

УДК 532.526

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕБАНИЙ БОЛЬШИХ И МАЛЫХ МАСШТАБОВ ПРИ ОТРЫВЕ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

А. В. Довгаль, А. М. Сорокин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

В течении с отрывом потока за уступом экспериментально изучено взаимное влияние коротковолновых колебаний — волн неустойчивости оторвавшегося пограничного слоя и длинноволновых возмущений на частоте схода периодических крупномасштабных вихрей. Показана возможность управления процессом вихреобразования путем возбуждения нарастающих возмущений сдвигового течения.

Ключевые слова: отрыв потока, неустойчивость, сход вихрей, управление отрывом.

**Введение.** Гидродинамическая неустойчивость течения в областях отрыва ламинарного пограничного слоя приводит к развитию нестационарного движения, в которое могут быть вовлечены возмущения скорости различных масштабов. В их числе коротковолновые колебания, нарастающие в оторвавшемся слое сдвига, и длинноволновые — на частоте образования периодических крупномасштабных вихрей, которые зарождаются в отрывной зоне и выносятся из нее в направлении потока. В этих условиях, используя внешние периодические воздействия, удастся управлять пульсационными и в конечном счете средними во времени характеристиками отрывных течений. Такой подход к управлению отрывом потока реализован в ряде работ с применением различных способов возбуждения контролируемых колебаний для стимулирования перехода к турбулентности в оторвавшемся пограничном слое и модификации когерентного вихревого движения в областях отрыва дозвукового потока газа (см. [1–6]).

Согласно результатам предшествующих исследований сход периодических вихрей при отрыве потока может быть вызван разными причинами. Одна из них — возникновение вихревых структур в оторвавшемся слое сдвига с последовательным увеличением их размера по мере распространения от точки отрыва до зоны присоединения [6–10]. В этом случае результат внешнего воздействия объясняется изменением динамики вихрей, включая процессы их спаривания и многократного объединения. Другой механизм периодического вихреобразования связан с неустойчивостью области отрыва по отношению к длинноволновым колебаниям, которая регулируется свойствами течения в большом масштабе [4, 11, 12]. При этом характеристики течения за точкой отрыва определяются одновременно двумя разными по своей сути явлениями: усилением высокочастотных возмущений, за которое ответственны локальные свойства устойчивости оторвавшегося слоя, и глобальной вихревой динамикой. В таких условиях появляется возможность управлять нестационарным полем течения в областях отрыва пограничного слоя, используя взаимодействия колебаний больших и малых масштабов. Цель настоящей работы заключалась в экспериментальной проверке указанной возможности.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-01-00816) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № НШ-964.2003.1).

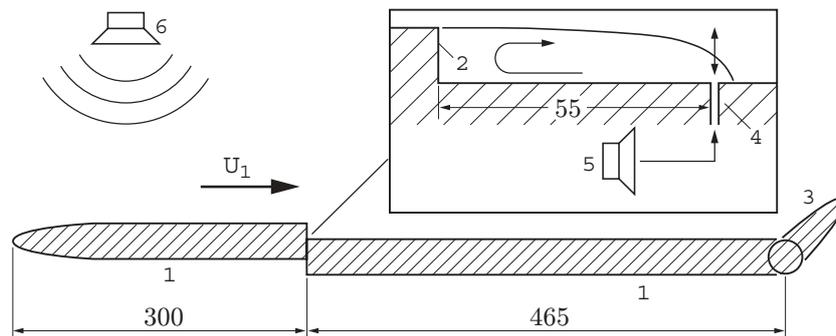


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — пластины; 2 — уступ; 3 — закрылок; 4 — поперечная щель; 5 — громкоговоритель; 6 — внешний акустический источник

**1. Экспериментальная методика.** Исследования проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН с закрытой рабочей частью размерами  $1 \times 1 \times 4$  м при степени турбулентности потока, не превышающей 0,04 % на частотах пульсаций свыше 2 Гц. В опытах использовалась экспериментальная модель, представлявшая собой две состыкованные пластины, расположенные в центральном сечении рабочей части трубы под нулевым углом атаки (рис. 1). Толщина пластин 10 мм, размах 995 мм, длина передней пластины 300 мм, задней — 465 мм. Носовая часть передней пластины выполнена в форме двух сопряженных полуэллипсов с соотношением полуосей 2 мм : 132 мм на рабочей стороне модели и 8 мм : 132 мм на противоположной. Ламинарный пограничный слой отрывался на стыке пластин за прямоугольным уступом обтекаемой поверхности. Продольный градиент давления в окрестности передней кромки модели, в большой мере определяющий состояние течения ниже по потоку, регулировался закрылком, положение которого выбиралось таким образом, чтобы обеспечить минимально возможный уровень фоновых пульсаций пограничного слоя перед уступом.

Взаимодействие волн неустойчивости оторвавшегося пограничного слоя и колебаний, возникающих в процессе образования периодических вихрей, изучалось при гармоническом возбуждении течения на соответствующих частотах. Генерация осуществлялась акустическим источником, помещенным на стенке рабочей части аэродинамической установки над зоной отрыва, либо локально, через поперечную щель в поверхности задней пластины, симметричную относительно ее центрального сечения. Щель длиной 70 мм и шириной 0,4 мм располагалась на расстоянии 55 мм за уступом на участке присоединения оторвавшегося слоя. В этом случае источником колебаний служил соединенный с ней пневмотрассой динамический громкоговоритель, который находился ниже по потоку экспериментальной модели.

Средняя во времени и пульсационная составляющие скорости течения регистрировались термоанемометром фирмы DISA (основного блока 55 M01 в сочетании со стандартным мостом 55 M10) с использованием одноточечных датчиков. Методика позволяла получить необходимые количественные результаты в большей части области измерений, исключая пристенный участок зоны отрыва с малой скоростью возвратного тока, где показания датчика могли служить для оценки скорости течения. Сигнал с выхода термоанемометра подавался на аналого-цифровой преобразователь и далее подвергался компьютерной обработке, в ходе которой определялись спектральные характеристики возмущений. Амплитуды выделенных пульсационных компонентов фиксировались в переменной полосе пропускания: относительно широкой — для нарастающих за точкой отрыва волновых

$h$ , мм	$U_\infty$ , м/с	$Re_h$	$\delta_1/h$	$\delta_1/\theta$	$x_r/h$	$x_{tr}/h$	Способ генерации колебаний
3,0	9,0	1730	0,30	2,25	18,3–21,7	33	Акустический
2,9	9,0	1670	0,29	2,24	18,9–22,4	31	Локальный

пакетов и более узкой — при исследовании искусственно возбужденных колебаний, что позволяло в последнем случае уменьшить вклад фоновых пульсаций в полезный сигнал датчика. Измерения выполнены в плоскости симметрии модели, используемая в дальнейшем координата  $x$  отсчитывается от уступа в направлении внешнего потока.

**2. Характеристики исследуемого течения.** Приведенные ниже результаты получены в двух экспериментах, выполненных в близких условиях при внешнем акустическом и локальном возбуждении отрывного течения. В таблице представлены основные характеристики обтекания уступа в обоих случаях:  $h$  — высота уступа;  $U_\infty$  — скорость внешнего потока над ним;  $Re_h = U_\infty h/\nu$  — число Рейнольдса;  $\delta_1$  и  $\theta$  — толщины вытеснения и потери импульса пограничного слоя, измеренные перед точкой отрыва ( $x = -5$  мм). В таблице также указаны примерное положение зоны присоединения оторвавшегося слоя  $x_r$ , определенное из результатов измерений поля средней скорости за уступом, и координата “точки” перехода к турбулентности  $x_{tr}$ , которая соответствует максимуму пульсаций в пристенной зоне течения в направлении потока. В том и другом случае, при данных числах Рейнольдса и малом уровне внешних возмущений, неустойчивое течение в области отрыва остается ламинарным на всем ее протяжении, а турбулентный режим обтекания модели устанавливается в пограничном слое за участком присоединения.

Амплитудные спектры пульсаций за точкой отрыва пограничного слоя приведены на рис. 2. Данные получены в максимуме возмущений по нормальной координате, соответствующей значению  $U/U_0 \approx 0,5$ , где  $U_0$  — местная скорость внешнего течения, отличающаяся в пределах области отрыва от  $U_\infty$  не более чем на 2,5 %. Нарастание волн неустойчивости оторвавшегося слоя сдвига и вихреобразование представлены в спектрах пакетами колебаний соответственно высоких и низких частот. В одном случае (рис. 2, а) их центральные частоты близки к 270 и 100 Гц, в другом (рис. 2, б) — к 290 и 75 Гц. Различие в спектральных данных, полученных в двух близких экспериментальных режимах, вероят-

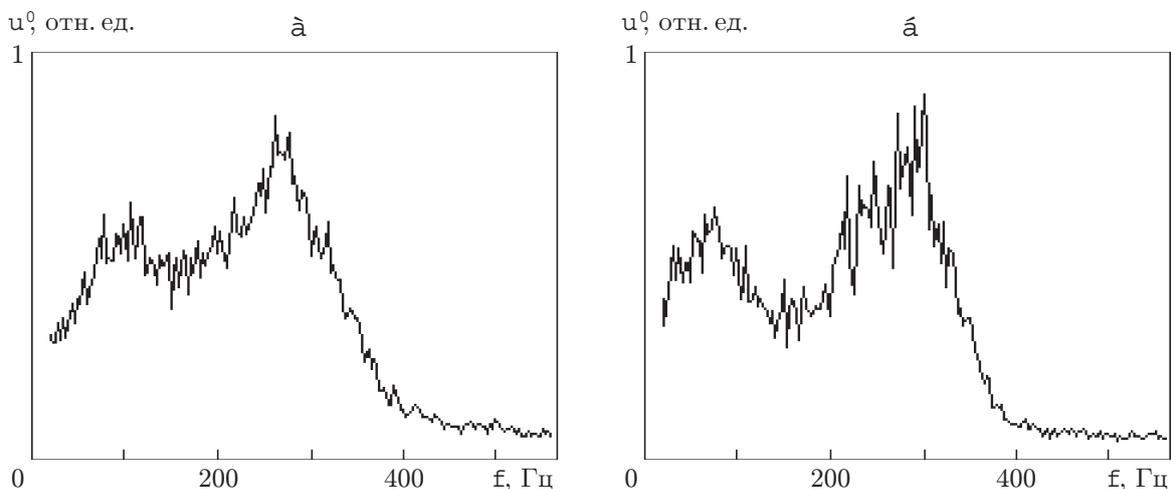


Рис. 2. Спектры пульсаций:

а —  $h = 3,0$  мм,  $x/h = 18,7$ ; б —  $h = 2,9$  мм,  $x/h = 20,0$

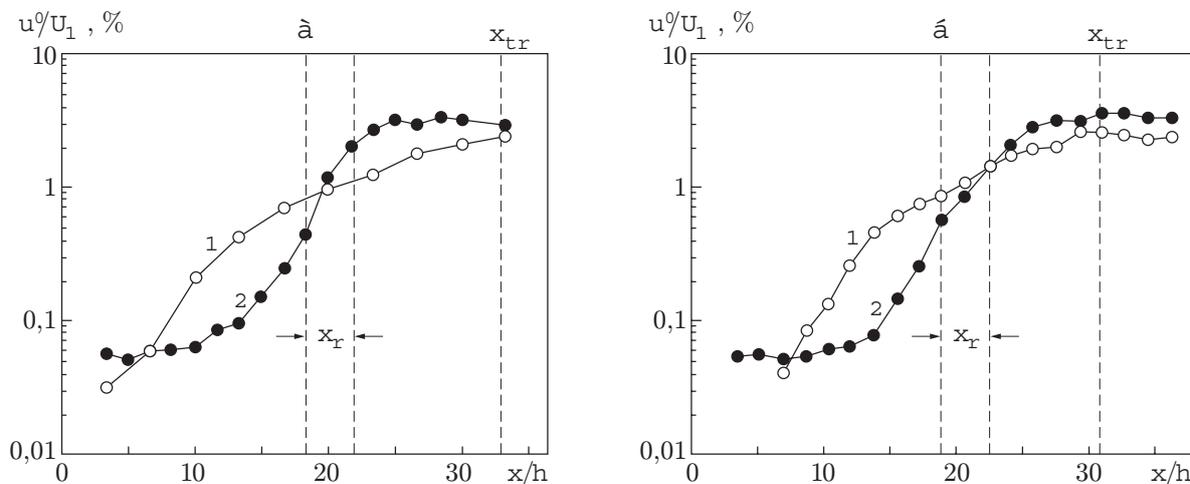


Рис. 3. Усиление возмущений вдоль потока:  
 а —  $h = 3,0$  мм,  $f = 290$  (1) и  $100$  Гц (2); б —  $h = 2,9$  мм,  $f = 290$  (1) и  $75$  Гц (2);  
 амплитуды измерены в полосе фильтра  $15$  Гц

но, вызвано зависимостью состава возмущений, естественно возникающих в отрывном течении, от внешних неконтролируемых пульсаций, включая турбулентные, акустические и вибрационные. Нарастание возмущений из диапазона неустойчивости оторвавшегося слоя и на частоте схода вихрей в направлении потока, измеренное при  $U/U_\infty \approx 0,5$ , показано на рис. 3. По мере удаления от уступа сначала выделяются высокочастотные колебания. Образование крупномасштабных вихрей, доминирующих ниже по потоку, начинается перед областью присоединения. Подробнее этот режим отрывного течения, в котором реализуются два разных вида неустойчивости — коротковолновая и длинноволновая, исследован в предыдущих экспериментах [11, 12].

**3. Высокочастотная генерация.** При возбуждении колебаний на частоте волн неустойчивости оторвавшегося слоя (внешним акустическим источником или периодическим вдувом газа через щель в поверхности модели) в окрестности уступа возникают близкие к двумерным возмущения завихренности, распространяющиеся в направлении потока [12]. Их влияние на процесс образования крупномасштабных вихрей изучалось в двух режимах по амплитуде генерации (рис. 4, а). В обоих случаях течение подвергалось периодическому воздействию слабой интенсивности, при которой внесенные в зону отрыва возмущения ведут себя на ее начальном участке как линейные экспоненциально нарастающие колебания.

Измерения пульсационной составляющей скорости течения показали, что внешняя акустическая и локальная генерации волн неустойчивости приводят к одному и тому же результату: интенсивность возмущений на частоте вихреобразования возрастает в пределах отрывной области и снижается за участком присоединения. Для иллюстрации на рис. 5 приведены спектральные данные, полученные в максимуме возмущений поперек вязкого слоя. Количественную характеристику обнаруженного эффекта дают изображенные на рис. 6 распределения амплитуды низкочастотных колебаний в направлении потока. В частности, уменьшение амплитуды пульсаций на частоте схода вихрей в присоединившемся течении достигает 20–30 %.

Объяснение результатов настоящих наблюдений, основанное на данных предыдущих исследований неустойчивых отрывных течений, заключается в следующем. Так как формирование зоны отрыва взаимосвязано с процессом ламинарно-турбулентного перехода,

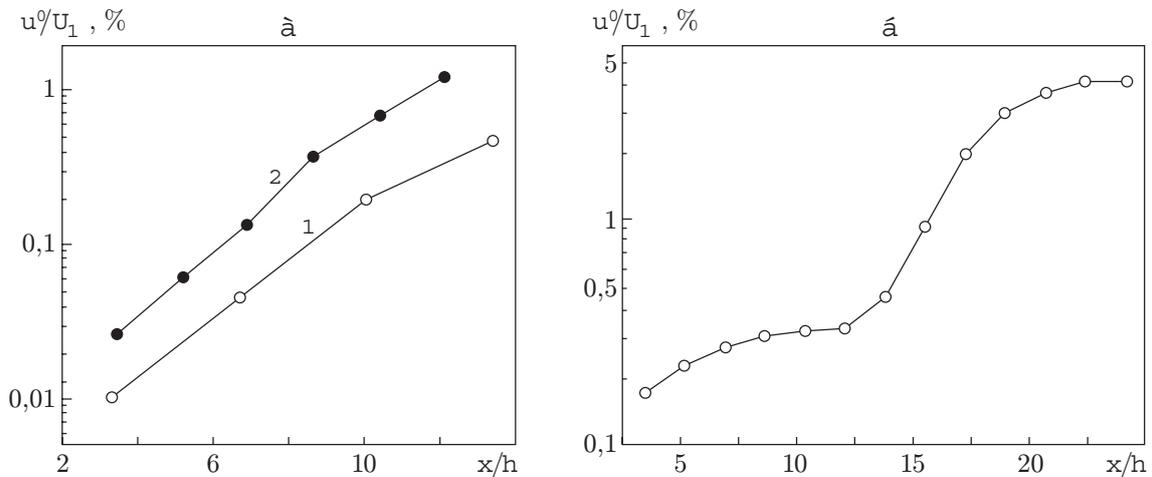


Рис. 4. Амплитуды колебаний, возбужденных в области отрыва:  
*a* —  $h = 3,0$  (1) и  $2,9$  мм (2), частота генерации 290 Гц; *б* —  $h = 2,9$  мм, частота генерации 75 Гц; данные получены в полосе фильтра 2 Гц

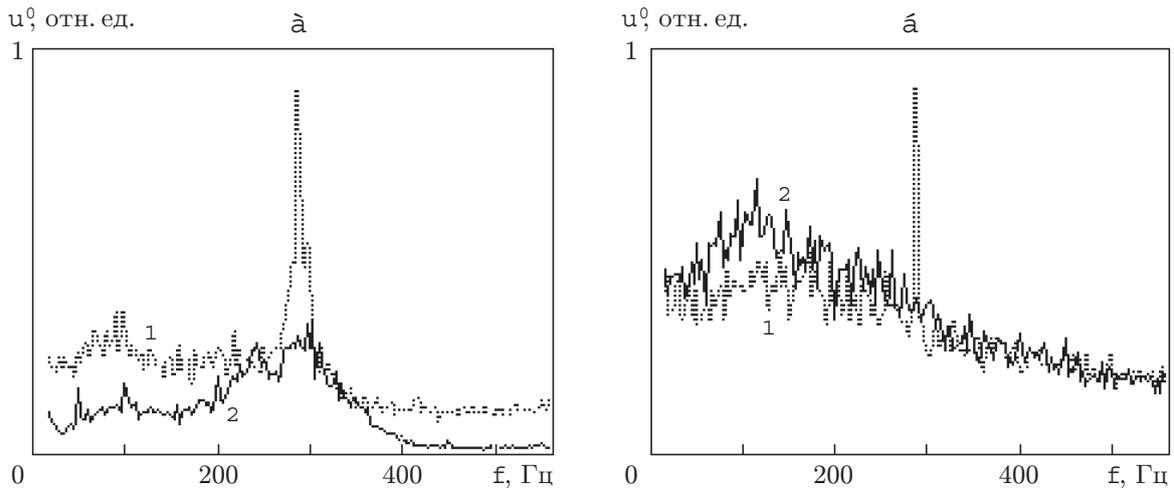


Рис. 5. Спектры пульсаций по частоте колебаний ( $h = 2,9$  мм):  
*a* —  $x/h = 17,2$ ; *б* —  $x/h = 31,0$ ; 1 — при возбуждении течения, 2 — без возбуждения

генерация волн неустойчивости сопровождается изменением (уменьшением) размеров рециркуляционной области. Это, в свою очередь, сказывается на динамике крупных вихрей, которая определяется свойствами течения в масштабе всей области циркуляции. Таким образом, воздействие колебаний высоких частот на вихревое движение опосредовано их влиянием на средние во времени характеристики отрывного течения.

**4. Низкочастотное возбуждение.** Результаты предварительных тестов показали малую эффективность внешнего акустического воздействия для генерации колебаний на частоте схода крупномасштабных вихрей, поэтому в дальнейшем использовался только локальный источник периодических возмущений. Распределение максимальной амплитуды возбужденных низкочастотных колебаний вдоль потока в основном режиме последующих измерений приведено на рис. 4, *б*. Сравнение этих данных с зависимостью амплитуды возмущений от продольной координаты, представленной на рис. 3, *б* (кривая 2), показывает, что таким образом воспроизводятся низкочастотные пульсации, возникающие в зоне отрыва естественным путем, но с большей интенсивностью колебаний.

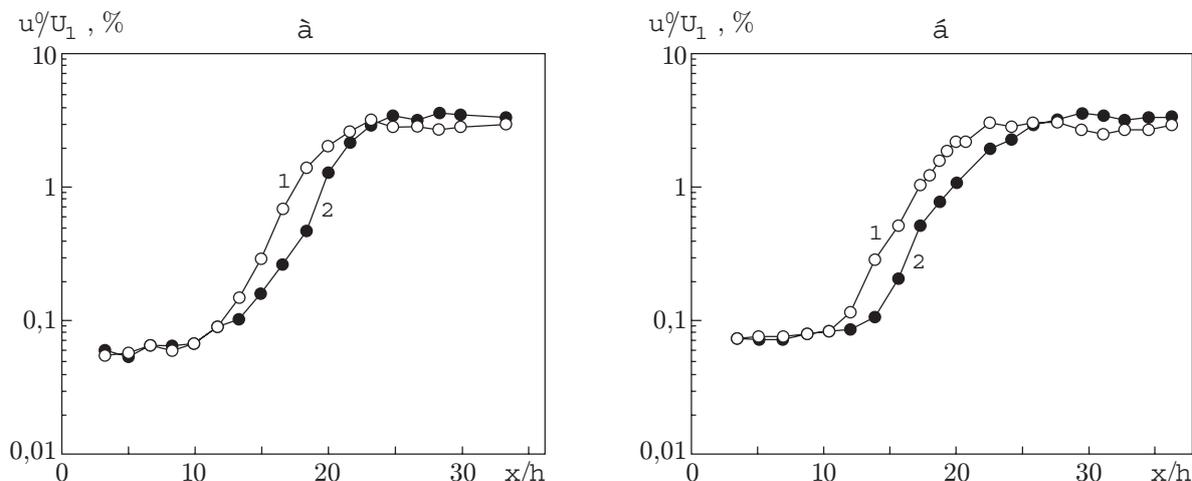


Рис. 6. Амплитуды колебаний на частоте схода крупномасштабных вихрей:  
 а —  $h = 3,0$  мм,  $f = 100$  Гц; б —  $h = 2,9$  мм,  $f = 75$  Гц; 1 — при возбуждении течения,  
 2 — без возбуждения; данные получены в полосе фильтра 15 Гц

В ходе исследования, выполненного аналогично описанному в п. 3, не было выявлено какого-либо выходящего за пределы погрешностей эксперимента влияния низкочастотной генерации на развитие волн неустойчивости оторвавшегося пограничного слоя. Полученный результат не исключает возможности подобного эффекта при большей интенсивности возбуждения, которое, индуцируя осцилляции сдвигового течения, вызывает периодическое изменение его локальных характеристик устойчивости. Вместе с тем при сопоставимых амплитудах колебаний высоких и низких частот, генерируемых в отрывной зоне (см. рис. 4), воздействие последних на коротковолновые возмущения оторвавшегося слоя оказывается незначительным по сравнению с обратным влиянием, описанным в п. 3.

**Заключение.** Результатами проведенных экспериментов дополнены существующие в настоящее время представления о возможностях управления неустойчивым течением в областях отрыва ламинарного пограничного слоя с помощью внешних периодических воздействий. Показано, что в режиме отрывного обтекания с одновременным усилением коротковолновых возмущений и сходом крупномасштабных периодических вихрей слабое гармоническое возбуждение на частоте колебаний, близких к максимально нарастающим в диапазоне линейной неустойчивости отрывающегося пограничного слоя, позволяет управлять энергонесущими компонентами пульсаций в низкочастотной области спектра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Довгаль А. В., Козлов В. В. Влияние акустических возмущений на структуру течения в пограничном слое с неблагоприятным градиентом давления // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1983. № 2. С. 48–52.
2. Zaman K. B. M. Q., McKinzie D. J. Control of laminar separation over airfoils by acoustic excitation // AIAA J. 1991. V. 29, N 7. P. 1075–1083.
3. Kiya M., Shimizu M., Mochizuki O., Ido Y., Tezuka H. Active forcing of an axisymmetric leading-edge turbulent separation bubble. N. Y., 1993. (Paper / AIAA; N 93-3245).
4. Sigurdson L. W., Roshko A. The structure and control of a turbulent reattaching flow // Proc. of the IUTAM symp. on turbulence management and relaminarisation, Bangalore, India, 1987. Berlin: Springer-Verlag, 1988. P. 497–514.

5. **Montividas R. E., Acharya M., Metwally M. H.** Reactive control of an unsteady separating flow // AIAA J. 1992. V. 30, N 4. P. 1133–1134.
6. **Roos F. W., Kegelman J. T.** Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers // AIAA J. 1986. V. 24, N 12. P. 1956–1963.
7. **Bestek H., Gruber K., Fasel H.** Self-excited unsteadiness of laminar separation bubbles caused by natural transition // The prediction and exploitation of separated flow. London: Roy. Aeronaut. Soc., 1989. P. 14.1–14.16.
8. **Hasan M. A. Z.** The flow over a backward-facing step under controlled perturbation: laminar separation // J. Fluid Mech. 1992. V. 238. P. 73–96.
9. **Kiya M.** Separation bubbles // Theoretical and applied mechanics. Amsterdam: Elsevier Sci. Pub. B. V., 1989. P. 173–191.
10. **Pauley L. L., Moin P., Reynolds W. C.** The structure of two-dimensional separation // J. Fluid Mech. 1990. V. 220. P. 397–411.
11. **Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Неустойчивость течения в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя к сходу периодических вихрей // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 189–197.
12. **Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Экспериментальное моделирование периодического вихреобразования при отрыве течения за уступом поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 2. С. 193–200.

*Поступила в редакцию 21/III 2003 г.,  
в окончательном варианте — 30/X 2003 г.*

---