

УДК 532.526.3

© 2007 г. В. Н. ГОРЕВ, М. М. КАТАСОНОВ, В. В. КОЗЛОВ

ВОЛНОВЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ПРОДОЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА

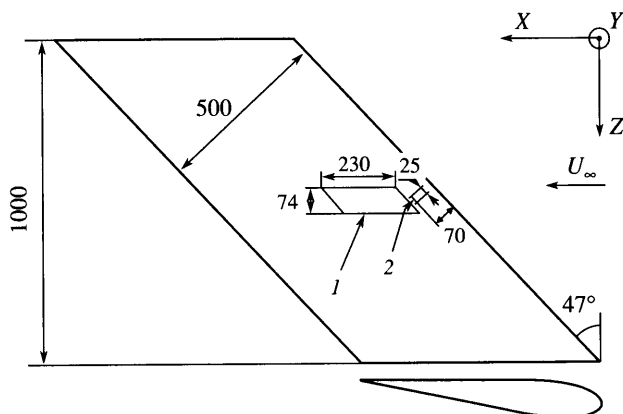
В условиях модельного эксперимента в пограничном слое скользящего крыла в областях течения, предшествующих фронтам продольных структур, впервые получены волновые пакеты (предвестники). Исследованы характеристики и динамика развития вниз по потоку волновых пакетов и порождающих их продольных структур. Показано, что предвестники способны преобразовываться в турбулентные пятна и таким образом приводить к ламинарно-турбулентному переходу. Проведено сравнение отдельных составляющих предвестника с периодической волной неустойчивости.

Ключевые слова: Ламинарно-турбулентный переход, продольная структура, волновой пакет, турбулентное пятно, скользящее крыло, термоанемометрия.

Среди объектов исследования в аэрофизике процесс перехода течения от ламинарного состояния к турбулентному является, пожалуй, одним из интереснейших и сложных явлений. Ламинарно-турбулентный переход имеет место в различных сдвиговых течениях, таких как пограничные слои, струи, течения в каналах [1]. Интерес исследователей к процессу перехода объясняется как желанием получить новые фундаментальные знания, которые позволят дополнить известную на сегодняшний день физическую картину явления, так и технической стороной вопроса, в частности снижением аэродинамического сопротивления и шумности летательных аппаратов.

Потенциальная возможность существенного снижения сопротивления путем затягивания ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое обтекаемых тел методами активного управления пристенным течением хорошо известна. Такие методы, в частности с использованием технологии микроэлектромеханических систем, предполагают локальное импульсное воздействие на вихревые возмущения, присутствующие в слое сдвига, на ранних этапах их развития [2, 3]. Однако в случае импульсного воздействия в пограничный слой вводится возмущение с широким спектром частот, часть из которых попадает в область неустойчивости течения (если таковая имеется), в результате в пограничном слое возникнет волновой пакет, который будет нарастать ниже по потоку и может привести к образованию турбулентного пятна. Таким образом, затягивание перехода к турбулентности не будет достигнуто. Возникновение волновых пакетов неоднократно наблюдалось в экспериментах по исследованию нестационарных продольных структур в пограничных слоях плоской пластины [4, 5] и прямого крыла [6–8], возбуждаемых с помощью мембраны или методом вдува (отсоса). Явление получило название “предвестник”, поскольку предшествует фронту продольной структуры. Как было показано ранее [8], в пограничном слое прямого крыла предвестники – пакеты волн Толлмина–Шлихтинга. Предварительные измерения в пограничном слое со скольжением [7] также показали присутствие подобных возмущений.

В настоящей работе рассматриваются особенности возникновения и развития вниз по потоку волновых пакетов предвестников и порождающих их продольных структур в пограничном слое скользящего крыла, в частности исследуются эволюция пространственной структуры предвестников и их роль в процессе перехода к турбулентности. Прово-



Фиг. 1. Схема эксперимента: 1 – область измерений; 2 – источник возмущений (щель)

дится сравнение развития волновых пакетов с периодической бегущей волной такой же частоты.

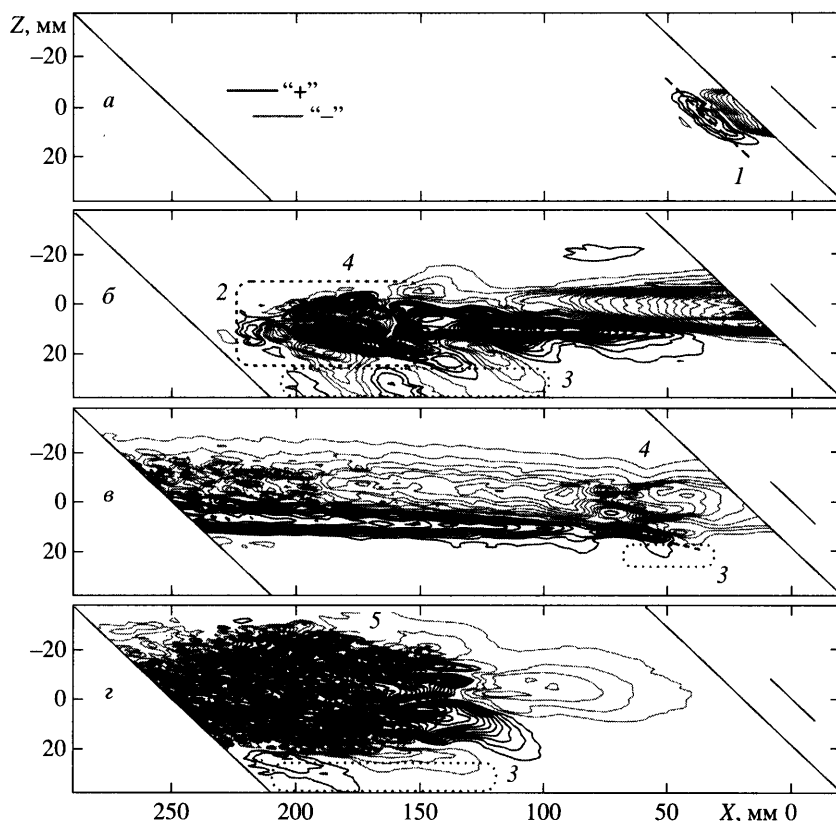
1. Методика эксперимента. Эксперимент проводили в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН с поперечным сечением рабочей части $10^3 \times 10^3$ мм и длиной $4 \cdot 10^3$ мм. Скорость набегающего потока $U_\infty = 7$ м/с, степень турбулентности потока не превышала 0.03%. В качестве модели использован профиль крыла с хордой 500 мм и углом скольжения 47° , имеющий участок поверхности малой кривизны, близкий к плоскому (фиг. 1). Возмущения вводились в пограничный слой методом вдува (отсоса) через щель в поверхности модели, длиной 25 мм, которая располагалась параллельно передней кромке на расстоянии 70 мм от нее. Толщина пограничного слоя в области измерений составляла 2–4 мм ($Re_\delta \approx 2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$). Число Рейнольдса по хорде крыла $Re \approx 5.1 \cdot 10^5$.

Вдув (отсос) производился с помощью компрессора (форвакуумного насоса), длительность регулировалась быстродействующим электромагнитным клапаном, синхронизованным с системой записи сигнала. Компрессор (насос) подключался к источнику возмущений (щель) пневмотрассой. В случае необходимости импульс вдува (отсоса) сглаживался добавлением в пневмотрассу демпфирующей емкости (демпфера). В случае генерации периодических возмущений к пневмотрассе вместо компрессора или форвакуумного насоса подключался динамический громкоговоритель, соединенный с генератором синусоидальных сигналов. Так же, как и клапан, генератор был синхронизован с системой записи сигнала.

Измерения проводились однопунктным датчиком термоанемометра постоянной температуры. Диаметр нити датчика 6 мкм, длина – около 1 мм. Скорость набегающего потока U_∞ в рабочей части аэродинамической трубы измерялась насадком Пито–Прандтля, соединенным с электронным манометром.

Начало координат выбрано в центре щели. Ось X направлена вдоль потока, ось Z – нормально к потоку и лежит в плоскости крыла, ось Y перпендикулярна осям X, Z .

Измерения проводились с использованием автоматического координатного устройства, способного перемещать датчик с точностью до 5 мкм. Для изучения пространственной геометрии рассматриваемых возмущений применялась методика термоанемометрической визуализации [9]. Измерялись двумерные поля продольной скорости в плоскости, нормальной (XY), проходящей через центр щели, а также вдоль поверхности, огибающей модель на уровне максимума возмущений. Кроме того, для некоторых слу-



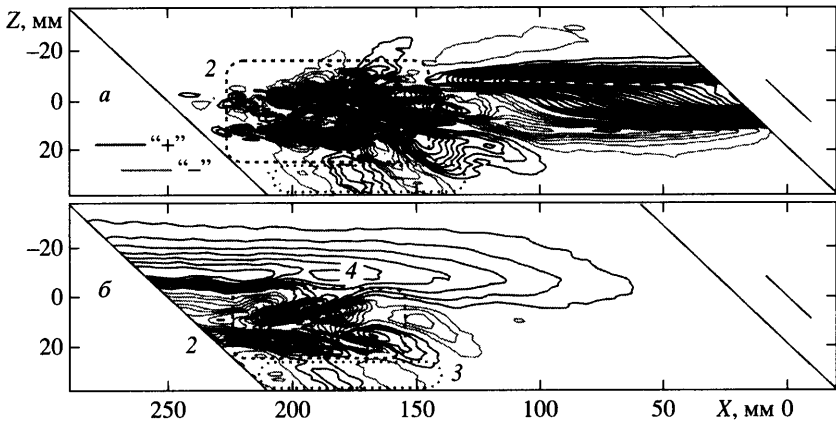
Фиг. 2. Изолинии мгновенных полей пульсационной составляющей продольной компоненты скорости u для полосчатой структуры, полученной методом вдува, и предвестников на ее переднем (а, б) и заднем (в, г) фронтах в различные моменты времени t ; шаг изолиний $\Delta = 1\%$ от U_∞ : 1 – фронт волнового пакета; 2 – ядро предвестника; 3 – квазидвумерный след; 4 – Λ -структуры; 5 – турбулентное пятно

чаев проводились измерения трехмерных полей скорости, охватывающих участок пограничного слоя в области измерений.

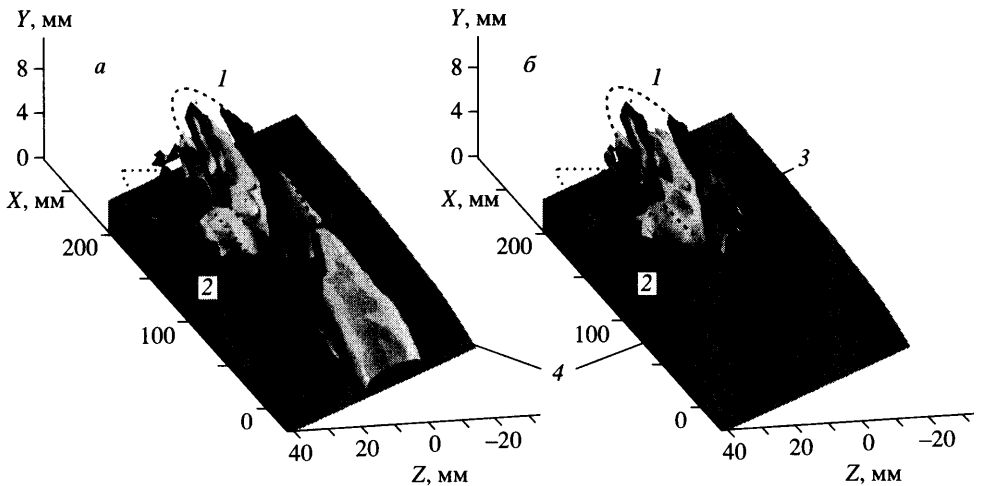
2. Результаты и обсуждение. Волновые пакеты. На начальном этапе исследования были проведены предварительные измерения, которые позволили подобрать необходимые условия эксперимента, в частности характеристики продольной структуры и границы области измерений. Угол атаки подбирался так, чтобы плоский участок поверхности был расположен параллельно направлению внешнего потока, что существенно упростило процесс измерений.

Отдельно рассматривались случаи генерации продольного возмущения методами вдува (фиг. 2) и отсоса (фиг. 3). На фиг. 2 и далее $u = u_*/U_\infty$ – пульсации безразмерной продольной составляющей скорости, %, где u_* – их размерный аналог. Для каждого из этих случаев проводились серии измерений двумерных полей продольной составляющей скорости участка пограничного слоя, возмущенного продольной структурой на уровне максимума среднеквадратичного отклонения пульсационной составляющей скорости. В случае использования отсоса было измерено трехмерное поле скорости (фиг. 4), охватывающее область измерений.

Отдельно для вдува и отсоса проводились измерения с использованием демпфера в составе пневмотрассы (фиг. 5) и без демпфера (фиг. 2–4). С помощью демпфера дости-



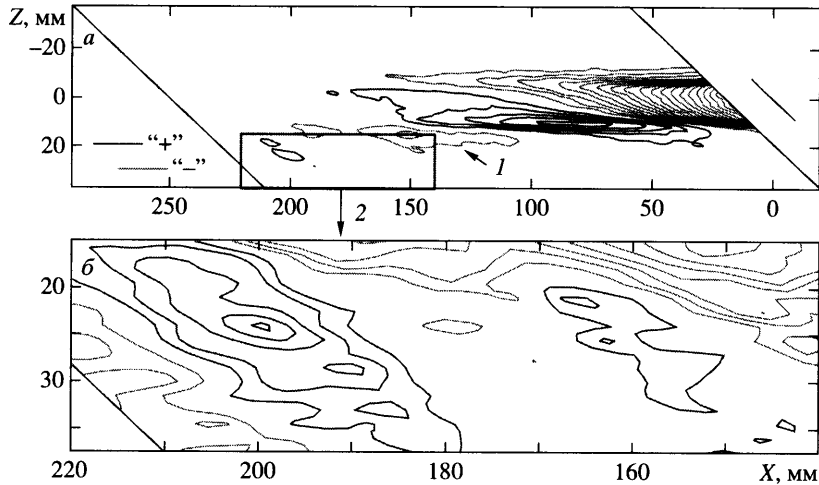
Фиг. 3. Изолинии мгновенных полей пульсационной составляющей продольной компоненты скорости u для полосчатой структуры, полученной методом отсоса, и предвестников на ее переднем (а), $\Delta = 1\%$, и заднем (б), $\Delta = 2\%$, фронтах в различные моменты времени t ; обозначения как на фиг. 2



Фиг. 4. Компьютерная визуализация поздней стадии развития предвестника на переднем фронте продольной структуры, полученной с помощью отсоса (а); спектральная компонента соответствующая волновому пакету (б); светлые области показывают изоповерхности, для которых $u = 3.5\%$, темные $-u = -3.5\%$: 1 – ядро предвестника; 2 – квазидвумерный след; 3 – Λ -структуры; 4 – поверхность модели крыла

галось сглаживание переднего и заднего фронтов продольного возмущения, что, как показано в [4, 5], оказывало влияние на формирование предвестников в пограничном слое плоской пластины.

Компьютерные визуализации исследуемых возмущений, выполненные на основе измеренных полей скорости, позволили сформулировать и обобщить основные особенности развития предвестников в условиях скользящего крыла. Эти закономерности несколько различаются для пакетов, возникающих на переднем и заднем фронтах продольной структуры.



Фиг. 5. Предвестник на переднем фронте продольной структуры, полученной методом вдува с использованием демпфера в составе пневмотрассы; а – $\Delta = 1\%$, б – $\Delta = 0.2\%$: 1 – вторичный максимум продольной структуры; 2 – волновой пакет

Несглаженные фронты. В случае генерации продольных структур без использования демпфера величины локального градиента скорости на переднем и заднем фронтах продольного возмущения получаются достаточно большими для того, чтобы развитие предвестников происходило весьма интенсивно (фиг. 2, 3).

На начальном этапе развития фронт продольного возмущения параллелен передней кромке крыла, что определяется ориентацией щели. В области потока непосредственно перед фронтом возникает квазидвумерный волновой пакет, также параллельный передней кромке крыла (фиг. 2, а). Далее происходит нарушение двумерности, предвестник разделяется на сугубо трехмерное ядро и на практически нейтральный пакет волн, ориентированных вдоль передней кромки крыла – след (фиг. 2, б; 3, а, б). Амплитуда ядра быстро растет, и ниже по потоку наблюдается формирование Λ -структур. Особенно отчетливо Λ -структура обнаруживалась в области переднего фронта продольного возмущения, полученного методом вдува (фиг. 2, б). На заднем фронте данного возмущения видна пара Λ -структур. В случае отсоса измерений, проведенных в двумерной области потока огибающей поверхность модели на уровне максимума пульсаций, оказалось недостаточно для того, чтобы с уверенностью подтвердить или опровергнуть наличие Λ -структуры на переднем фронте продольного возмущения (фиг. 3, а). Ввиду этого были проведены измерения трехмерной области потока (фиг. 4, а), которые, после удаления низкочастотной составляющей, соответствующей продольному возмущению, позволили обнаружить Λ -структуру (фиг. 4, б).

Ниже по потоку ядро, представляющее собой пакет Λ -структур, превращается в турбулентное пятно (фиг. 2, з). Непосредственно образование турбулентного пятна зафиксировано на заднем фронте продольной структуры при вдуве, однако и в остальных случаях предвестники растут достаточно быстро, что далее приводит к турбулентности.

Если пакет на переднем фронте фактически бежит по невозмущенному пограничному слою, то развитие волновых пакетов на заднем фронте продольной структуры происходит в условиях течения, искаженного продольным возмущением. Динамика развития предвестников в этом случае существенно зависит от условий генерации продольного возмущения, в частности сильно различаются случаи вдува (фиг. 2, з) и отсоса (фиг. 3, б). Пакеты, возникающие на заднем фронте продольного возмущения, по-

лученного методом вдува, распространяются по области пограничного слоя с дефектом скорости. Профиль продольной компоненты средней скорости этой части течения менее наполненный и соответственно менее устойчивый. Следовательно, эволюция предвестника в турбулентное пятно в данных условиях происходит значительно быстрее. Тем не менее волновой пакет проходит все стадии развития, характерные для предвестников, развивающихся в других условиях (например, на переднем фронте).

При генерации продольной структуры с помощью отсоса волновой пакет возникает в области пограничного слоя с превышением скорости. Ввиду того что эта область пограничного слоя более устойчива, на начальном этапе рост амплитуды предвестника не наблюдается. Однако, как только часть волнового пакета достигает области с дефектом скорости, начинается интенсивный рост волнового пакета. Далее выделяются нарастающее вниз по потоку ядро, состоящее из Λ -структур, и квазидвумерный след, амплитуда которого меняется слабо (фиг. 3, б).

Следует заметить, что развитие турбулентного пятна на плоской пластине, исследованное в [10], происходит мультипликацией Λ -структур, причем в трансверсальном направлении от турбулентного пятна расходятся наклонные волны. С другой стороны, в [11] рассмотрено развитие Λ -структуры в пограничных слоях крыльев с различными углами скольжения. В этом исследовании показано, что с увеличением угла скольжения Λ -структура постепенно становится все более несимметричной, однако механизм ее развития остается тем же, что и в пограничном слое прямого крыла или плоской пластины, и качественно не меняется. Объединяя эти факты, можно утверждать, что поведение предвестника в пограничном слое скользящего крыла соответствует развитию зарождающегося турбулентного пятна. При этом ядро волнового пакета, состоящее из асимметричных Λ -структур, и есть будущее турбулентное пятно, а квазидвумерный след – не что иное, как след за этим пятном, как в [10]. Вследствие условий развития предвестника в пограничном слое скользящего крыла у следа отсутствует симметрия, он наблюдается только с одной стороны в трансверсальном направлении от ядра. Процесс развития волновых пакетов протекает с некоторыми нюансами, обусловленными параметрами возникновения, как, например, возбуждение предвестника на переднем или заднем фронте, случай генерации продольной структуры методом вдува либо отсоса. Однако в целом просматривается вполне определенный общий сценарий развития предвестников в случае не сглаженных с помощью демпфера фронтов продольного возмущения, показывающий, что волновые пакеты – зарождающиеся турбулентные пятна.

Сглаженные фронты. В данном разделе исследуются переходные явления, связанные с распространением продольных структур, фронты которых были сглажены путем включением демпфирующей емкости в пневмотрассу. В этом случае фронты продольного возмущения получаются более протяженными в направлении потока и, таким образом, можно добиться существенного уменьшения локального градиента скорости в области фронта.

Измерения показали, что в случае сглаженных фронтов волновой пакет все же возникает (фиг. 5). Однако динамика его развития значительно отличается от предвестников, образующихся перед фронтами с большим значениям локального градиента скорости. В частности, не наблюдается возникновение ядра и в целом амплитуда пакетов значительно ниже. Тем не менее, как и в описанном выше случае несглаженных фронтов, видны общие закономерности развития пакетов. Отметим, что в процессе развития продольных структур в пограничном слое скользящего крыла наблюдается их мультиплицирование, т.е. образование дополнительных максимумов в направлении размаха крыла (фиг. 5). В случае сглаженных фронтов эти дополнительные продольные вихри влияют на развитие предвестников.

Пакеты, возникающие на переднем фронте продольных структур, полученных методами как вдува (фиг. 5, а), так и отсоса, развиваются одинаково. Предвестник образуется в области предшествующей фронту продольной структуры и представляет собой

квазидвумерный пакет волн, фронты которых вследствие условий генерации на начальном этапе развития параллельны передней кромке крыла. Пакет слабо нарастает вниз по потоку, при этом квазидвумерная структура сохраняется, а количество максимумов увеличивается.

В области заднего фронта продольной структуры образование волнового пакета наблюдается только в области “вторичного” максимума продольного возмущения, образовавшегося за счет мультипликации последнего. Так же, как и на переднем фронте, предвестник представляет собой квазидвумерный пакет волн, слабо нарастающий вниз по потоку, фронты которого ориентированы в направлении передней кромки крыла.

Несмотря на то что в случае сглаженных фронтов волновые пакеты все же возникают, нарастают они значительно медленнее, чем предвестники в случае несглаженных фронтов, и в результате образование турбулентных пятен не наблюдается. Следовательно, с помощью метода вдува (отсоса) можно достаточно деликатно воздействовать на пограничный слой скользящих крыльев, практически не вызывая побочных явлений.

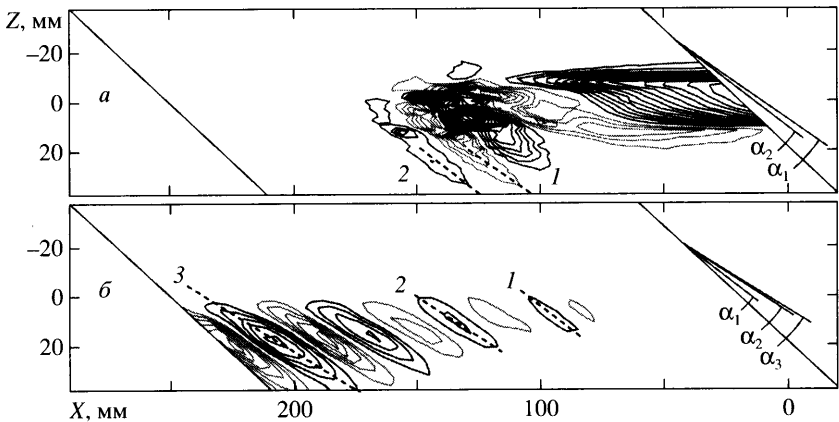
Из простых геометрических соображений понятно, что при фиксированном значении локального градиента скорости в области фронта продольной структуры, амплитуда и продолжительность генерации продольного возмущения связаны между собой. Таким образом, если локализованный нестационарный вдув (отсос) рассматривать как метод влияния на пограничный слой с целью затягивания процесса ламинарно-турбулентного перехода, следует иметь в виду, что на параметры вдува (отсоса) накладываются некоторые ограничения, дабы избежать образования предвестников, которые могут ускорить переход к турбулентности.

Периодические возмущения. В экспериментах по исследованию предвестников в некоторых условиях наблюдаются квазидвумерные волновые образования. В случае, когда фронты продольной структуры не сглажены с помощью демпфера – это следы, а в случае сглаженных фронтов – это сами предвестники. Соответственно возникает вопрос: как в пограничном слое данной конфигурации будут развиваться периодические возмущения с той же длиной волны. Чтобы получить бегущую волну к пневмотрассе, которая ведет к источнику возмущений (щели), вместо компрессора (форвакуумного насоса) был подключен динамический громкоговоритель. Максимальное значение амплитуды волны в пределах области измерений составляло 5%.

Геометрия фронтов волны практически повторяла геометрию квазидвумерных волновых пакетов (фиг. 6, а). В момент генерации на щели фронт волны естественным образом параллелен передней кромке крыла, поскольку на всей щели колебания происходят синфазно. Ниже по потоку эта параллельность нарушается, в результате фронты волны образуют с передней кромкой угол $\alpha \sim 5^\circ$ (фиг. 6, б). Фронт продольной структуры в момент зарождения на щели уже – волновой пакет, и он так же параллелен передней кромке крыла, т.е. условия генерации бегущего возмущения (волны) и волнового пакета подобны. В процессе развития фронт квазидвумерного волнового пакета так же, как и фронты бегущей волны, образует с передней кромкой крыла угол, близкий к 5° .

Заключение. Впервые в пограничном слое скользящего крыла получены волновые пакеты – предвестники фронтов продольных структур. Методом термоанемометрической визуализации изучена пространственная геометрия предвестников.

Обнаружено, что при достаточно большой величине локального градиента скорости на фронтах продольного возмущения предвестники на скользящем крыле в процессе развития могут трансформироваться в турбулентные пятна. Показано, что в условиях пограничного слоя скользящего крыла волновые пакеты возникают и в условиях существенно сглаженных фронтов продольной структуры. Найдено, что в составе предвестника присутствует квазидвумерная составляющая, ведущая себя подобно периодической волне с такой же частотой.



Фиг. 6. Предвестник на переднем фронте продольной структуры полученной методом отсоса (а), $\Delta = 1.5\%$; периодическая волна неустойчивости (б), $\Delta = 0.7\%$; величины α_1 , α_2 , α_3 – углы между соответствующими волновыми фронтами и передней кромкой крыла; для волнового пакета: $\alpha_1 = 8.3^\circ$, $\alpha_2 = 5.6^\circ$; для волны: $\alpha_1 = 5.6^\circ$, $\alpha_2 = 9.4^\circ$, $\alpha_3 = 11.0^\circ$

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 05-01-00034), ведущих научных школ РФ (№ НШ-964.2003.1), молодых российских ученых (МК-1655.2005.1, МК-101.2007.1) и проектом № РНП.2.1.2.3370 Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко А.В., Грек Г.Р., Довгаль А.В., Козлов В.В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. Москва; Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Ин-т компьютерных исследований, 2006. 304 с.
2. Gad-el-Hak M. Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management. Cambridge: Univ. Press, 2000. P. 448.
3. Haasl S., Mucha D., Chernoray V., Ebefors T., Enoksson P., Lofdahl L., Stemme G. Hybrid-mounted micromachined aluminum hotwires for wall shear-stress measurements // J. Microelectromech. Syst. 2005. V. 14. № 2. P. 254–260.
4. Альфредссон П.Х., Катасонов М.М., Козлов В.В. Генерация и развитие “пассивных” возмущений в пограничном слое Блазиуса // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8. № 3. С. 363–370.
5. Katasonov M.M., Park S.-H., Sung H.J., Kozlov V.V. Instability of streaky structures in a Blasius boundary layer // Exper. Fluids. 2005. V. 38. № 3. P. 363–371.
6. Чернорай В.Г., Спиридонов А.Н., Катасонов М.М., Козлов В.В. Генерация возмущений локализованным вибратором в пограничном слое прямого крыла // ПИМТФ. 2001. Т. 42. № 5. С. 37–45.
7. Горев В.Н., Катасонов М.М., Козлов В.В. Волновые предвестники продольных структур на прямом и скользящем крыле // Докл. РАН. 2006. Т. 410. № 1. С. 53–56.
8. 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.
9. Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л., Пратт П.Р. Термоанемометрическая визуализация турбулизации сложных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13. № 2. С. 229–237.
10. Чернорай В.Г., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Лефдаль Л., Грек Г.Р., Чун Х. Управление трансформацией Λ -структуры в турбулентное пятно с помощью риблет // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 575–585.
11. Pratt P.R., Chernoray V.G., Bakchinov A.A., Lofdahl L. A quantitative flow visualization of a point source disturbance in a swept wing boundary layer // Boundary Layer Transition in Aerodynamics. Book of abstracts EUROMECH Colloquium, Stuttgart, 2001. P. 423.