

03

Нестационарные эффекты в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем при трансзвуковых скоростях потока

© А.А. Сидоренко, А.Д. Будовский[†], П.А. Поливанов,
О.И. Вишняков

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

[†] E-mail: budovsky@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 9 февраля 2017 г.

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарных характеристик отрывного течения при взаимодействии пограничного слоя с ударной волной, возникающей на профилированном выступе в трансзвуковом потоке. Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе Т-325 при варьировании интенсивности и положения ударной волны. Течение исследовалось при помощи шпирен-визуализации, измерений давления и его пульсаций на поверхности модели, а также измерений полей скорости методом PIV. Результаты анализа экспериментальных данных показывают, что колебания ударной волны и пульсации течения в отрывной зоне связаны с возмущениями набегающего пограничного слоя.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.12.44709.16738

Данная экспериментальная работа посвящена исследованию взаимосвязи пульсаций в трансзвуковых отрывных течениях и имеет отношение к проблеме возникновения самоподдерживающихся колебаний в таких потоках. Наиболее известным случаем подобных колебаний является трансзвуковой бафтинг несущего крыла. До сих пор нерешенным остается вопрос о физических механизмах данного явления и, в частности, о природе взаимодействия возмущений и образования периодических структур, присущих данному течению. Было показано [1–3], что в случае изолированного профиля основным механизмом возникновения колебаний ударной волны является ее взаимодействие с возмущениями, генерируемыми на задней кромке профиля, либо

с акустическими возмущениями, генерируемыми ниже по течению и распространяющимися вверх по потоку через зоны дозвукового течения. При этом пульсации отрывной зоны тесно связаны с движением ударной волны или являются следствием ее колебаний. Отмечается, что даже при схожей постановке эксперимента существуют некоторые отличия в механизме возникновения пульсаций на несущем профиле под углом атаки и симметричном при нулевом угле атаки [4]. Однако взаимодействию ударной волны с пограничным слоем присущи низкочастотные колебания даже без наличия обратной связи через дозвуковое течение [5,6]. Как было показано на примере сверхзвуковых течений, такие колебания являются достаточно сильными, а их природа связана с откликом зоны взаимодействия на возмущения набегающего потока. Задачей данной работы является выявление роли данного механизма в трансзвуковых течениях.

Эксперименты были проведены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325. Течение исследовалось с помощью высокоскоростной шпирен-визуализации, тепловизионных измерений, измерений средней величины и пульсаций поверхностного давления, а также с помощью PIV. В рабочую часть аэродинамической трубы устанавливались специально разработанные сопловые вставки, образующие канал прямоугольного сечения высотой 208 мм и шириной 200 мм. На нижней стенке канала установлен гладкий профилированный выступ. Форма выступа была спроектирована при помощи CFD-моделирования так, чтобы над ним возникала локальная сверхзвуковая зона, замыкающаяся ударной волной. Длина выступа составляет $L = 281$ мм, максимальная высота — 14 мм. Характерная толщина пограничного слоя на выступе перед зоной взаимодействия составляет $\delta = 2$ мм, слой является турбулентным.

В конце рабочей части аэродинамической трубы имеется так называемое второе горло, образованное стенками вставок и эллиптическим валом, проходящим поперек канала. Размеры канала и сечение вала в этом месте подобраны так, чтобы возникала локальная сверхзвуковая зона, ограничивающая рост расхода газа с увеличением скорости потока. Плавная регулировка скорости потока в канале в этом случае обеспечивается изменением проходного сечения за счет вращения эллиптического вала. Изменение угла установки вала θ позволяет в процессе эксперимента настраивать интенсивность ударной волны и ее

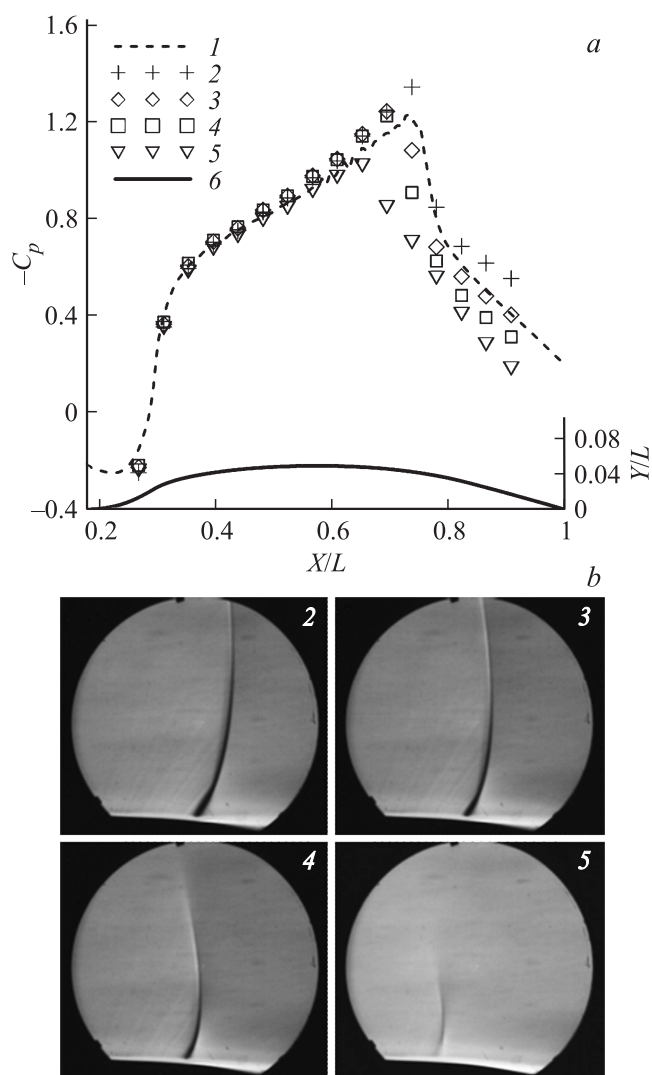


Рис. 1. Распределение среднего давления на поверхности выступа (а) и соответствующие картины теневой визуализации (b). 1 — расчет; эксперимент: 2 — $\theta = 1.8^\circ$; 3 — $\theta = 9^\circ$; 4 — $\theta = 11^\circ$; 5 — $\theta = 14^\circ$; 6 — профиль выступа.

Координаты расположения высокочастотных датчиков ЕРН вдоль хорды на поверхности экспериментальной модели

#	1	2	3	4	5	6	7
X/L	0.52	0.62	0.65	0.68	0.74	0.77	0.79

положение на поверхности выступа. Число Маха набегающего потока в экспериментах составляло $M_\infty = 0.73$.

Результаты теневой визуализации и измерения распределения среднего давления на поверхности показали, что течение характеризуется наличием локальной сверхзвуковой зоны, замыкающейся ударной волной. При достаточной интенсивности ударной волны ниже по потоку формируется отрывная зона, обусловленная положительным градиентом давления на ударной волне. На рис. 1 приведены распределения коэффициента давления $C_p = P_{st}/P_0$ (a) и шпирен-фотографии (b) для нескольких характерных случаев. Видно, что при больших значениях θ ударная волна имеет минимальную интенсивность и сдвинута вверх по потоку. При этом сверхзвуковая зона перед ней имеет минимальный размер. Уменьшение загромождения потока во втором горле (уменьшение θ) приводит к увеличению размеров локальной сверхзвуковой зоны над выступом, а также к росту интенсивности замыкающей ударной волны и смещению ее вниз по потоку.

Измерения пульсаций поверхностного давления проводились с помощью высокочастотных датчиков ЕРН-583-0.7В/М по продольной линии симметрии. Координаты расположения датчиков приведены в таблице. Распределения среднеквадратичных пульсаций давления на стенке выступа, нормированные на величину полного давления в свободном потоке P_0 , представлены на рис. 2, a для различных θ . Видно, что положение максимума пульсаций примерно соответствует положению ножки ударной волны и сдвигается вверх по потоку с увеличением θ . При максимальном загромождении второго горла в эксперименте ударная волна находилась в положении $X/L = 0.68$.

Видно, что за ударной волной уровень пульсаций давления уменьшается, однако смещение ударной волны вниз по потоку приводит к общему росту уровня пульсаций в отрывной зоне. При этом на спектрах

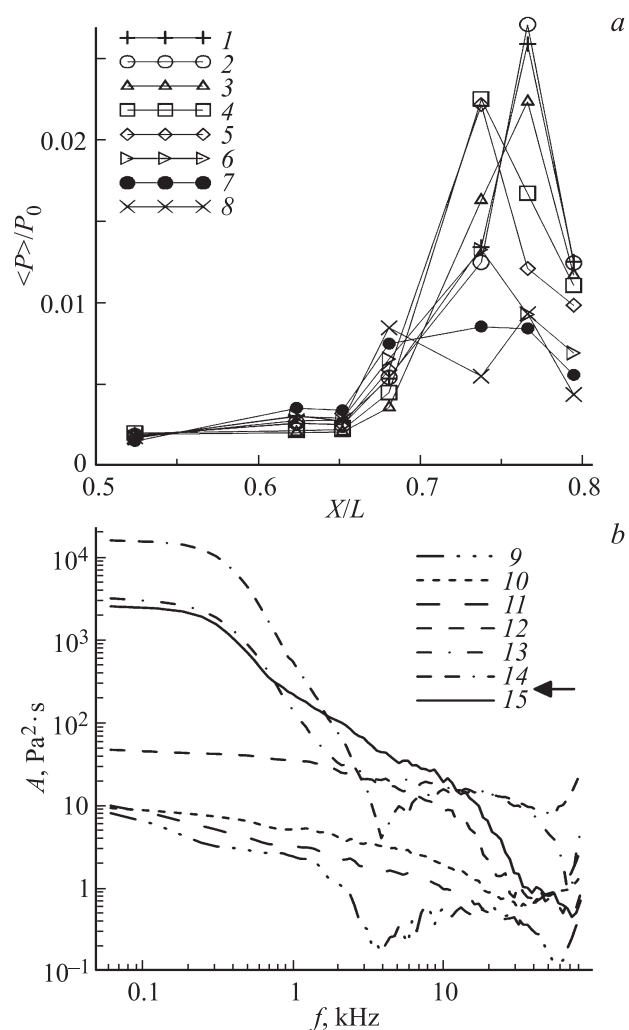


Рис. 2. Среднеквадратичные пульсации давления на стенке выступа для разных θ (a) и спектры мощности пульсаций давления для разных датчиков при $\theta = 1.8^\circ$ (b): 1 — $\theta = 1.8^\circ$; 2 — $\theta = 3.5^\circ$; 3 — $\theta = 5^\circ$; 4 — $\theta = 7^\circ$; 5 — $\theta = 9^\circ$; 6 — $\theta = 11^\circ$; 7 — $\theta = 12^\circ$; 8 — $\theta = 14^\circ$; 9 — #1; 10 — #2; 11 — #3; 12 — #4; 13 — #5; 14 — #6; 15 — #7 (см. таблицу).

выделяются пульсации низкой частоты, связанные с колебаниями ударной волны и вызванным ею отрывом пограничного слоя. Необходимо заметить, что ярко выраженные низкочастотные колебания связаны с существованием достаточно интенсивной ударной волны и наличием развитой отрывной зоны под ней.

Спектры мощности пульсаций давления на стенке для случая наиболее интенсивной ударной волны (минимальное значение θ) представлены на рис. 2, *b*. Положение ударной волны при заданном значении θ обозначено стрелкой на легенде к рисунку. Данные показывают, что вблизи ударной волны и в некоторой зоне выше по потоку наблюдается наполнение низкочастотной части спектра ($f \leq 1000$ Hz, $F = f\delta/U_\infty = 0.006$).

На рис. 3, *a* представлены уровни когерентности, вычисленные между сигналом датчика #6, расположенным в непосредственной близости от ударной волны, и остальными датчиками. Представленные данные показывают, что низкочастотные пульсации, детектируемые датчиками #5 и #7 (см. таблицу), являются взаимосвязанными с пульсациями, измеренными датчиком #6, и демонстрируют высокий уровень когерентности. Таким образом, можно сделать вывод, что эти пульсации обусловлены низкочастотными негармоническими колебаниями ударной волны в достаточно широком частотном диапазоне. Данные о коэффициенте кросс-корреляции позволяют оценить величину фазовой скорости доминирующих возмущений, распространяющихся в пограничном слое при данном θ как 37–72 м/с (рис. 3, *b*).

Кроме того, при большой интенсивности ударной волны, которой достаточно для формирования развитого отрывного течения, взаимосвязь пульсаций давления прослеживается вверх по потоку далеко за область размаха колебаний ударной волны (рис. 3, *a*). Здесь уровень когерентности меньше, а спектр когерентности имеет тот же вид с максимумом в районе 200 Hz. Это говорит о взаимосвязи возмущений набегающего пограничного слоя с пульсациями области взаимодействия и колебаниями ударной волны.

Количественные данные о структуре среднего течения около выступа, полученные с помощью PIV, были проанализированы методом главных компонент. Данная методика является удобным инструментом для анализа коррелирующих между собой процессов в турбулентных потоках и позволяет в большей мере понять базовые принципы организации

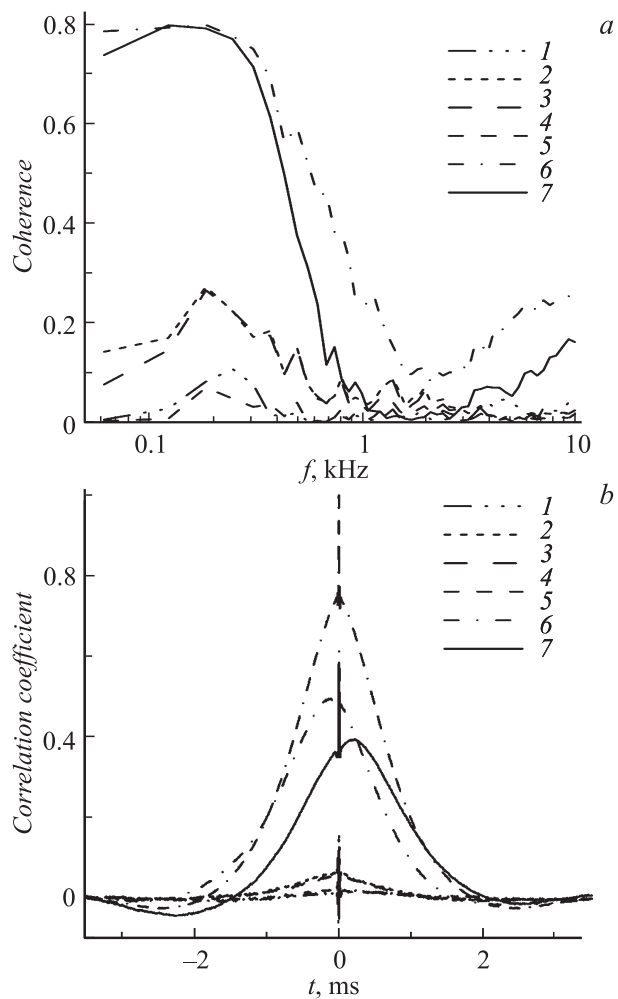


Рис. 3. Спектр когерентности (a) и коэффициент кросс-корреляции (b) пульсаций давления при $\theta = 1.8^\circ$ для разных датчиков: 1 — #1; 2 — #2; 3 — #3; 4 — #4; 5 — #5; 6 — #6; 7 — #7 (см. таблицу).

таких течений [7,8]. Принимая определенные допущения, отдельные моды такого разложения позволяют выявить наличие коррелирующих между собой пульсационных процессов, имеющих определенную длину волны. Результаты анализа показали, что пульсации потока, присутствующие в пограничном слое выше по потоку от ударной волны, и пульсации в рециркуляционной зоне за ударной волной коррелируют друг с другом и могут являться взаимосвязанными.

Полученные в экспериментальном исследовании результаты позволяют установить, что в трансзвуковом потоке при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем обнаруживаются нестационарные явления достаточно большой величины даже без явных механизмов обратной связи. Максимальный уровень пульсаций давления на стенке наблюдается вблизи ударной волны и обусловлен ее негармоническими осцилляциями в низкочастотном диапазоне. Спектральный и корреляционный анализ данных выявил наличие низкочастотных пульсаций, которые наблюдаются выше по потоку от зоны взаимодействия и связаны с ее осцилляциями. Схожий результат получен при анализе полей скорости, полученных с помощью PIV с применением метода главных компонент.

Результаты исследования показывают, что возмущения, присутствующие в набегающем потоке, могут являться источником возникновения нестационарных процессов в трансзвуковых течениях при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Европейского Союза в рамках программы FP7, проект BUTERFLI и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-08-01134-А.

Список литературы

- [1] *Stanewsky E., Basler D.* // AGARD CP. 1990. V. 483. P. 4.1–4.13.
- [2] *Lee B.H.K.* // Prog. Aerosp. Sci. 2001. V. 37. P. 147–196.
- [3] *Hartmann A., Klaas M., Schröder W.* // Exp. Fluids. 2012. V. 52. P. 591–604. DOI 10.1007/s00348-011-1074-6
- [4] *Zijie Zhao et al.* Experimental Study of Shock Wave Oscillation on SC(2)-0714 Airfoil. Texas, 2013. (Paper / AIAA. N 2013-0537).
- [5] *Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A.* // Techn. Phys. Lett. 2010. V. 36. N 2. P. 104–107. DOI: 10.1134/S1063785010020045

- [6] *Loginov M.S., Adams N.A., Zheltovodov A.A.* // J. Fluid Mech. 2006. V. 565. P. 135–169. DOI: 10.1017/S0022112006000930
- [7] *Berkooz G., Holmes Ph., Lumley J.L.* // Annu. Rev. Fluid Mech. 1993. V. 25. P. 539–57.
- [8] *Hall K.C., Thomas J.P., Dowell E.H.* // AIAA J. 2000. V. 38. N 10. P. 1853–1862.