

УДК 536.46:532.517.4

УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИЕЙ Λ-СТРУКТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЯТНО С ПОМОЩЬЮ РИБЛЕТ^{*}

**В.Г. ЧЕРНОРАЙ², Ю.А. ЛИТВИНЕНКО¹, В.В. КОЗЛОВ¹, Л. ЛЕФДАЛЬ²,
Г.Р. ГРЕК¹, Х.Х. ЧУН³**

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Чалмерсовский технологический университет, Гетеборг, Швеция*

³*Пусанский национальный университет, Южная Корея*

Приведены результаты экспериментальных исследований по трансформации уединенной Λ-структуры в турбулентное пятно и управлению этим процессом с помощью ребрения (риблеты) обтекаемой поверхности в пограничном слое плоской пластины. Установлено стабилизирующее влияние риблет на процесс преобразования Λ-структуры в турбулентное пятно. Показано, что Λ-структура на гладкой поверхности растягивается в продольном направлении и трансформируется в шпильковый вихрь, который далее вниз по потоку трансформируется в турбулентное пятно. Обнаружено, что интенсивность Λ-структуры на риблетах сначала нарастает, а затем вниз по потоку затухает и становится более чем в два раза меньшей, чем при ее развитии на гладкой поверхности. В конечном итоге, Λ-структура затухает на риблетах, не приводя к образованию турбулентного пятна.

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 являются неизменным атрибутом перехода в более сложных

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (НШ-964.2003.1), РФФИ (грант 05-01-00034), Шведской академии наук, Ведущего центра исследований кораблей корейского фонда науки и техники.

течениях, таких как течения, модулированные продольными полосчатыми структурами типа вихрей Гертлера [5 – 7], вихрей поперечного течения на скользящих крыльях и т. д., а также в вязком подслое турбулентного пограничного слоя. 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 (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 [8, 9].

Изучению механизма возникновения и развития данных структур посвящено много экспериментальных [8, 10 – 13] и численных [14 – 16] исследований. В этих работах показано, что механизм возникновения и воспроизводства 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, полосчатых структур и т. д. Дымовая визуализация процесса преобразования уединенной Λ -структуры в турбулентное пятно в пограничном слое плоской пластины впервые представлена в работе [17]. При уменьшении амплитуды возбуждающего сигнала Λ -структура затухала вниз по потоку. Однако термоанемометрические измерения [13] показали, что при взаимодействии затухающей Λ -структуры с высокочастотной волной из-за неустойчивости трансверсального профиля скорости $\partial U/\partial z$ (в области “ног” Λ -структуры) происходит нарастание интенсивности двух противовращающихся вихрей, выход “головки” Λ -структуры за пределы ламинарного пограничного слоя и трансформации возмущения в турбулентное пятно вниз по потоку. Таким образом, ситуация вторичной высокочастотной неустойчивости многих течений, связанная с их поперечной модуляцией, например, стационарными вихрями Гертлера, вихрями поперечного течения на скользящих крыльях и т. д., типична и для нестационарных продольных структур, таких, например, как полосчатые структуры повышенной степени турбулентности набегающего потока [8], а также и Λ -структур. 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 подобные когерентные структуры и экспериментально, аналитически и численно исследуется их роль в механизме регенерации турбулентных пульсаций. Поняв механизм возникновения, развития и роли таких структур в процессе турбулизации ламинарных течений и воспроизводства турбулентности в вязком подслое турбулентного пограничного слоя, можно исследовать различные методы управления этими процессами. Проведем обзор работ по одному из таких методов управления, а именно, методу пассивного управления течением с помощью ребрения обтекаемой поверхности так называемыми риблетами.

Риблеты являются пассивными устройствами, которые устанавливаются на гладкую поверхность в турбулентном пограничном слое и которые могут снижать сопротивление трения до 10 %. Они представляют собой продольные микророзетки с размерами вязкого подслоя, треугольной или полусферической формы.

Первое практическое применение риблет на корпусах гоночных лодок было сделано мужской командой США по гребле на Олимпийских играх в Лос-Анжелесе в 1984 г. На Олимпийских играх в Сиднее в 2000 г. пловцы, используя плавательные костюмы с риблетами, завоевали много золотых медалей. Летные испытания риблет на Аэробусе А-300 были проведены в 1989 г., что привело к чистому снижению сопротивления порядка 2% при использовании оребрения крыльев и фюзеляжа. Риблеты имели размеры порядка 30–50 $\mu\text{м}$.

Систематическое исследование риблет для снижения турбулентного трения начал Уолш в конце 70-х годов прошлого века в Исследовательском Центре NASA Лэнгли [18 – 21]. Эти исследования показали, что сопротивление трения снижается, когда безразмерный параметр риблет $s^+ = su^*/v \approx 15$. Однако, сопротивление возрастает при $s^+ = 30$. Для максимального снижения сопротивления риблеты должны выстраиваться в направлении локальной скорости вязкого подслоя. Чистое снижение сопротивления трения почти линейно пропорционально величине охвата риблетами всей обтекаемой поверхности. Экспериментальные исследования пристенной турбулентной структуры течения на риблетах проводились многими исследователями как в физических экспериментах [20, 22 – 25], так и численных (DNS) [26 – 28]. Одна из гипотез снижения сопротивления трения в турбулентном пограничном слое с помощью риблет связана с их воздействием на когерентные структуры вязкого подслоя. Оказалось, что риблеты работают как своеобразное препятствие для трансверсальных колебаний продольных вихрей, что приводит к снижению сопротивления трения [29]. В известном смысле, риблеты снижают сопротивление трения в турбулентном пограничном слое за счет изменения последовательности пристенной вихревой динамики пассивным трансверсальным принуждением. Турбулентные пристенные сдвиговые напряжения в пограничном слое создаются за счет движения к стенке высокоскоростной жидкости на финальной стадии регенерационного цикла [30], когда шпильковые вихри вытягиваются в продольном направлении. Растяжение продольных вихрей на риблетах затрудняется, поскольку их трансверсальное движение тормозится риблетами, вследствие этого движение ускоренной жидкости к стенке затрудняется. Численные эксперименты [31] показали, что процесс снижения продольной завихренности ω'_x идет на риблетах.

Таким образом, гипотеза снижения сопротивления трения с помощью риблет в турбулентном пограничном слое за счет их воздействия на когерентные структуры вязкого подслоя находит подтверждение как в численных, так и физических экспериментах. Изменение пристенной структуры течения на риблетах, представленной в работе [32], наблюдалось, в частности, на картинах дымовой визуализации, где видно, что парные вихри (типа шпильковых или Λ -вихрей) становятся короче и трансверсальный размер между ними — шире на риблетах по сравнению с гладкой поверхностью. Другие исследователи также отмечают препятствие риблетами трансверсальных пульсаций скорости в пристенной области пограничного слоя, как первичный механизм снижения турбулентного трения. В работе [33] получено 10% снижение турбулентного трения на риблетах за счет эффекта подавления трансверсальных колебаний между риблетными бороздками. Значительное снижение ω -пульсаций скорости на риблетах наблюдали также в [34].

Когерентные вихревые структуры, как отмечалось выше, существуют в переходных пограничных слоях, и управление их развитием, с целью затягивания перехода к турбулентности с помощью риблет, было впервые проведено в работах [35 – 37]. В физическом эксперименте показано, что риблеты дестабилизируют течение в ламинарном пограничном слое на линейной стадии развития волн Толлмина — Шлихтинга и стабилизируют его на нелинейной стадии, когда возникают

продольные вихревые Λ -структуры [35]. Естественно, размеры риблет для переходного пограничного слоя отличались от риблет, обычно используемых для турбулентного пограничного слоя. Определенным критерием для этого является масштаб толщин вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя и ламинарного пограничного слоя. Если в первом случае высота риблет обычно 30 – 50% от толщины вязкого подслоя, что составляет примерно 20 – 30 $\mu\text{м}$, то в случае ламинарного пограничного слоя порядок соотношения тот же (30 – 50%), но уже относительно его толщины, которая на полтора порядка больше. В тестовых экспериментах [35] была выбрана оптимальная конфигурация риблет и их пространственные размеры, которые составили величину порядка 1000 $\mu\text{м}$. Экспериментальные исследования показали стабилизирующее влияние данных риблет на переход к турбулентности в течениях с когерентными структурами типа Λ -вихрей, Ω -вихрей, полосчатых структур и продольных стационарных вихрей типа вихрей Гертлера. Отмечено, что данное влияние связано, в частности, с подавлением величины трансверсального градиента скорости, т. е. с повышением устойчивости течения относительно развития вторичных высокочастотных возмущений и, следовательно, задержкой турбулизации течений. Для случая воздействия риблет на развитие уединенной Λ -структуры и группы Λ -структур в К-режиме перехода показано, что риблеты задерживают их трансформацию в турбулентные пятна, особенно в последней ситуации. Таким образом, установлено благоприятное влияние риблет на переход к турбулентности на нелинейной стадии классического перехода и в течениях с когерентными структурами.

Цель настоящей работы состоит в более детальном изучении воздействия риблет на развитие Λ -структуры и ее трансформации в турбулентное пятно с применением современной методики сбора, обработки и представления экспериментальной информации. Для этого проведены измерения продольной компоненты средней скорости и пульсаций скорости в пространстве (x, y, z) и в различные моменты времени, что дало возможность получить пространственно-временные картины развития Λ -структуры на гладкой и оребренной поверхности и представить их как в виде термоанемометрической визуализации развития структуры в пространстве и времени (видеофильм), так и в виде контурных диаграмм изолиний равных пульсаций скорости.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проведены в контролируемых условиях в малотурбулентной аэродинамической трубе. Плоская пластина 1 толщиной 30 мм, шириной 900 мм и длиной 2000 мм устанавливалась параллельно в рабочей части трубы (рис. 1).

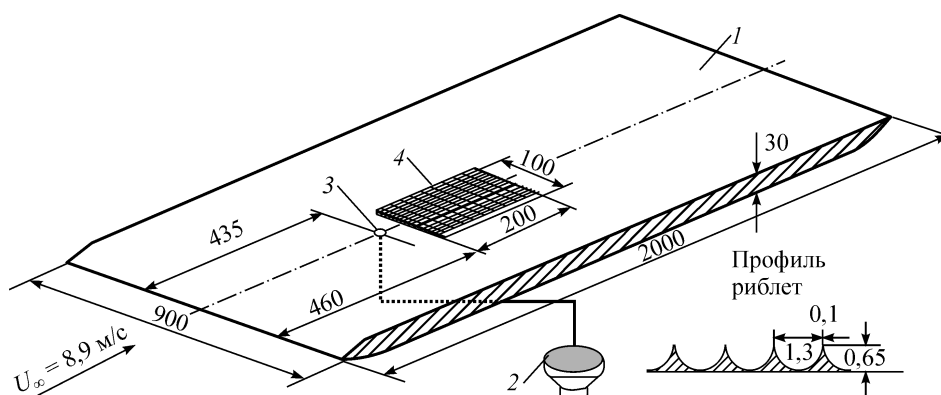


Рис. 1. Экспериментальная установка.

Λ -структура генерировалась с помощью вдува газа динамическим громкоговорителем 2 через отверстие 3 диаметром 3 мм, расположенное в центре пластины на расстоянии $x = 435$ мм от ее носика. На динамический громкоговоритель подавался электрический сигнал, представляющий собой прямоугольные импульсы частотой 4 Гц, которые обеспечивали генерацию локализованных по пространству возмущений. С целью более надежной стабилизации сигнала при его осреднении по ансамблю, а также обеспечения контролируемого вторичного возмущения, ведущего к развалу Λ -структуры в турбулентное пятно, прямоугольные импульсы модулировались вторичным высокочастотным возмущением малой амплитуды частотой 240 Гц (рис. 2).

В условиях отсутствия модуляции не удавалось избавиться от фоновых шумов на последних стадиях преобразования Λ -структуры в турбулентное пятно. Вначале уровень выделения полезного, контролируемого сигнала из фонового шума не превышал 0,01–0,02% от скорости набегающего потока, однако вниз по течению нарастал и достигал уже 1%, влияние шума на Λ -структуру и, тем более, на турбулентное пятно было незначительным. Λ -вихрь генерировался искусственно в контролируемых условиях с сохранением фазовой информации. Фоновый шум всегда присутствует, и для выделения когерентной составляющей сигнала обычно используется операция осреднения по ансамблю с целью выделения слабых по интенсивности контролируемых сигналов. В описываемом случае уровень амплитуды генерированной Λ -структуры более чем на два порядка превышал внешний шум. Его влияние было незначительным и не могло исказить параметры и структуру Λ -вихря. Что касается турбулентного пятна, то при осреднении по ансамблю оно представляет собой образование, состоящее из группы когерентных областей. Турбулентное пятно достаточно консервативно, на него очень сложно повлиять, особенно таким незначительным уровнем фонового шума.

Риблетный вкладыш 4 устанавливался на расстоянии 25 мм от точки ввода возмущений и представлял собой прямоугольник размерами 200×100 мм, впадины риблет которого совпадали с поверхностью плоской пластины, т. е. подложка риблетного вкладыша в эксперименте была утоплена (см. рис. 1). Профиль риблет показан на рис. 1, высота $h = 0,65$ мм, поперечный размер $s = 1,3$ мм, ширина пика выступа 0,1 мм. Безразмерный параметр риблет $s^+ = su^*/\nu$, где $u^* = (\nu |\partial u/\partial y|_{y=0})^{1/2}$ — скорость ламинарного трения и $|\partial u/\partial y|_{y=0} = 0,332U_\infty/\delta$ — градиент средней скорости на стенке, где $\delta \sim (\nu X/U_\infty)^{1/2}$. В диапазоне исследуемых чисел Рейнольдса $Re_x = 2,82 \div 3,77 \times 10^5$ безразмерный трансверсальный параметр s^+ , нормализованный на внутренние переменные (ν, u^*) , составил $19 \geq s^+ \geq 18$, что достаточно близко к аналогичному параметру из работы [35] $26 \geq s^+ \geq 21$ и приближается к оптимальному параметру риблет для турбулентного пограничного слоя из работы [18] $s^+ = 15$. Скорость потока составляла $U_\infty = 8,9$ м/с, уровень турбулентности не превышал 0,04 % U_∞ . Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости U и пульсации скорости u' . Датчик с проволочкой из золотого 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

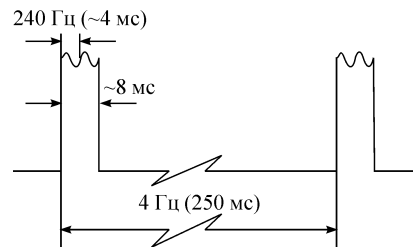
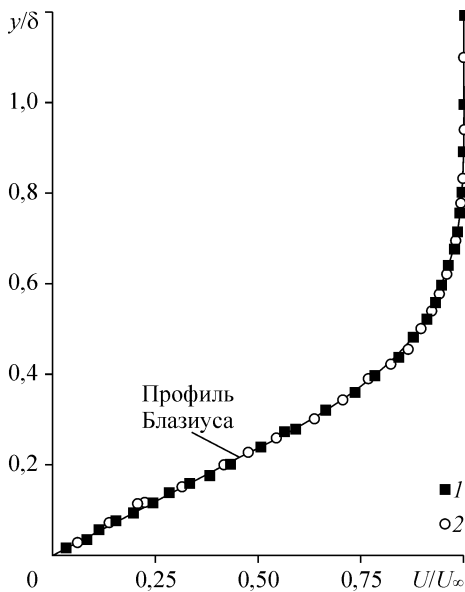


Рис. 2. Электрический сигнал для генерации локализованного возмущения.

свободную конвекцию на стенке при малых скоростях потока. Максимальная ошибка при калибровке датчика не превышала 1% от U_∞ . 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 которого датчик автоматически перемещался 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 равных пульсаций скорости в плоскости xz , а также в виде пространственных (x, y, z) поверхностей равных уровней пульсаций скорости. Начало координат x всех измерений указано от позиции источника возмущений (от отверстия диаметром 3 мм, расположенном на $x=435$ мм).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования структуры течения в пограничном слое без введения возмущений на гладкой и оребренной поверхности плоской пластины показали, что течение ламинарное с профилем скорости, близким профилю скорости Блазиуса (рис. 3). На рис. 4 представлена структура генерируемого возмущения в изолиниях равных пульсаций скорости в точке начала измерений ($x = 40$ мм) на гладкой и оребренной поверхностях плоской пластины при $z = 0$ мм. Видно, что в обоих случаях структура возмущения практически осталась неизменной. С одной стороны, на начальном этапе развития возмущения риблеты не оказали заметного влияния на его структуру, а с другой стороны, соблюдена идентичность начальных условий эксперимента. Зависимость интенсивности возмущения при его развитии на гладкой и оребренной поверхностях от продольной координаты (x) представлена на рис. 5. Видно, что при одинаковой начальной амплитуде возмущений (19% U_∞ при $x = 40$ мм) на гладкой поверхности можно наблюдать резкое ее нарастание (до 47% U_∞ при $x = 200$ мм) и далее вниз по потоку турбулентный развал структуры, на риблетах же наоборот, первоначальный рост амплитуды прекращается (при 31% U_∞ на $x = 140$ мм), и она начинает падать с той же интенсивностью, что и нарастала, пока не достигнет исходной величины в конце риблетной поверхности (19% U_∞ при $x = 210$ мм). Таким образом, риблеты способствовали снижению интенсивности исходного возмущения более чем в два раза и этим стабилизировали течение (см. рис. 5).



Рассмотрим теперь динамику развития локализованного возмущения на гладкой и оребренной поверхностях в виде изоповерхностей равного уровня пульсаций скорости (5% U_∞ — гладкая поверхность и 2,5% U_∞ — риблеты) в пространстве (x, y, z).

Результаты измерений для различных позиций вниз по потоку представлены на рис. 6, 7. На рис. 6 показано

Рис. 3. Распределение $U = f(y)$ на гладкой (1) и оребренной (2) поверхностях плоской пластины без возмущений, $x = 40$ мм, $U_\infty = 8,9$ м/с.

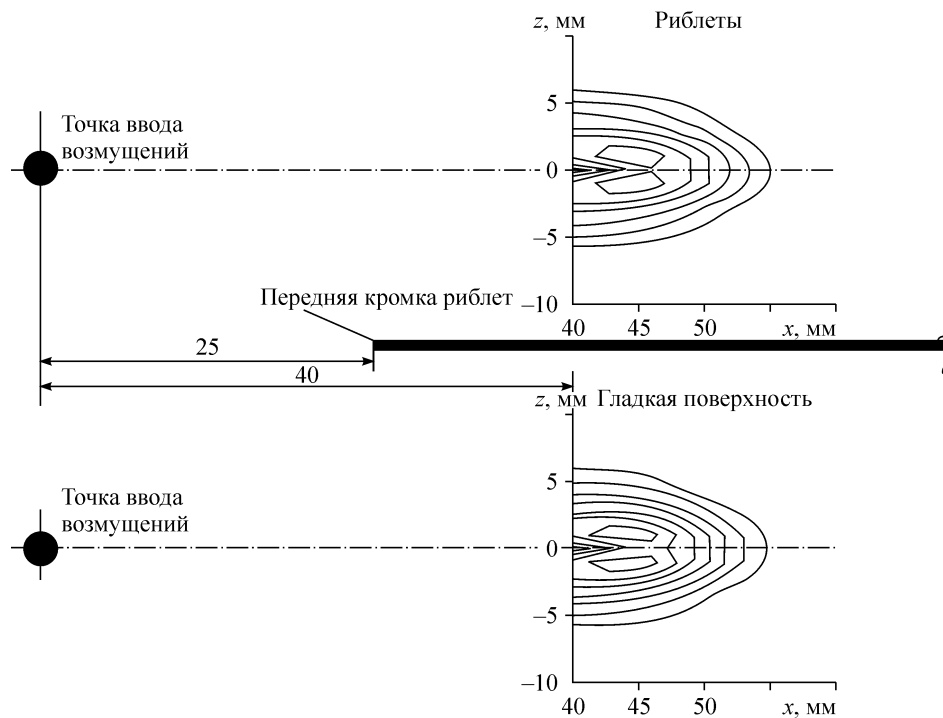
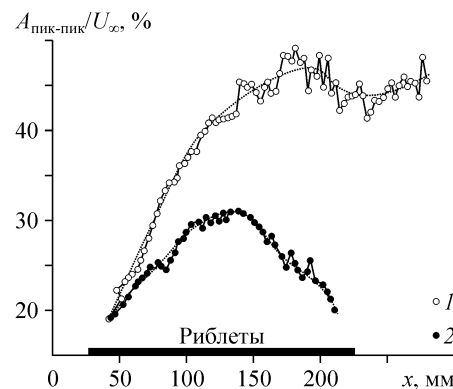


Рис. 4. Контурные диаграммы изолиний равных пульсаций скорости для возмущения, генерированного на гладкой и оребренной поверхностях, $U_\infty = 8,9$ м/с.

сравнение структуры возмущения в начале и конце его развития вниз по потоку. Отчетливо видно, что генерируемая вначале, при $x = 75$ мм, Λ -структура трансформировалась вниз по потоку в сложное образование, состоящее из целого ряда когерентных структур при $x = 180$ мм. Обычно так выглядит осредненное по ансамблю турбулентное пятно, тем более, что турбулентные пульсации скорости зафиксированы на осциллограммах сигнала в этой области измерений, что дает основание утверждать, что Λ -структура при своем движении вниз по потоку трансформировалась в турбулентное пятно. При более детальном рассмотрении картины эволюции локализованного возмущения вниз по потоку на различных координатах x как на гладкой, так и на оребренной поверхностях (см. рис. 7) следует отметить, что при $x = 40$ мм структура возмущения в обоих случаях остается без изменений. Однако по мере движения вниз по потоку Λ -структура на гладкой поверхности трансформируется в более сложную с множеством областей дефекта и превышением скорости, постепенным увеличением ее трансверсального и продольного масштабов, т. е. Λ -структура постепенно преобразуется в уединенное турбулентное пятно при $x = 175, 180$ мм.

Следует также отметить продольное растяжение Λ -структуры ($x = 75, 125$ мм), что типично для трансформации

Рис. 5. Кривые нарастания интенсивности возмущения на гладкой (1) и оребренной (2) поверхностях плоской пластины вниз по потоку, $U_0 = 8,9$ м/с.



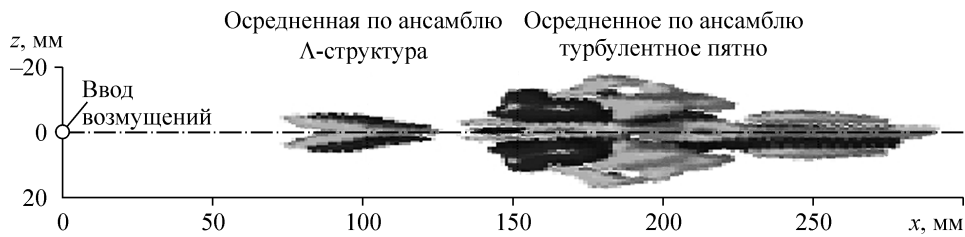


Рис. 6. Эволюция Λ -структуры вниз по потоку на гладкой поверхности, $U_0 = 8,9$ м/с.

Λ -вихря, в так называемый шпильковый вихрь (hairpin vortex) в сдвиговом течении вниз по потоку. В противоположность этому процессу структура Λ -вихря на риблетах при движении вниз по потоку меняется слабо. Трансверсальный и продольный масштабы изменяются незначительно и, в конечном итоге (см. рис. 7, *b* при $x = 180$ мм), видно, что Λ -структура практически не может трансформироваться в турбулентное пятно в данной ситуации. На рис. 8 показаны контурные диаграммы изолиний равных пульсаций скорости развития Λ -структуры вниз по потоку на гладкой и оребренной поверхностях.

Как и в предыдущем случае, для сравнения структуры течения на риблетах и гладкой поверхности диаграммы для различных позиций по x представлены совместно. Как видно, структура возмущения в обоих случаях представляет собой

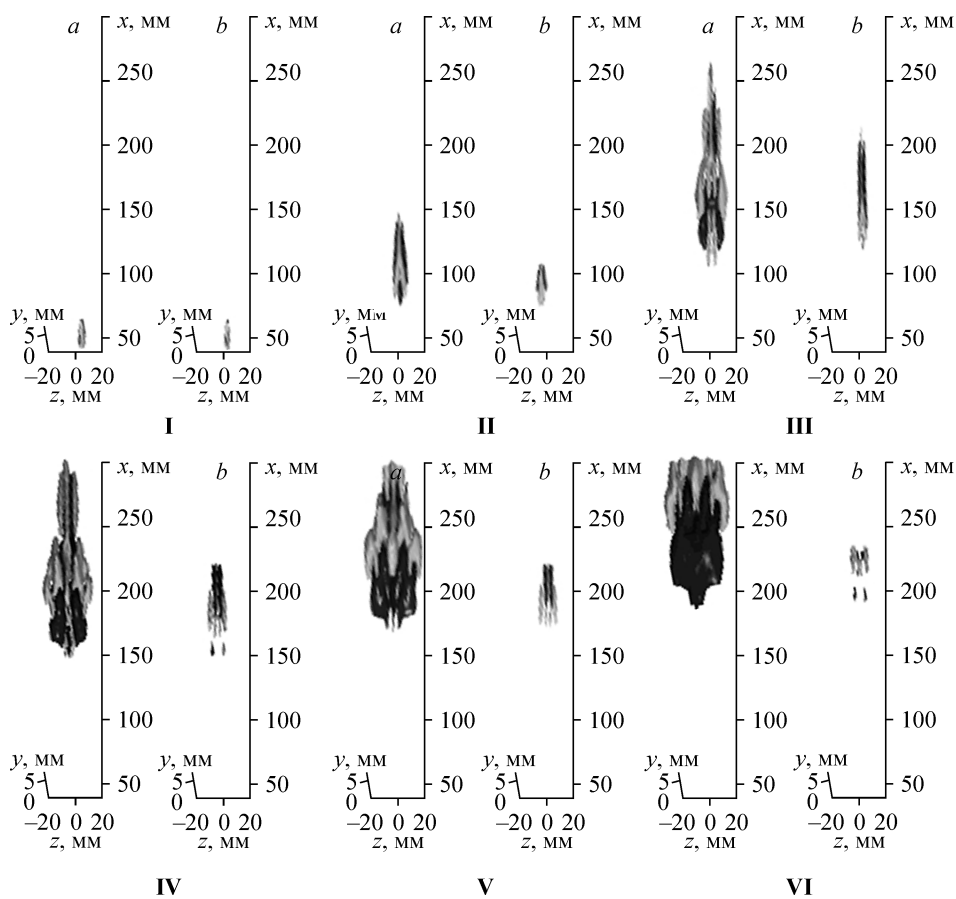


Рис. 7. Термоанемометрическая визуализация развития Λ -структуры на гладкой (*a*) и оребренной (*b*) поверхностях плоской пластины на различных расстояниях вниз по потоку: $x = 40$ мм (I), $x = 75$ мм (II), $x = 125$ мм (III), $x = 150$ мм (IV), $x = 175$ мм (V), $x = 180$ мм (VI), уровень амплитуды изоповерхностей $0,75\% U_0$, $U_0 = 8,9$ м/с.

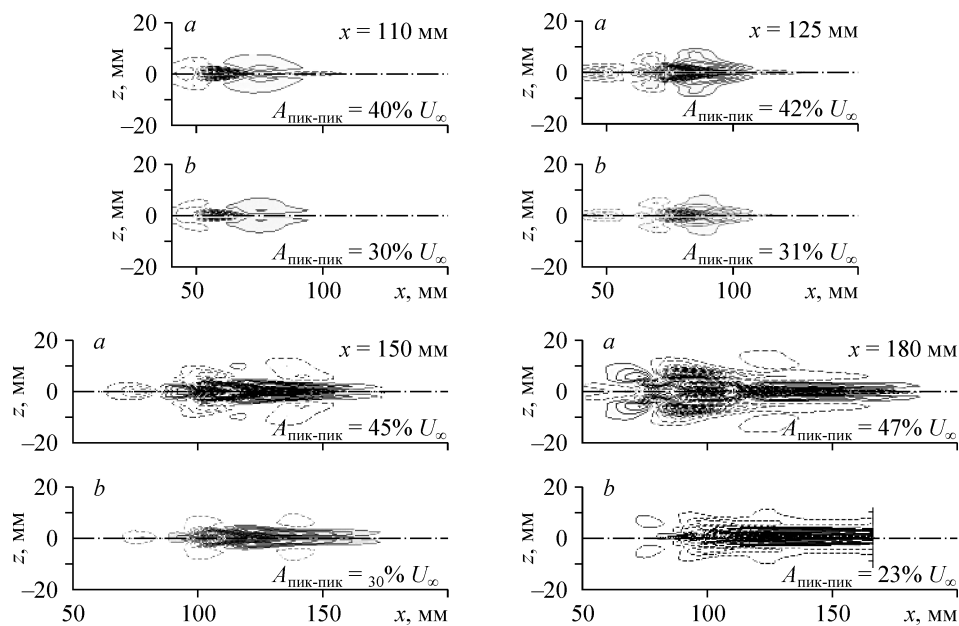


Рис. 8. Контурные диаграммы изолиний равных пульсаций скорости развития Λ -структуры на гладкой (a) и оребренной (b) поверхностях плоской пластины вниз по потоку при $y = 1,5$ мм, $U_0 = 8,9$ м/с.

замкнутые области превышения и дефекта скорости, расположенные строго симметрично относительно плоскости ее симметрии. Характерные особенности развития Λ -структуры на гладкой и оребренной поверхностях, представленные картинами поверхностей равных уровней пульсаций скорости в пространстве xz , можно наблюдать и в данной ситуации. В дополнение следует отметить наличие наклонных волн, генерируемых как Λ -структурой, так и турбулентным пятном, что на диаграммах отражено наличие областей превышения и дефекта скорости по обе стороны на периферии основных структур. В целом, результаты измерений показали, что риблеты являются эффективным способом управления развитием Λ -структуры и ее трансформацией в турбулентное пятно. На более высоком уровне исследований (компьютерные сбор, обработка и пространственно-временное представление экспериментальной информации) был подтвержден вывод работы [35] о стабилизирующем влиянии риблет на развитие нестационарных вихревых образований типа Λ -вихрей. Получены количественные данные о механизме подавления процесса преобразования Λ -структуры в турбулентное пятно на риблетах. Таким образом, гипотеза о стабилизирующем влиянии риблет на развитие когерентных структур вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя еще раз подтверждена экспериментальными исследованиями по управлению развитием когерентной структурой ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя с помощью оребрения поверхности.

4. ВЫВОДЫ

Показано, что Λ -структура трансформируется в турбулентное пятно вниз по потоку на гладкой поверхности плоской пластины за счет мультиплицирования этих структур.

Установлено, что риблеты предотвращают трансформацию Λ -структуры в турбулентное пятно и приводят к затуханию данного возмущения. Показано, что интенсивность Λ -структуры на риблетах сначала нарастает, а затем затухает

и становится на исследуемом участке более чем в два раза меньшей, чем при ее развитии на гладкой поверхности.

Показано, что Λ -структура на гладкой поверхности растягивается и трансформируется в шпильковый вихрь. Установлено, что в обоих случаях уединенные Λ -структура и турбулентное пятно генерируют на периферии наклонные волны.

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. — 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. — P. 1–15.
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-Verlag, 2003. — P. 1–12.
5. Floryan J.M. On the Goertler Instability of Boundary Layers, Technical Report of National Aerospace Laboratory, TR-1120, 1991. — P. 1–45.
6. Bippes H. Experimentelle Untersuchung des laminar-turbulenten Umschlags an einer parallel angestromten konkaven Wand, Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, 103-180, Jahrgang 1972, 3 Abhandlung, (also NASA-TM-72243, March 1978).
7. Ito A. Breakdown Structure of Longitudinal Vortices along a Concave Wall // *J. Japan Soc. Aero. Space Sci.* — 1985. — Vol. 33. — P. 166–173.
8. Boiko A.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Kozlov V.V. The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows. — Berlin et al.: Springer-Verlag, 2002. — P. 1–263.
9. 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 // *Boundary Layer Transition in Aerodynamics*. Book of abstracts EUROMECH Colloquium 423. April, 2-4, Stuttgart. — 2001.
10. Panton R.L. Overview of the self-sustaining mechanisms of wall turbulence // *Progress in Aerospace Sciences*. — 2001. — No. 37. — P. 341–383.
11. Acarlar MS, Smith CR. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Pt 1 // *J. Fluid Mech.* — 1987. — Vol. 175. — P. 1–41.
12. Haidary H.A, Smith C.R. 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 sci.* — 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.* — No. 103.
15. Reuter J., Rempfer D. A hybrid spectral/finite-difference scheme for the simulation of pipe-flow transition. In *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. Grek, G.R., Kozlov, V.V. & Ramasanov, M.P. Receptivity and stability of the boundary layer at a high turbulence level // *IUTAM Symposium, Toulouse, (Eds. D. Arnal & R. Michel).* — Springer, Berlin, Heidelberg, 1989. — P. 511–522,
18. Walsh M.J. Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets / *Viscose Drag Reduction* (Ed. G.R. Hough), Washington, DC // AIAA. — 1980. — P. 168–184.
19. Walsh M.J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets // AIAA Pap. 82-0169. — 1982.
20. Walsh M.J. Riblets // *Viscose Drag Reduction in Boundary Layers, Progress in Astronautics and Aeronautics* / Ed. Bushnell, J. Hefner, 1990. — P. 123.
21. Walsh M.J., Lindeman A.M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. // AIAA Pap. 84-0347. — 1984.
22. Coustols E., Savill M. 1992. Turbulent skin-friction drag reduction by active and passive means Parts 1, 2. AGARD. Special Course on Skin Friction Prog. Reduction, Report 768 (VKI Lecture Series Notes, 1992) 8–1.
23. Tardu S.F. Coherent structure and riblets // *Appl. Sci. Res.* — 1995. — No. 54. — P. 349–385.

24. **Coustols E.** Riblets: main known and unknown features // Emerging Techniques in Drag Reduction, ed. K.S. Choi, K.K. Prasad, T.V. Truong. — London: MEP, 1996. — P. 3–43.
25. **Choi K.S.** Turbulent drag reduction strategies // In Emerging Techniques in Drag Reduction, ed. K.S. Choi, K.K. Prasad, T.V. Truong. — London: MEP, 1996. — P. 77–98.
26. **Chu D.C., Karniadakis G.E.** The direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces // J. Fluid Mech. — 1993. — Vol. 250. — P. 1–42.
27. **Choi H., Moin P., Kim J.** Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets // J. Fluid Mech. — 1993. — Vol. 255. — P. 503–539.
28. **Goldstein D., Handler R.A., Sirovich L.** Direct numerical simulation of turbulent flow over a modeled riblet covered surface // J. Fluid Mech. — 1995. — Vol. 302. — P. 333–376.
29. **Choi K.S.** On physical mechanisms of turbulent drag reduction using riblets // Transport Phenomena in Turbulent Flows / Eds. M. Hirata, N. Kasagi. — New-York: Hemisphere, 1987. — P. 185–198.
30. **Choi K.S.** Near-wall structure of turbulent boundary layer with riblets // J. Fluid Mech. — 1989. — Vol. 208. — P. 417–458.
31. **Crawford C.H.** Direct numerical simulation of near-wall turbulence: passive and active control // PhD thesis. Princeton Univ. — New Jersey, USA, 1996.
32. **Karniadakis G.E., Kwing-So Choi.** Mechanism on transverse motions in turbulent wall flows. // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2003. — Vol. 35. — P. 45–62.
33. **Berhert D.W., Bruse M., Hage W., van der Hoeven J.G.T., Hoppe G.** Experiments on drag reduction surfaces and their optimization with an adjustable geometry // J. Fluid Mech. — 1997. — Vol. 338. — P. 59–87.
34. **Suzuki Y., Kasagi N.** Turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface // AIAA J. — 1994. — Vol. 32. — P. 1781–1790.
35. **Grek, G.R., Kozlov, V.V. & Titarenko, S.V.** An experimental study on the influence of riblets on transition // J. Fluid Mech. — 1996. — Vol. 315. — P. 31–49.
36. **Grek, G.R., Kozlov, V.V., Titarenko, S.V.** Effects of riblets on vortex development in the wake behind a single roughness element in the laminar boundary layer on a flat plate // La Recherche Aerospaciale. — 1996. — No. 1. — P. 1–9.
37. **Grek, G.R., Kozlov, V.V., Klingmann, B.G.B., Titarenko, S.V.** The influence of riblets on a boundary layer with embedded streamwise vortices // Phys. Fluids. — 1995. — Vol. 7, No. 10. — P. 2504–2506.

Статья поступила в редакцию 21 июля 2005 г.