

УДК 532.526

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ ВИБРАТОРОМ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРЯМОГО КРЫЛА

В. Г. Чернорай, А. Н. Спиридонов, М. М. Катасонов, В. В. Козлов

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано возникновение и развитие возмущений, порождаемых трехмерной вибрирующей поверхностью в пограничном слое на крыловом профиле с нулевым углом скольжения. Вибрации поверхности создавались лавсановой мембраной. Показано, что вибрации трехмерной поверхности с большой амплитудой приводят к образованию в пограничном слое одновременно двух типов возмущений: квазистационарных продольных структур и сопровождающих их волновых пакетов. Наличие областей с благоприятным и неблагоприятным градиентами давления не оказывает существенного влияния на развитие продольных структур, но приводит сначала к затуханию, а затем к росту волновых пакетов.

Введение. Решение практических задач, связанных с задачами управления пограничным слоем с целью снижения сопротивления летательных и плавательных аппаратов и расчета их аэродинамических характеристик, предполагает комплексное изучение всех возможных факторов, которые могут оказывать влияние на процесс ламинарно-турбулентного перехода.

Одним из возможных видов воздействия на пограничный слой является колебание ограниченного участка обтекаемой поверхности (трехмерного поверхностного вибратора). С точки зрения управления ламинарно-турбулентным переходом такой поверхностный вибратор можно представить как одну из составных частей системы, предназначенной для достижения существенной задержки перехода на нелинейной стадии или в трехмерных течениях. Такое устройство, включающее детекторы возмущений, устройства воздействия (актюаторы) и систему управления, разрушает возмущения путем их взаимного подавления или другими способами. Современная микромашина технология позволяет производить устройства микронных размеров. Для решения задач механики жидкости и газа эта технология дает возможность создавать микродатчики и микрогенераторы управления течением. В обзорной работе [1] детально рассматриваются различные типы сенсоров и актюаторов, а также специфика их изготовления и применения. Микромембрана, встроенная в поверхность обтекаемого аппарата, является одним из устройств, воздействующих на течение в пограничном слое.

В то же время невозможно представить реальный аппарат или аэродинамическую установку, в которых отсутствуют вибрации обтекаемой поверхности. Всегда имеются участки обшивки, которые при деформации несущих частей аппарата или под воздействием колебаний, например силовой установки, могут вибрировать. При этом, как правило, колеблется конечный участок поверхности, который представляет собой трехмерный виб-

ратор. На практике закон колебаний такого вибратора может быть произвольным. Это необязательно будут синусоидальные колебания с предельно малыми амплитудами. С помощью существующих теоретических методов не всегда можно исследовать результат воздействия на сдвиговое течение такого вибратора.

Первое экспериментальное исследование возбуждения возмущений в пограничном слое при вибрации поверхности проведено в работе [2], в которой рассмотрен простейший случай двумерного вибратора на плоской пластине. Сравнение с теоретическими результатами [3] показало, что линейная теория гидродинамической устойчивости и восприимчивости в двумерном случае правильно описывает этот процесс при малых амплитудах таких вибраций. Количественные экспериментальные данные по возбуждению трехмерных волн Толлмина — Шлихтинга в пограничном слое Блазиуса получены в работах [4, 5], в которых применен метод локализованных вибраторов. С помощью разложения “волновых поездов” на нормальные моды получен набор характеристик устойчивости пограничного слоя Блазиуса к трехмерным волнам Толлмина — Шлихтинга.

В последнее время в связи с быстрым развитием техники представляет интерес случай, когда амплитуды вибраций достаточно велики и возмущения в сдвиговом слое уже нельзя считать линейными. Теоретический анализ данной проблемы отсутствует. В работе [6] экспериментально исследовались возникновение и развитие возмущений, порождаемых трехмерной вибрирующей поверхностью в пограничном слое Блазиуса. В этом исследовании показано, что вибрирующая поверхность может возбуждать в пограничном слое возмущения, отличные от волн Толлмина — Шлихтинга. В случае, когда трехмерный вибратор совершает колебания низкой частоты сравнительно малой амплитуды, ниже по потоку развивается полосчатое пассивное возмущение, характерный продольный масштаб которого значительно превышает размер модели. Возмущение, представляющее собой чередующиеся области с превышением и дефектом скорости, сносится потоком и затухает. Авторы работы [6] классифицировали эти возмущения как модулированный в поперечном направлении пакет волн Толлмина — Шлихтинга, однако на основе исследований [7–9] можно заключить, что это возмущения другого типа, а именно “пассивные” полосчатые структуры. При увеличении эффективной амплитуды колебаний мембраны приблизительно в два раза на одном из полупериодов колебаний возникает возмущение типа “пафф”-структуры. В настоящее время такие возмущения достаточно хорошо исследованы в модельных экспериментах [10–12]. Считается, что они доминируют в пограничном слое при повышенной степени турбулентности набегающего потока [13, 14]. Из анализа [13, 14] следует, что, возможно, большую часть возмущений в случае повышенной степени турбулентности составляют “пассивные” возмущения.

Таким образом, задача воздействия на пограничный слой локализованным вибратором нетривиальна даже в случае течения на плоской пластине. Как показывают результаты работы [15], градиент давления существенно влияет на развитие локализованных возмущений. В [15] описываются результаты численного моделирования развития трех типов возмущений в течении с градиентом давления: плоского волнового пакета, волны от точечного источника и полосчатых структур типа “пафф”. Показана доминирующая роль волновой составляющей в возмущениях при воздействии неблагоприятного градиента давления.

Известно, что в течении на крыле наблюдается преимущественно рост продольных структур типа вихрей Гёртлера по сравнению с двумерными волнами Толлмина — Шлихтинга. Опираясь только на результаты проведенных исследований, невозможно определить, какого рода возмущения будут генерироваться вибратором в пограничном слое на крыле. В данной работе экспериментально исследуются возникновение и развитие возмущений от вибрирующей поверхности в пограничном слое прямого крыла при больших

амплитудах вибраций низкой частоты. Развитие возмущений рассматривается в областях с положительным и отрицательным градиентами давления.

1. Методика проведения эксперимента. Исследования проводились в аэродинамической трубе МТ-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН с поперечным сечением рабочей части 200×200 мм и длиной 800 мм. Скорость набегающего потока $U_0 = 6,6$ м/с, степень турбулентности потока ε не превышала 0,3 %. В качестве модели использован крыловой профиль размахом 200 мм с хордой 290 мм. Профиль был установлен горизонтально в рабочей части трубы под нулевым углом атаки. Для исследования влияния благоприятного и неблагоприятного градиентов давления на развитие возмущений мембрану поместили на небольшом расстоянии от носика крыла, где поверхность модели имела довольно большую кривизну. Использование методики изготовления мембраны [6] оказалось невозможным, поскольку для этого необходимо прорезать в поверхности модели паз того же размера, что и вибрирующая поверхность, что приводит к искажению основного течения. Поэтому мембрана наклеивалась на поверхность модели таким образом, чтобы в нерабочем состоянии она прилегала к поверхности, а под ней прорезалась поперечная щель шириной 2 мм и длиной 17 мм. Мембрана была наклеена на расстоянии 17 мм от передней кромки профиля и представляла собой прямоугольную эластичную (латексную) поверхность с размерами 28×18 мм, укрепленную лавсановой наклейкой с размерами 25×15 мм. Мембрана приводилась в движение посредством пульсаций давления от динамической головки громкоговорителя, соединенной с камерой под щелью мембраны пневмотрассой (рис. 1). На динамик громкоговорителя с генератора подавался электрический сигнал прямоугольной формы различной амплитуды, в результате чего мембрана совершала возвратно-поступательные движения с частотой 3 Гц, перемещаясь из положения покоя в поднятое положение с амплитудой $(0,6 \pm 0,1)$ мм.

Измерения проводились однопиточным датчиком термоанемометра постоянной температуры. Диаметр нити датчика составлял 6 мкм, длина — около 1 мм. Измерялись продольная компонента пульсационной составляющей скорости u' и средняя скорость U в различных точках пространства (x, y, z) . Ось x с началом отсчета на передней кромке профиля направлена вдоль потока, ось z с началом на оси симметрии мембраны расположена вдоль размаха модели, ось y с началом отсчета на поверхности крылового профиля перпендикулярна осям x, z . Скорость набегающего потока в рабочей части аэродинамической трубы измерялась насадком Пито — Прандтля, соединенного с наклонным жидкостным микроанометром. Датчик термоанемометра тарировался в свободном потоке напротив

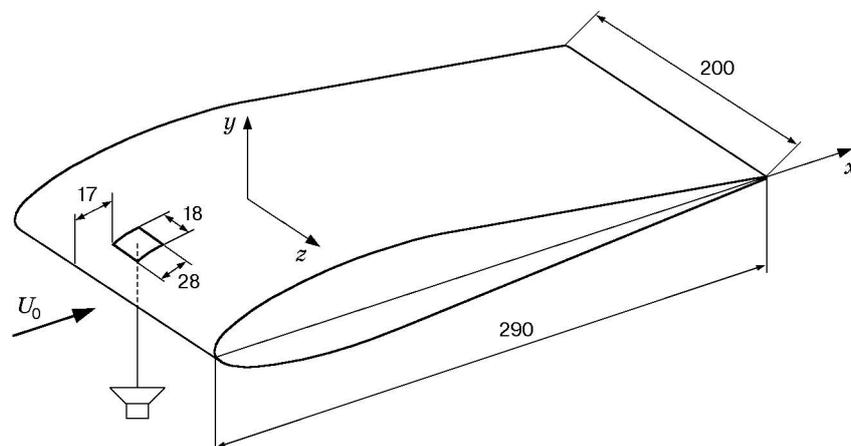


Рис. 1. Схема эксперимента

трубки Пито — Прандтля при скоростях потока 3–20 м/с, так чтобы погрешность в определении средней скорости была менее 2 %. Процесс тарировки и применяемое экспериментальное оборудование подробно описаны в работах [11, 16].

Осциллограммы сигнала с моста термоанемометра через аналого-цифровой преобразователь вводились в компьютер и осреднялись по ансамблю для улучшения соотношения сигнал/шум, что позволяло выделять полезный сигнал из недетерминированных шумов. Осреднение проводилось по 30–60 единичным реализациям в зависимости от уровней выделяемого сигнала и шума. Дальнейшая обработка результатов измерений также проводилась на компьютере с использованием программы пространственно-временного фурье-анализа по методике, изложенной в работе [11].

Измерения процесса развития возмущений по трансверсальной координате z проводились в области максимума их интенсивности по нормали к поверхности модели.

2. Результаты эксперимента. При колебаниях мембраны вблизи передней кромки крылового профиля генерировалось локализованное по трансверсальной координате и времени возмущение, которое сносилось вниз по потоку. Положение мембраны вблизи передней кромки было выбрано исходя из того, что пограничный слой здесь тонкий и наиболее чувствителен к вводимым возмущениям. Установлено, что генерируемое возмущение является “пафф”-структурой, поскольку наблюдались чередование в трансверсальном направлении областей с превышением и дефектом скорости, локализация структуры в трансверсальном направлении [6], а также наклонные волны по бокам структуры. Кроме того, анализ $(y-t)$ -диаграмм показал, что максимум возмущения находится на расстоянии $y_{u' \max}/\delta \approx 0,5$, т. е. дальше от стенки, чем для пакета волн Толлмина — Шлихтинга ($y_{u' \max}/\delta \approx 0,3 \div 0,4$). Здесь δ — толщина пограничного слоя.

“Пафф”-структура возникала вблизи передней кромки профиля в области с благоприятным градиентом давления и сносилась вниз по потоку в область с неблагоприятным градиентом давления. На рис. 2 приведено распределение скорости над профилем. Точка $x = 100$ мм разделяет области с благоприятным и неблагоприятным градиентами, и развитие “пафф”-структуры в этих областях различно.

При благоприятном градиенте давления ($x = 0 \div 100$ мм) процесс развития “пафф”-структуры такой же, как на плоской пластине в пограничном слое Блазиуса. В работе [13] исследовались возмущения от колебаний мембраны, помещенной на поверхности плоской пластины. Развитие возмущений происходило при нейтральном градиенте давления. Возникающие продольные локализованные структуры растягивались по потоку из-за разности скоростей переднего и заднего фронтов и затухали. На крыловом профиле в области с благоприятным градиентом давления поведение возмущений аналогично, поскольку благоприятный градиент давления в отличие от нейтрального усиливает затухание возмущения. При дальнейшем движении возмущения вниз по потоку процесс его развития менялся, так как изменялся градиент давления.

В зоне с неблагоприятным градиентом давления ($x = 100 \div 300$ мм) появляются особенности, не наблюдавшиеся в случае благоприятного градиента давления. На рис. 3 представлены диаграммы возмущения. На рис. 3, *a* видно, что передний и задний фронты возмущения начинают развиваться вниз по потоку, а центральная часть, представляющая собой низкочастотный пакет волн, остается неизменной. На переднем и в меньшей степени на заднем фронтах возмущения возбуждаются высокочастотные колебания, интенсивно растущие при переходе структуры в область с неблагоприятным градиентом давления. Различие пульсаций на переднем и заднем фронтах объясняется, по-видимому, особенностью работы мембраны. Подъем мембраны осуществляется более резко, чем опускание.

На рис. 4, 5 показана эволюция “пафф”-структуры. На больших расстояниях от мембраны ($x = 165 \div 225$ мм) хорошо видны развивающиеся на передней и задней кромках

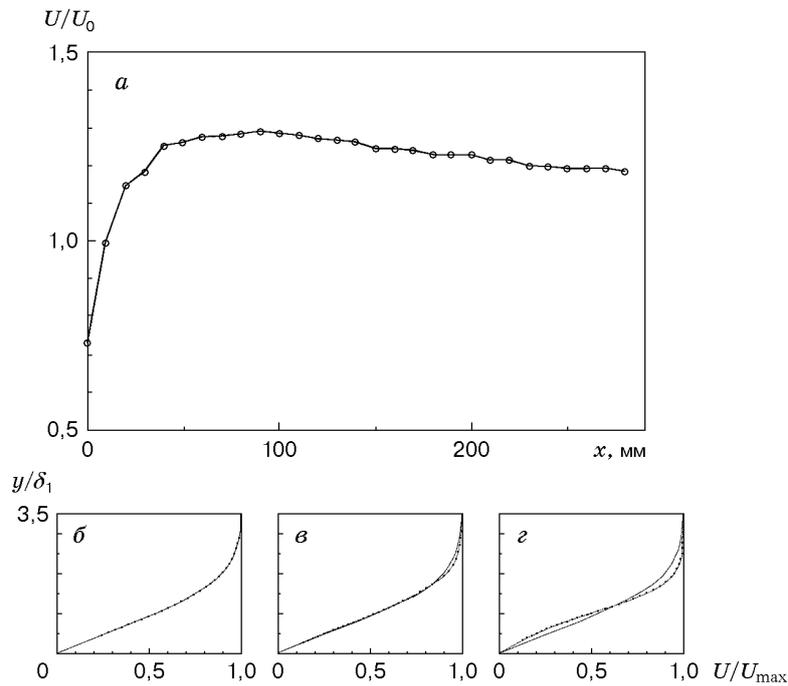


Рис. 2. Распределение скорости на внешней границе пограничного слоя вдоль хорды крыла (а) и профили средней скорости по нормали к стенке (точки) в сравнении с профилем Блазиуса (сплошные линии) (б-е):
 б — $x = 45$ мм, $\delta_1 = 0,45$ мм; в — $x = 125$ мм, $\delta_1 = 0,95$ мм; г — $x = 245$ мм, $\delta_1 = 1,92$ мм (δ_1 — толщина вытеснения)

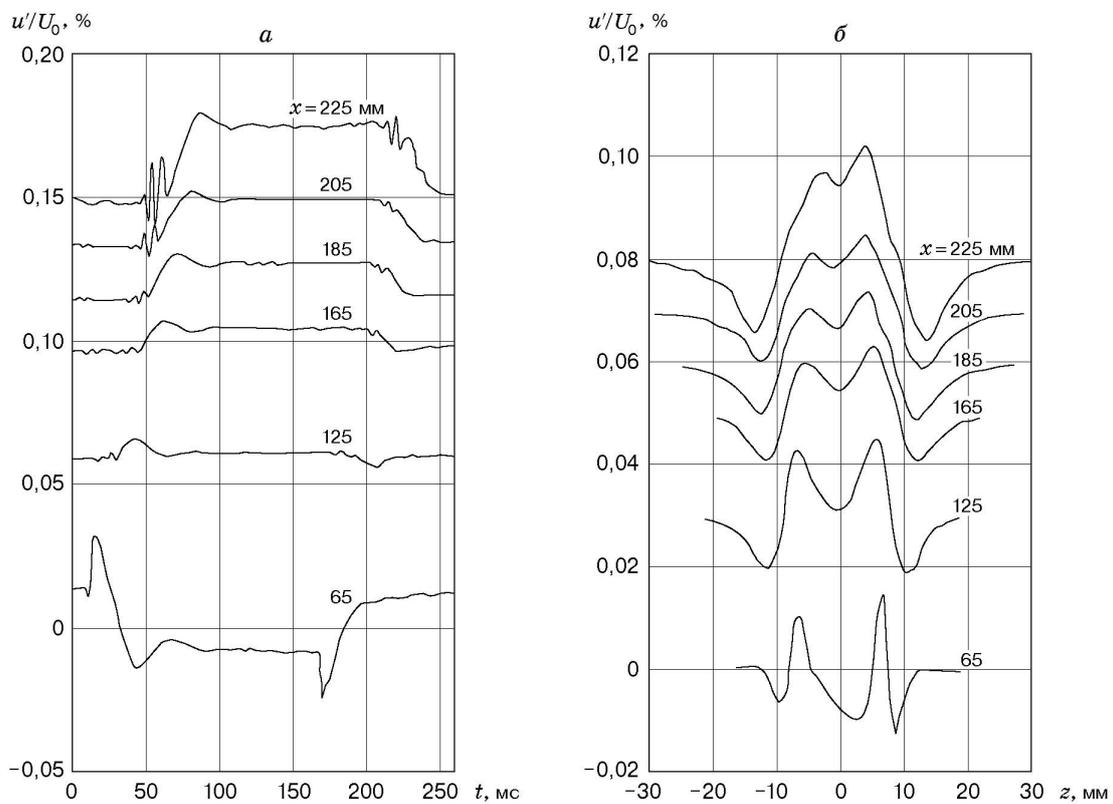


Рис. 3. Осциллограммы пульсаций скорости u' для различных значений x при $z = 0$ (а) и по трансверсальной координате z при $t = 125$ мс (б)

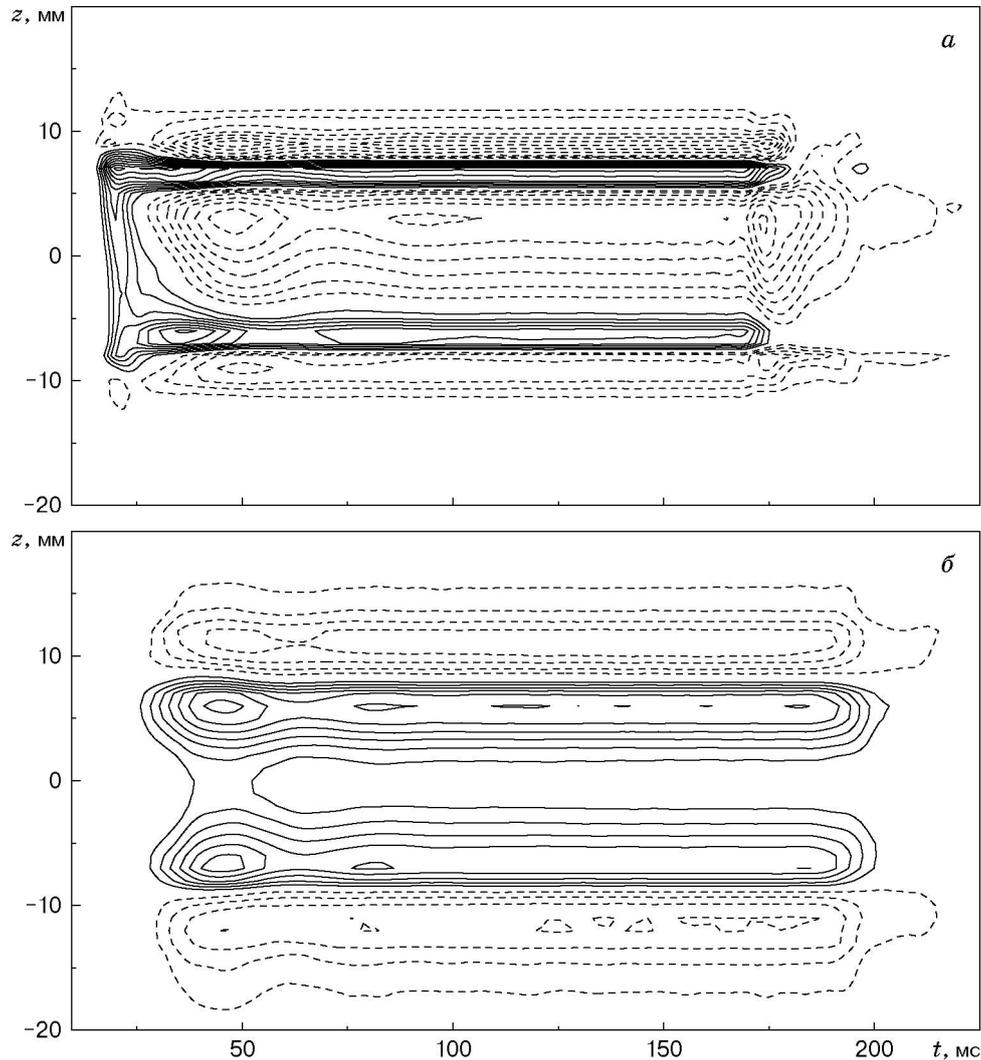


Рис. 4. Развитие возмущения в пограничном слое от вибратора в области с благоприятным градиентом давления (изолинии пульсаций скорости u' в плоскости (z, t) на уровне $y = y_{u' \max}$):

сплошные линии — превышение скорости, штриховые — дефект скорости; a — $x = 65$ мм, $U = 0,45U_0$, $(u'/U)_{\min} = -0,04$, $(u'/U)_{\max} = 0,045$, $\Delta(u'/U) = 0,005$; b — $x = 125$ мм, $U = 0,47U_0$, $(u'/U)_{\min} = -0,02$, $(u'/U)_{\max} = 0,035$, $\Delta(u'/U) = 0,005$

“пафф”-структуры волны Толлмина — Шлихтинга (“усы”). Их амплитуда сравнима с амплитудой “пафф”-структуры и составляет около $(0,01 \div 0,03)U_0$, а на конечной стадии развития возмущения превосходит ее.

“Усы” представляют собой две волны, распространяющиеся под углом 45° к оси x в обе стороны от возмущения. Длина волны составляет около 30 мм. Однако нельзя утверждать, что длина мембраны (28 мм) определяет длину волны. Не исключено, что близость этих значений — случайное совпадение. Динамика развития “усов” исследовалась при частотной фильтрации “пафф”-структуры на различных стадиях развития. Использовались прямое и обратное преобразования Фурье по времени и фильтрация низкочастотных компонент (менее 70 Гц). Анализ показал, что высокочастотные возмущения затухают при движении возмущения в области с благоприятным и нейтральным градиентами давления ($x = 65 \div 125$ мм) и усиливаются в области с неблагоприятным градиентом

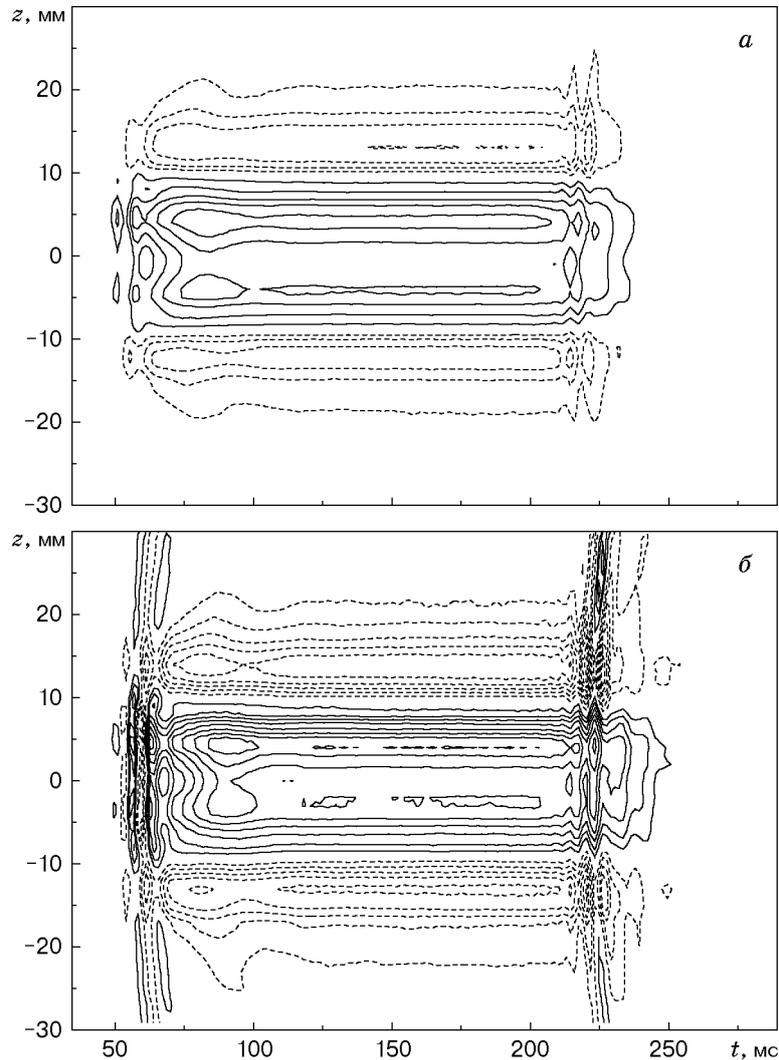


Рис. 5. Развитие возмущения в пограничном слое от вибратора в области с неблагоприятным градиентом давления (обозначения те же, что на рис. 4):
a — $x = 205$ мм, $U = 0,44U_0$, $(u'/U)_{\min} = -0,02$, $(u'/U)_{\max} = 0,025$, $\Delta(u'/U) = 0,005$;
б — $x = 225$ мм, $U = 0,57U_0$, $(u'/U)_{\min} = -0,035$, $(u'/U)_{\max} = 0,04$, $\Delta(u'/U) = 0,005$

($x = 125 \div 225$ мм), так как волны Толлмина — Шлихтинга чувствительны к изменению градиента давления.

Как известно, градиенты давления вдоль потока существенно влияют на усиление волн Толлмина — Шлихтинга. Этим объясняется появление волн Толлмина — Шлихтинга именно на фронтах возмущения и их рост в области с неблагоприятным градиентом давления. Максимальный градиент скорости dU/dx в данном случае наблюдается на переднем фронте возмущения. При дополнительном влиянии градиента давления внешнего потока именно на фронтах начинают зарождаться и развиваться “усы”. При генерации структур с плавными фронтами можно ожидать отсутствия “усов”.

На низкочастотные компоненты, которые представляют собой “пафф”-структуру, изменение градиента давления не оказывает сильного влияния (нечувствительность низкочастотных флуктуаций к градиентам давления отмечалась и в экспериментах [17, 18]). В зоне с благоприятным градиентом давления “пафф”-структура затухает. В случае малых амплитуд при попадании “пафф”-структуры в область неблагоприятного градиен-

та давления амплитуда возмущения уменьшается. Однако при отрицательном градиенте давления "пафф"-структура нарастает. Возможно, это объясняется взаимодействием с волнами Толлмина — Шлихтинга. В экспериментах [13, 19] установлено, что взаимодействие "пафф"-структур и волн Толлмина — Шлихтинга приводит к росту амплитуды возмущения и образованию турбулентного пятна, даже если "пафф"-структура и волны Толлмина — Шлихтинга затухали, когда генерировались независимо.

Следует отметить, что на больших расстояниях от мембраны влияние низкочастотных компонент на эволюцию пограничного слоя ослабевает. Главную роль начинают играть быстрорастущие волны Толлмина — Шлихтинга, которые вызывают преждевременный отрыв пограничного слоя и образование турбулентных пятен.

Особенностью развития возмущения является также срастание двух областей с превышением скорости, образовавшихся на краях мембраны (см. рис. 3,б). На начальной стадии они разделены областью с дефектом скорости. При движении структуры вниз по потоку ширина этих областей увеличивается, в итоге они сливаются. Ширина областей пропорциональна удвоенной толщине пограничного слоя.

Заключение. При колебаниях трехмерного вибратора, расположенного вблизи носовой части крылового профиля, в пограничном слое одновременно генерируются два типа возмущений: квазистационарные продольные структуры типа "пафф" и волновые пакеты, сопровождающие продольные структуры. Развивающиеся в потоке продольные структуры создают неустойчивые области на переднем и заднем фронтах, в которых в случае неблагоприятного градиента давления происходит интенсивный рост волновых пакетов, состоящих из плоской волны и пары наклонных волн. Волновые пакеты модулированы по трансверсальной координате вследствие неоднородного трехмерного среднего течения в этих областях, обусловленного продольными структурами. Вниз по потоку продольные структуры слабо затухают с незначительным изменением характерного поперечного размера, сохраняя локализацию в трансверсальном направлении. При этом ламинарно-турбулентный переход может быть обусловлен вторичными колебаниями, развивающимися на продольных структурах [20], и волновыми пакетами, возникающими на фронтах возмущения.

Таким образом, микромембрана, встроенная в поверхность модели прямого крыла, является источником как пакетов волн неустойчивости, так и продольных, локализованных возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lefdahl L., Gad-el-Hak M. MEMS applications in turbulence and control // Progr. Aerospace Sci. 1999. V. 35, N 2. P. 101–195.
2. Гилев В. М., Козлов В. В. Возбуждение волн Толлмина — Шлихтинга в пограничном слое на вибраторе. Новосибирск, 1983. (Препр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 19-83).
3. Тумин А. М., Федоров А. В. Возбуждение волн неустойчивости в пограничном слое на вибрирующей поверхности // ПМТФ. 1983. № 3. С. 72–79.
4. Качанов Ю. С., Оболенцева Т. Г. Развитие трехмерных возмущений в пограничном слое Блазиуса. 2. Характеристики устойчивости // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4, № 4. С. 403–415.
5. Kachanov Yu. S. Three-dimensional receptivity of boundary layers // Europ. J. Mech. B. Fluids. 2000. V. 19, N 5. P. 723–744.
6. Чернорай В. Г., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В. Генерация локализованных возмущений вибрирующей поверхностью // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7, № 3. С. 339–351.

7. **Westin K. J. A., Bakcinov A. A., Kozlov V. V., Alfredsson P. H.** Experiments on localized disturbances in a flat plate boundary layer. Pt 1. The receptivity and evolution of a localized free stream disturbance // *Europ. J. Mech. B. Fluids*. 1998. V. 17, N 6. P. 823–846.
8. **Bakcinov A. A., Westin K. J. A., Kozlov V. V., Alfredsson P. H.** Experiments on localized disturbances in a flat plate boundary layer. Pt 2. Interaction between localized disturbances and TS-waves // *Ibid.* P. 847–873.
9. **Альфредссон П. Х., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Генерация и развитие “пассивных” возмущений в пограничном слое Блазиуса // Тез. докл. Междунар. конф. “Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей”, Новосибирск, 25–27 апр. 2001 г. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО РАН, 2001. Вып. 8. С. 7, 8.
10. **Бакчинов А. А., Грек Г. Р., Козлов В. В.** Развитие локализованных возмущений типа “пафф” и “зарождающееся” пятно в безградиентном пограничном слое // *Сиб. физ.-техн. журн.* 1993. Вып. 6. С. 11–21.
11. **Бакчинов А. А., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Экспериментальное исследование процесса развития и структуры локализованных вихревых возмущений в пограничном слое на плоской пластине. Новосибирск, 1997. (Препр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 1-97).
12. **Grek H. R., Kozlov V. V., Ramazanov M. P.** Three types of disturbances from the point source in the boundary layer // *Laminar-turbulent transition*. Berlin: Springer-Verlag, 1985. P. 267–272.
13. **Грек Г. Р., Козлов В. В., Рамазанов М. П.** Ламинарно-турбулентный переход при повышенной степени турбулентности набегающего потока: Обзор // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.* 1991. Вып. 6. С. 106–137.
14. **Grek H. R., Dey J., Kozlov V. V., et al.** Experimental analysis of the process of the formation of turbulence in the boundary layer at higher degree of turbulence of windstream: Rep. / *Indian Inst. Sci.* 91-FM-2. Bangalore, India, 1991.
15. **Bech K. H., Henkes R. A. W. M., Henningson D. S.** Linear and nonlinear development of localized disturbances in zero and adverse pressure gradient boundary-layers // *Phys. Fluids*. 1998. V. 10, N 6. P. 115–131.
16. **Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Чернорай В. Г.** Экспериментальное исследование механизма вторичного высокочастотного разрушения Λ -структуры // *Теплофизика и аэромеханика*. 1999. Т. 6, № 4. С. 445–461.
17. **Kozlov V. E., Kuznetsov V. R., Mineev B. I., Sekundov A. N.** The influence of free-stream turbulence and surface ribbing on the characteristics of a transitional boundary layer // *Near-wall turbulence: Proc. of the 1988 Zorian Zorac mem. conf.* Hemisphere, 1990. P. 172–189.
18. **Kendall J. M.** Studies on laminar boundary layer receptivity to freestream turbulence near a leading edge // *Boundary layer stability and transition to turbulence*. S. l., 1991. V. 114. P. 23–30.
19. **Грек Г. Р., Козлов В. В.** Взаимодействие волн Толлмина — Шлихтинга с локализованными возмущениями // *Сиб. физ.-техн. журн.* 1992. Вып. 5. С. 68–76.
20. **Бакчинов А. А., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Экспериментальное исследование взаимодействия продольных “полосчатых” структур с высокочастотным возмущением // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 1998. № 5. С. 39–49.