

УДК 532.526
DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-65-80

Исследование развития локализованных возмущений в пограничном слое плоской пластины в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока за уступом поверхности

И. А. Садовский, М. М. Катасонов, А. М. Павленко

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

Аннотация

В аэродинамической трубе на плоской пластине в отрывном течении за прямоугольным уступом исследовано возникновение и развитие локализованных возмущений, порождаемых низкочастотными импульсными отклонениями локального участка обтекаемой поверхностью в условиях низкой и повышенной степени турбулентности набегающего потока. Результаты получены методом термоанемометрии при малой дозвуковой скорости потока. Установлено, что импульсные отклонения стенки генерируют возмущения, представляющие собой так называемые полосчатые структуры и волновые пакеты колебаний. Отрыв ламинарного пограничного слоя ускоряет нарастание волновых пакетов с последующей турбулизацией пристенного течения. Выявлены особенности поведения локализованных возмущений в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока.

Ключевые слова

пограничный слой, отрыв потока, переход к турбулентности, полосчатые структуры, волновые пакеты, повышенная степень турбулентности

Источник финансирования

Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610128-8) и при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах, соглашение № 075-15-2019-1923

Для цитирования

Садовский И. А., Катасонов М. М., Павленко А. М. Исследование развития локализованных возмущений в пограничном слое плоской пластины в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока за уступом поверхности // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 1. С. 65–80. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-65-80

Investigation of the Development of Localized Disturbances in the Boundary Layer of a Flat Plate under Conditions of Moderate Degree of the Incoming Flow Turbulence behind the Surface Step

I. A. Sadovsky, M. M. Katasonov, A. M. Pavlenko

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

In a wind tunnel on a flat plate in a separated flow behind a rectangular step, the emergence and development of localized disturbances generated by low-frequency impulse deviations of the local surface section under conditions of low and moderate degrees of the incoming flow turbulence is studied. The results were obtained by hot-wire anemometry

© И. А., Садовский М. М. Катасонов, А. М. Павленко, 2021

ISSN 2541-9447
Сибирский физический журнал. 2021. Том 16, № 1
Siberian Journal of Physics, 2021, vol. 16, no. 1

at low subsonic flow velocity. It was found that impulse deviations of the wall generate disturbances, which are so-called Streaky structures and wave packets of oscillations. The separation of the laminar boundary layer accelerates the growth of wave packets with subsequent turbulization of the near-wall flow. The specific features of the behavior of localized disturbances under conditions of moderate degree of free-stream turbulence are revealed.

Keywords

boundary layer, flow separation, transition to turbulence, streaky structures, wave packets, moderate free-stream turbulence level

Funding

This work was partially carried out within the framework of the Program of Basic Scientific Research of State Academies of Sciences for 2013–2020 (project AAAA-A17-117030610128-8) and with state support for scientific research conducted under the guidance of leading scientists in Russian universities, agreement No. 075-15-2019-1923

For citation

Sadovsky I. A., Katasonov M. M., Pavlenko A. M. Investigation of the Development of Localized Disturbances in the Boundary Layer of a Flat Plate under Conditions of Moderate Degree of the Incoming Flow Turbulence behind the Surface Step. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 1, p. 65–80. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-65-80

Введение

В изучении перехода течения от ламинарного к турбулентному в пограничном слое в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока (ПСТ) исследователи важную роль отводят локализованным возмущениям ламинарного течения, обозначаемым термином «полосчатые структуры». Формирование таких структур – результат немодового усиления гидродинамических возмущений, которое не соответствует традиционной модели неустойчивости течений со сдвигом скорости по отношению к элементарным волнам [1–3]. Наблюдаемые в многочисленных экспериментах полосчатые структуры являются квазистационарными деформациями слоя сдвига, ориентированными вдоль потока и ограниченными в поперечном к нему направлении. Такие деформации способны возникнуть в пограничном слое под влиянием различных факторов, в том числе, за счет турбулентности внешнего потока. Развиваясь в пограничном слое, они способствуют усилению волновых (вторичных) возмущений и возникновению турбулентного режима течения.

Сравнительно недавно обнаруженный эффект неустойчивости, связанный с образованием полосчатых структур, заключается в генерации на их фронтах пакетов волн Толлмина – Шлихтинга. Зарождение и эволюция пакетов подробно изучались в предшествующих экспериментальных работах авторами настоящего исследования, где полосчатые структуры пограничного слоя моделировались различными способами. В их числе генерация структур вдувом – отсосом воздуха через щели в обтекаемой потоком поверхности, ее локализованными низкочастотными вибрациями, а также, возмущениями завихренности набегающего потока в градиентном и безградиентном течениях [4–10].

Настоящее исследование предпринято в продолжение упомянутых выше экспериментов с локализованными возмущениями течения в условиях отрыва ламинарного пограничного слоя и повышенной степени турбулентности набегающего потока. Известно, что при отрыве ламинарного течения в большинстве случаев происходит его дестабилизация и быстрое усиление возмущений завихренности оторвавшегося пограничного слоя с последующим переходом к турбулентности. С точки зрения линейной теории устойчивости сдвиговых течений это объясняется формированием в отрывной зоне профилей средней скорости с точкой перегиба, которые оказываются более неустойчивыми относительно колебаний малых амплитуд, чем локальные распределения скорости в присоединенном пограничном слое [11–14]. Данный теоретический вывод хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и прямого численного моделирования течения в локальных отрывных областях, в том числе за уступом поверхности [15]. В условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока течение внутри пограничного слоя еще больше усложнено. Например, отмечается стабилизирующее влияние (подавление) собственных возмущений пограничного

слоя – волн Толлмина – Шлихтинга и волновых пакетов на начальной, линейной, стадии их развития [15].

Таким образом, разумно предположить заметное влияние как отрыва ламинарного пограничного слоя, так и повышенной степени турбулентности набегающего потока, на развитие полосатых структур и сопровождающих их волновых пакетов, генерируемых искусственно в пограничном слое за счет импульсного отклонения участка поверхности. В настоящей работе эта возможность исследована в условиях отрывного обтекания прямоугольного уступа на поверхности плоской пластины, расположенной продольно низкоскоростному воздушному потоку в условиях низкой и повышенной степени турбулентности набегающего потока.

1. Методика эксперимента

Исследование проведено в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе МТ-324 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН. Экспериментальная установка замкнутого типа имеет закрытую рабочую часть с поперечным сечением $0,2 \times 0,2$ м и длиной 0,8 м, степень турбулентности свободного потока в которой не превышает $0,2\% U_\infty$. В качестве экспериментальной модели использована плоская пластина длиной 680 мм, шириной 200 мм, толщиной 10 мм с обтекаемой носовой частью в виде двух сопряженных полуэллипсов, установленная горизонтально в рабочей части трубы под нулевым углом атаки (рис. 1). На рабочей стороне пластины помещалась накладка размерами 50×200 мм, задний срез которой образовывал прямоугольный уступ поверхности высотой $h = 3,0$ мм на расстоянии 202 мм от передней кромки модели. В задней части пластины располагался закрылок, служащий для изменения положения линии растекания вблизи передней кромки и установления ламинарного течения над поверхностью модели. Угол установки закрылка определялся экспериментально и составлял около 15° от горизонтальной плоскости.

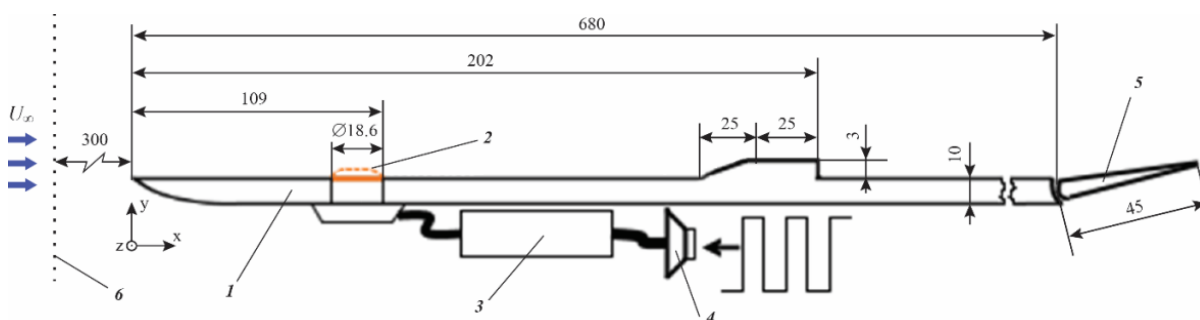


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – пластина с уступом; 2 – мембрана; 3 – успокоительная емкость; 4 – динамический громкоговоритель;
5 – закрылок; 6 – турбулизирующая сетка (размеры приведены в миллиметрах)

Fig. 1. Scheme of the experiment:

1 – plate with a step; 2 – membrane; 3 – damper; 4 – dynamic speaker;
5 – flap; 6 – turbulizing grid (dimensions are in millimeters)

Низкочастотное возмущение в ламинарном течении генерировалось контролируруемыми колебаниями эластичной лавсановой мембраны круглой формы диаметром 18,6 мм, расположенной на поверхности пластины перед уступом в центральном сечении модели. Мембрана приводилась в движение динамическим громкоговорителем, подвижный диффузор которого герметично соединялся с ней пневмотрассой. На громкоговоритель подавались прямоугольные электрические импульсы частотой 2 Гц, длительностью 0,5 с и амплитудой 10 В. При подаче импульса диффузор громкоговорителя приходил в движение, создавая избыточное давление в пневмотрассе, отклоняющее мембрану от стенки, после чего она возвращалась

в исходное положение. Генерация импульсов была синхронизирована с записью сигнала измерительной аппаратурой. Максимальное отклонение мембраны по нормали к поверхности составляло 0,35 мм.

Измерения проводились термоанемометром постоянной температуры фирмы *A.A. Lab. Systems Ltd*, модель *AN-1003* с использованием одноточечного датчика. Перемещение датчика в области измерений осуществлялось полуавтоматическим программируемым координатным устройством с точностью 0,5 мм в продольном, 0,02 мм в трансверсальном потоку направлениях и 0,01 мм по нормали к поверхности модели. Регистрировались средняя во времени U и пульсационная u компоненты продольной составляющей скорости течения.

Скорость потока в рабочей части аэродинамической трубы измерялась трубкой Прандтля в сочетании с электронным дифференциальным микроанемометром. Датчик термоанемометра тарировался в свободном потоке в диапазоне скоростей 1–15 м/с. Погрешность определения средней скорости течения была менее 1 %. Особенности тарировки датчика и применяемое для этого экспериментальное оборудование подробно описаны в работе [16].

Исходные экспериментальные данные представляли собой набор осциллограмм, записанных в различных точках измерения вблизи поверхности модели. Сигнал термоанемометра, оцифрованный 14-разрядным аналого-цифровым преобразователем *L-Card E14-440*, сохранялся в памяти персонального компьютера с осреднением осциллограмм по ансамблю для улучшения отношения сигнал / шум. Осреднение выполнялось по 10–30 единичным реализациям в зависимости от уровней выделяемого сигнала и шума.

Обработка результатов измерений, фильтрация сигнала (выделение его высокочастотной составляющей) проводились при помощи прямого и обратного преобразований Фурье в выбранном диапазоне частот. Прямое преобразование Фурье осциллограмм сигнала датчика термоанемометра давало представление о его спектральном составе. Далее выбиралась область частот, соответствующая исследуемому возмущению – волновому пакету, в пренебрежении другими спектральными составляющими. Модифицированный частотный спектр подвергался обратному преобразованию Фурье с восстановлением сигнала в координатах «амплитуда – время». По наборам осциллограмм вдоль выделенной пространственной координаты строились изоконтурные пульсаций скорости, что позволило получить картины термоанемометрической визуализации возмущений.

Экспериментальные данные получены при скорости набегающего потока $U_\infty = 6,5$ м/с и соответствующем числе Рейнольдса $Re_h = U_\infty h / \nu = 1300$. Повышенный ($Tu = 0,8 \% U_\infty$) уровень турбулентности набегающего потока создавался с помощью турбулизирующей сетки, установленной перед входом в рабочую часть (см. рис. 1). В принятой системе координат ее начало отсчета лежит в плоскости симметрии модели на передней кромке пластины; ось x направлена вдоль потока, ось z – вдоль передней кромки модели, ось y – перпендикулярна направлениям x, z с началом отсчета на поверхности пластины.

2. Результаты исследования. Низкая степень турбулентности

Среднее во времени исходное течение позади источника возмущений и в окрестности уступа поверхности пластины иллюстрирует рис. 2. В крайнем левом сечении $x = 150$ мм изображен профиль скорости ламинарного присоединенного пограничного слоя с толщиной вытеснения 1,14 мм и толщиной потери импульса 0,42 мм. На рис. 3, б, в показаны распределения скорости при $x = 205$ и 215 мм в области течения за уступом, по мере удаления от уступа вниз по потоку. В сечениях за уступом профили $U(y)$ имеют характерный для отрывного течения вид, при $x = 150$ мм поток присоединен к поверхности пластины.

Как было показано в работе [4], импульсное воздействие мембраны на пограничный слой приводит к образованию в нем возмущений двух типов: локализованной в трансверсальном потоку направлении полосчатой структуры и волновых пакетов вблизи ее переднего и заднего фронтов. К аналогичному результату приводит движение мембраны, расположенной перед отрывной областью. Генерируемая перед зоной отрыва полосчатая структура представлена на

рис. 3, *а* контурами отклонения продольной компоненты скорости течения от ее невозмущенной величины. На этой фигуре и других отрицательные отклонения показаны синими контурными линиями, положительные – красными. В данном случае продолжительность возмущения мембраной ламинарного течения составляет 200 мс. Трансверсальный размер полосчатой структуры в интервале $\Delta t = 30\text{--}440$ мс коррелирует с шириной мембраны. Вблизи переднего и заднего фронтов полосчатой структуры выделяются волновые пакеты колебаний в диапазонах $\Delta t = 20\text{--}60$ и $230\text{--}300$ мс (рис. 3, *б*).

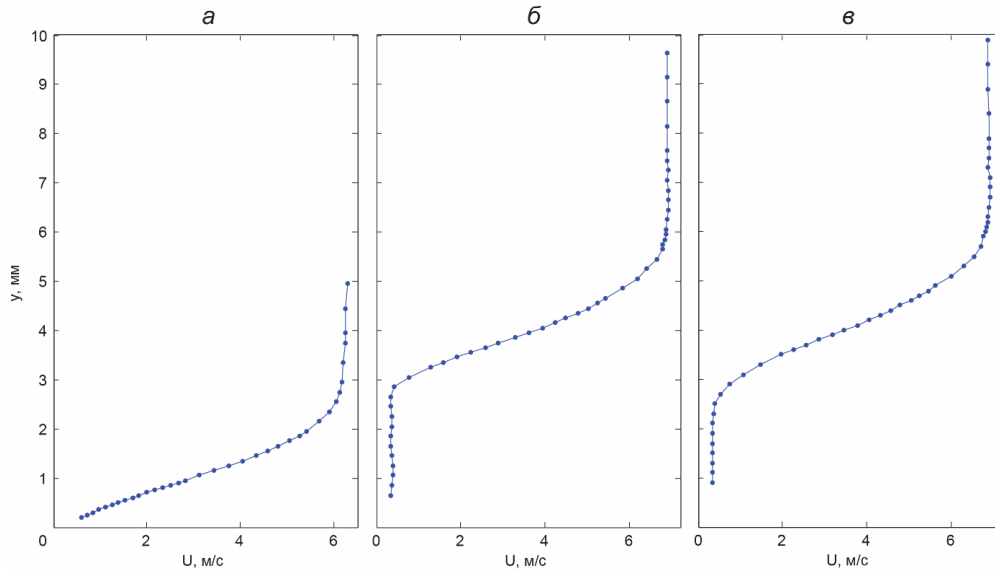


Рис. 2. Профили средней скорости невозмущенного течения, измеренные в сечении $z = 0$: слева направо при $x = 150, 205, 215$ мм, *а–в* соответственно
 Fig. 2. Profiles of the mean velocity of the undisturbed flow measured in the section $z = 0$: from left to right at $x = 150, 205, 215$ mm, *а–с*, respectively

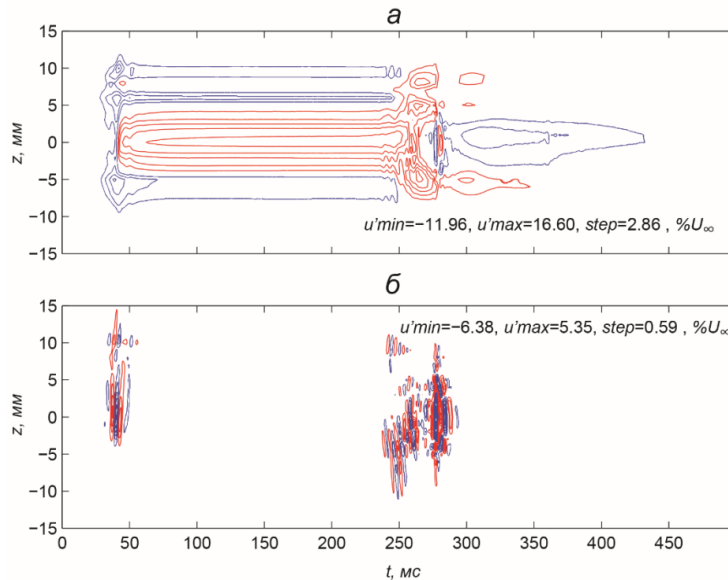


Рис. 3. Контурные пульсации скорости в плоскости $z-t$ в его максимуме по координате y при $x = 150$ мм: *а* – без фильтрации сигнала; *б* – после фильтрации в полосе частот 100–700 Гц
 Fig. 3. Velocity pulsations contours in the $z-t$ plane at its maximum along the y coordinate at $x = 150$ mm: *а* – without signal filtering; *б* – after filtering in the frequency band 100–700 Hz

Градиенты скорости течения, индуцированные его низкочастотным возмущением, стимулируют усиление высокочастотных колебаний, которые демонстрирует рис. 4. Вследствие различных градиентов в окрестности переднего и заднего фронтов локализованного возмущения связанные с ними колебания не совпадают по амплитуде, оказываясь заметно интенсивнее на заднем фронте (это хорошо видно на рис. 4, *а*), который относится к ламинарному течению перед уступом. Однако в отрывной области картина меняется, интенсивности возмущений переднего и заднего фронтов выравниваются (см. рис. 4, *б*, *в*).

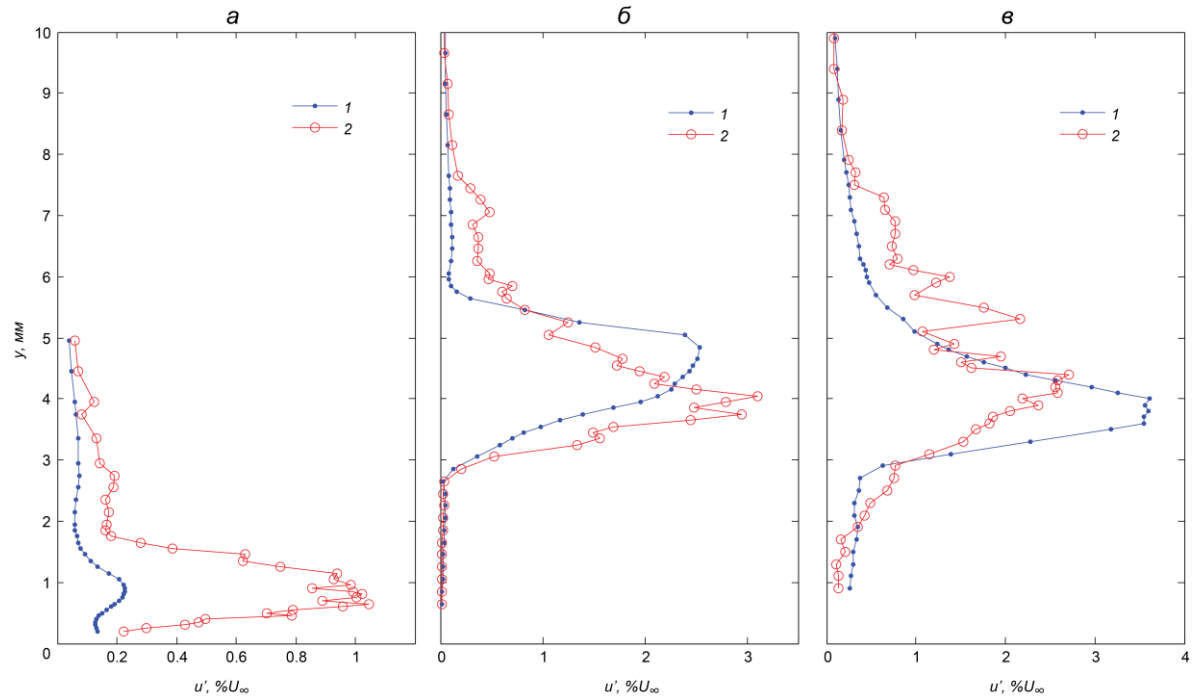


Рис. 4. Профили пульсаций скорости в полосе частот 100–700 Гц, сечение $z = 0$, слева направо (*а–в*) при $x = 150, 205, 215$ мм: 1 и 2 – волновые пакеты на переднем и заднем фронтах полосчатой структуры соответственно

Fig. 4. Profiles of velocity pulsations in the frequency band 100–700 Hz, cross section $z = 0$, from left to right (*a–c*) at $x = 150, 205, 215$ mm: 1 and 2 – wave packets at the leading and trailing edges of the streaky structure, respectively

Пространственно-временная структура возмущений, индуцируемых колебаниями мембраны, изображена на рис. 5 контурами отклонения продольной компоненты скорости течения от ее невозмущенной величины в координатах $y-t$. Общий вид полосчатой структуры и сопровождающих ее волновых пакетов без Фурье-фильтрации показан фрагментами *а–в*, картина течения в окрестности переднего и заднего фронтов полосчатой структуры после фильтрации в диапазоне частот 100–700 Гц – фрагментами *г–е*. Пакет колебаний вблизи переднего фронта, наблюдаемый в диапазоне $20 < t < 50$ мс, возникает при движении мембраны от поверхности модели. Далее мембрана остается в фиксированном положении, после чего, возвращаясь к стенке, генерирует волновой пакет на заднем фронте в интервале $220 < t < 300$ мс. Максимальный уровень пульсаций в середине оторвавшегося слоя сдвига скорости, в данном случае вблизи $y = 4$ мм (см. рис. 4 и 5, *б*, *в*), характерен для амплитудного распределения волн неустойчивости, нарастающих в течении с отрывом ламинарного пограничного слоя.

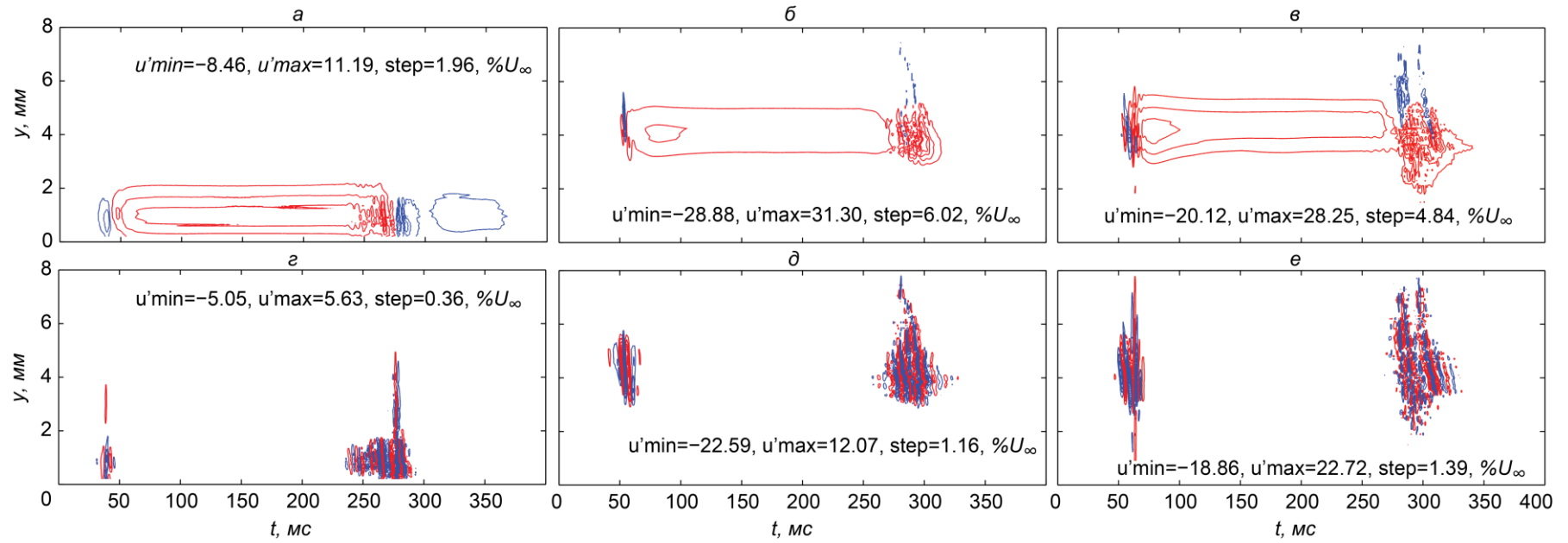


Рис. 5. Контуры пульсаций скорости в плоскости $y-t$ при $z=0$;
 а, з – при $x=150$, б, д – при $x=205$, в, е – при $x=215$ мм;
 а–в – не фильтрованный сигнал; з–е – фильтрованный в полосе частот 100–700 Гц

Fig. 5. Velocity pulsations contours in the $y-t$ plane at $z=0$;
 а, d – at $x=150$; б, e – at $x=205$; в, f – at $x=215$ мм;
 а–с – not filtered signal; д–f – filtered in the frequency band 100–700 Hz

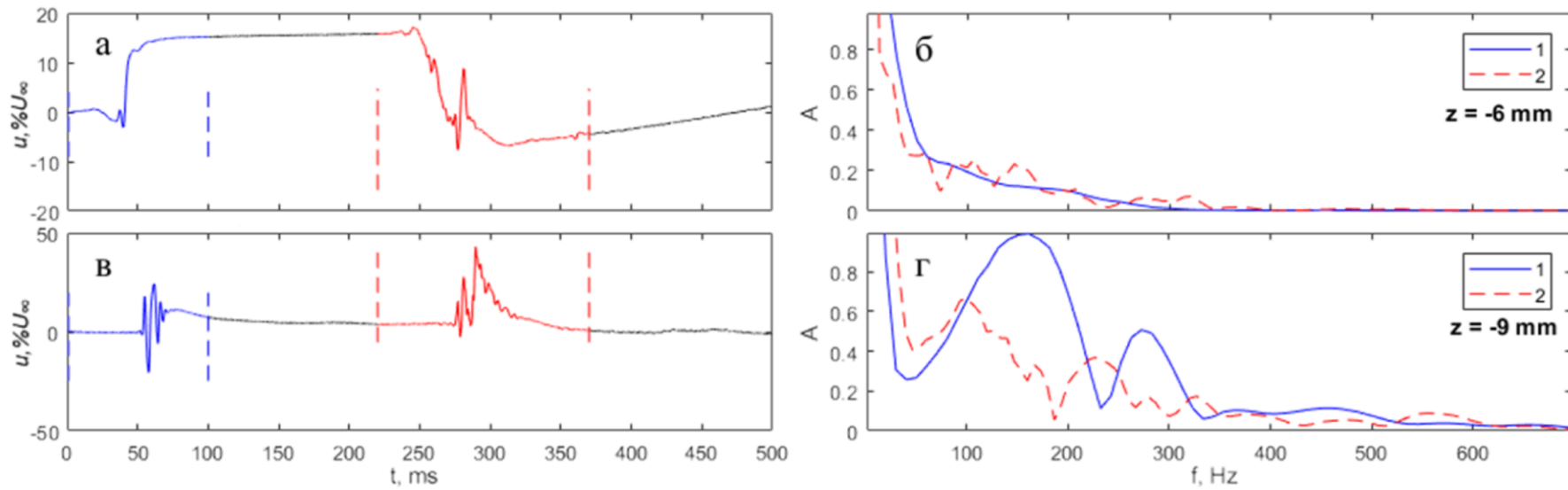


Рис. 6. Осциллограммы сигнала (а, в) и их спектры (б, г) при $z = z_{\max}$, $y = y_{\max}$, $x = 150$ (а, б), 215 мм (в, г):
 1 и 2 – спектры волновых пакетов на переднем и заднем фронтах полосчатой структуры соответственно
 Fig. 6. Signal oscillograms (a, c) and their spectra (b, d) at $z = z_{\max}$, $y = y_{\max}$, $x = 150$ (a, b), 215 mm (c, d):
 1 and 2 – spectra of wave packets at the leading and trailing edges of the banded structure, respectively

Осциллограммы возмущений, записанные перед уступом и за уступом поверхности в максимуме пульсаций по координате y , и соответствующие им амплитудные спектры колебаний приведены на рис. 6. Спектральные распределения для волновых пакетов на переднем фронте полосчатой структуры вычислялись по осциллограммам во временном интервале 0–100 мс, на заднем фронте – в интервале 220–370 мс. В первом сечении $x = 150$ мм в спектре частот колебаний на заднем фронте (см. рис. 6, б, кривая 2), кроме низкочастотных осцилляций вблизи $f = 0$ выделяются два максимума со средними частотами около 115 и 300 Гц. Вниз по потоку амплитуда этих спектральных составляющих заметно возрастает (см. рис. 6, з, кривая 2), а средние частоты соответствуют 100 и 250 Гц. Возмущение на переднем фронте демонстрирует схожее поведение с развивающимися при $x = 215$ мм максимумами со средними частотами около 150 и 270 Гц (см. рис. 6, з, кривая 1). Также на обоих фронтах заметен рост высокочастотных возмущений в районе 500–600 Гц.

Термоанемометрическая визуализация возмущений за уступом в плоскости $z-t$ показана на рис. 7. Можно видеть, что передний волновой пакет трансформировался в Λ -структуру, рис. 7, в, а волновой пакет на заднем фронте представляет собой зарождающееся турбулентное пятно, рис. 8, а, б. Продольная структура сохраняет свой масштаб в трансверсальном направлении и определяется на начальном этапе размером источника и далее вниз по потоку толщиной сдвигового слоя.

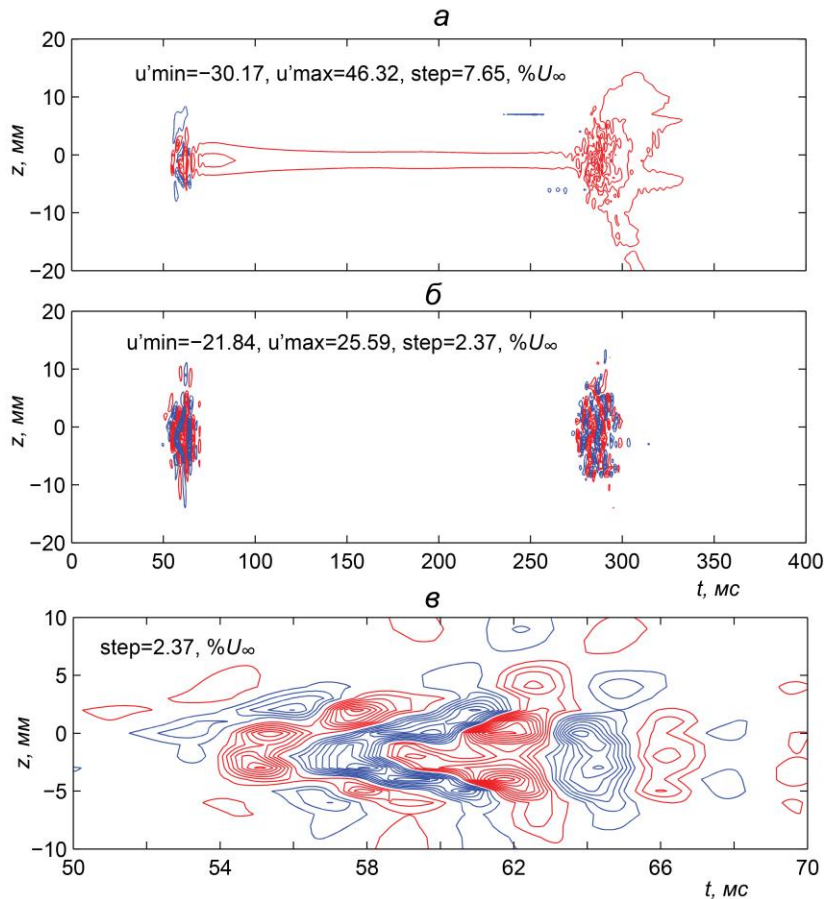


Рис. 7. Контуры пульсаций скорости в плоскости $z-t$ в его максимуме по координате y при $x = 215$ мм: а – без фильтрации сигнала; б, в – после фильтрации в полосе частот 100–700 Гц

Fig. 7. Velocity pulsations contours in the $z-t$ plane at its maximum along the y coordinate at $x = 215$ mm: а – without filtering the signal; б, в – after filtering in the frequency band 100–700 Hz

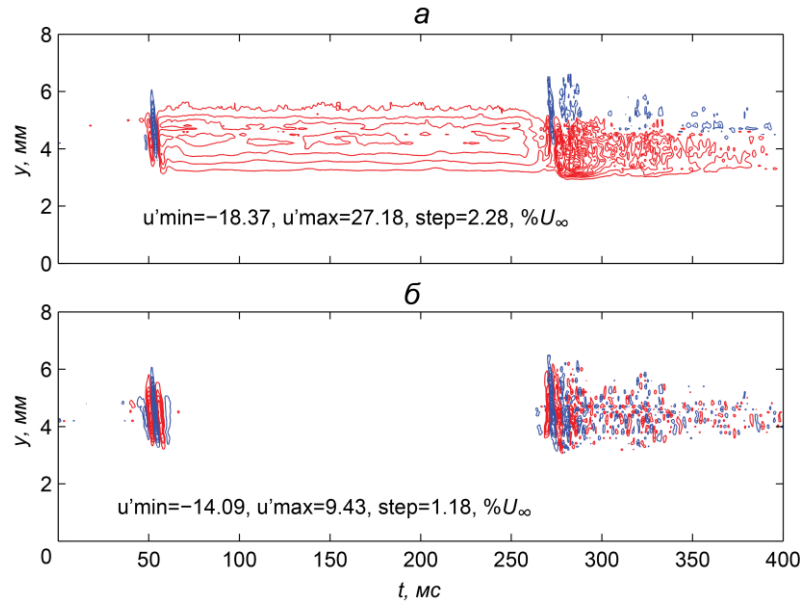


Рис. 8. Контуры пульсации скорости в плоскости $y-t$ в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока, при $z = 0$, $x = 205$ мм; a – не фильтрованный сигнал; b – фильтрованный в полосе частот 100–700 Гц

Fig. 8. Velocity pulsations contours in the $y-t$ plane under conditions of an increased degree of free-stream turbulence, at $z = 0$, $x = 205$ mm; a – not filtered signal; b – filtered in the frequency band 100–700 Hz

3. Повышенная степень турбулентности

Следующая серия измерений проводилась в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока $Tu = 0,8 \% U_\infty$. Изолинии пульсаций скорости, построенные в плоскостях $y-t$ и $z-t$, представлены на рис. 8 и 9 соответственно. Если сравнить топологию полученных возмущений с исследованиями при низкой степени турбулентности набегающего потока (см. рис. 5, 7), видно хорошее качественное согласование картин визуализации на всех этапах развития как до отрыва (см. рис. 5, б, д; 8, а, б), так и в отрывной области (см. рис. 5, в, е; 9, в–д). Отчетливо выделяются как продольная структура, так и волновые пакеты. Передний волновой пакет (см. рис. 9, д), как и в случае низкой степени турбулентности, по своей топологии схож с Λ -структурой, наблюдаемой на поздних стадиях развития пакетов волн Толлмина – Шлихтинга.

На рис. 10 представлены осциллограммы возмущений, записанные перед уступом и за уступом поверхности в максимуме пульсаций по координате y , и соответствующие им амплитудные спектры колебаний в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока $Tu = 0,8 \% U_\infty$. Спектральные картины возмущений получались аналогично представленным выше, на рис. 6. Для волнового пакета на переднем фронте в отрыве характерен сильный рост амплитуды участков спектра со средними частотами 150 и 280 Гц (см. рис. 10, б, г, кривая 1). В спектре волнового пакета на заднем фронте возмущения при повышенной степени турбулентности выделяется множество пиков в диапазонах частот 100–200 и 250–350 Гц, можно предположить, что это пульсации на частоте 300 Гц и их субгармоника на частоте 150 Гц (см. рис. 10, б, г, кривая 2).

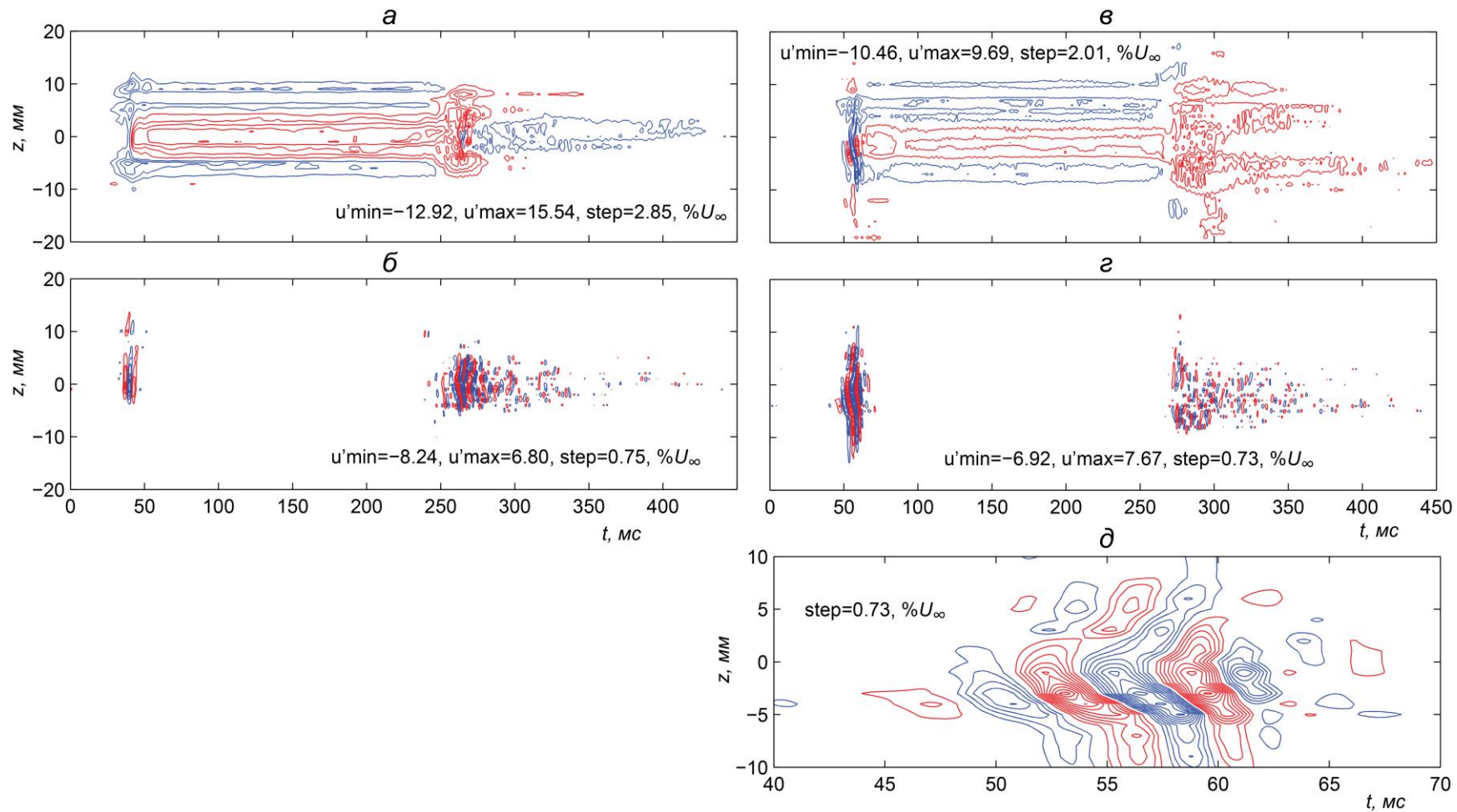


Рис. 9. Контурсы пульсации скорости в плоскости $z-t$ в его максимуме по координате y при $x = 150$ мм ($a, б$), $x = 215$ мм ($в-г$):
 $a, в$ – без фильтрации сигнала; $б, г, д$ – после фильтрации в полосе частот 100–700 Гц
 Fig. 9. Velocity pulsations contours in the $z-t$ plane at its maximum along the y coordinate at $x = 150$ mm ($a, б$), $x = 215$ mm ($в-г$):
 $a, в$ – without signal filtering; $б, г, д$ – after filtering in the frequency band 100–700 Hz

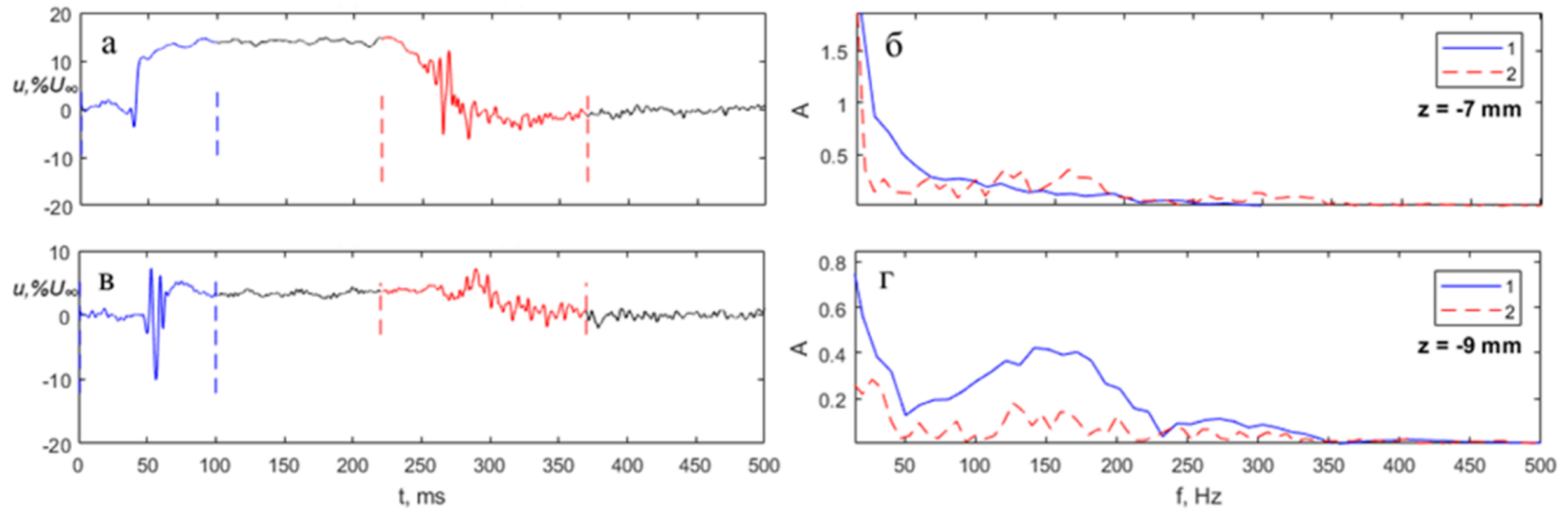


Рис. 10. Осциллограммы сигнала (а, в) и их спектры (б, д) в максимуме возмущения при $x = 150$ (а, б), 215 мм (в, д):
 1 и 2 – спектры волновых пакетов на переднем и заднем фронтах полосчатой структуры соответственно, $Tu = 0,8 \% U_\infty$
 Fig. 10. Signal oscillograms (a, c) and their spectra (b, d) at the maximum of disturbance at $x = 150$ (a, b), 215 mm (c, d):
 1 and 2 – spectra of wave packets at the leading and trailing edges banded structure, respectively, $Tu = 0.8 \% U_\infty$

Изменение в направлении потока уровня возмущений, формирующихся перед отрывной зоной под действием импульсного отклонения мембраны и в области отрыва, показано на рис. 11 и 12 при низкой и повышенной степени турбулентности набегающего потока. Интенсивность квазистационарных полосчатых структур (см. рис. 11) монотонно уменьшается как перед отрывом, так и позади него, с 22,1 до 16,6 % U_∞ (снижение в 1,3 раза). Повышенная степень турбулентности усугубляет данный процесс, заметно увеличивая темп затухания с 19,7 до 7,8 % U_∞ (снижение в 2,5 раза).

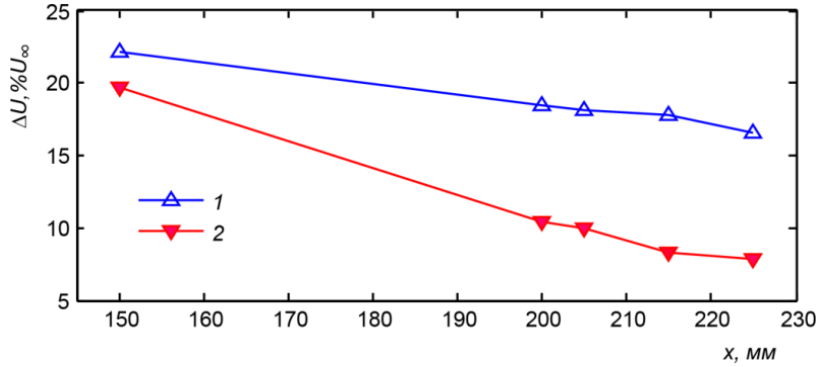


Рис. 11. Отклонения продольной компоненты скорости от ее величины в невозмущенном течении, индуцированные полосчатой структурой: 1 – низкая степень турбулентности набегающего потока; 2 – повышенная

Fig. 11. Deviations of the longitudinal velocity component from its value in an undisturbed flow, induced by a streaky structure:

1 – low degree of free-flow turbulence; 2 – increased degree of free-flow turbulence

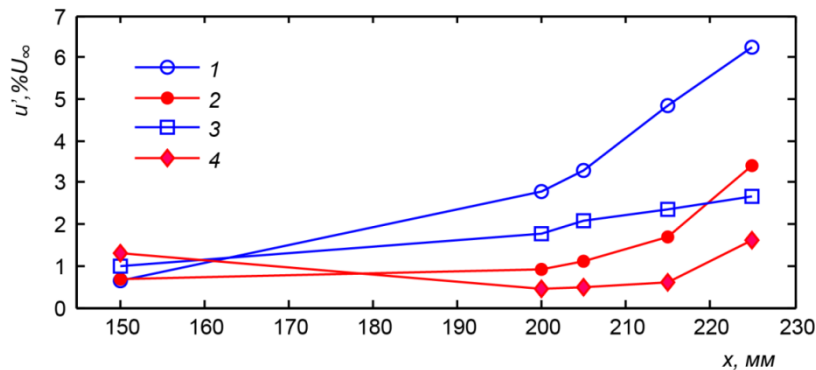


Рис. 12. Изменение вдоль потока амплитуды пульсаций скорости в полосе частот 100–700 Гц в максимуме пульсаций по координате y при $z = 0$;

1 и 3 – волновые пакеты на переднем и заднем фронтах полосчатой структуры при низкой степени турбулентности набегающего потока, 2 и 4 – при повышенной

Fig. 12. Change along the flow of the amplitude of velocity pulsations in the frequency band 100–700 Hz at the maximum of pulsations along the y coordinate at $z = 0$;

1 and 3 – wave packets at the leading and trailing edges of the streaky structure at a low degree of free-flow turbulence, 2 and 4 at increased

В значительно большей степени отрыв пограничного слоя и повышенная степень турбулентности набегающего потока сказывается на эволюции высокочастотных волновых возмущений. Зависимость величины пульсаций скорости от продольной координаты приведена на рис. 12. За уступом поверхности с сечения $x = 200$ мм наблюдается резкое усиление возмущений на переднем и заднем фронтах полосчатой структуры. Схожий результат был полу-

чен в экспериментах [10] при генерации пространственно-локализованных возмущений пограничного слоя на прямом крыле в области неблагоприятного градиента давления. Повышенная степень турбулентности набегающего потока вносит свой вклад в распределения пульсаций достаточно предсказуемо. Наблюдается подавление высокочастотных пульсаций на начальном участке до области отрыва, однако далее, за областью отрыва, темп роста пульсаций начинает увеличиваться, и интенсивность возмущений растет быстрее, чем при низкой степени турбулентности набегающего потока. Волновой пакет на заднем фронте оказывается слабее, что также отмечалось в других работах, по-видимому, это вызвано особенностью работы мембраны.

В целом характер развития исследуемых волновых пакетов соответствует имеющимся представлениям об устойчивости отрывных течений. Упомянутая в начале статьи дестабилизация течения при отрыве пограничного слоя выражается в увеличении на порядок пространственных инкрементов волн неустойчивости, а также в расширении диапазона нарастающих колебаний в частотно-волновом спектре. Такие условия, очевидно, благоприятны для усиления волновых пакетов, возникающих в пристенной зоне течения при его низкочастотном локализованном возбуждении.

Заключение

В итоге проведенного экспериментального исследования в области отрыва ламинарного пограничного слоя за прямоугольным уступом в условиях низкой и повышенной степени турбулентности основного потока определена реакция течения на наложенные на него пространственно-локализованные низкочастотные пульсации. Колебания стенки приводят к генерации в зоне отрыва возмущений двух видов, характерных для переходных сдвиговых течений: пакетов волн неустойчивости и низкочастотных продольных деформаций поля скорости. Процесс ламинарно-турбулентного перехода за уступом поверхности определяется нарастанием волновых пакетов при затухании продольных структур – возмущений в направлении потока. Сопоставление полученных данных с аналогичными результатами для течения на прямом крыле показывает, что отрыв пограничного слоя, как и неблагоприятный градиент давления, стимулирует развитие пакетов колебаний и их трансформацию сначала в Λ -структуры, а затем в турбулентные пятна. Воздействие повышенной степени турбулентности на продольные локализованные структуры приводит к еще большему их затуханию как перед уступом, так и позади него. Для волновых пакетов, развивающихся в отрыве за уступом на нелинейной стадии своего развития, воздействие повышенной степени турбулентности способствует их более интенсивному нарастанию. Перед уступом при малой интенсивности волновых пакетов повышенная степень турбулентности уменьшает их амплитуду.

Список литературы

1. **Landahl M. T.** A note on an algebraic instability of in viscid parallel shear flows. *J. Fluid Mech.*, 1980, vol. 98, p. 243–251.
2. **Schmid P. J., Henningson D. S.** Stability and Transition in Shear Flows. New York, Springer, 2001, 558 p.
3. **Reshotko E.** Transient growth: A factor in bypass transition. *Phys. Fluids*, 2001, vol. 13, no. 5, p. 1067–1075.
4. **Чернорай В. Г., Спиридонов А. Н., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Генерация возмущений локализованным вибратором в пограничном слое прямого крыла // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 5. С. 365–373.
5. **Горев В. Н., Катасонов М. М.** Возникновение и развитие предвестников на фронтах продольных структур в пограничном слое прямого крыла // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 3. С. 403–415.
6. **Горев В. Н., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Волновые предвестники продольных структур на прямом и скользящем крыле // ДАН. 2006. Т. 410, № 1. С. 53–56.

7. **Горев В. Н., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Волновые предвестники продольных структур в пограничном слое скользящего крыла // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 5. С. 51–58.
8. **Горев В. Н., Катасонов М. М., Щербаков В. А.** Экспериментальное исследование возникновения и развития волновых пакетов – предвестников локализованных возмущений в двумерных и трехмерных пограничных слоях // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Т. 2, № 4. С. 49–54.
9. **Горев В. Н., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Особенности нестационарных процессов в области фронтов продольных структур в пограничном слое прямого крыла // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 441–451.
10. **Катасонов М. М., Мотырев П. А., Сбоев Д. С., Козлов В. В., Эверс К. Б.** Развитие волновых пакетов-предвестников в пограничном слое прямого крыла // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2012. Т. 7, № 1. С. 28–37.
11. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
12. **Taghavi H., Wazzan A. R.** Spatial stability of some Falkner-Skan profiles with reversed flow. *Phys. Fluids*, 1974, vol. 17, p. 2181–2183.
13. **Nayfeh A. H., Ragab S. A., Al-Maaitah A. A.** Effect of bulges on the stability of boundary layers. *Phys. Fluids*, 1988, vol. 31, no. 4, p. 796–806.
14. **Michalke A.** On the inviscid instability of wall-bounded velocity profiles close to separation. *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, 1990, vol. 14, p. 24–31.
15. **Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V.** The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows. Berlin, Springer, 2002, 267 p.
16. **Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Чернорай В. Г.** Моделирование «пафф»-структур в двух- и трехмерных пограничных слоях. Препринт № 2. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1999. 26 с.

References

1. **Landahl M. T.** A note on an algebraic instability of in viscid parallel shear flows. *J. Fluid Mech.*, 1980, vol. 98, p. 243–251.
2. **Schmid P. J., Henningson D. S.** Stability and Transition in Shear Flows. New York, Springer, 2001, 558 p.
3. **Reshotko E.** Transient growth: A factor in bypass transition. *Phys. Fluids*, 2001, vol. 13, no. 5, p. 1067–1075.
4. **Chernorai V. G., Spiridonov A. N., Katasonov M. M., and Kozlov V. V.** Generation of perturbations by a localized vibrator in the boundary layer of a nonswept wing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 5, p. 765–772.
5. **Gorev V. N., Katasonov M. M.** Origination and development of precursors on the fronts of streaky structures in the boundary layer on a nonswept wing. *Thermophys. and Aeromech.*, 2004, vol. 11, no.3. p. 391–403.
6. **Gorev V. N., Katasonov M. M., Kozlov V. V.** Wave precursors on longitudinal structures on nonswept and swept wings. *Doklady Physics*, 2006, vol. 51, no. 9, p. 513–516.
7. **Gorev V. N., Katasonov M. M., Kozlov V. V.** Wave forerunners of streamwise structures in a sweptwing boundary layer. *Fluid Dynamics*, 2007, vol. 42, no. 5, p. 732–739.
8. **Gorev V. N., Katasonov M. M., Scherbakov V. A.** Experimental study of the origin and development of wave packets – forerunners of localized disturbances in two-dimensional and three-dimensional boundary layers. *Siberian Journal of Physics*, 2007, vol. 2, no. 4, p. 49–54.
9. **Gorev V. N., Katasonov M. M., Kozlov V. V.** Specific features of unsteady processes in the front regions of streaky structures in the boundary layer on a nonswept wing. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2008, vol. 15, no. 3, p. 415–425.

10. **Katasonov M. M., Motyrev P. A., Sboev D. S., Kozlov V. V., Evers Q. B.** Development of the wave packets – forerunners at the straight wing boundary layer. *Siberian Journal of Physics*, 2012, vol. 7, no. 1, p. 28–37.
11. **Schlichting H.** Boundary-layer theory. New York, McGraw-Hill, 1955, 535 p.
12. **Taghavi H., Wazzan A. R.** Spatial stability of some Falkner-Skan profiles with reversed flow. *Phys. Fluids*, 1974, vol. 17, p. 2181–2183.
13. **Nayfeh A. H., Ragab S. A., Al-Maaitah A. A.** Effect of bulges on the stability of boundary layers. *Phys. Fluids*, 1988, vol. 31, no. 4, p. 796–806.
14. **Michalke A.** On the inviscid instability of wall-bounded velocity profiles close to separation. *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, 1990, vol. 14, p. 24–31.
15. **Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V.** The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows. Berlin, Springer, 2002, 267 p.
16. **Grek G. R., Katasonov M. M., Kozlov V. V., Chernorai V. G.** Modeling of "puff" structures in two-and three-dimensional boundary layers. Preprint no. 2, Novosibirsk, ITAM SB RAS, 1999, 26 p. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию
Received
11.12.2020*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Садовский Иван Алексеевич, аспирант, старший лаборант с высшим профессиональным образованием, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Ivan A. Sadovsky, Graduate Student, Senior Assistant, Institute of Theoretical and Applied Mechanics. S. A. Khristianovich SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

sadovski.ivan@yandex.ru

Катасонов Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Mikhail M. Katasonov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

mikhail@itam.nsc.ru

Павленко Александр Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Alexander M. Pavlenko, PhD, Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

pavlyenko@gmail.com