структура возмущений внешнего потока ( $\theta = 40^\circ$ ) в плоскости  $Z, t$ .  
 $X = -1$  мм,  $Y = 0,5$  мм.

На рис. 4 показаны изолинии пульсаций продольной компоненты скорости в пограничном слое в плоскости  $Z/\delta, t$ , где  $\delta$  — местная толщина пограничного слоя; для сравнения приведены результаты измерений при  $\theta = 0$  и  $40^\circ$ . Возмущения, генерируемые в пограничном слое при  $\theta = 0$ , демонстрируют симметричную относительно оси  $Z$  структуру с тремя характерными областями: одной — с превышением скорости над местной средней скоростью, расположенной на оси возмущения, и двух других — с дефектом скорости по сторонам первой (см. рис. 4, *a, b*). Эта структура аналогична исследованной в работах [10 – 12]. В то же время при  $\theta = 40^\circ$  возмущения пограничного слоя состоят только из двух характерных областей: с дефектом и с превышением скорости (см. рис. 4, *c, d*). Из сравнения рис. 4, *a, b, c, d* видно, что несимметричные возмущения локализованы и слабо расплываются в трансверсальном направлении, скорости распространения по продольной координате передних фронтов симметричных и несимметричных возмущений практически равны и составляют  $0,8U_\infty$ . Таким образом, исследуемые возмущения обладают характерными особенностями возмущений типа полосчатых структур. Следовательно, в пограничном слое возможно существование таких возмущений с несимметричной в плоскости  $Z, X$  структурой.

На рис. 5 изображены распределения по координате  $Z$  пиковых значений отклонений мгновенной скорости от средней для возмущений пограничного слоя при  $\theta = 40^\circ$ . Здесь видна еще одна характерная черта несимметричных возмущений — их дрейф по трансверсальной координате, который можно связать с присутствием ненулевой трансверсальной компоненты вектора скорости распространения внешнего возмущения. Таким образом, несимметричные возмущения как целое распространяются под некото-

Рис. 4. Структура возмущений пограничного слоя в плоскости  $(Z/\delta, t)$ , полученных при  $\theta = 0$  (*a, b*) и  $\theta = 40^\circ$  (*c, d*).  
*a, c* —  $X = 114$  мм,  $Y/\delta = 0,32$ ,  $\delta = 2,54$  мм; *b, d* —  $X = 235$  мм,  $Y/\delta = 0,32$ ,  $\delta = 3,14$  мм.



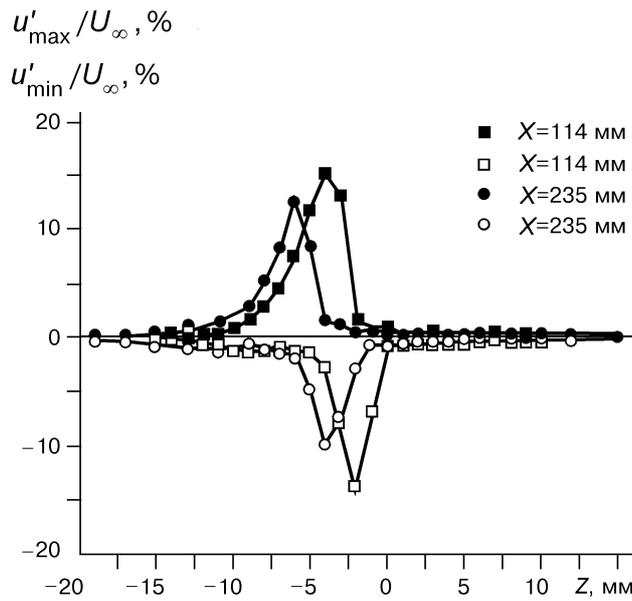


Рис. 5. Распределения по трансверсальной координате пиковых значений отклонений мгновенной скорости от средней в данной точке для возмущений пограничного слоя при  $\theta = 40^\circ$ .

рым углом ( $\sim 1^\circ$ ) к направлению средней скорости в пограничном слое. Наблюдения за развитием полосчатых структур в “естественных” условиях при дымовой визуализации течения также показали, что некоторые из этих структур при своем распространении вниз по потоку смещаются в

трансверсальном направлении [4]. Возможно, это явление имеет ту же природу, что и в настоящей работе.

Другая особенность несимметричного возмущения — большая, в сравнении с симметричным, величина пульсаций и более слабое затухание при равной амплитуде сигнала на громкоговорителе. Пиковые значения отклонений мгновенной скорости от средней меняются от 12 до 6 % для симметричного возмущения и от 36 до 23 % для несимметричного (см. рис. 4 и таблицу). Подобная особенность несимметричных возмущений была обнаружена и при прямом численном моделировании развития локализованных возмущений в течении Пуазейля в прямоугольном канале [14]. Несимметричные возмущения в [14] были получены поворотом начального возмущения (пары противовращающихся вихрей) вокруг оси, нормальной стенкам канала.

Спектры возмущений пограничного слоя в плоскости  $f, \beta$ , где  $f$  — частота и  $\beta$  — трансверсальное волновое число, приведены на рис. 6. Видно большое сходство спектров симметричных и несимметричных возмущений. В частности, наблюдается преобладание низких частот и наклонных волн. Наибольшую амплитуду имеют гармоники  $(0, \pm \beta_{\max})$ , где значению  $f = 0$  соответствует очень низкая частота (ниже первой выделяемой дискретным преобразованием Фурье гармоники). Как видно из таблицы, несмотря на затухание возмущений вниз по потоку, эти гармоники нарастают.

Сравнение численных значений величин, характеризующих спектры возмущений, позволяет сделать несколько выводов о восприимчивости пограничного слоя. В частности, амплитуда гармоник  $(0, \pm \beta_{\max})$  в спектре несим-

$\theta$ , град	$\frac{u'_{pp}(X=235 \text{ мм})}{u'_{pp}(X=114 \text{ мм})}$	$\frac{A_{0, \beta_{\max}}(X=235 \text{ мм})}{A_{0, \beta_{\max}}(X=114 \text{ мм})}$	$\lambda_z(X=-1 \text{ мм}),$ мм	$\lambda_z(X=114 \text{ мм}),$ мм	$\frac{\lambda_z(X=235 \text{ мм})}{\lambda_z(X=114 \text{ мм})}$
0	0,5	1,10	$\infty$	7,1	0,90
40	0,63	1,05	$\infty; 24,5$	9,8	0,88

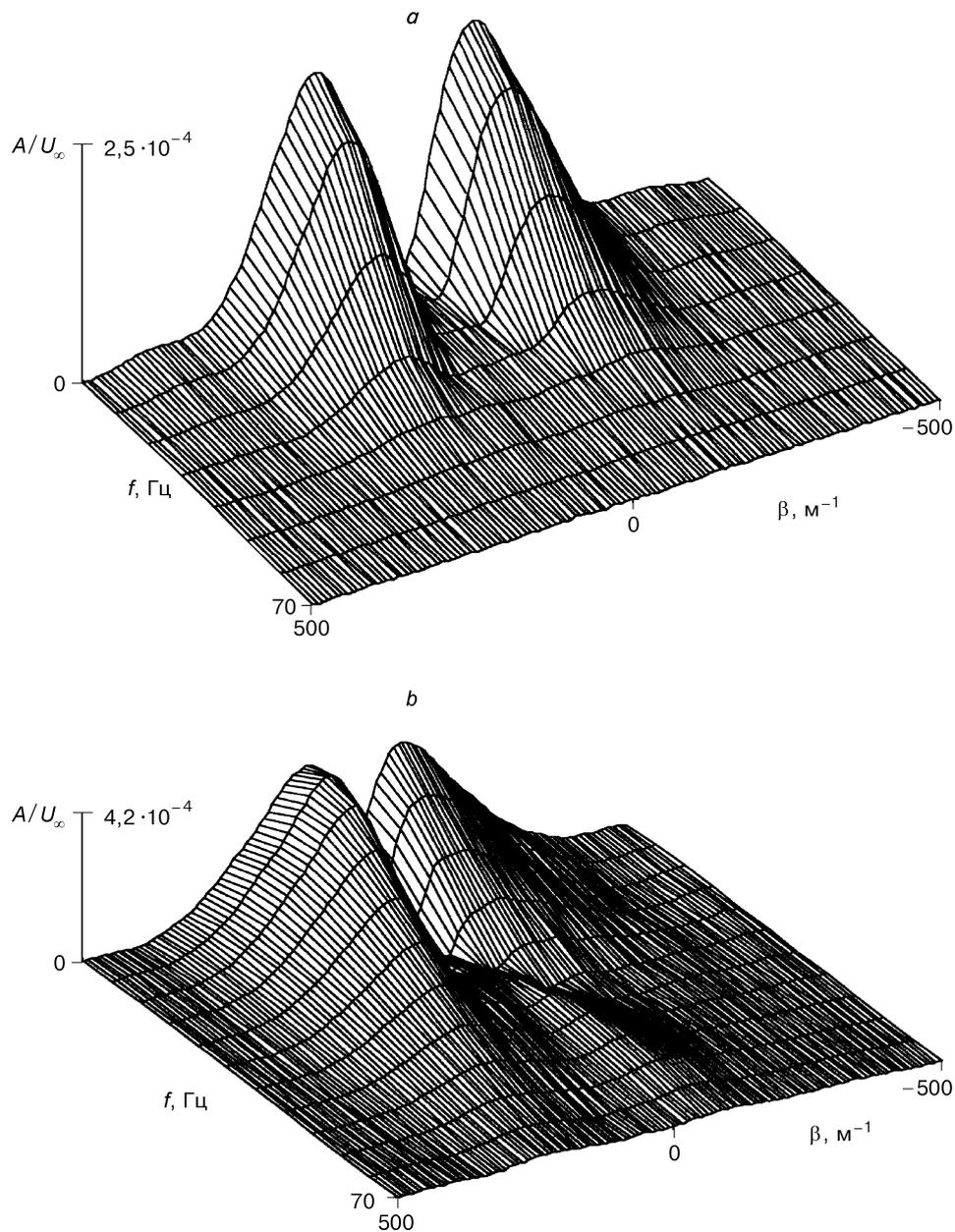


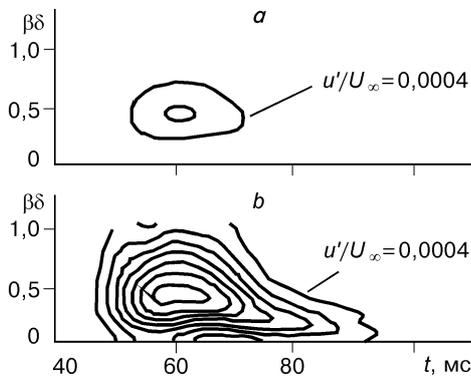
Рис. 6. Амплитудные частотно-волновые спектры возмущений пограничного слоя ( $X = 235$  мм) при  $\theta = 0$  (a) и  $40^\circ$  (b).

метричного возмущения значительно превышает аналогичную величину для симметричного возмущения (см. рис. 6). Поскольку величина возбуждающего сигнала в обоих случаях постоянна, этот факт свидетельствует о том, что при  $\theta = 40^\circ$  данные гармоники более эффективно генерируются в пограничном слое. К такому же выводу пришли авторы работы [14], которые имели возможность получить спектры возмущений по продольному волновому числу  $\alpha$  и предложили следующее объяснение: поворот начального возмущения вокруг нормальной оси в физическом пространстве можно рассматривать как соот-

ветствующее преобразование координат. Это преобразование имеет место и в пространстве волновых чисел, что, в свою очередь, приводит к более сильной концентрации энергии в модах с  $\alpha \rightarrow 0$ , которые наиболее “опасны” с точки зрения алгебраического роста возмущений. Вследствие этого происходит генерация возмущений пограничного слоя, имеющих значительно большую амплитуду при одинаковой энергии начального возмущения.

Важным аспектом восприимчивости пограничного слоя является также величина характерного масштаба возмущений по трансверсальной координате. В таблице приведены значения поперечных длин волн гармоник, доминирующих в спектрах возмущений и определенных как  $\lambda_z = 1/\beta_{\max}$  во внешнем потоке ( $X = -1$  мм) и в пограничном слое ( $X = 114$  мм). В случае  $\theta = 0$  в спектрах внешних возмущений энергия распределена в широком диапазоне поперечных длин волн, хотя преобладают плоские волны ( $\lambda_z \rightarrow \infty$ ) [12]. При  $\theta = 40^\circ$  в спектрах внешних возмущений доминируют плоские волны и наклонные волны с  $\lambda_z \cong 24,5$  мм. Тем не менее возмущения пограничного слоя в обоих случаях имеют достаточно близкие значения поперечных длин волн. Кроме того, из таблицы видно, что изменение данной величины вниз по потоку имеет одинаковый характер для  $\theta = 0$  и  $40^\circ$ . На возможные причины этого будет указано ниже.

С точки зрения управления развитием возмущений в пограничном слое наибольшее значение имеют не столько характеристики каких-то (пусть и наиболее энергонесущих) гармоник в спектрах возмущений, сколько масштабы этих возмущений как целостных структур. Эти масштабы могут быть корректно определены из спектров по трансверсальному волновому числу, которые получены без выполнения преобразования Фурье по времени. В таком случае амплитуда одной  $\beta$ -гармоники представляет собой суммарную амплитуду всех частотных гармоник в спектре возмущения, имеющих данную величину трансверсального волнового числа с учетом их фаз. На рис. 7 в виде изолиний в плоскости  $\beta\delta, t$  показано развитие спектров возмущений по трансверсальному волновому числу за время пролета возмущения мимо датчика (на рисунках представлена половина спектра вследствие его симметричности относительно  $\beta = 0$ ). Можно идентифицировать следующие масштабы в структуре возмущений: с  $\beta\delta \cong 0,45$  при  $t = 60$  мс и с  $\beta\delta \cong 0,2$  при  $t \geq 70$  мс. Как показано в работе [10], первый из этих масштабов характеризует полосчатые структуры, а второй — пакеты наклонных волн ТШ, генерируемых на краях возмущения при его распространении вниз по потоку. Масштаб с  $\beta\delta \cong 0,45$  наблюдается как при  $\theta = 0$ , так и при  $\theta = 40^\circ$ , причем видно, что в последнем случае в нем сосредоточена значительно большая энергия. Масштаб с  $\beta\delta \cong 0,2$  отсутствует у симметричных возмущений, генерируемых при  $\theta = 0$  (рис. 7, а), что является следствием ограниченного диапазона измерений по трансверсальной координате (симметричное возмущение по размерной координате  $Z$



почти в два раза шире несимметричного). У волн ТШ, наклоненных к потоку под углами около  $30 - 40^\circ$  (что, по-видимому, имеет место в настоящей работе), скорость распространения порядка  $0,4U_\infty$  [15] — что значительно ниже, чем у полосчатых структур. Это объясняет различия в скорости распространения заднего

Рис. 7. Амплитудные спектры возмущений по трансверсальному волновому числу в плоскости  $(\beta\delta, t)$  для  $\theta = 0$  (а) и  $40^\circ$  (б).

фронта возмущений, наблюдаемые на рис. 4.

Представляет интерес сравнение полученных результатов с данными теоретических работ [16, 17], посвященных исследованию оптимальных возмущений в пограничном слое на плоской пластине. Оптимальными возмущениями в [16, 17] названы возмущения такой конфигурации, которая среди всех возможных конфигураций обеспечивает наибольший потенциал алгебраического роста, например, наибольшую энергию возмущения в заданный момент времени. Поэтому следует ожидать, что на достаточно больших временах развития структура возмущений пограничного слоя будет определяться структурой этого оптимума. При использовании различных подходов в [16, 17] получены близкие результаты — оптимальными оказались вытянутые вдоль потока возмущения типа полосчатых структур с  $\beta\delta = 0,35$  [16] и  $0,45$  [17]. В настоящей работе в качестве характеристики интегрального масштаба по трансверсальной координате для возмущений в пограничном слое получена величина  $\beta\delta \cong 0,45$ . Кроме того, обнаружена близость численных значений поперечных длин волн наиболее энергонесущих гармоник в спектрах возмущений независимо от способа их генерации.

### 3.2. Вторая серия экспериментов

Как видно из предыдущего, в зависимости от характеристик начального возмущения топология полосчатых структур может быть различной. Представляет интерес исследование возможности генерации несимметричных возмущений такого типа внутри пограничного слоя. В настоящей работе для этой цели был выбран источник возмущений в виде продольной щели, причем направление вдува газа через щель не совпадало с нормалью к поверхности пластины (см. рис. 2).

На рис. 8 показано развитие возмущений в пограничном слое в плоскости  $Z, t$ . Ось времени нормирована на  $\delta/U_\infty$ . Такая нормировка позволяет сравнить характерные временные масштабы развития пограничного слоя и возмущения. Как показали результаты [10], генерация возмущений типа “пафф” при помощи расположенного на стенке источника сопровождается генерацией на нем и пакетов волн ТШ. Характерный масштаб времени, в течение которого развиваются волны ТШ, соответствует  $v/U_\infty^2$ . Поскольку полосчатые структуры развиваются на временах порядка времени развития сдвигового слоя, выбранная нормировка оси  $t$  позволяет более четко отделить такие возмущения от возмущений других типов, вносимых в течение источником.

Как видно из рис. 8, *a*, на расстоянии  $X = 377$  мм возмущение состоит из области дефекта скорости, вызванной перемещением низкоскоростной жидкости от стенки к внешней границе пограничного слоя при вдуве, и более слабой области с превышением скорости в районе отрицательной полуоси  $Z$ , соответствующей подосу высокоскоростной жидкости к стенке, вызываемому инжекцией струи. Появление положительного максимума пульсаций скорости на отрицательной полуоси  $Z$  довольно неожиданно, так как вдуваемая струя была направлена в сторону положительной полуоси (см. рис. 2). Временная протяженность возмущения составляет около  $400\bar{t}$ , размер по трансверсальной координате — порядка шести местных толщин пограничного слоя. В спектре возмущения при  $X = 377$  мм по трансверсальному волновому числу доминируют плоские волны.

Ниже по потоку ( $X = 587$  мм) в структуре возмущения появляется еще один максимум положительных пульсаций скорости, расположенный в области  $-2 < Z/\delta < 0$  и имеющий временную протяженность около  $100\bar{t}$ . При  $X = 1245$  мм этот внутренний максимум наблюдается при  $0 < Z/\delta < 2$ , причем его временная протяженность не изменилась, а амплитуда превышает ампли-

Рис. 8. Вторая серия экспериментов. Структура возмущений пограничного слоя в плоскости  $Z/\delta, t/U_\infty/\delta$ .

$a$  —  $X = 377$  мм,  $Y/\delta = 0,43$ ,  $\delta = 2,50$  мм;  $b$  —  $X = 587$  мм,  $Y/\delta = 0,43$ ,  $\delta = 4,25$  мм;  $c$  —  $X = 1245$  мм,  $Y/\delta = 0,36$ ,  $\delta = 7,50$  мм.

туду пульсаций во внешнем максимуме. Развитие во времени спектров возмущения по трансверсальному волновому числу для  $X = 587$  мм показано на рис. 9,  $a$ , откуда следует, что на ранних стадиях преобладают возмущения со спектральным масштабом  $\beta\delta \cong 0,5$  (характерный разворот изолиний); в то же время основная энергия возмущения сосредоточена в масштабах с  $\beta\delta \cong 0,2$ . Распределения амплитудных спектров в плоскости  $\beta\delta, t$ , полученные для  $X = 377$  и  $587$  мм, были проинтегрированы по времени, и их отношение показано на рис. 9,  $b$ , из которого следует, что наиболее нарастающими являются возмущения с масштабами  $\beta\delta \cong 0,5$ . Возмущения с  $\beta\delta \cong 0,2$  растут значительно медленнее, а плоские волны затухают наиболее быстро. Далее вниз по потоку происходит затухание возмущения как целого, однако сравнение спектров при  $X = 587$  и  $1245$  мм показывает, что возмущения с масштабами  $\beta\delta \cong 0,5$  наиболее долгоживущие.

Представленные результаты позволяют определить интегральные характеристики развития возмущений. Скорость распространения переднего фронта возмущения составляет величину  $0,82U_\infty$ , заднего —  $0,45U_\infty$ . Из-за различия в скорости распространения переднего и заднего фронтов в размерных координатах возмущение растягивается как целое по продольной координате, но в безразмерных координатах (см. рис. 8) его протяженность сокращается. В то же время протяженность той части возмущения, которая соответствует спектральному масштабу  $\beta\delta \cong 0,5$  (прямоугольник, выделенный штриховой линией), не изменяется и в безразмерных координатах. Сокращение временной протяженности возмущения как целого в безразмерных координатах связано с

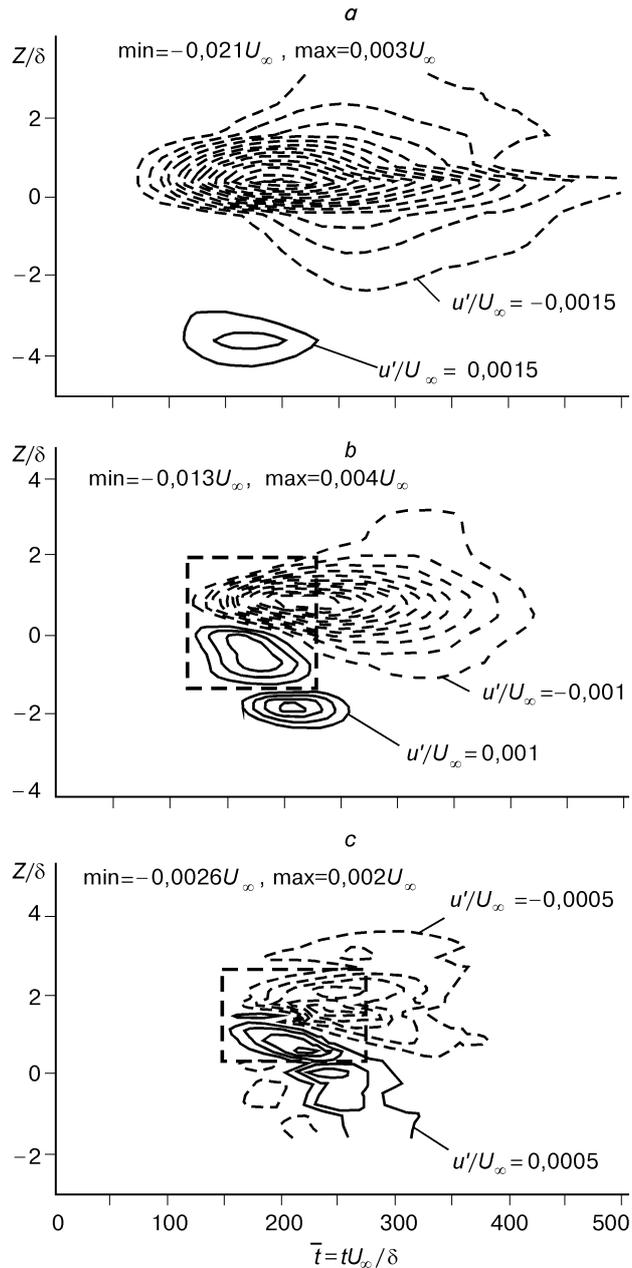
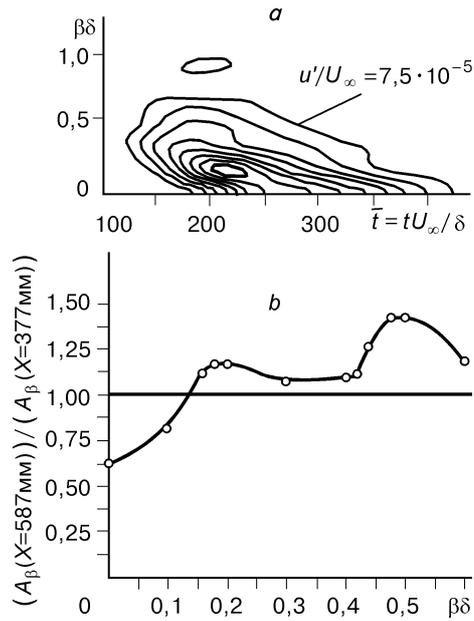


Рис. 9. Вторая серия экспериментов. Амплитудный спектр по трансверсальному волновому числу в плоскости  $\beta\delta$ ,  $tU_\infty/\delta$  для  $X = 587$  (а); отношение спектров возмущений, полученных при  $X = 587$  и  $377$  мм (б).

указанным выше различием во временных масштабах развития возмущений. Кроме того, из рис. 8 следует, что описываемая часть возмущения слабо расплывается по трансверсальной координате и имеет несимметричную в плоскости  $Z$ ,  $t$  структуру с характерным масштабом порядка трех местных толщин пограничного слоя. По изменению значений  $Z/\delta$  видно, что исследуемое возмущение дрейфует по трансверсальной координате, подобно несимметричным возмущениям, порожденным введением возмущений из набегающего потока.



#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные выводы работы

1. Модельный эксперимент показал, что ориентация и направление распространения внешних локализованных возмущений относительно направления средней скорости внешнего течения и передней кромки модели оказывает сильное влияние на структуру локализованных возмущений пограничного слоя; возможна генерация внешней турбулентностью возмущений типа полосчатых структур как с симметричным, так и с несимметричным внутренним строением. При этом несимметричные возмущения обладают основными свойствами полосчатых структур: они локализованы и слабо расплываются в трансверсальном направлении, имеют высокие скорости распространения переднего и заднего фронтов возмущения. В спектрах возмущений доминируют наклонные волны очень низкой частоты, характерный спектральный масштаб возмущений  $\beta\delta \cong 0,5$ . Это указывает на универсальность порождаемых в пограничном слое возмущений.

2. Основные отличия этих возмущений от ранее исследованных состоят в следующем: структура возмущений в плоскости  $X$ ,  $Z$  теряет свою симметрию; в пограничном слое наблюдается дрейф возмущения как целого по координате  $Z$ , направление дрейфа совпадает с направлением распространения внешнего возмущения; несимметричное возмущение имеет более слабое затухание при своем развитии в пограничном слое.

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

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — продольная, нормальная и трансверсальная оси координат соответственно;  
 $\theta$  — угол установки трубки в плоскости  $X$ ,  $Z$ ;  
 $t$  — время;  
 $\alpha$ ,  $\beta$  — компоненты волнового вектора в продольном и трансверсальном направлении со-

$u'_{\max}$ ,  $u'_{\min}$  — максимальное и минимальное значения  $u'$  за время пролета возмущения мимо датчика термоанемометра;  
 $t = tU_\infty/\delta$  — безразмерное время;  
 $U_\infty$  — скорость набегающего потока;  
 $U$  — продольная компонента локальной сред-

ответственно;  
 $f$  — частота;  
 $Z_0$  — фундаментальный период преобразования Фурье по трансверсальной координате;  
 $A$  — спектральная амплитуда компоненты  $u'(f, \beta)$ ;  
 $\delta$  — местная толщина пограничного слоя;  
 $\varepsilon$  — степень турбулентности набегающего потока;

ней скорости;  
 $U(t)$  — продольная компонента локальной мгновенной скорости;  
 $u' = U(t) - U$  — возмущение продольной компоненты скорости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schubauer G.B., Skramstad H.K.** Laminar boundary layer oscillations and transition on a flat plate // NASA Tech. Report. — 1943. — No. 909.
2. **Kendall J.M.** Experimental study of disturbances produced in a pre-transitional laminar boundary layer by weak freestream turbulence // AIAA Paper, No. 85 – 1695, 1985.
3. **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.
4. **Alfredsson P.H., Bakchinov A.A., Kozlov V.V., Matsubara M.** Laminar turbulent transition structures at a high level of a free stream turbulence // IUTAM Symp. on Nonlinear Instability and Transition in Three-Dimensional Boundary Layers: Proc. — London: Kluwer Acad. Publ., 1996. — P. 423 – 436.
5. **Kosorygin V.S., Polyakov N.Ph.** Laminar boundary layers in turbulent flows // Laminar-Turbulent Trans. — Berlin: Springer-Verlag et al., 1990. — P. 573 – 578.
6. **Westin K.J.A., Boiko A.V., Klingmann B.G.B. et al.** Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. Pt I. Boundary layer structure and receptivity // J. Fluid Mech. — 1994. — Vol. 281. — P. 193 – 218.
7. **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.
8. **Landahl M.T.** Note on an algebraic instability of inviscid parallel shear flows // J. Fluid Mech. — 1980. — Vol. 98. — P. 243 – 251.
9. **Breuer K.S., Haritonidis J.H.** The evolution of a localized disturbance in a laminar boundary layer. Part 1. Weak disturbances // Ibid. — 1991. — Vol. 220. — P. 569 – 594.
10. **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. — (Препр. / Ин-т теор. и прикл. механики СО РАН; № 1-97).
11. **Westin K.J.A., Alfredsson P.H., Bakchinov A.A., Kozlov V.V.** On by-pass transition in the Blasius boundary layer. Part 1: Receptivity and evolution of a localised free stream disturbance // Eur. J. Mech. B/Fluids. — 1998. — Vol. 17. — P. 823 – 846.
12. **Сбоев Д.С., Грек Г.Р., Козлов В.В.** Экспериментальное исследование восприимчивости пограничного слоя к локализованным возмущениям из внешнего потока // Теплофизика и аэромеханика. — 1999. — Т. 6, № 1. — С. 1 – 14.
13. **Boiko A.V., Kozlov V.V.** Methods of controlled disturbances for laminar-turbulent transition research and control // Intern. Conf. Meth. Aerophys. Research: Pt 1. — Novosibirsk, 1996. — P. 25 – 33.
14. **Henningson D.S., Lundbladh A., Johansson A.V.** A mechanism for bypass transition from localized disturbances in wall-bounded shear flows // J. Fluid Mech. — 1993. — Vol. 250. — P. 169 – 207.
15. **Качанов Ю.С., Оболенцева Т.Г.** Развитие трехмерных возмущений в пограничном слое Блазиуса. 2. Характеристики устойчивости // Теплофизика и аэромеханика. — 1997. — Т. 4, № 4. — С. 403 – 415.
16. **Butler K.M., Farrell B.F.** Three-dimensional optimal perturbations in viscous shear flow // Phys. Fluids A. — 1992. — No. 4. — P. 1637 – 1650.
17. **Luchini P.** Reynolds-number-independent instability of the boundary layer over a flat surface. Pt 2: Optimal perturbations // J. Fluid Mech. — In press.

*Статья поступила в редакцию 12 января 1998 г.*