

УДК 536.46:532.517.4

ВЛИЯНИЕ РИБЛЕТ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ*

²В.Г. ЧЕРНОРАЙ, ¹В.В. КОЗЛОВ, ²Л.Л. ЛЕФДАЛЬ, ¹Г.Р. ГРЕК, ³Х.Х. ЧУН

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*

Представлены результаты экспериментальных исследований нелинейной стадии синусоидальной и варикозной неустойчивости полосчатой структуры, приводящей к мультипликации полосчатых структур и возникновению на них когерентных образований типа Λ -структур. Риблеты подавляют интенсивность полосчатых структур, стабилизируя течение относительно развития их вторичной высокочастотной неустойчивости, и, по этой причине, затягивают турбулизацию течения по пространству. Результаты исследований могут быть полезны как для понимания структуры течений в данных ситуациях, так и для возможности управления развитием когерентных структур с целью стабилизации течения.

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 и теоретически и экспериментально, то нелинейная стадия, а особенно ее последние этапы, изучена 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, 3]. К особенностям возникновения и развития этих структур следует отнести тот факт, что они типичны не только для классического ламинарно-турбулентного перехода, но и наблюдаются также в процессе развития более сложных течений, таких как течения, модулированные продольными полосчатыми структурами типа вихрей Гертлера [4], вихрей поперечного течения на скользящих крыльях [1] и т. д., а также в вязком подслое турбулентного пограничного слоя [5, 6]. 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. п. вихрей. Именно динамика развития этих структур вниз по потоку

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (НШ-964.2003.1) и РФФИ (грант 05-01-00034).

приводит, во многих случаях, к переходу к турбулентности или к ее воспроизводству в вязком подслое турбулентного пограничного слоя. Также 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.

Высокочастотную вторичную неустойчивость переходных и турбулентных пристенных течений при наличии в них полосчатых структур часто связывают с так называемой синусоидальной и варикозной неустойчивостями. Вторичные механизмы продуцируют различные типы вторичных движений: либо в виде периодического меандрирования вихрей в поперечном направлении, либо в форме подковообразных жгутов в области сильного поперечного сдвига [7]. Такие возмущения называют синусоидальной и варикозной модами соответственно. В качестве причины неустойчивости выступает невязкий локальный механизм, обусловленный перегибами в мгновенных профилях скорости как в нормальном (варикозная мода), так и трансверсальном (синусоидальная мода) направлениях. Можно полагать, что оба типа неустойчивостей являются важными механизмами возникновения турбулентности и ее воспроизводства в турбулентном пограничном слое [8 – 10]. Синусоидальная и варикозная моды неустойчивости в контролируемых условиях на линейной и начальных стадиях нелинейного развития были исследованы в работе [11] и более детально, на поздних стадиях нелинейного развития, в работе [12]. Цель настоящей работы — исследование возможности управления нелинейной стадией развития синусоидальной и варикозной неустойчивостей с помощью модификации обтекаемой поверхности риблетами.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проведены в контролируемых условиях в малотурбулентной аэродинамической трубе на плоской пластине (рис. 1). Полосчатая структура генерировалась с помощью цилиндрического элемента шероховатости высотой 1,1 мм и диаметром 5,8 мм, установленного в центре пластины на расстоянии $x_0 = 438$ мм от ее носика. Скорость потока $U_0 = 7,8$ м/с. В отсутствие элемента шероховатости ламинарный пограничный слой развивался без каких-либо волн, и профиль скорости приближался к профилю Блазиуса. Высота элемента шероховатости $h = 1,1$ мм близка к толщине вытеснения ламинарного пограничного слоя Блазиуса $\delta_B^* \approx 1,5$ мм при $x - x_0$ и $U_0 = 7,8$ м/с. Число Рейнольдса $Re^* \approx \delta_B^* \cdot U_0 / \nu = 780$ при $x = x_0$. Без искусственных возмущений пограничный слой с полосчатой структурой оставался ламинарным в измеряемой области $x - x_0 = 30 - 150$ мм. Это позволило управлять неустойчивостью полосчатой структуры с помощью искусственных возмущений, генерируемых вдувом–отсосом газа через три отверстия малого диаметра на поверхности пластины, как и в работах [11, 12]. Возбуждаемая частота вторичного высокочастотного возмущения составляла 150 Гц, что примерно соответствовало безразмерному частотному параметру $2\pi f\nu/U_0^2 \times 10^6 = 232$. Амплитуда вторичного возмущения доходила до 10 % от U_0 вблизи источника ($x - x_0 = 30$ мм), что позволяло исследовать нелинейную стадию процесса. Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости U и пульсации скорости u_{rms} в пространстве x, y, z .

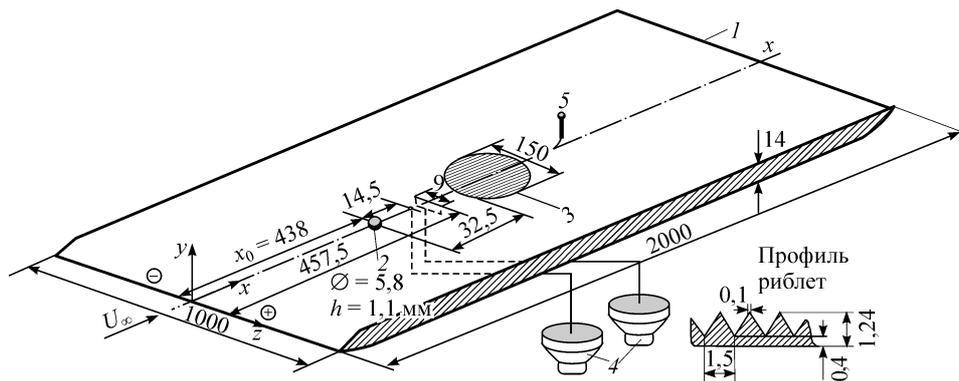


Рис. 1. Экспериментальная установка.

1 — плоская пластина, 2 — элемент шероховатости, 3 — риблеты, 4 — динамические громкоговорители, 5 — датчик термоанемометра.

2. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ НА НЕЛИНЕЙНОЙ СТАДИИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ И ВАРИКОЗНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПОЛОСЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

На рис. 2 представлены синусоидальные разрушения полосчатой структуры. Пространственная картина развития возмущения (рис. 2, а) показывает, что на его начальном участке наблюдается меандрирование полосчатой структуры

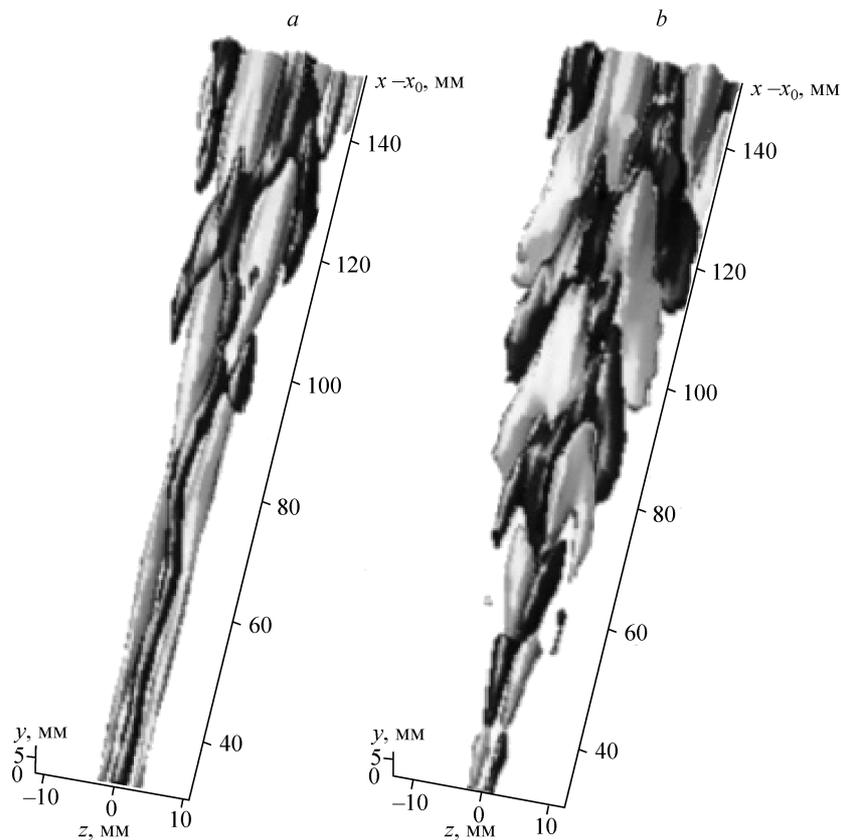


Рис. 2. Пространственные картины синусоидального разрушения полосчатой структуры.

Влияние риблет: на средние характеристики течения (уровни амплитуды $U = \pm 5\% U_0$, а), на пульсационные характеристики течения (уровни амплитуды $u' = \pm 2\% U_0$, б); полутона темные — превышение скорости, светлые — дефекты скорости.

в трансверсальном направлении, что типично для развития синусоидальной неустойчивости. Однако вниз по потоку структура возмущенной области трансформируется в характерные когерентные структуры, напоминающие Λ -вихри. Процесс развития вторичных возмущений можно наблюдать на рис. 2, *b*. На начальном этапе развития этого возмущения можно наблюдать пару квазипродольных вихрей чередующегося знака, которые вниз по потоку трансформируются в Λ -структуры. Таким образом, детальные термоанемометрические измерения нелинейной стадии развития синусоидальной неустойчивости показали, что вторичное высокочастотное разрушение полосчатой структуры связано с образованием Λ -структур, разрушение которых вниз по потоку приводит к турбулизации течения.

На рис. 3 представлено варикозное разрушение полосчатой структуры. Пространственная картина развития возмущения (см. рис. 3, *a*) показывает, что на начальном участке наблюдается продольная модуляция полосчатой структуры частотой вторичного возмущения ($f = 150$ Гц), что типично для развития варикозной неустойчивости. Однако вниз по потоку структура возмущенной области трансформируется в характерные когерентные структуры, напоминающие Λ -вихри, как и в случае синусоидального разрушения полосчатой структуры. Следует заметить, что в отличие от предыдущего случая Λ -структуры асимметричны, т. е. второй противорвращающийся вихрь находится на стадии формирования из-за слабой завихренности на трансверсальных границах поля возмущения. Ниже, при рассмотрении

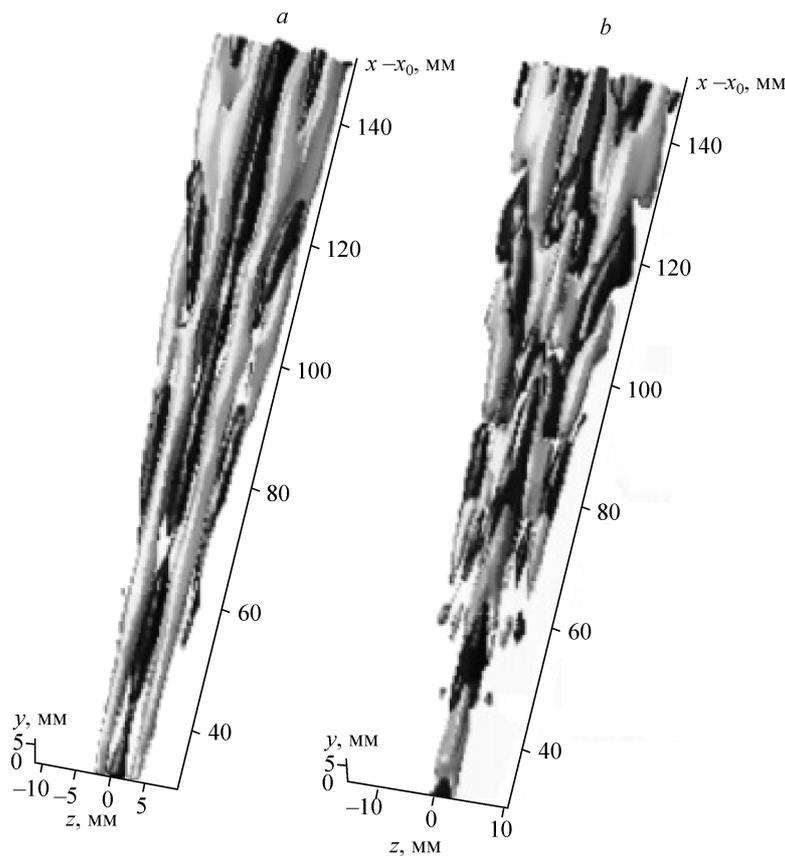


Рис. 3. Пространственные картины варикозного разрушения полосчатой структуры.

Влияние рибблет: на средние характеристики течения (уровни амплитуды $U = \pm 3\% U_0$, *a*), на пульсационные характеристики течения (уровни амплитуды $u' = \pm 1,5\% U_0$, *b*); полутона темные — превышение скорости, светлые — дефекты скорости.

развития непосредственно высокочастотного возмущения, мы будем наблюдать симметричные Λ -структуры. Рассмотрим динамику развития непосредственно вторичного высокочастотного возмущения, генерированного на полосчатой структуре. Процесс развития вторичных возмущений показан на рис. 3, *b*. На начальном этапе развития возмущения наблюдается череда квазипродольных вихрей, которые вниз по потоку трансформируются в шпильковые вихри или Λ -структуры. Эти вихри отчетливо наблюдаются при $z = 0$ мм в виде пары структур переменного знака на каждом периоде вторичного возмущения. При $z = \pm 5$ мм, трансверсальные границы возмущенной области, Λ -структуры или шпильковые вихри становятся асимметричными, тем не менее структура второго противобращающегося вихря данных когерентных образований явно наблюдается. Исследования варикозной неустойчивости уединенной полосчатой структуры в пограничном слое скользящего крыла [13] показали, что Λ -вихри трансформируются в асимметричные структуры из-за поперечного течения.

Таким образом, детальные термоанемометрические измерения нелинейной стадии развития варикозной неустойчивости показали, что вторичное высокочастотное разрушение полосчатой структуры связано с образованием Λ -структур, как и в случае синусоидального разрушения полосчатой структуры. Вторичная неустойчивость полосчатой структуры синусоидального и варикозного типов на нелинейной стадии приводят к мультиплицированию новых полосчатых структур вниз по потоку, и Λ -вихри множатся в трансверсальном направлении при эволюции возмущения вниз по потоку. Этот результат важен для понимания и механизма турбулизации течений, модулированных полосчатыми структурами, и механизмов воспроизводства турбулентности в турбулентных течениях, в которых динамика когерентных структур вязкого подслоя играет кардинальную роль.

3. УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СТАДИЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОЙ И ВАРИКОЗНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПОЛОСЧАТОЙ СТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ РИБЛЕТ

Рассмотрим возможность управления данной неустойчивостью. С этой целью проведены экспериментальные исследования по управлению нелинейной стадией развития варикозной и синусоидальной неустойчивостей с помощью ребрения поверхности. Стабилизирующее влияние риблет на переход отмечалось в работе [14]. В настоящем случае использовались риблеты (см. рис. 1) из предыдущих работ [15, 16], которые показали стабилизирующее влияние на переход к турбулентности в течении, модулированном продольными вихрями типа вихрей Гертлера [15] и на Λ -структуры нелинейной стадии классического перехода при низком уровне внешней турбулентности [16]. Профиль используемых риблет треугольный, высота выступа (или глубина канавки) $h = 1,2$ мм, поперечный размер (или шаг выступов) $s = 1,5$ 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 $|\partial u / \partial y|_{y=0} = 0,332 U_\infty / \delta$ — градиент средней скорости на стенке, здесь $\delta \sim (\nu X / U)^{1/2}$. В диапазоне исследуемых чисел Рейнольдса $Re_x = 2,63 \div 3,25 \times 10^5$ безразмерный трансверсальный параметр s^+ , нормализованный на внутренние переменные (ν, u^*), составил $20 \geq s^+ \geq 18$, что достаточно близко к аналогичному параметру из работы [16] $26 \geq s^+ \geq 21$ и приближается к оптимальному параметру риблет для турбулентного пограничного слоя из работы [17] $s^+ \approx 15$. Воздействие риблет, установленных вдоль и поперек потока, на процесс турбулизации течения для случая синусоидальной и варикозной неустойчивостей полосчатой структуры представлено на рис. 4, 5 соответственно. Результаты измерений U и u_{rms} для обоих типов установки

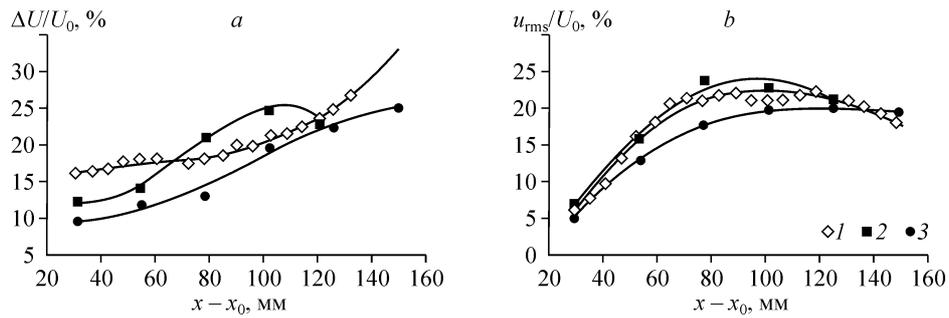


Рис. 4. Кривые нарастания вниз по потоку интенсивностей средней (а) и пульсационной (b) составляющих возмущения для случая синусоидальной неустойчивости полосчатой структуры на гладкой (1), оребренных поперек (2) и вдоль (3) потока поверхностях.

риблет сравниваются с результатами измерений этих параметров на гладкой поверхности. На рис. 4, а, 5, а показано влияние риблет на средние характеристики течения, представленное в виде $\Delta U = 1/2 (\max_{y,z}\{U'\} - \min_{y,z}\{U'\})$, где $[\max_{y,z}\{U'\}]$ — максимальное превышение скорости в плоскости y, z , а $[\min_{y,z}\{U'\}]$ — максимальный дефект скорости в этой же плоскости. Развитие пульсаций скорости показано на рис. 4, b, 5, b, оно характеризуется максимальным значением среднеквадратичных пульсаций скорости — $[u_{rms} = \max_{y,z}\{u_{rms}\}]$ в плоскости y, z . Влияние риблет на средние характеристики течения, т. е. непосредственно на интенсивность полосчатых структур, показывает заметное ее снижение во всем диапазоне измерений вниз по потоку при оребрении модели вдоль потока по сравнению с гладкой поверхностью как для случая синусоидальной (см. рис. 4, а), так и варикозной неустойчивостей (см. рис. 5, а). Оребрение поперек потока ведет к резкому росту интенсивности структуры и турбулизации течения вниз по потоку, что видно по смене знака производной $\partial U/\partial x$ при $x \approx 100$ мм на рис. 4, а и $x \approx 110$ мм на рис. 5, а. Если рассмотреть кривые нарастания вторичного высокочастотного возмущения на оребренной и гладкой поверхностях, то можно отметить резкий рост его интенсивности на начальном этапе развития (с 5 % U_0 при $x - x_0 = 30$ мм до примерно 20 % U_0 при $x - x_0 = 90$ мм) синусоидальной неустойчивости (см. рис. 4, b) и, примерно, равный уровень интенсивности (15 – 20 % U_0 в том же пространственном диапазоне) варикозной неустойчивости (см. рис. 5, b). Данный факт подтверждает известный вывод [18] о том, что синусоидальная неустойчивость более опасна, чем варикозная именно из-за резкого нарастания амплитуды возмущений, что и ведет к быстрой турбулизации течения. Поэтому, с целью сравнения влияния

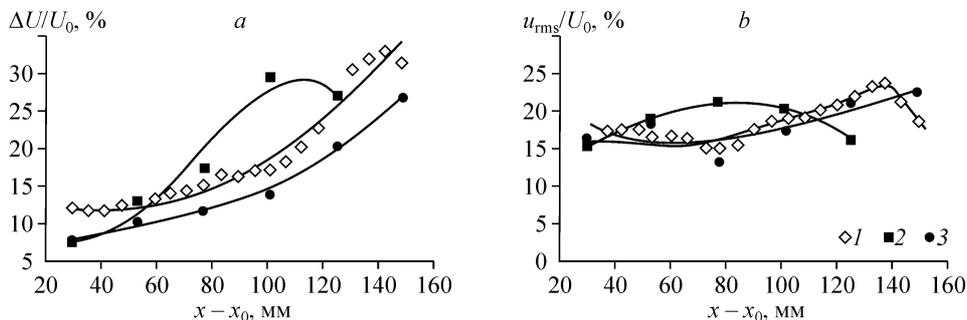


Рис. 5. Кривые нарастания вниз по потоку интенсивностей средней (а) и пульсационной (b) составляющих возмущения для случая варикозной неустойчивости полосчатой структуры на гладкой (1), оребренных поперек (2) и вдоль (3) потока поверхностях.

риблет на оба вида неустойчивостей в одном пространственном диапазоне, начальные амплитуды вторичного возмущения имели разные значения, тем не менее, пространственная координата, в которой амплитуда возмущения вышла, примерно, на один уровень (примерно 20 % U_0) была одинаковой ($x - x_0 \approx 80$ мм) в обоих случаях. Следует заметить, что первое измерение ($x - x_0 = 30$ мм) происходило вне риблетной поверхности. С точкой перехода течения в турбулентное состояние обычно связывают точку, после которой кривая нарастания возмущений при достижении своего максимума начинает спадать. Как видно на графиках (см. рис. 4, *b*, 5, *b*), перехода к турбулентности течения на риблетах, расположенных по потоку, не наблюдается. В случае синусоидальной неустойчивости амплитуда возмущения выходит на насыщение, однако кривая ее нарастания практически не спадает, в случае же варикозной неустойчивости нарастание амплитуды возмущения продолжается. На гладкой поверхности можно наблюдать переход к турбулентности при $x - x_0 \approx 120$ мм (синусоидальная неустойчивость, см. рис. 4, *b*) и при $x - x_0 \approx 140$ мм (варикозная неустойчивость, см. рис. 5, *b*). При установке риблет поперек потока, точка перехода сдвигается вверх (по потоку) примерно на 30 и 50 мм по сравнению с гладкой поверхностью при синусоидальной и варикозной неустойчивостях соответственно (см. рис. 4, *b*, 5, *b*). Следует также отметить, что были проведены дополнительные исследования по влиянию ступеньки, создаваемой самими риблетами, на результаты измерений. В испытаниях риблеты были заменены гладким вкладышем с размерами риблет и какого-либо влияния этой ступеньки обнаружено не было, что коррелирует с данными работы [16].

Таким образом, экспериментальные исследования по управлению процессом развития синусоидальной и варикозной неустойчивостями полосчатой структуры на нелинейной стадии ее развития с помощью риблет показали, что оребрение поверхности по потоку приводит к стабилизации среднего течения, т. е. заметному снижению интенсивности полосчатых структур, что, в свою очередь, способствует снижению амплитуды пульсаций скорости, т. е. снижению интенсивности вторичных высокочастотных возмущений, развивающихся на полосчатых структурах, и, в конечном итоге, предотвращению перехода течения в турбулентное состояние для данной области измерений по сравнению с гладкой поверхностью. Оребрение поверхности поперек потока приводит к дестабилизации среднего течения, т. е. повышению интенсивности полосчатых структур, что, в свою очередь, способствует возрастанию амплитуды пульсаций скорости, т. е. интенсивности вторичных высокочастотных возмущений, развивающихся на этих структурах, и, в конечном итоге, ускорению турбулизации течения в пространстве по сравнению с гладкой поверхностью.

ВЫВОДЫ

По результатам экспериментальных исследований нелинейной стадии развития синусоидальной и варикозной неустойчивостей полосчатой структуры и возможности управления этим процессом с помощью риблет установлено следующее:

- показано, что вторичная высокочастотная неустойчивость полосчатой структуры на нелинейной стадии приводит к мультипликации полосчатых структур и возникновению и развитию на них когерентных образований типа Λ -структур как при синусоидальной, так и варикозной неустойчивостях;
- установлено стабилизирующее воздействие риблет, расположенных по потоку, на оба вида неустойчивостей, что характеризуется снижением интенсивности полосчатых структур и вторичных высокочастотных возмущений и, в целом, затормаживанием турбулизации течения;

– показано дестабилизирующее воздействие риблет, расположенных поперек потока, на оба вида неустойчивостей, что характеризуется повышением интенсивности полосчатых структур и вторичных высокочастотных возмущений и, в целом, ускорению турбулизации течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Klebanoff P.S., Tidstrom K.D., Sargent L.M.** The three-dimensional nature of boundary-layer instability // J. Fluid Mech. — 1962. — Vol. 12(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. **Floryan J.M.** On the Goertler Instability of Boundary Layers // Technical Report of National Aerospace Laboratory. TR-1120, 1991. — P. 1–45.
5. **Zhou J., Adrian R.J., Balachandar S., Kendall T.M.** Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 387. — P. 353–396.
6. **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.
7. **Li F., Malik M.R.** Fundamental and subharmonic secondary instabilities of Goertler vortices // J. Fluid Mech. — 1995. — Vol. 82. — P. 255–290.
8. **Brandt L., Henningson D.S.** Transition of streamwise streaks in zero-pressure-gradient boundary layers // J. Fluid Mech. — 2002. — Vol. 472. — P. 229–261.
9. **Swearingen J.D., Blackwelder R.F.** The growth and breakdown of streamwise vortices in the presence of a wall // J. Fluid Mech. — 1987. — Vol. 182. — P. 225–290.
10. **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.
11. **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.
12. **Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л.Л., Грек Г.Р., Чун Х.** О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивостях в пограничном слое (*обзор*) // Теплофизика и Аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 3. — С. 339–364.
13. **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. 13–22.
14. **Luchini P., Manzo F., Pozzi A.** Resistance of a grooved surfaces to parallel and crossflow // J. Fluid Mech. — 1991. — Vol. 228. — P. 87–109.
15. **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.
16. **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.
17. **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.
18. **Andersson P., Brandt L., Bottaro A., Henningson D.S.** On the breakdown of boundary layers streaks // J. Fluid Mech. — 2001. — Vol. 428. — P. 29–60.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2005 г.