

УДК 532.526

**М. М. Катасонов^{1,2}, П. А. Мотырев¹, Д. С. Сбоев^{1,3},
В. В. Козлов^{1,2}, К. Б. Эверс¹**

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского
ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская обл., 140180, Россия

E-mail: mikhail@itam.nsc.ru

РАЗВИТИЕ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРЯМОГО КРЫЛА*

В модельном эксперименте в пограничном слое прямого крыла исследованы характеристики и особенности развития волновых пакетов-предвестников и генерирующих их продольных структур. Исследования проведены в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе, возмущения регистрировались термоанемометрическим методом. Показано, что генерируемые в набегающем потоке локализованные возмущения, порождают в пограничном слое прямого крыла продольные полосчатые структуры, на переднем фронте которых возникают высокочастотные волновые пакеты-предвестники. Исследована динамика развития волновых пакетов в зависимости от следующих характеристик: градиент скорости вблизи переднего фронта продольного возмущения, амплитуда продольного возмущения и градиент скорости над профилем.

Ключевые слова: пограничный слой, полосчатые структуры, волновой пакет, ламинарно-турбулентный переход.

Введение

Как показывают последние исследования, возникновение волновых пакетов, схожих по своим свойствам с собственными возмущениями пограничного слоя (волнами Толлмина – Шлихтинга), возможно в силу дисперсионных свойств пограничного слоя, проявляющихся в области фронтов продольных локализованных возмущений [1; 2]. Такие локализованные возмущения (полосчатые структуры, streaky structures) возникают в пограничном слое под влиянием повышенной степени турбулентности внешнего течения и играют ключевую роль в

процессе ламинарно-турбулентного перехода в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока. Вихревые возмущения из внешнего потока воздействуют на пограничный слой, в результате чего в нем образуются ориентированные вдоль потока структуры, состоящие из областей с превышением и дефектом продольной компоненты скорости. Данные продольные локализованные возмущения создают условия для развития ряда неустойчивостей: вторичная неустойчивость, проявляющаяся в областях с большим локальным градиентом скорости в трансверсальном направлении по отношению к основному по-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-01-00027), гранта ведущих научных школ (НШ-454.2008.1), Министерства образования и науки РФ (№ РНП.2.1.2.541), госконтракта № 14.740.11.0354.

току; неустойчивость, связанная с образованием предвестников вблизи переднего и заднего фронтов локализованного возмущения, которые далее трансформируются в турбулентные пятна (incipient spots), в результате течение в пограничном слое переходит из ламинарного состояния в турбулентное [1; 2]. В последнее время исследователями-экспериментаторами широко применяется метод моделирования возмущений. Он заключается в том, что в исследуемую область, в данном случае в пограничный слой, искусственно вводят с определенной периодичностью возмущения с заданными легко воспроизводимыми свойствами, в нашем случае это продольные локализованные возмущения, идентичные тем, что наблюдаются в «естественных», или неконтролируемых, условиях. При этом исследователю доступна количественная информация об эволюции моделируемого возмущения. В данной работе изучаются продольные локализованные структуры, полученные методом вдува через трубку, помещенную перед моделью. Основное отличие настоящих исследований от проводимых ранее [3] заключается в способе генерации возмущений. Если ранее использовались источники, расположенные на поверхности модели, то в данном случае источник вынесен в набегающий поток и искусственные возмущения проникают и взаимодействуют с пограничным слоем так же, как «естественные» возмущения. Особое внимание уделяется изучению волновых пакетов, возникающих в областях, предшествующих резкому изменению скорости потока внутри пограничного слоя (фронты продольного локализованного возмущения), поскольку, как показывают исследования, эволюция именно волновых пакетов, а не продольных полосчатых структур, приводит к образованию турбулентных пятен. Исследуется динамика развития волновых пакетов в зависимости от градиента скорости вблизи переднего фронта продольного возмущения, амплитуды продольного локализованного возмущения и градиента скорости над профилем.

Методика эксперимента

Исследования проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе МТ-324 (Институт теоретической и прикладной механики СО РАН) с поперечным сечением рабочей части 200×200 мм и

длиной 800 мм. Скорость набегающего потока $U_\infty = 3,2$ м/с, степень турбулентности потока не превышала 0,18 %. В качестве модели использован прямой профиль крыла размахом 200 мм с хордой 290 мм (рис. 1). Профиль устанавливался горизонтально в рабочей части трубы, при углах атаки $\alpha = -1,2, -3$ и $-5,2^\circ$. Продольные возмущения генерировались методом вдува воздуха через трубку, расположенную перед носиком крылового профиля и ориентированную под 30° к направлению потока. Диаметр трубки составлял 2,5 мм. Центр среза трубки располагался в 2,5 мм выше по потоку от носика профиля. Высота трубки относительно профиля подбиралась таким образом, чтобы след от трубки не проникал в пограничный слой над профилем. Вдув производился с помощью компрессора, длительность задавалась быстродействующим клапаном, который был синхронизован с системой записи сигнала. Продольные структуры генерировались с частотой 0,5–1 Гц. Градиенты скорости (du/dt) на переднем фронте искусственного продольного возмущения задавались с помощью демпфера с переменным объемом, установленного между клапаном и трубкой. Следует заметить, что локальный градиент du/dt может быть преобразован в пространственный градиент скорости du/dX , основываясь на постоянстве скорости распространения продольного возмущения.

Как известно, величины градиентов скорости на фронтах существенно влияют на развитие волновых пакетов в областях, предшествующих фронтам продольного локализованного возмущения, поэтому объем демпфера выбирался таким, чтобы динамика развития волновых пакетов была видна наилучшим образом. Измерения проводились однониточным датчиком термоанемометра постоянной температуры. Измерялись средняя U и пульсационная u компоненты продольной составляющей скорости. Диаметр нити датчика составлял 6 мкм, длина – около 1 мм. Координатное устройство позволяло перемещать датчик по координате X с точностью 0,5; Z – 0,5; Y – 0,005 мм. Данные представляли собой набор осциллограмм в координатах амплитуда-время ($A-t$) для различных точек пространства (X, Y, Z) внутри пограничного слоя. Начало координат отсчитывалось от носика профиля. Ось X направлена вдоль потока, ось Z – вдоль размаха крыла, ось Y с началом отсчета на поверхности крыла перпендикулярна осям X, Z . Скорость набегающего потока в рабо-

чей части аэродинамической трубы измерялась насадком Пито – Прандтля, соединенным с наклонным жидкостным микроанометром. Датчик термоанометра тарировался в свободном потоке напротив трубки Пито – Прандтля при скоростях потока 1–15 м/с так, чтобы погрешность в определении средней скорости была менее 1 %. Процесс тарировки и применяемое экспериментальное оборудование подробно описаны в работе [4].

Осциллограммы сигнала с моста термоанометра через аналого-цифровой преобразователь поступали в компьютер, усреднялись по ансамблю реализаций для улучшения соотношения сигнал / шум, что позволяло выделять полезный сигнал из недетерминированных шумов. Осреднение выполнялось по 10–40 единичным реализациям в зависимости от уровней выделяемого сигнала и шума. Измерения процесса развития возмущений по трансверсальной координате Z выполнялись в области максимума их интенсивности, что примерно соответствует середине толщины пограничного слоя.

Обработка результатов измерений, фильтрация сигнала (выделение высокочастотной составляющей) производилась с применением прямого и затем обратного преобразования Фурье в выделенном диапазоне частот. Пример фильтрации представлен на рис. 2. Прямое преобразование Фурье для осциллограммы сигнала с датчика термоанометра дает представление о его спектральном составе, затем выбирается область частот, содержащая исследуемое возмущение – волновой пакет, при этом отбрасываются все остальные частоты (зануляются). Для модифицированного таким образом частотного спектра производится обратное преобразование Фурье, восстанавливающее сигнал в координатах амплитуда-время.

Результаты

Эксперимент проводился в условиях градиентного течения, образованного за счет обтекания профиля крыла при углах атаки $\alpha = -1,2, -3$ и $-5,2^\circ$. Измерялись характеристики невозмущенного течения – распределение средней скорости в рабочей части над крылом вдоль оси X (рис. 3) и профили пограничного слоя при $X/C = 0,07; 0,34; 0,62; 0,97$ (рис. 4). Анализ распределений скорости показывает, что при всех исследованных углах атаки течение в пограничном слое без введения контролируемых возмущений яв-

ляется ламинарным и практически автомодельным. При $\alpha = -5,2^\circ$ автомодельность течения наиболее выражена (расхождение в профилях скорости минимальное), что обусловлено практически нулевым градиентом давления на участке от $X/C = 0,48$ и далее вниз по потоку (см. рис. 3). С ростом угла атаки область неблагоприятного градиента давления увеличивается, также наблюдаются расхождения в форме профилей скорости (см. рис. 4), они становятся более наполненными. В тех же сечениях были получены $Y-t$ диаграммы в пограничном слое с введенными в него продольными структурами (рис. 5). Сплошные линии – превышение скорости относительно невозмущенного потока, а пунктирные – ее дефект. Уровни отклонений указаны в процентах скорости набегающего потока U_∞ (u_{\min} – минимальный дефект, u_{\max} – максимальное превышение, $step$ – шаг по амплитуде пульсаций). Для каждого положения датчика по оси X найден максимум пульсаций скорости (см. рис. 5). Далее, на уровне максимума данного возмущения снимались диаграммы $Z-t$ (рис. 6). Диаграммы $Y-t$ и $Z-t$ позволили получить наглядное представление о структуре и динамике развития возмущений.

Из диаграмм видно, что продольные структуры целиком располагаются внутри пограничного слоя, размер структуры по координате Y увеличивается вместе с ростом толщины пограничного слоя вниз по потоку (см. рис. 5). Размер структуры по трансверсальной координате (координата Z) практически не изменяется (см. рис. 6). Вниз по потоку локализация продольной структуры сохраняется.

Попадая в пограничный слой, локализованное возмущение из набегающего потока порождает в нем продольную структуру – стрик, вблизи его фронтов (в областях, предшествующих резкому изменению скорости) возникают волновые пакеты-предвестники. В области неблагоприятного градиента вниз по потоку происходит интенсивный рост амплитуды пакетов-предвестников. Анализируя зависимости, представленные на рис. 7, видно, что с ростом неблагоприятного градиента давления (увеличение угла атаки профиля α) происходит усиление темпа роста амплитуды волновых пакетов-предвестников. В процессе развития в волновом пакете растет количество максимумов, увеличивается размер пакета в трансверсальном направлении (см. рис. 6).

Рис. 1. Схема эксперимента

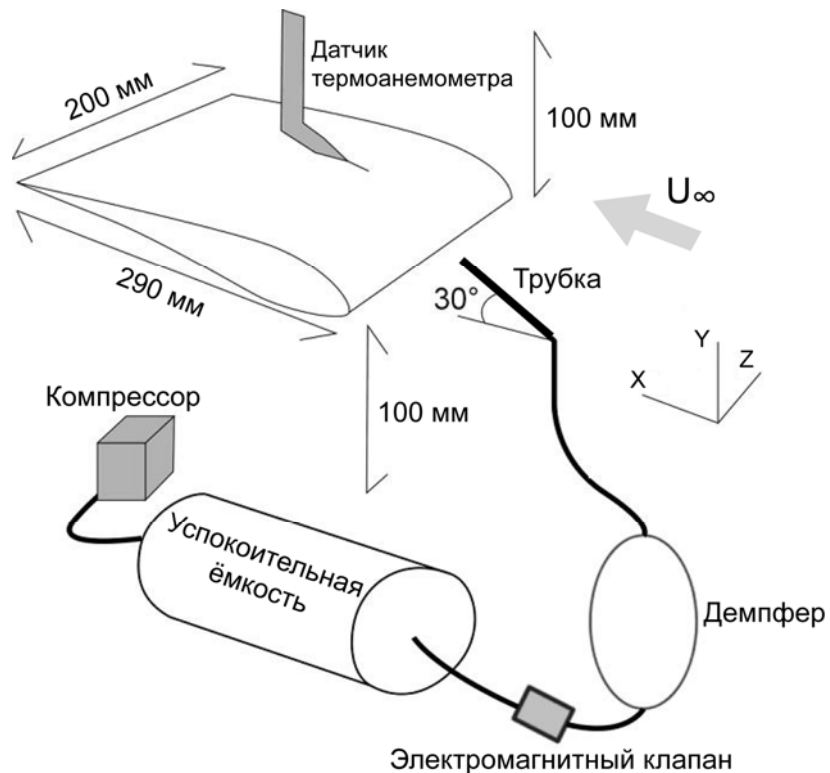
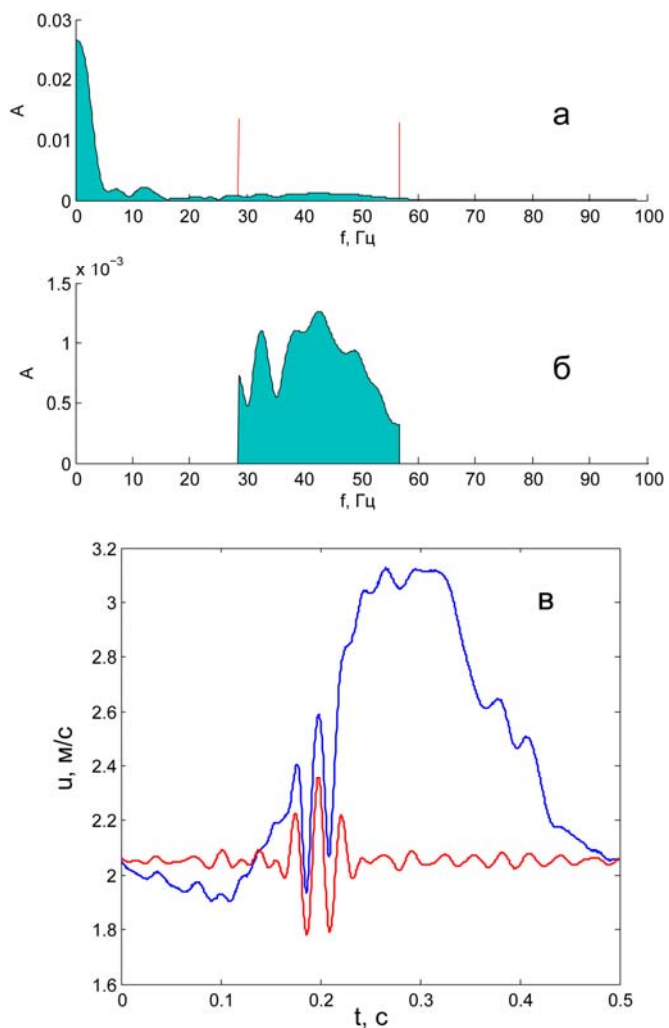


Рис. 2. Пример низкочастотной фильтрации сигнала: а – спектр возмущения; б – выделенная область спектра ($28 < f < 55$ Гц), в которой присутствует волновой пакет; в – осциллограммы фильтрованного (красный цвет) и нефильтрованного (синий) сигнала



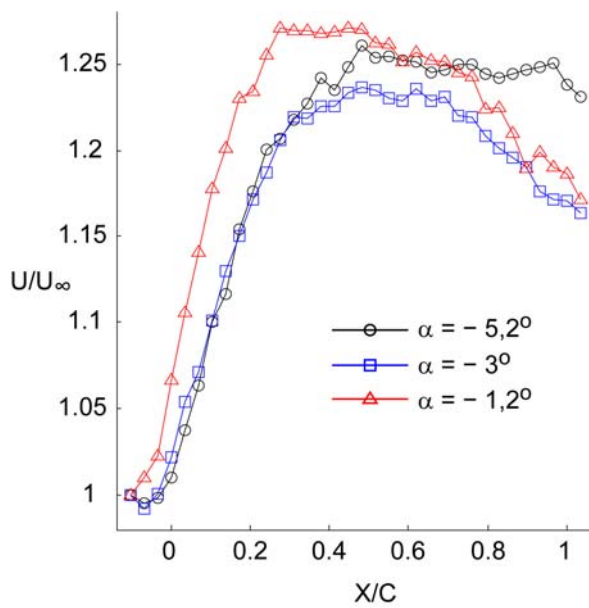


Рис. 3. Распределение средней скорости свободного потока при различных углах атаки профиля

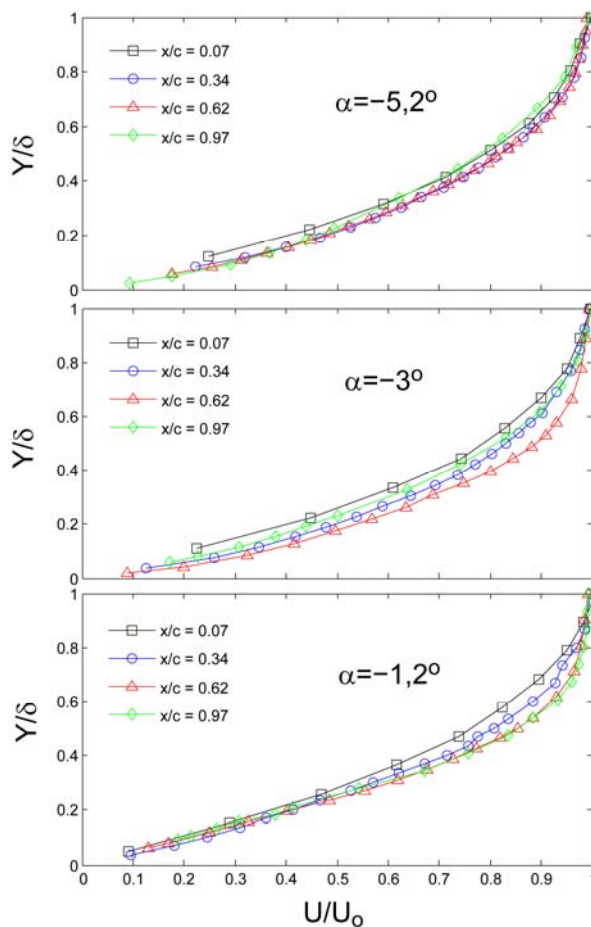


Рис. 4. Распределение скорости внутри пограничного слоя при различных углах атаки профиля

На поздних стадиях развития волнового пакета видно, как он трансформируется в Λ -структуру (см. рис. 6, ж, з). Предшествующие исследования [3] показывают, что предвестник представляет собой пакет волн Толлмина – Шлихтинга, который, как известно, также проходит стадию трансформации в Λ -структуру и затем в турбулентное пятно.

Далее были проведены исследования по возбуждению волновых пакетов-предвестников продольными локализованными структурами, введенными из набегающего потока, имеющими различные условия на переднем фронте. На рис. 8 представлены осциллограммы сигнала для различных координат вниз по потоку при двух различных градиентах скорости вблизи переднего фронта продольного возмущения (du/dX). Более детально оценить данные градиенты можно из рис. 9 (возмущения 1 и 2). Эволюция возмущения вниз по потоку показывает, что чем больше градиент скорости вблизи переднего фронта продольного возмущения (du/dX), тем раньше начинает нарастать волновой пакет-предвестник в области неблагоприятного градиента давления (рис. 8, б). При малом градиенте du/dX (рис. 8, а) предвестник начинает проявляться и нарастать при $X/C = 0,90-0,97$, для большего градиента du/dX , (см. рис. 8, б) – при $X/C = 0,62-0,69$. Данные результаты согласуются с результатами работы [3], где различие скоростей роста пакета на переднем фронте объясняется разными величинами градиентов (du/dX) вблизи фронтов соответствующих продольных структур. Чем большим градиентом скорости (du/dX) характеризуется фронт продольной структуры, тем интенсивнее развивался волновой пакет-предвестник.

Другой фактор, влияющий на развитие волновых пакетов-предвестников – это начальная амплитуда продольного локализованного возмущения (при том же значении градиента скорости вблизи переднего фронта du/dX). Уменьшение более чем в два раза начальной амплитуды продольной структуры (см. рис. 9, возмущения 1 и 3) сместило вниз по потоку с $X/C = 0,62$ до $X/C = 0,89$ (рис. 10) положение по продольной координате, при котором наблюдается начало нарастания волнового пакета-предвестника.

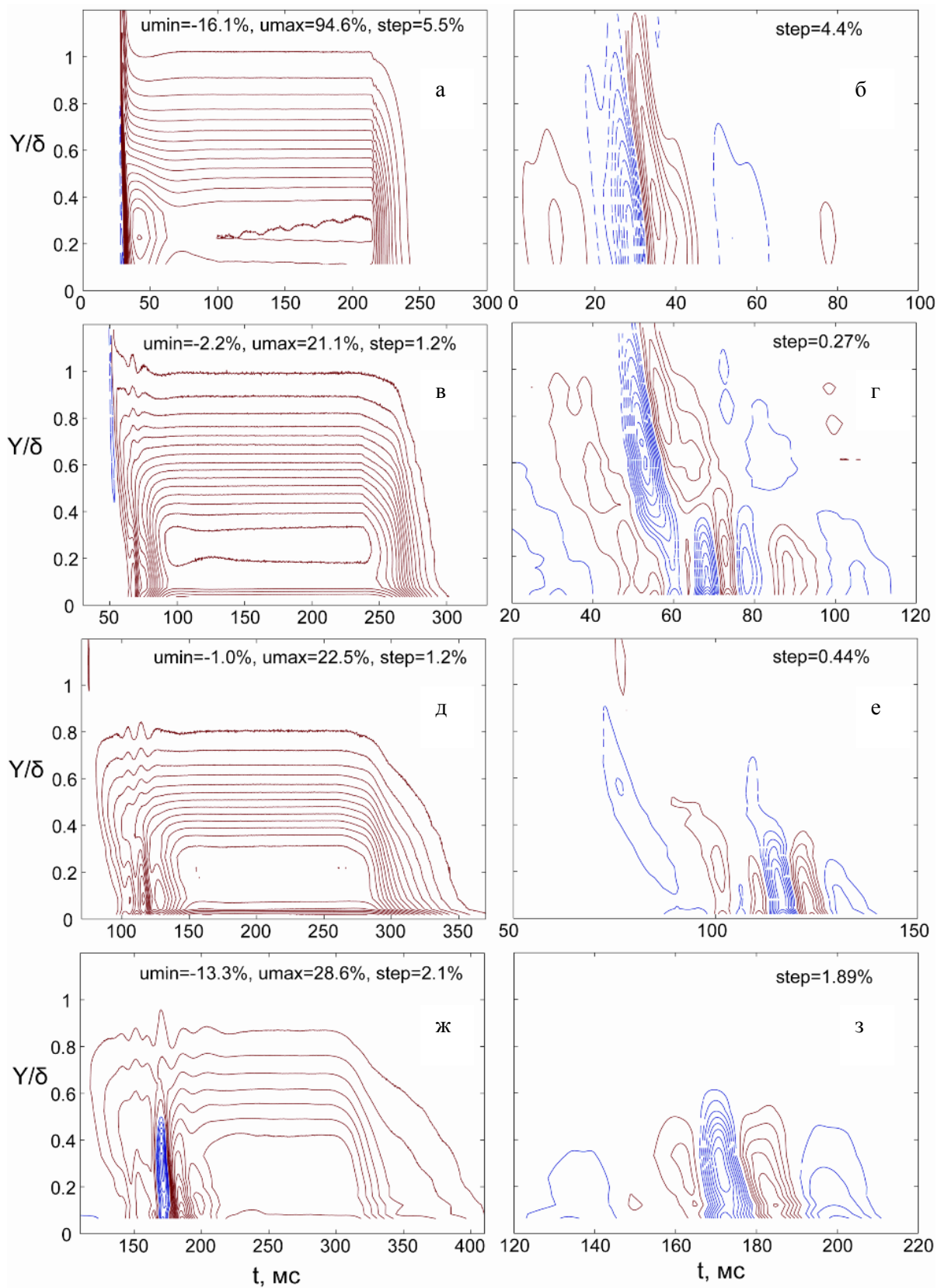


Рис. 5. Изолинии пульсационной составляющей скорости при $Z = 0$ в плоскости $Y-t$ ($\alpha = -3^\circ$): а, б – $X/C = 0,07$; в, г – $X/C = 0,34$; д, е – $X/C = 0,62$; ж, з – $X/C = 0,97$; а, в, д, ж – нефильтрованный сигнал; б, г, е, з – фильтрованный сигнал с выделенным волновым пакетом

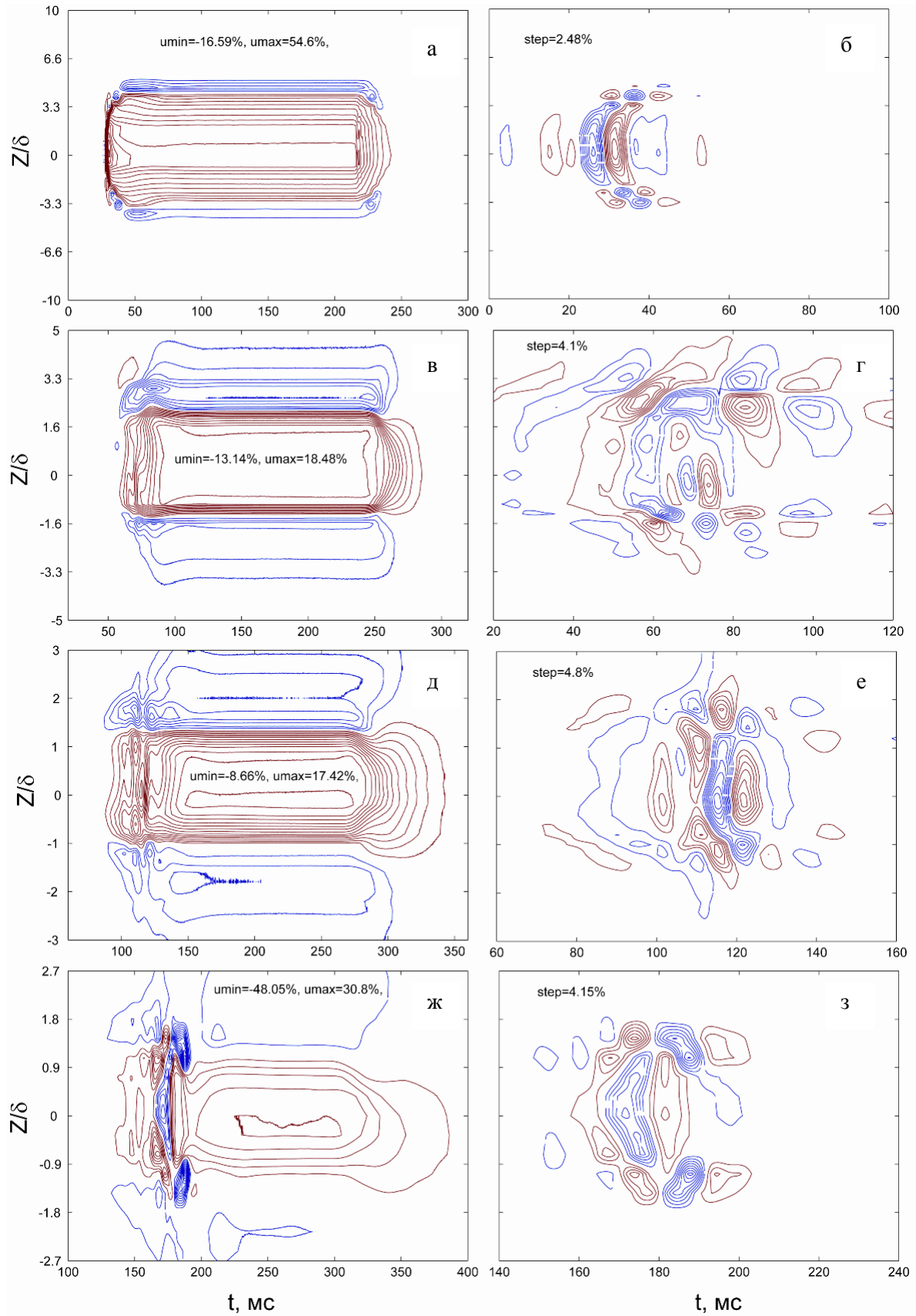


Рис. 6. Изолинии пульсационной составляющей скорости в плоскости $Z-t$ ($\alpha = -3^\circ$): а, б – $X/C = 0,07$; в, г – $X/C = 0,34$; д, е – $X/C = 0,62$; ж, з – $X/C = 0,97$; а, в, д, ж – нефильтранный сигнал; б, г, е, з – фильтрованный сигнал с выделенным волновым пакетом

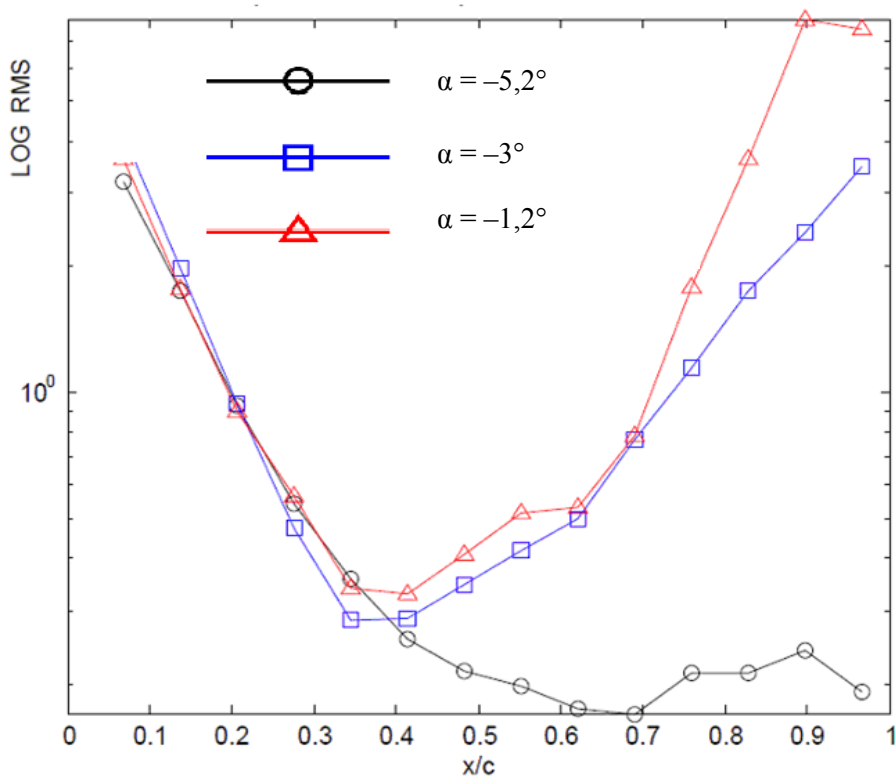


Рис. 7. Изменение амплитуд волновых пакетов-предвестников вниз по потоку при различных углах атаки (логарифмический масштаб)

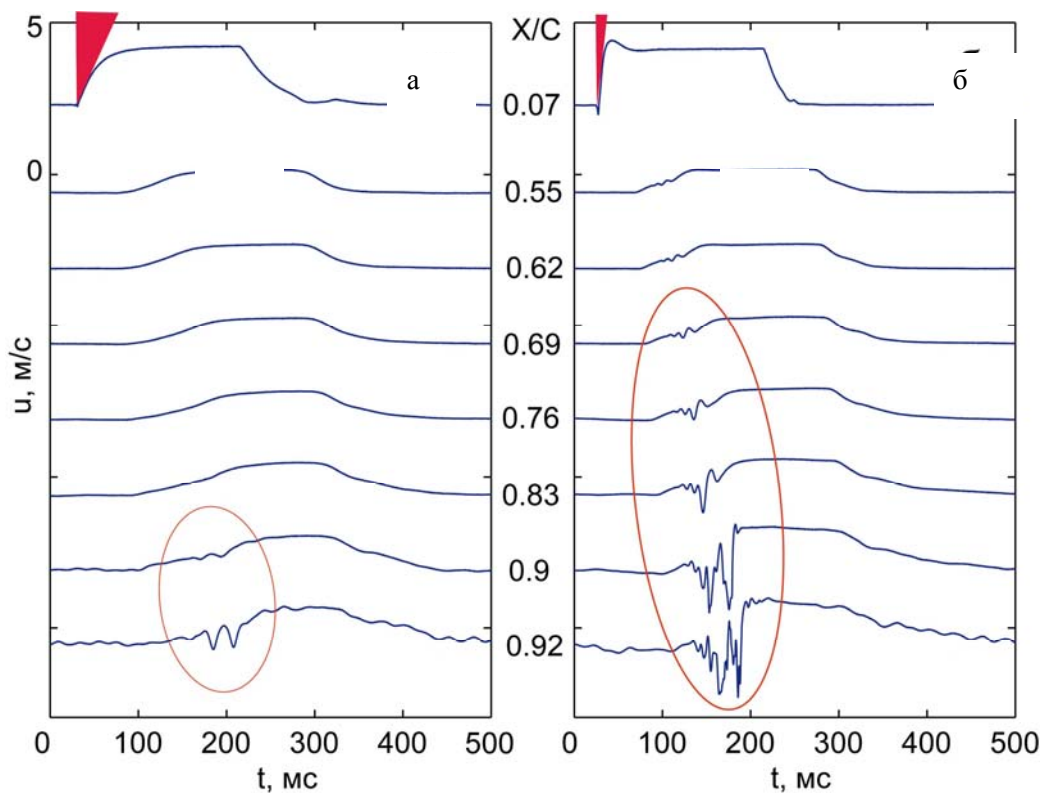


Рис. 8. Эволюция локализованных возмущений вниз по потоку при различных значениях градиента скорости du/dX вблизи переднего фронта продольного возмущения (осциллограммы сигнала)

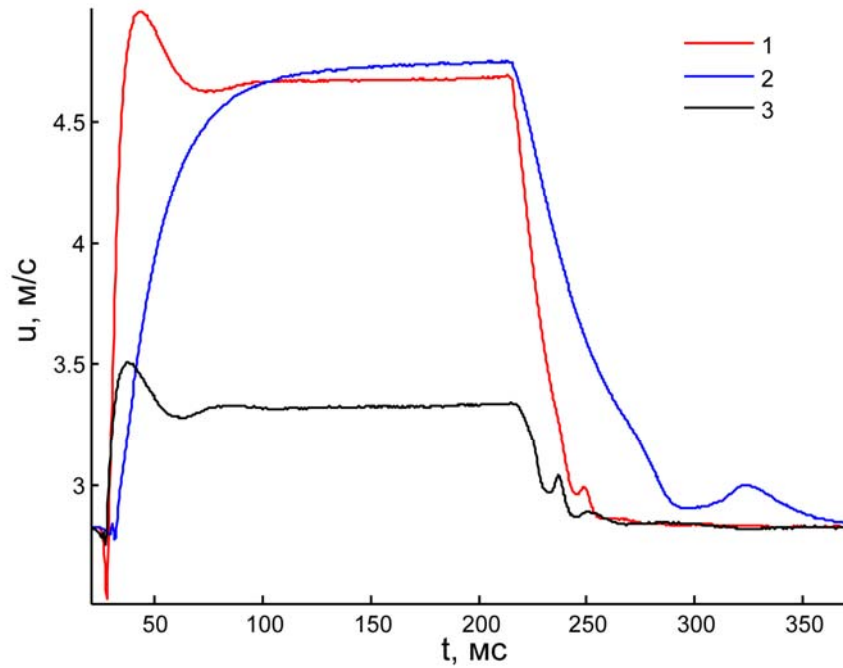


Рис. 9. Осциллограммы сигнала при $X/C = 0,07$ и $Y = Y_{u_{\max}}$: 1 – опорное возмущение; 2 – возмущение с уменьшенным градиентом du/dX вблизи переднего фронта; 3 – возмущение с уменьшенной амплитудой

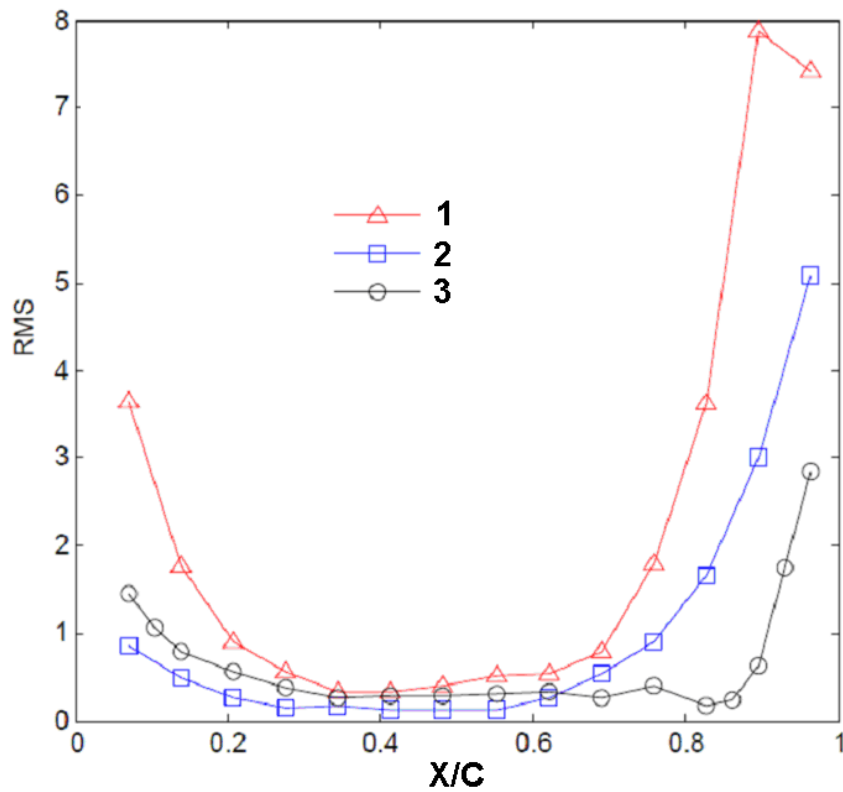


Рис. 10. Изменение амплитуд волновых пакетов-предвестников вниз по потоку при различных начальных условиях ($\alpha = -1,2^\circ$): 1 – опорное возмущение; 2 – возмущение с уменьшенным градиентом du/dX вблизи переднего фронта; 3 – возмущение с уменьшенной амплитудой

Выводы

В пограничном слое прямого крыла в условиях градиентного течения вблизи фронтов продольных возмущений, моделируемых из набегающего потока, получены высокочастотные волновые пакеты-предвестники.

Изучен характер поведения волновых пакетов-предвестников в зависимости от следующих факторов: градиент скорости на переднем фронте продольного возмущения; амплитуда продольного возмущения; градиент скорости внешнего течения (угла атаки профиля).

Показано, что с ростом неблагоприятного градиента давления (увеличение угла атаки α профиля) рост амплитуды волновых пакетов-предвестников ускоряется.

Обнаружено, что увеличение градиента скорости (du/dX) вблизи фронта продольной структуры, порождающей волновой пакет-предвестник, ускоряет рост предвестника.

Найдено, что уменьшение амплитуды продольной структуры, порождающей волновой пакет-предвестник, задерживает нарастание предвестника.

Список литературы

1. Kozlov V. V. The Role of Localized Vortex Disturbances in the Process of Transition to Turbulence in a Boundary Layer // Dynamics

of Localized Disturbances in Engineering Flows: EUROMECH Colloquim 353: Booklet of Summaries. Karlsruhe, 1996. P. 15–16.

2. Бойко А. В., Грек Г. П., Довгаль А. В., Козлов В. В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма, 1999.

3. 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.

4. Грек Г. П., Катасонов М. М., Козлов В. В., Чернорай В. Г. Моделирование «пафф»-структур в двух- и трехмерных пограничных слоях. Новосибирск, 1999. (Препринт / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теоретической и прикладной механики. № 2-99.)

Список принятых обозначений

U_∞ – скорость свободного потока
 U_0 – локальная скорость невозмущенного потока
 u – отклонение локальной скорости от скорости невозмущенного потока
 δ – толщина пограничного слоя
 α – угол атаки профиля
 C – хорда крыла
 f – частота

Материал поступил в редколлегию 12.12.2011

M. M. Katasonov, P. A. Motyrev, D. S. Sboev, V. V. Kozlov, Q. B. Evers

DEVELOPMENT OF THE WAVE PACKETS-FORERUNNERS AT THE STRAIGHT WING BOUNDARY LAYER

This work is devoted to the study of wave packets (forerunners) formed in straight wing boundary layers in the regions preceding a drastic change in the flow velocity inside the boundary layer, near the fronts of streaks. The investigations were carried out in the subsonic low turbulence wind tunnel. Measurements of the flow fields were carried out using a single-wire probe of a constant-temperature hot-wire anemometer. It was shown that the localized structures, which modeled artificially from incoming flow, generate streaks in a boundary layer. The wave packets (forerunners) are appears in the regions preceding a drastic change of flow velocity inside the boundary layer at the streaks fronts. The characteristics of the forerunners, affected by the external-flow pressure gradient, intensity of streak, and local velocity gradients near the front of the streak were investigated.

Keywords: boundary layer, laminar-turbulent transition, streaky structures, wave packet.