

УДК 536.46:532.517.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ,
ГЕНЕРИРОВАННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ,
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРЯМОГО КРЫЛА***

В.Г. ЧЕРНОРАЙ, Ю.А. ЛИТВИНЕНКО, В.В. КОЗЛОВ, Г.Р. ГРЕК

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Представлен результат экспериментальных исследований нелинейной стадии варикозной неустойчивости продольной структуры, генерированной элементом шероховатости, в области неблагоприятного градиента давления прямого крыла. Показаны особенности развития варикозного разрушения продольной стационарной полосчатой структуры, такие как модуляция структуры в трансверсальном и продольном направлениях вторичным возмущением, появление новых полосчатых структур вниз по потоку и возникновение и развитие локализованных по пространству нестационарных образований типа Λ -структур. Обсуждаются картины пространственно-временной термоанемометрической визуализации течения в процессе пространственной эволюции полосчатой структуры с генерированным на ней вторичным высокочастотным возмущением. Выявлены особенности влияния неблагоприятного градиента давления на процесс нелинейного развития варикозной неустойчивости и структуры течения и показано его существенное влияние на эволюцию возмущений. Проведено сравнение варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной двумя различными способами (элементом шероховатости, как в данной работе, и вдувом газа, как в ранее опубликованной работе).

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что ламинарно-турбулентный переход при низкой степени турбулентности набегающего потока связан с развитием волн неустойчивости, так называемых волн Толлмина–Шлихтинга. В процессе своего развития вниз по потоку эти волны могут нарастать вначале линейно, затем претерпевают нелинейную стадию развития и, наконец, приводят к турбулизации течения. Если линейная стадия развития волн неустойчивости достаточно детально исследована как теоретически, так и экспериментально, то нелинейная стадия и особенно ее последние этапы изучены слабо. Наибольший результат в этих исследованиях достигнут в физическом и численном экспериментах. Двумерная волна Толлмина–Шлихтинга на нелинейной стадии своего развития претерпевает трехмерное искажение при достижении определенной амплитуды, в результате чего возникают характерные трехмерные Λ -структуры [2–4]. К особенностям возникновения и развития этих структур следует отнести тот факт, что они типичны не только для классического ламинарно-турбулентного перехода [2], но и наблюдаются при переходе в более сложных течениях. Например, в течениях, модулированных продольными полосчатыми структурами при повышенной степени турбулентности набегающего

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № РНП. 2.1.2.3370) и РФФИ (грант № 05-01-00034).

потока [5], в вязком подслое турбулентного пограничного слоя [6], а также в течениях, модулированных вихрями Гертлера [7–9] или вихрями поперечного течения на скользящих крыльях [5] и т. д. В данных ситуациях они возникают, в частности, из-за вторичной высокочастотной неустойчивости таких течений и могут проявляться не только как Λ -структуры, но и в виде подковообразных (Ω -структур), шпильковых (английский термин — hairpin) и т. д. вихрей. Тем не менее, их общей особенностью является наличие двух противовращающихся вихрей (ног структуры), заканчивающихся их замыканием “головкой”. Именно динамика развития этих структур вниз по потоку приводит во многих случаях к турбулизации течений. Характерной особенностью развития таких структур, например, на скользящем крыле является исчезновение одного из противовращающихся вихрей из-за поперечного течения, в то время как на прямом крыле можно наблюдать развитие классической Λ -структуры [5, 10]. Изучению механизма возникновения и развития данных структур посвящено много экспериментальных [5, 10–13] и численных [14–16] исследований. В этих работах показано, что механизм производства турбулентности в различных пристенных переходных (например, гармонический и субгармонический типы классического перехода) и турбулентных течениях одинаков и связан с возникновением, развитием и разрушением когерентных образований типа Λ -структур, Ω -структур и т. д.

С другой стороны, как упомянуто выше, начальная неустойчивость многих течений связана с их поперечной модуляцией стационарными (вихри Гертлера, вихри поперечного течения на скользящих крыльях и т. д.) и нестационарными продольными структурами (полосчатые структуры при повышенной степени турбулентности набегающего потока, Λ -, Ω - и шпилькообразные вихри и т. д.). Трансверсальная модуляция течений данными структурами создает условия (неустойчивые перегибные профили скорости по нормали к поверхности — $\partial U/\partial y$ и поперек потока — $\partial U/\partial z$) для возникновения и нарастания на них вторичных высокочастотных колебаний, эволюция которых вниз по потоку приводит к турбулизации пограничного слоя. В вязком подслое турбулентного пограничного слоя также обнаружены полосчатые структуры, роль которых в механизме регенерации турбулентных пульсаций широко исследуется экспериментально, аналитически и численно. Результаты прямого численного моделирования когерентных структур турбулентного течения в канале демонстрируют характерные образования типа Λ -структур [16]. Авторы работы [17] выделяют различные типы когерентных структур, возникающие в вязком подслое.

Важный аспект, касающийся роли полосчатых структур — это их роль в процессе турбулизации свободных струйных течений. Как показано в [18, 19], полосчатые структуры возникают непосредственно на выходе из сопла круглой и плоской струи. При взаимодействии двумерных вихревых колец Кельвина–Гельмгольца с полосчатыми структурами происходит их трехмерное искажение с образованием характерных азимутальных выбросов типа Λ - или Ω -образных структур. Сценарий этого процесса очень напоминает трехмерное искажение классической двумерной волны Толлмина–Шлихтинга на нелинейной стадии ее развития с образованием Λ -структур. Вторичное высокочастотное возмущение, генерированное в области зарождения полосчатых структур [18], приводит к разрушению азимутальных выбросов из вихревого кольца, тем самым способствуя интенсификации процесса смешения струи с окружающим газом и ее турбулизации. Развитие высокочастотного возмущения происходит на двух противовращающихся вихрях, составляющих элементы Λ - или Ω -образных азимутальных выбросов, неустойчивость которых к таким возмущениям показана в работе [13]. Таким образом,

полосчатые структуры играют важную роль не только в пристенных переходных и турбулентных течениях, но и в свободных сдвиговых течениях, таких как круглые и плоские струи. Механизмы их возникновения, развития, взаимодействия с другими возмущениями и их роль в процессах турбулизации и регенерации турбулентности детально изучаются многими исследователями.

Высокочастотная вторичная неустойчивость переходных и турбулентных пристенных течений при наличии в них полосчатых структур часто связывают с так называемой синусоидальной и варикозной неустойчивостью. Например, визуализация потока, модулированного вихрями Гертлера [5–7], показала, что переход такого течения определяется вторичными механизмами, которые продуцируют волны неустойчивости независимо на каждой вихревой паре так, что соседние пары могут усиливать различные типы вторичных движений: либо в виде периодического “меандрирования” вихрей в поперечном направлении, либо в форме подковообразных жгутов в области сильного поперечного сдвига. Такие возмущения называют синусоидальной и варикозной модами соответственно. Они сопоставляются многими исследователями с нечетной и четной модами, известными из аналитического и численного анализа вторичной неустойчивости вихрей Гертлера. В качестве причины неустойчивости выступает невязкий локальный механизм, обусловленный перегибами в мгновенных профилях скорости как в нормальном (варикозная мода), так и трансверсальном (синусоидальная мода) направлении. Выбор моды неустойчивости, которая возбуждается первой и растет более быстро, зависит от конкретных начальных условий, в частности, от расстояния между возмущениями. Например, авторы [20, 21] численно нашли, что для длинноволновых вихрей варикозная мода доминирующая, тогда как у коротковолновых (наиболее часто встречающихся) превалирует синусоидальная мода. Это связано с тем, что вихри с большой длиной волны обеспечивают слабый поперечный сдвиг, а вихри малой длины волны — большой.

Прямое численное моделирование варикозной неустойчивости в турбулентном пограничном слое [22] показало подобие подковообразных вихрей, генерируемых как в ламинарном, так и турбулентном пограничных слоях. Одновременно установлено, что механизм генерации подковообразных вихрей в турбулентных пограничных слоях связан с перегибной ($\partial U/\partial y$) неустойчивостью полосчатых структур. Подковообразные вихри могут быть причиной появления новых полосчатых структур в ламинарном подслое турбулентного пограничного слоя, что согласуется с результатами работы [17]. С другой стороны, синусоидальная неустойчивость, связанная с трансверсальным перегибным профилем скорости ($\partial U/\partial z$), подтверждена целым рядом исследований [23–25]. Можно полагать, что оба типа неустойчивости являются важными механизмами самоподдержания турбулентности в турбулентном пограничном слое: синусоидальный тип служит для регенерации пристенной турбулентности [26–28], а варикозный — для генерации подковообразных вихрей, занимающих область дальше от стенки [11, 12, 17, 22, 29].

Обе моды неустойчивости были исследованы в контролируемых условиях на линейной и начальных стадиях нелинейного развития в работе [30]. На уединенной полосчатой структуре возбуждались отдельно симметричная (варикозная) мода и антисимметричная (синусоидальная) мода. Когда трансверсальный размер полосчатой структуры был больше толщины сдвигового слоя, наблюдался рост варикозной неустойчивости. С другой стороны, когда трансверсальный размер полосчатой структуры был сравним с толщиной слоя сдвига или менее ее, она становилась более неустойчивой к антисимметричным модам чем к симметричным. Эксперимент [30] ясно продемонстрировал, что рост симметричной моды приводит к формированию “шпилькообразных” вихрей, представляющих собой пару

противовращающихся продольных вихрей, замыкающихся головкой, т. е. Λ -вихрь, в то время как антисимметричная мода развивается в цуг квазипродольных вихрей с завихренностью чередующегося знака. С другой стороны, экспериментальные исследования поздних стадий нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивостей на плоской пластине [31] показали, что, в конечном итоге, в обоих случаях формируются Λ -структуры, трансверсальное мультиплицирование которых вниз по потоку установлено. Следует заметить, что исследования варикозной неустойчивости уединенной полосчатой структуры в пограничном слое скользящего крыла [32] показали, что Λ -вихри трансформируются в асимметричные структуры из-за поперечного течения. В работе [33] представлены результаты экспериментальных исследований варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной вдувом газа, в пограничном слое прямого крыла. Исследована нелинейная стадия процесса в областях с нулевым и неблагоприятным градиентами давления. Показано, что неблагоприятный градиент давления приводит к трансверсальному мультиплицированию как когерентных Λ -вихрей, так и самих полосчатых структур и ускоряет процесс турбулизации течения. В отличие от исследований работы [33], где полосчатая структура была генерирована с помощью вдува газа через малое отверстие на поверхности крыла, в данном случае полосчатая структура генерировалась с помощью элемента шероховатости, как и в работе [30]. За исключением генератора стационарного возмущения, остальные условия данного эксперимента оставались такими же, как и в работе [33]. Было интересно сравнить, существуют ли особенности варикозного разрушения полосчатой структуры в зависимости от способа ее генерации, т. е. начальных условий. Если в предыдущей работе [33] начальная интенсивность стационарного возмущения могла регулироваться (вдув газа) при неизменной скорости набегающего потока, то в данной ситуации (шероховатость) она связана только с изменением скорости набегающего потока при прочих равных условиях. Основное внимание было обращено на когерентные структуры, возникающие в процессе вторичной высокочастотной варикозной неустойчивости полосчатой структуры, и влияние градиента давления на их развитие, что важно как для понимания механизмов перехода к турбулентности, так и для механизмов регенерации турбулентности в турбулентном пограничном слое для градиентных течений. Проведены детальные термоанемометрические измерения продольной компоненты скорости (U) и среднеквадратичных пульсаций скорости (u') по пространству (x, y, z) и времени (t), что дало возможность представить результаты измерений в виде пространственно-временных картин течения и, таким образом, выявить особенности динамики возникновения, развития и внутренней структуры когерентных образований до более поздних стадий их нелинейного развития.

Таким образом, цель данной работы состоит в исследовании влияния градиента давления на нелинейную стадию варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной элементом шероховатости, в пограничном слое прямого крыла и сравнении полученных результатов с результатами работы [33].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперимент проведен в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе со степенью турбулентности $u'/U_0 = 0,04$ %. Модель прямого крыла (рис. 1) шириной 1000 мм с хордой $c = 500$ мм устанавливалась в рабочей части трубы. Верхняя половина профиля модели, на которой проводились измерения, с расстояния $x/c \approx 0,22$ до $x/c = 1,0$ переходила в прямую линию, что позволяло реализовать как безградиентный участок обтекания при небольшом отрицательном угле

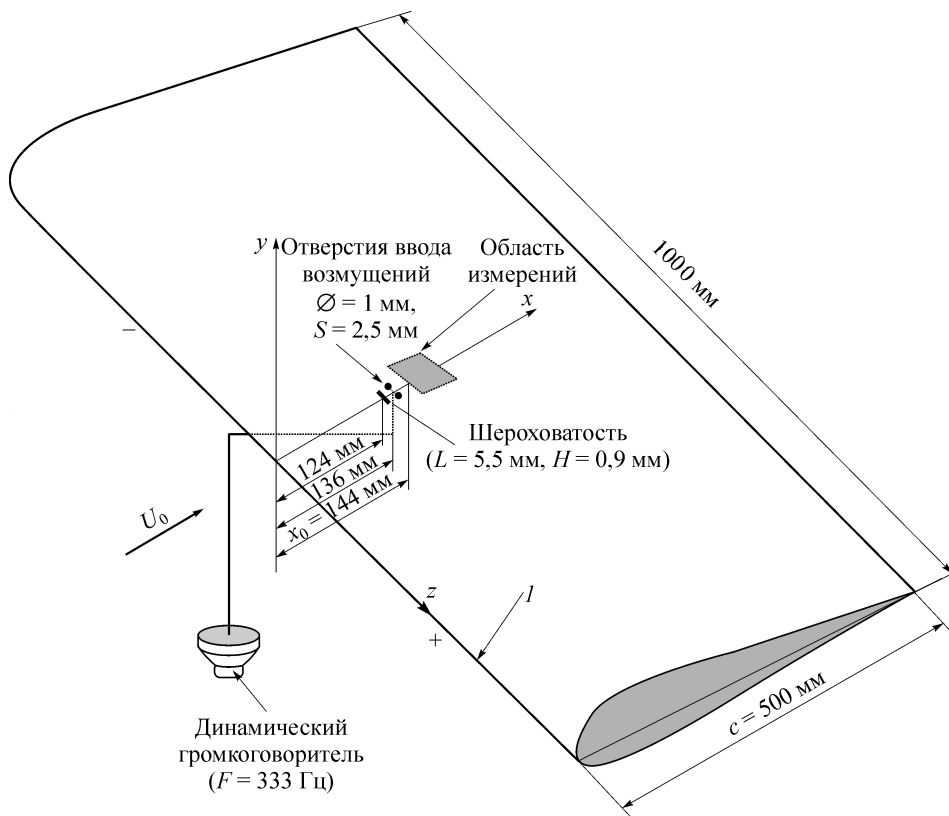


Рис. 1. Схема эксперимента.

атаки, так и участок с неблагоприятным градиентом давления при нулевом угле атаки. Стационарная продольная (далее полосчатая) структура генерировалась с помощью элемента шероховатости длиной 5,5 мм и высотой 0,9 мм, расположенном на расстоянии 124 мм от носика модели (см. рис.1). Вторичное высокочастотное возмущение ($f = 333$ Гц) накладывалось на полосчатую структуру с помощью динамического громкоговорителя, герметичная полость которого соединялась воздуховодом с двумя отверстиями диаметром 1 мм и расстоянием между ними 2,5 мм на поверхности модели, расположенными на расстоянии 136 мм от носика модели (см. рис. 1). Следует отметить, что два отверстия предназначались для генерации синусоидальной моды вторичного возмущения, но в данном случае использованы для генерации варикозной моды. Оси координат: x — вниз по потоку от передней кромки модели, y — по нормали к поверхности и z — в трансверсальном направлении в миллиметрах, позиция начала области измерений $x = 144$ мм отмечена как x_0 . Координаты (x, z) отнесены к хорде модели $c = 500$ мм. Скорость набегающего потока составляла $U_0 = 5,5$ м/с, уровень турбулентности не превышал 0,04 % U_0 при $U_0 = 5-15$ м/с в частотном диапазоне от 0,1 до 10000 Гц.

В отличие от работы [33], исследовался только случай течения с неблагоприятным градиентом давления ($dp/dx > 0$). Модель устанавливалась под нулевым углом атаки, как и в [33], что обеспечило в области измерений $dp/dx > 0$ (рис. 2). В отсутствие искусственных возмущений ламинарный пограничный слой развивался без каких-либо волн, и профили скорости в области измерений были аффинно-подобны в безразмерных координатах ($y \rightarrow y/\delta^{**}$) — толщина потери импульса и $U \rightarrow U/U_{\max}$) и близки к профилю Блазиуса для плоской пластины для случая $dp/dx = 0$ [33]. Для случая неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$) также

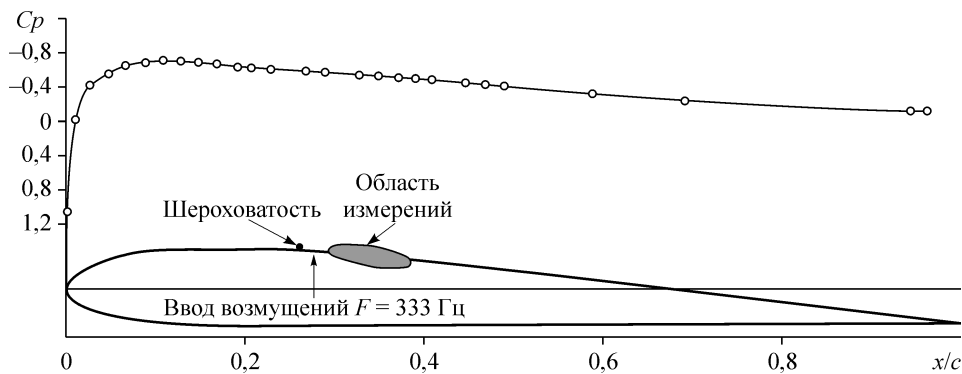


Рис. 2. Распределение коэффициента давления вдоль хорды прямого крыла в области проводимых исследований по нелинейной варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной элементом шероховатости, $U_0 = 5,5$ м/с.

наблюдалось аффинно-подобие профилей скорости в области измерений, и их характеристики соответствовали предотрывному характеру течения с параметром Хартри $m = -0,08$ (рис. 3). Известно [34], что параметр Хартри $m = 0$ соответствует течению в пограничном слое с профилем Блазиуса ($dp/dx = 0$), $m > 0$ — ускоренному течению ($dp/dx < 0$) и $-0,0904 < m < 0$ — замедленному течению ($dp/dx > 0$). Нижняя граница существования безотрывного течения в пограничном слое соответствует параметру Хартри $m = -0,0904$. Таким образом, в данном случае ($m = -0,08$) будет исследоваться развитие возмущений еще в области безотрывного течения. Число Рейнольдса в области измерений составляло, примерно, $R^* = \delta^* U_0 / \nu = 950 \div 1100$, где δ^* — толщина вытеснения при скорости набегающего

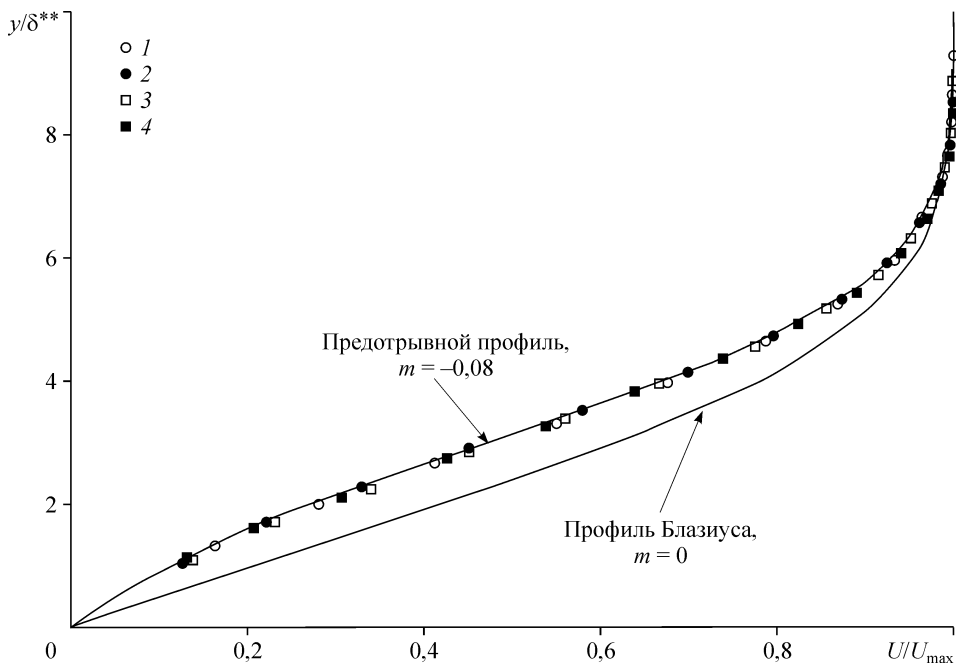


Рис. 3. Профили средней скорости в области измерений на модели прямого крыла в отсутствии возмущений для случая измерений в области неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$), для различных x/c : (1) 0,31, (2) 0,34, (3) 0,37, (4) 0,40; $U_0 = 5,5$ м/с.

потока $U_0 = 5,5$ м/с. Генерация полосчатой структуры делала профили скорости перегибными как в направлении по нормали к стенке (y), так и в трансверсальном направлении (z). Без внедрения вторичных высокочастотных возмущений пограничный слой с полосчатой структурой оставался ламинарным в измеряемых областях $x - x_0 = 0 \rightarrow 50$ мм. Это позволило нам управлять неустойчивостью полосчатой структуры с помощью искусственных возмущений через два отверстия диаметром 1 мм для возбуждения трансверсальных симметричных возмущений (рис. 1). Симметричные возмущения возбуждались синусоидальными сигналами от динамического громкоговорителя. Возбуждаемая частота вторичного высокочастотного возмущения составляла 333 Гц, что примерно соответствовало безразмерному частотному параметру $2\pi f v / U_0^2 \cdot 10^6 = 1037$. Амплитуда вторичного возмущения составляла, примерно, 7 % от U_0 вблизи источника ($x - x_0 = 0$ мм), что позволяло исследовать нелинейную стадию процесса, представляющую для нас основной интерес.

Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости U и пульсации скорости u' . Датчик с проволокой из золоченого вольфрама длиной 1 мм и диаметром 5 $\mu\text{м}$ с коэффициентом перегрева 1,8 калибровался в свободном потоке с использованием модифицированного закона Кинга: $U = k_1(E^2 - E_0^2)^{1/n} + k_2(E - E_0)^{1/2}$, где E и E_0 — выходные напряжения термоанемометра при скорости потока и ее отсутствии, соответственно; k_1 , k_2 и n — константы. Показатель экспоненты (n) обычно близок к 0,5, вторая константа (k_2) учитывает свободную конвекцию на стенке при малых скоростях потока. Максимальная ошибка при калибровке датчика не превышала 1 % от U_0 . Все измерения проведены в автоматическом режиме с использованием координатного устройства, перемещающего датчик в пространстве (x, y, z) по специально разработанной программе с использованием *LabVIEW*. Процесс измерения заключался в записи в память компьютера осредненных по ансамблю осциллограмм (до 50 реализаций) в определенной точке пространства, после чего датчик перемещался автоматически в следующую точку и т. д. Обработка полученной информации производилась с применением программного обеспечения *MatLab*, что позволило представить результаты измерений в виде контурных диаграмм изолиний средней скорости и пульсаций скорости трансверсальных сечений (плоскость yz) развития возмущений, а также в виде пространственно-временных (в координатах x, y, z, t) картин термоанемометрической визуализации данного процесса.

2. НЕЛИНЕЙНАЯ СТАДИЯ РАЗВИТИЯ ВАРИКОЗНОЙ МОДЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ОБЛАСТИ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ МОДЕЛИ ПРЯМОГО КРЫЛА

Теперь разберем более детально структуру течения на нелинейной стадии варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое прямого крыла для случая неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$) в области измерений. Вторичное высокочастотное возмущение на нелинейной стадии своего развития оказывает в данной ситуации значительно более существенное влияние на средние характеристики возмущенного полосчатой структурой течения, чем в случае безградиентного течения [33]. Контурные диаграммы изолиний дефектов средней скорости (ΔU) в плоскости yz (рис. 4) демонстрируют примерно двукратное (от 5 до 10 мм) трансверсальное расплывание возмущенной области вниз по потоку. Изначально ($x/c = 0,289$) возмущенная область состоит из мощного отрицательного дефекта скорости с амплитудой 20 % U_0 на оси и двух слабых положительных дефектов скорости по обе стороны от первого с амплитудой порядка

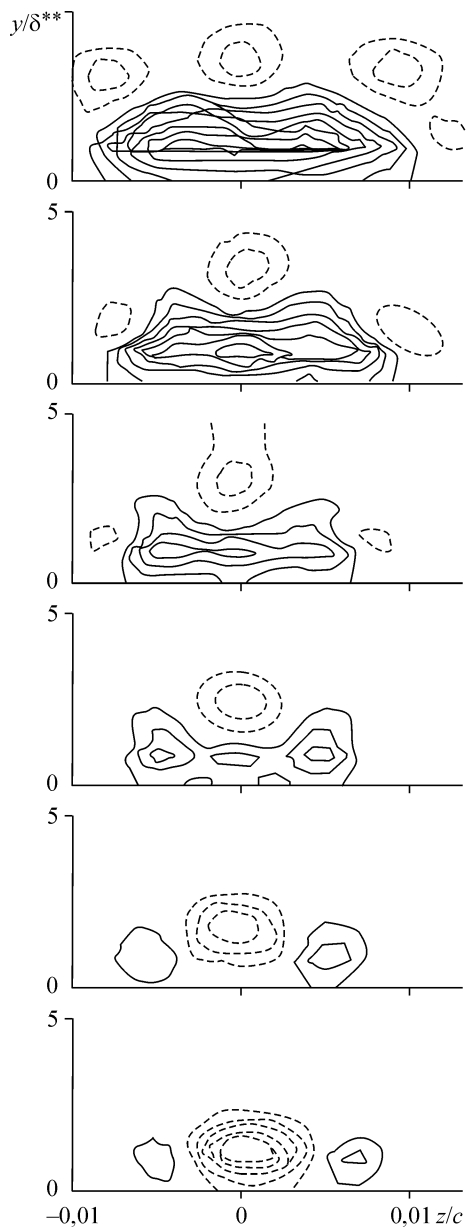


Рис. 4. Контурные диаграммы изолиний амплитуд дефектов средней скорости (ΔU) в плоскости yz процесса нелинейного развития варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления для различных координат вниз по потоку: см. снизу вверх ($x/c = 0,289, 0,307, 0,325, 0,343, 0,361, 0,379$), $U_0 = 5,5$ м/с. Шаг изолиний $4\% U_0$.

$8\% U_0$. Интегральная амплитуда искажения среднего течения в данной позиции составляет $28\% U_0$. Далее, вниз по потоку, интегральная амплитуда искажения среднего течения сначала падает до $20\% U_0$, а затем нарастает до $40\% U_0$ при $x/c = 0,379$ по сравнению с ее величиной $28\% U_0$ при $x/c = 0,289$. Изменяется вниз по потоку и структура возмущенной области. Область положительного дефекта скорости становится преобладающей на оси и вблизи стенки, в то время как область отрицательного дефекта скорости начинает дробиться на несколько локализованных в пространстве областей, которые перемещаются от стенки к верхней границе пограничного слоя. Можно также наблюдать и трансверсальное расплывание картины искажения среднего течения вниз по потоку. Очевидно, этот факт связан с резким ростом влияния неблагоприятного градиента давления как на саму полосчатую структуру, так и на вторичное высокочастотное возмущение, что отражается в целом на характеристиках среднего течения.

Рассмотрим динамику развития непосредственно вторичного высокочастотного возмущения, генерированного на полосчатой структуре. Контурные диаграммы изолиний пульсаций скорости (u') в плоскости yz (рис. 5) демонстрируют мощное трансверсальное расплывание возмущения вниз по потоку (от 5 до примерно 20 мм) и дробление изначально простой структуры на несколько симметричных относительно $z/c = 0$ замкнутых областей. Интегральная амплитуда возмущения при этом возрастает от 6 до $12\% U_0$. Особенно наглядно процесс развития вторичных возмущений можно наблюдать на пространственной картине развития вторичного возмущения на рис. 6, на котором представлены изоповерхности амплитуд пульсаций скорости ($u' = 1,5\% U_0$) в пространстве (xuz). Видно, что на начальном этапе развития возмущения можно наблюдать пару квазипродольных вихрей, которые далее вниз по потоку трансформируются в шпильковые вихри

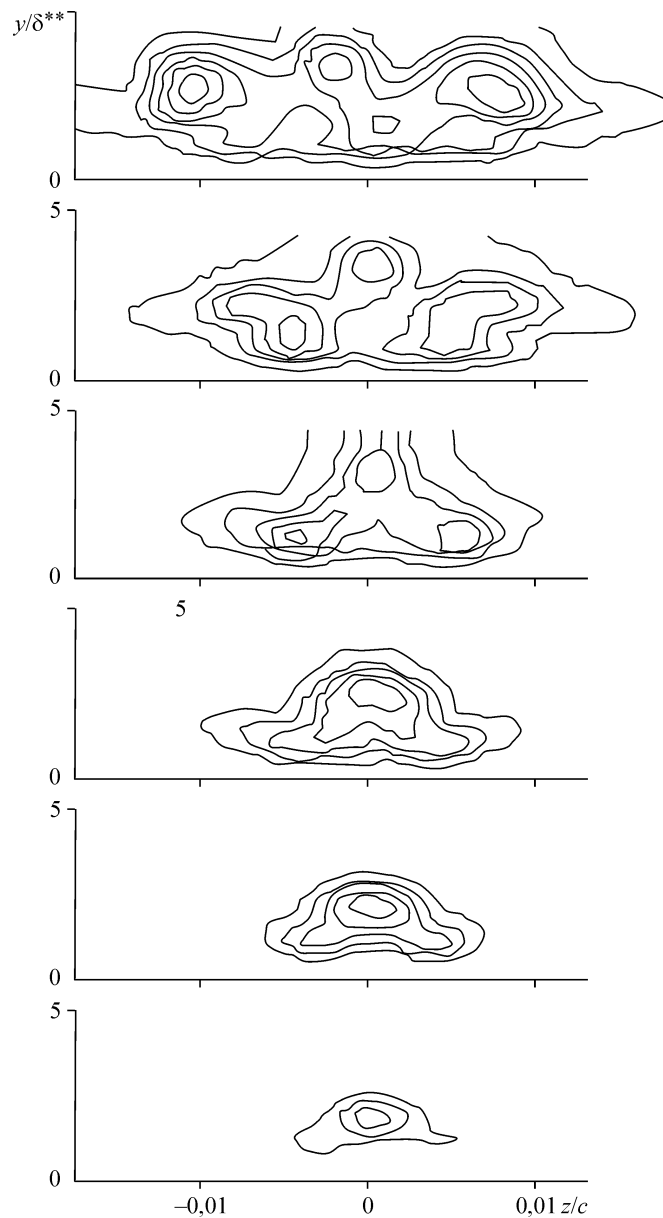


Рис. 5. Контурные диаграммы изолиний амплитуд пульсаций скорости (u') в плоскости yz процесса нелинейного развития варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления для различных координат вниз по потоку: см. снизу вверх ($x/c = 0,289, 0,307, 0,325, 0,343, 0,361, 0,379$), $U_0 = 5,5$ м/с. Шаг изолиний $2\% U_0$.

или Λ -структуры. Эти вихри отчетливо наблюдаются при $x/c \approx 0,34$ и далее вниз по потоку в виде чередующихся структур переменного знака на каждом периоде вторичного возмущения, причем можно четко наблюдать их трансверсальное мультиплицирование. Аналогичная картина развития вторичного возмущения наблюдается на контурной диаграмме изолиний амплитуд пульсаций скорости (u') в плоскости xz на координате по нормали к поверхности $y = 1,6$ мм в различные моменты времени (рис. 7). На рисунке хорошо видна временная последова-

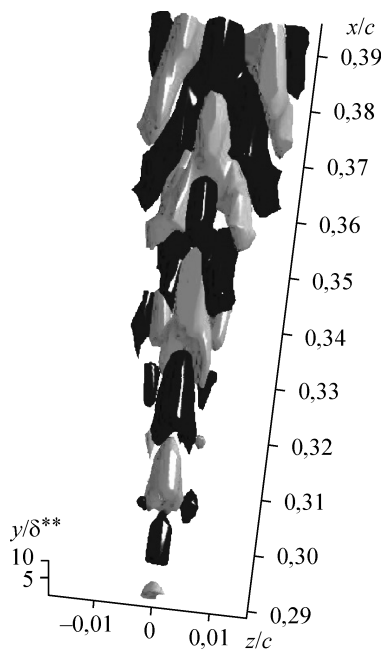


Рис. 6. Пространственная картина развития вторичного высокочастотного возмущения для случая варикозной неустойчивости полосчатой структуры в области неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$) на модели прямого крыла. Уровень изоповерхностей одинаковой амплитуды 1,5 % U_0 , темные и светлые полутона отражают превышение и дефект скорости соответственно.

тельность пространственных картин процесса образования Λ -структур из неустойчивости модулированной варикозной модой полосчатой структуры в продольном направлении. Отчетливо наблюдается и трансверсальное расплывание возмущенной области.

Глядя на пространственные картины развития вторичного высокочастотного возмущения совместно с его влиянием на средние характеристики течения ($u' + \Delta U$) (рис. 8), представленные в виде изоповерхностей амплитуд возмущений ($u' + \Delta U = 2,5 \% U_0$) для различных

моментов времени, как и на рис. 7, то можно отметить факт появления новых полосчатых структур, возникающих по обе стороны от основной в трансверсальном направлении, что, очевидно, связано с влиянием неблагоприятного градиента давления. В целом, трансверсальное расплывание возмущенной области вниз по потоку в случае неблагоприятного градиента давления (см. рис. 4–6, 8) составляет приблизительно $\alpha \approx 34^\circ$.

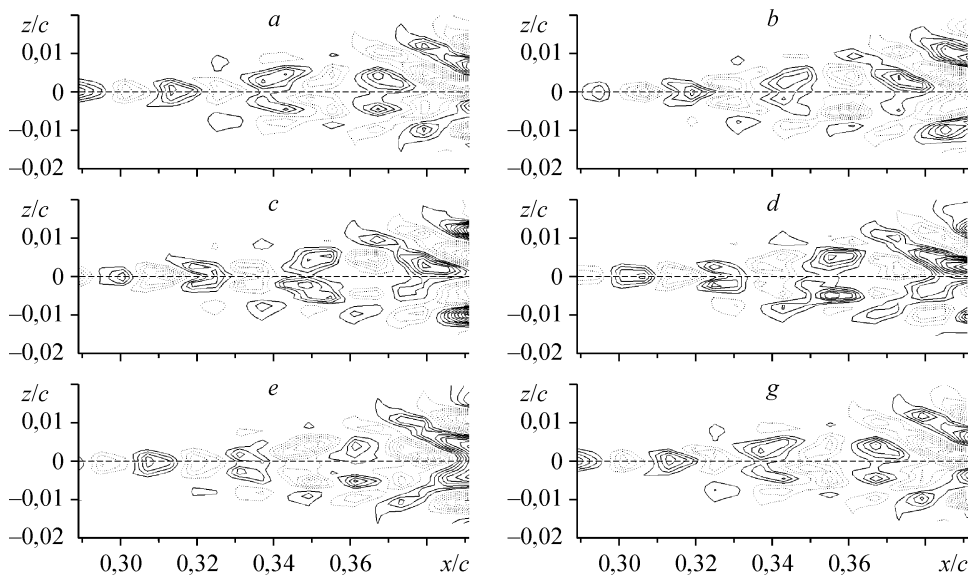


Рис. 7. Контурные диаграммы изолиний амплитуд пульсаций скорости (u') в плоскости xz процесса нелинейного развития варикозной неустойчивости полосчатой структуры для различных моментов времени в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления, $U_0 = 5,5$ м/с, $y = 1,6$ мм, шаг изолиний 1 %, временной интервал последовательности картин с 1 по 6 $\Delta t = 0,6$ мсек, начиная с $t = 0$ до $t = 3$ мсек.

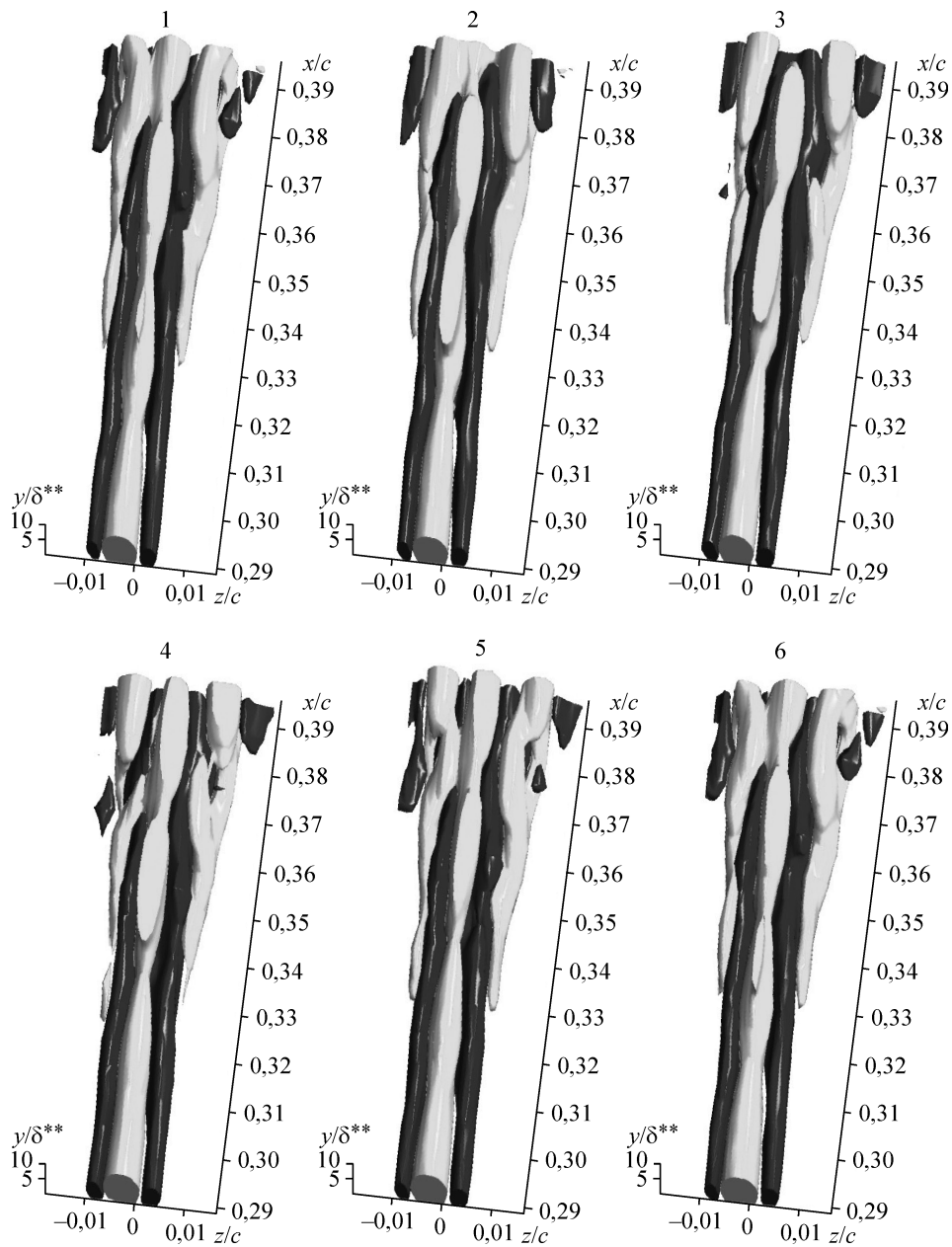


Рис. 8. Пространственные картины развития вторичного высокочастотного возмущения совместно с его влиянием на среднее течение ($u' + \Delta U$) для случая варикозной неустойчивости полосчатой структуры в области неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$) на модели прямого крыла для различных моментов времени, $U_0 = 5,5$ м/с, временной интервал последовательности картин с 1 по 6 $\Delta t = 0,6$ мс, начиная с $t = 0$ до $t = 3$ мс. Уровень поверхностей одинаковой амплитуды $2,5\% U_0$, темные и светлые полутона отражают превышение и дефект скорости соответственно.

Теперь рассмотрим пространственные картины развития вторичного высокочастотного возмущения совместно с его влиянием на среднюю скорость ($u' + \Delta U$) в виде изоповерхностей с уровнем амплитуды возмущения для $10\% U_0$; $6\% U_0$;

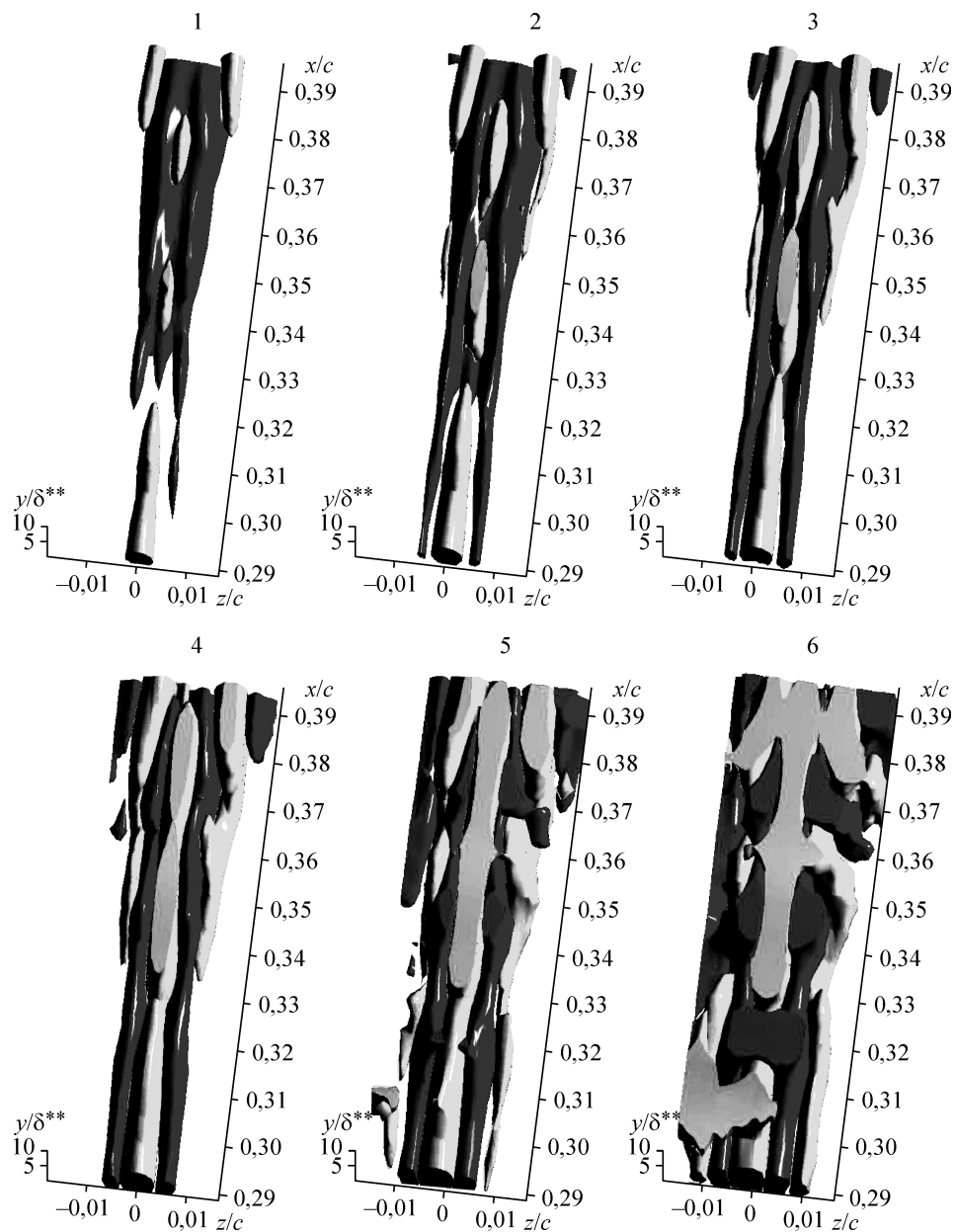


Рис. 9. Пространственные картины развития вторичного высокочастотного возмущения совместно с его влиянием на среднее течение ($u' + \Delta U$) для случая варикозной неустойчивости полосчатой структуры в области неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$) на модели прямого крыла в зависимости от уровня амплитуды отображающей поверхности: (1) 10 %, (2) 6 %, (3) 4 %, (4) 2 %, (5) 0,9 %, (6) 0,4 %, $U_0 = 5,5$ м/с, темные и светлые полутона отражают превышение и дефект скорости соответственно.

4 % U_0 ; 2 % U_0 ; 0,9 % U_0 и 0,4 % U_0 (см. рис. 9) и пространственные картины развития вторичного высокочастотного возмущения (u') в виде изоповерхностей с уровнем амплитуды пульсаций скорости для 3 % U_0 , 2,7 % U_0 , 1,5 % U_0 , 0,9 % U_0 , 0,3 % U_0 и 0,2 % U_0 (рис. 10). Такое представление различных уровней амплитуды

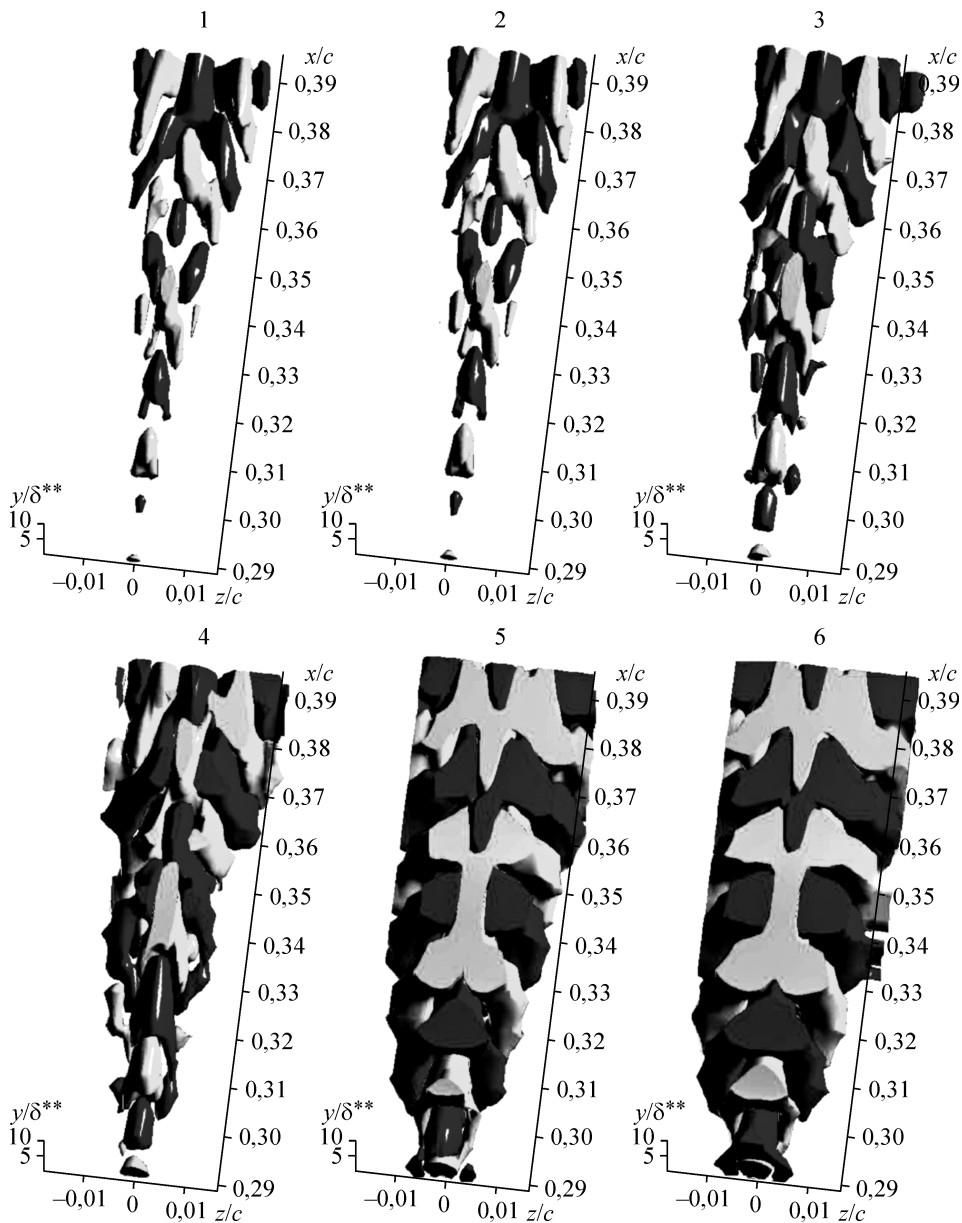


Рис. 10. Пространственные картины развития вторичного высокочастотного возмущения (u') для случая варикозной неустойчивости полосчатой структуры в области неблагоприятного градиента давления ($dp/dx > 0$) на модели прямого крыла в зависимости от уровня амплитуды отображающей поверхности: (1) 3 %, (2) 2,7 %, (3) 1,5 %, (4) 0,9 %, (5) 0,3 %, (6) 0,2 %, $U_0 = 5,5$ м/с, темные и светлые полутона отражают превышение и дефект скорости соответственно.

изоповерхностей, позволяет послойно и детально увидеть внутреннюю структуру возмущенной области течения. Например, при уровне амплитуды изоповерхностей ($u' + \Delta U$) от 2 до 10 % U_0 на рис. 9 можно отчетливо наблюдать полосчатую структуру, ее продольную модуляцию и трансверсальное мультиплицирование, что практически невозможно обнаружить при уровне амплитуды изоповерхности ($u'/U_0 + \Delta U$) = 0,4 % U_0 . Аналогичная картина наблюдается и на рис. 10. При уровне амплитуды изоповерхностей (u') от 0,9 до 3 % U_0 отчетливо видны Λ -структуры и их транс-

версальное мультиплицирование, что практически невозможно обнаружить при уровне амплитуды изоповерхности (u') 0,2 и 0,3 % U_0 .

С другой стороны, при уровне амплитуд изоповерхностей 0,9–3 % U_0 (см. рис. 10) можно наблюдать локализованные вихри продольной модуляции полосчатой структуры на начальном этапе развития возмущения, что типично для варикозной неустойчивости полосчатых структур, и далее вниз по потоку идет процесс появления Λ -вихрей и трансверсального мультиплицирования данных структур. Таким образом, детальные термоанемометрические измерения нелинейной стадии развития варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной элементом шероховатости, на модели прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления показали, что вторичное высокочастотное разрушение полосчатой структуры связано с образованием Λ -структур. Неблагоприятный градиент давления, вызывая бурный рост как интенсивности вторичного высокочастотного возмущения, так и самой полосчатой структуры, приводит к резкому пространственному расплыванию возмущенной области из-за трансверсального мультиплицирования когерентных структур и ускорению турбулизации течения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫВОДЫ

Детальные пространственно-временные термоанемометрические измерения процесса развития варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной элементом шероховатости, в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления позволили получить ответ на вопрос: какова структура течения, какова динамика развития когерентных структур и каков механизм разрушения течения в турбулентное состояние на последних стадиях нелинейного развития возмущений варикозной неустойчивости. Известно [30, 31], что нелинейная стадия варикозной неустойчивости безградиентного течения на плоской пластине приводит к возникновению когерентных структур типа Λ -вихрей. Ранее [33], проведены экспериментальные исследования развития варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной вдувом газа через малое отверстие на поверхности модели, в пограничном слое прямого крыла в областях с нулевым и неблагоприятным градиентом давления. Практически в тех же экспериментальных условиях (модель, ее установка, координаты ввода возмущений и область измерений), за исключением генератора полосчатой структуры и скорости набегающего потока, проведены настоящие исследования. В данном случае полосчатая структура генерирована с помощью элемента шероховатости, как и в работе [30]. Однако в отличие от [30], варикозная неустойчивость полосчатой структуры изучалась в области неблагоприятного градиента давления и на поздних стадиях ее нелинейного развития, как и в работе [33]. Из-за различия в способе генерации полосчатой структуры в данном случае и в [33], где вдувом газа можно было регулировать интенсивность стационарного возмущения (полосчатой структуры), а в нашем случае только изменением скорости набегающего потока она была снижена с 8,3 в [33] до 5,5 м/с. При скорости 8,3 м/с течение быстро турбулизовалось. Сравнение изменений средних характеристик течения в области неблагоприятного градиента давления вниз по потоку, измеренное по максимальным отклонениям скорости $(U_{\max} - U_{\min})/2/U_0$ в возмущенном пространстве (x, y, z), для случая генерации полосчатой структуры вдувом газа [33] и элементом шероховатости показано на рис. 11. Видно, что на начальном участке (до $(x - x_0)/c \approx 0,04$) интенсивность возмущения средней скорости падает в обоих случаях из-за его трансверсального расплывания. Но далее вниз по потоку, она начинает резко расти, достигая, примерно, 30 % U_0 при $(x - x_0) / c = 0,1$ в случае данного эксперимента

Рис. 11. Распределения дефектов средней скорости варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной элементом шероховатости (1) и вдувом газа (2, взято из [33]), в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления.

и более 40 % U_0 при $(x - x_0)/c = 0,09$ в [33]. В последнем случае, при $(x - x_0)/c > 0,09$ можно наблюдать снижение интенсивности возмущения средней скорости. В обоих случаях процесс сугубо нелинейный, хотя в настоящем эксперименте он более слабый, чем в работе [33]. Видно, что наряду с трансверсальным расплыванием возмущенной области, что было продемонстрировано выше и в [33], идет резкий рост влияния неблагоприятного градиента давления на амплитуду деформации среднего течения, особенно в ситуации генерации полосчатой структуры вдувом [33].

В целом, график показывает, что нелинейные процессы вторичного высокочастотного разрушения полосчатой структуры связаны с их влиянием на средние характеристики течения, выражающемся как в перераспределении энергии возмущения в трансверсальном направлении, так и в ее интегральном росте в случае неблагоприятного градиента давления. Так же ведет себя непосредственно вторичное высокочастотное возмущение, по характеру развития которого можно судить о моменте (в пространстве) разрушения полосчатой структуры в турбулентное состояние. На рис. 12 показаны кривые нарастания амплитуды (среднеквадратичные пульсации скорости — u' , измеренные в пространстве xuz) вторичного высокочастотного возмущения вниз по потоку для обоих случаев генерации полосчатой структуры. Видно, что в начале области измерений амплитуда возмущения слегка падает (от 6–7 % U_0 до 4–5 % U_0) в диапазоне $(x - x_0)/c \approx 0 \div 0,04$, однако далее вниз по потоку, она растет достигая примерно 16 % U_0 при $(x - x_0)/c = 0,07$, после чего начинает падать, указывая на переход к турбулентности для случая из [33]. В случае же настоящего исследования, нарастание амплитуды возмущения происходит значительно медленнее и сразу, с начала области измерений. Она достигает величины порядка 10 % U_0 при $(x - x_0)/c = 0,09$, продолжает расти далее, но перехода к турбулентности не наблюдается. Таким образом, при рассмотрении графиков (см. рис. 11, 12) следует сделать вывод о том, что тенденция роста варикозной неустойчивости полосчатых структур, генерированных различным способом, в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления сохранилась. Однако если в случае из работы [33] наблюдается турбулизация течения, то в данном случае она должна наступить значительно позднее

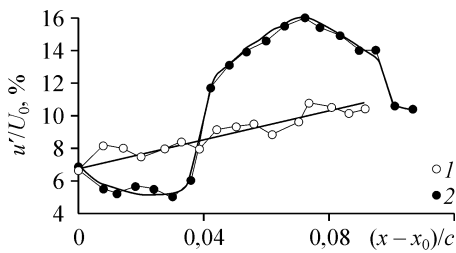
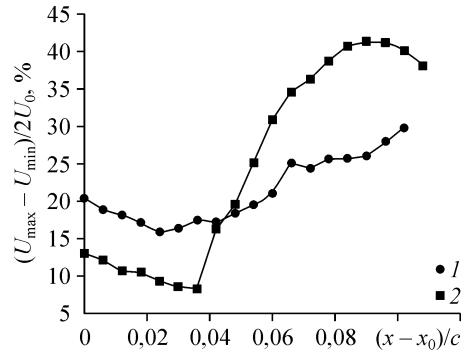


Рис. 12. Распределения среднеквадратичных пульсаций скорости варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной элементом шероховатости (1) и вдувом газа (2, взято из [33]), в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления.

по пространству, вероятно, по причине изначально более слабой нелинейности процесса, либо особенностей развития полосчатой структуры, генерированной шероховатостью, интенсивность которой напрямую зависит от скорости набегающего потока, что требует дополнительных исследований. Тем не менее, пространственно-временная термоанемометрическая визуализация нелинейной стадии варикозной неустойчивости полосчатых структур в области неблагоприятного градиента давления на прямом крыле демонстрирует одну и ту же динамику процесса, связанную с образованием Λ -структур, мультиплицированием этих когерентных образований и полосчатых структур, трансверсальным расплыванием возмущенной области независимо от способа генерации исходных полосчатых структур, что можно наблюдать на рис. 13. На нем представлены, для сравнения, изоповерхности амплитуд пульсаций скорости (u') в пространстве (xuz) для случая генерации полосчатой структуры вдувом газа при нулевом и неблагоприятном градиенте давления (взято из [33]) и результат настоящего исследования. Видно, что угол трансверсального расплывания возмущенной области различен для всех трех случаев. В случае развития возмущения в области с нулевым градиентом давления он составляет примерно 23° , а в области неблагоприятного градиента давления — 40° , что почти в два раза больше (по результатам исследований работы [33]). По результатам настоящих исследований видно, что угол трансверсального расплывания возмущенной области в случае неблагоприятного градиента давления составляет примерно 34° , что, в сравнении с аналогичной ситуацией из работы [33], значительно меньше, и связано это, вероятно, как уже отмечалось выше, с более “мягким” по сравнению с [33] нелинейным процессом из-за сложности

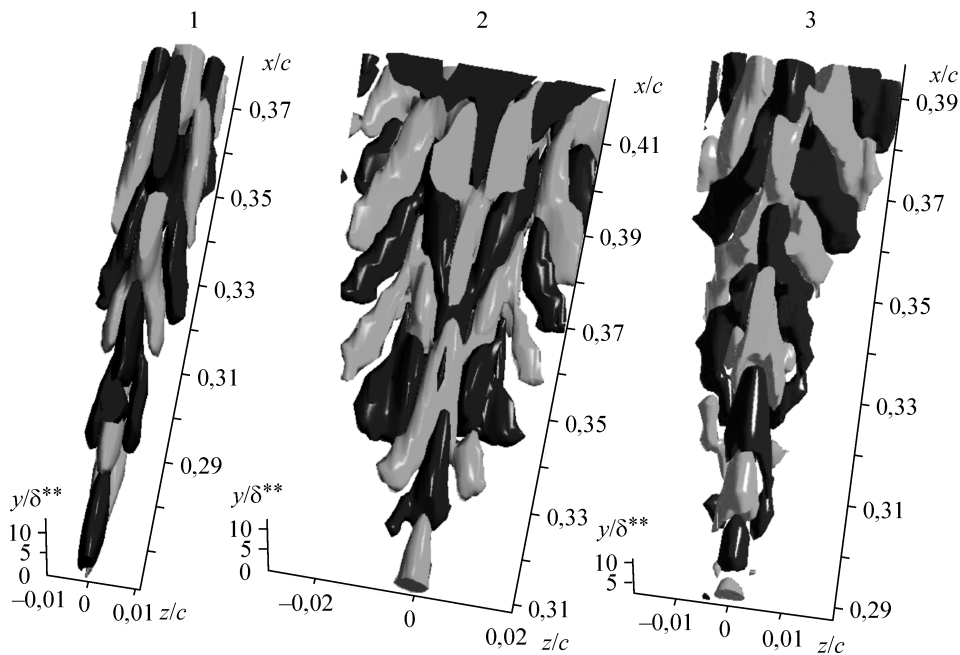


Рис. 13. Сравнение картин пространственно-временной термоанемометрической визуализации (изоповерхности амплитуд пульсаций скорости — u') процесса развития нелинейной варикозной неустойчивости полосчатой структуры, генерированной вдувом газа (1 — $dp/dx = 0$), (2 — $dp/dx > 0$) и элементом шероховатости (3 — $dp/dx > 0$) в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления: 1, 2 — взято из работы [33], 3 — по результатам данной работы. Темные и светлые полутона отражают превышение и дефект скорости соответственно.

с подбором интенсивности генерируемой полосчатой структуры, зависящей от скорости набегающего потока при прочих равных с [33] условиях эксперимента. В целом детальные измерения, позволившие получить пространственно-временные картины течения и контурные диаграммы его структуры, подтверждают вывод о том, что неблагоприятный градиент давления для последних стадий нелинейного развития варикозной неустойчивости приводит к ускорению турбулизации течения по сравнению с ее развитием в области нулевого градиента давления независимо от способа генерации полосчатых структур. На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

– установлено, что механизм нелинейного разрушения полосчатой структуры через процесс развития на ней вторичного возмущения в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления связан с образованием когерентных структур типа Λ -вихрей;

– показано, что вторичная высокочастотная неустойчивость полосчатой структуры варикозного типа на нелинейной стадии развития в пограничном слое прямого крыла в области неблагоприятного градиента давления приводит к мультиплицированию как полосчатых структур, так и Λ -вихрей вниз по потоку;

– установлено, что структурные характеристики течения в процессе развития нелинейной варикозной неустойчивости полосчатой структуры в неблагоприятном градиенте давления в пограничном слое прямого крыла не зависят от способа генерации полосчатой структуры либо вдувом струи газа в пограничный слой, либо с помощью локальной неоднородности течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов Ю.С., Козлов В.В., Левченко В.Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. — Новосибирск: Наука, 1982. — 151 с.
2. 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.
3. Saric, W.S., Kozlov, V.V., Levchenko V.Ya. Forced and unforced subharmonic resonance in boundary layer transition // *AIAA Paper 84-0007*, 1984.
4. Kachanov Y.S. On a universal mechanism of turbulence production in wall shear flows // *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design.* — Vol. 86. Recent Results in Laminar-Turbulent Transition. — Berlin: Springer, 2003, P. 1–12.
5. Boiko A.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Kozlov V.V. The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows // Springer-Verlag, 2002. — P. 1–263.
6. Panton R.L. Overview of the self-sustaining mechanisms of wall turbulence // *Progress in Aerospace Sciences.* — 2001, No. 37. — P. 341–383.
7. Floryan J.M. On the Goertler Instability of Boundary Layers // *Progress in Aerospace Sciences*, 1991. — V. 28. — P. 235–271.
8. Bippes H. Experimentelle Untersuchung des laminar-turbulenten Umschlags an einer parallel angestromten konkaven Wand // *Mathematischnaturwissenschaftliche Klasse. Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte.* — 1972. — No. 3. — P. 103–180. (also NASA-TM-75243, March 1978).
9. Ito A. Breakdown Structure of Longitudinal Vortices along a Concave Wall, *J. Japan Soc. Aero. Space Sci.* — 1985. — Vol. 33. — P. 166–173.
10. Pratt P.R., Chernoray V.G., Bakchinov A.A., Loeffdahl L. A quantitative flow visualization of a point source disturbance in a swept wing boundary layer // *Book of abstracts EUROMECH Colloquium 423 “Boundary Layer Transition in Aerodynamics”, April, 2–4, Stuttgart.* — 2001.
11. Acarlar MS, Smith CR. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part 1 // *J. Fluid Mech.* — 1987. — Vol. 175. — P. 1–41.
12. Haidary HA, Smith CR. The generation and regeneration of single hairpin vortices // *J. Fluid Mech.* — 1994. — Vol. 227. — P. 127–135.
13. Grek G.R., Kozlov V.V., Katasonov M.M., Chernorai V.G. Experimental study of a Λ -structure and its transformation into the turbulent spot // *Current Science.* — 2000. — Vol. 79., No. 6. — P. 781–789.
14. Rist U., Moeller K., Wagner S. Visualization of late-stage transitional structures in numerical data using vortex identification and feature extraction // *In Proc. 8th Int. Sym. Flow Visualization, Sorrento, Italy.* — 1998. — 103 p.

15. **Reuter J., Rempfer D.** A hybrid spectral/finite-difference scheme for the simulation of pipe-flow transition // *Laminar-Turbulent Transition* (ed. H. Fasel & W.S. Saric — Berlin: Springer-Verlag, 2000. — P. 383–390.
16. **Zhou J., Adrian R.J., Balachandar S., Kendal T.M.** Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow // *J. Fluid Mech.* — 1999. — Vol. 387. — P. 353–396.
17. **Adrian R.J., Meinhart C.D., Tomkins C.D.** Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* — 2000. — Vol. 422. — P. 1–23.
18. **Козлов В.В., Грек Г.Р., Лефдаль Л.Л., Чернорай В.Г., Литвиненко М.В.** Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (Обзор) // *ПМТФ.* — 2002. — Т. 43, № 2. — С. 62–76.
19. **Литвиненко М.В., Козлов В.В., Козлов Г.В., Грек Г.Р.** Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // *ПМТФ.* — 2004. — Т. 45, № 3. — С. 50–61.
20. **Li F., Malik M.R.** Fundamental and subharmonic secondary instabilities of Goertler vortices // *J. Fluid Mech.* — 1995. — Vol. 82. — P. 255–290.
21. **Bottaro A., Klingmann B.G.B.** On the linear breakdown of Goertler vortices // *Europ. J. Mech. B/Fluids.* — 1996. — Vol. 15(3). — P. 301–330.
22. **Skote M., Haritonidis J.H., Henningson D.S.** Varicose instabilities in turbulent boundary layers // *Physics of Fluids.* — 2002. — Vol. 4, No. 7. — P. 2309–2323.
23. **Waleffe F.** On a self-sustaining process in shear flows // *Phys. Fluids.* — 1997. — Vol. 9. — P. 883–896.
24. **Kawahara G., Jimenez J., Uhlmann M., Pinelli A.** The instability of streaks in near-wall turbulence // *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs.* — 1998. — P. 155–170.
25. **Schoppa W. and Hussain F.** Genesis and dynamics of coherent structures in near-wall turbulence: A new look // *Computational Mechanics Publication, Southampton UK and Boston USA.* — 1997. — P. 385–422.
26. **Jimenez J. and Moin P.** The minimal flow unit in near-wall turbulence // *J. Fluid Mech.* — 1991. — Vol. 225. — P. 213–226.
27. **J.H. Hamilton, J. Kim, F. Waleffe.** Regeneration of near-wall turbulence structures // *J. Fluid Mech.* — 1995. — Vol. 287. — 317 p.
28. **Brandt, L. and Henningsson, D.S.** Transition of streamwise streaks in zero-pressure-gradient boundary layers // *J. Fluid Mech.* — 2002. — Vol. 472. — P. 229–261.
29. **Robinson S.K.** The kinematics of turbulent boundary layer structure // *NASA TM 103859.* — 1991.
30. **Asai M., Minagawa M., Nishioka M.** The stability and breakdown of near-wall low-speed streak // *J. Fluid Mech.* — 2002, — Vol. 455. — P. 289–314.
31. **Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л., Грек Г.Р., Чун Х.** О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое (Обзор) // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2004. — Т. 11, № 3. — С. 339–364.
32. **Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Лефдаль Л., Чернорай В.Г.** Экспериментальное исследование варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое скользящего крыла // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2004. — Т. 11, № 1. — С. 1–10.
33. **Litvinenko Yu.A., Chernoray V.G., Kozlov V.V., Grek G.R., Loeffdahl L.L., Chun H.H.** Adverse pressure gradient effect on nonlinear varicose instability of a streaky structure in unswept wing boundary layer // *Physics of Fluids.* — 2005. — 17, No. 1. — P. 118106(1)–118106(3).
34. **Peter Corbett and Alessandro Bottaro.** Optimal perturbations for boundary layers subject to stream-wise pressure gradient // *Physics of Fluids.* — 2000. — Vol. 12, No. 1. — P. 120–130.

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2007 г.