

УДК 532.526

ПРИМЕНЕНИЕ ОТСОСА ПОТОКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СХОДОМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ ПРИ ОТРЫВЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

А. В. Довгаль, А. М. Сорокин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mails: dovgal@itam.nsc.ru, am_sorokin@ngs.ru

В аэродинамической трубе исследовано влияние отсоса пристенного течения на отрыв ламинарного пограничного слоя за двумерным прямоугольным уступом обтекаемой поверхности. Измерения выполнены термоанемометрическим методом при низких дозвуковых скоростях потока. Показано, что данный способ управления течением позволяет подавить образование крупномасштабных вихрей, определяемое глобальными свойствами устойчивости отрывной зоны.

Ключевые слова: отрыв пограничного слоя, сход вихрей, отсос, управление отрывом.

Появление местных областей отрыва ламинарного течения (так называемых отрывных пузырей) во многих случаях сопровождается генерацией крупномасштабных вихрей, которые квазипериодически выносятся из отрывной зоны в направлении внешнего потока. Доминируя в нестационарном течении, вихри определяют его пульсационные и в большой мере средние во времени характеристики, которые удается оптимизировать, воздействуя на формирование и динамику когерентных вихревых структур.

Управление вихревым движением, зарождающимся в результате эволюции возмущений оторвавшегося слоя сдвига, возможно путем изменения их начального спектра и локальных свойств устойчивости течения. Модификация начального спектра пульсаций достигается периодическим возбуждением зоны отрыва внешними акустическими [1, 2] или локально генерируемыми [3, 4] колебаниями. Для изменения характеристик устойчивости отрывного течения по отношению к колебаниям малых амплитуд используются, например, отсос потока и охлаждение обтекаемой поверхности [5–7].

В данной работе рассмотрена возможность управления квазипериодическим вихреобразованием, источником которого служит не усиление конвективных возмущений оторвавшегося слоя, а неустойчивость отрывной зоны по отношению к длинноволновым колебаниям (сходу вихря в терминологии [8]). Когерентное вихревое движение, которое регулируется глобальными свойствами поля скорости в масштабе всей зоны отрыва, экспериментально исследовано в работах [9, 10]. Один из способов управления отрывом потока в таком режиме неустойчивости рассмотрен в [11], где установлена зависимость процесса вихреобразования от слабого гармонического возбуждения течения в частотном диапазоне нарастания малых возмущений оторвавшегося пограничного слоя.

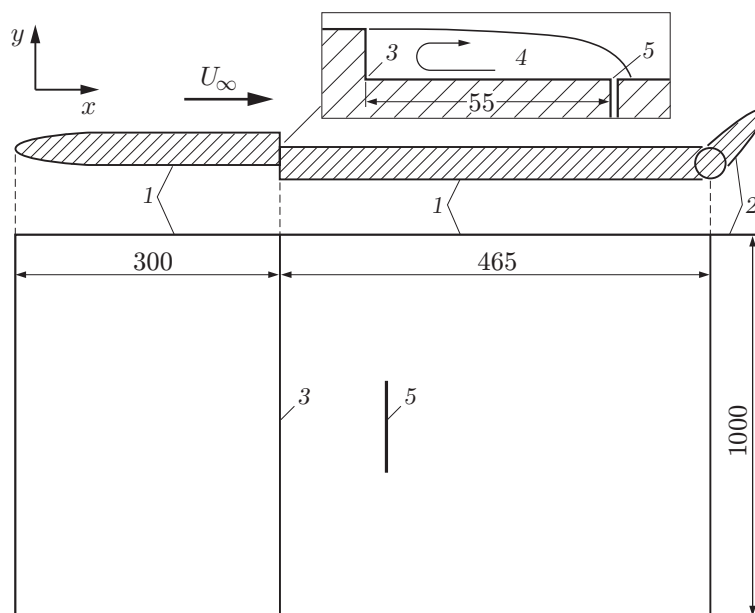


Рис. 1. Экспериментальная модель:

1 — пластины; 2 — закрылок; 3 — уступ; 4 — зона отрыва; 5 — щель для отсоса потока

В данной работе в качестве возможного способа воздействия на сход периодических вихрей использован отсос потока — традиционный способ управления обтеканием тел, в частности переходом к турбулентности, инициированным неустойчивостью течения за точкой отрыва пограничного слоя [5].

Методика эксперимента. Эксперименты проведены в малотурбулентной дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН с закрытой рабочей частью, имеющей размеры $1 \times 1 \times 4$ м и степень турбулентности свободного потока не более 0,04 %. Экспериментальная модель, схема которой приведена на рис. 1, ранее использовалась при изучении образования когерентных вихрей в течении за прямоугольным уступом плоской поверхности [9–11]. Модель, состоящая из двух пластин, устанавливалась в центральном сечении рабочей части аэродинамической трубы под нулевым углом атаки, уровень фоновых пульсаций пограничного слоя перед уступом высотой $h = 2,9$ мм минимизировался с помощью закрылка. Отсос пристенного течения осуществлялся через поперечную щель длиной 70 мм и шириной 0,4 мм, которая располагалась на расстоянии 55 мм за уступом на поверхности задней пластины симметрично относительно ее центрального сечения. В соответствии с выбранными условиями эксперимента щель находилась в зоне присоединения оторвавшегося слоя, где формируются крупномасштабные вихри. Интенсивность отсоса контролировалась расходомерной шайбой.

Характеристики течения определялись в ходе измерений продольной составляющей скорости с помощью термоанемометра постоянной температуры AN 1003 и одноточечных датчиков. Сигнал термоанемометра, оцифрованный 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем, обрабатывался на персональном компьютере в среде MATLAB. Перемещение датчика термоанемометра в исследуемой области потока осуществлялось в автоматическом режиме с погрешностью не более 2,5 мкм. Основные измерения выполнены в плоскости симметрии модели; в используемой ниже системе координат x отсчитывается от уступа вниз по потоку, y — в ортогональном направлении от поверхности задней пластины.

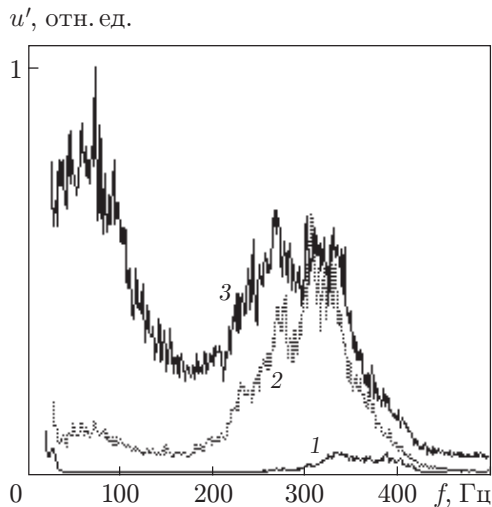


Рис. 2

Рис. 2. Возмущения отрывного течения:

1 — $x = 40$ мм, $y = 2,6$ мм; 2 — $x = 50$ мм, $y = 2,8$ мм; 3 — $x = 54$ мм, $y = 2,0$ мм

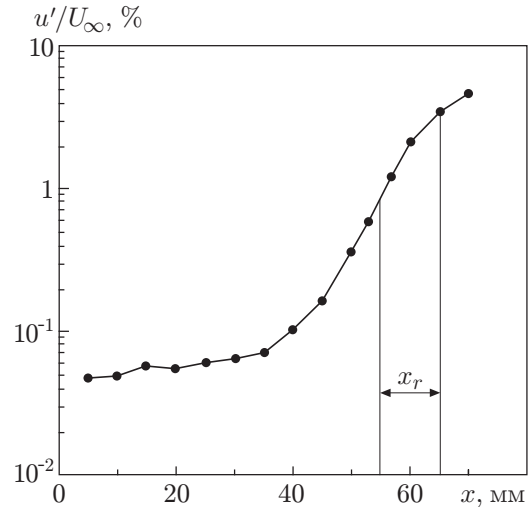


Рис. 3

Рис. 3. Изменение вдоль потока максимальной среднеквадратичной амплитуды колебаний в полосе частот $f = 25 \div 100$ Гц, соответствующей сходу квазипериодических вихрей

Результаты экспериментов. Характеристики отрывного течения в условиях, близких к принятым в настоящих экспериментах, подробно исследованы в работах [9, 10]. В данном случае при скорости внешнего потока над уступом $U_\infty = 9$ м/с (число Рейнольдса $Re_h = U_\infty h/\nu = 1650$, где ν — кинематическая вязкость) происходил отрыв ламинарного пограничного слоя с толщиной вытеснения $\delta_1 = 0,89$ мм, толщиной потери импульса $\theta = 0,39$ мм и значением формпараметра $\delta_1/\theta = 2,26$ на расстоянии $x = -5$ мм. Отрыв потока сопровождался его присоединением к поверхности модели на участке $x_r = 55 \div 65$ мм с последующим переходом к турбулентному режиму течения. Эволюция возмущений зоны отрыва показана на рис. 2. В спектрах пульсаций доминируют колебания двух масштабов: высокочастотные (волны неустойчивости оторвавшегося слоя) и низкочастотные (спектральный образ крупномасштабных вихрей). Высокочастотные колебания выделяются из фоновых возмущений на начальном участке течения, низкочастотные начинают нарастать перед областью присоединения (рис. 3).

Развитие низкочастотных колебаний в управляемом течении изучалось в нескольких режимах отсоса, интенсивность которого характеризуется числом Рейнольдса $Re_s = Ql/\nu$ (Q — объемный расход отсасываемого воздуха; l — длина щели). Равномерность отсоса по размаху модели проверялась специальными измерениями в направлении, перпендикулярном потоку, которые показали, что изменение средней скорости течения и интенсивности пульсаций вдоль щели не превышает 5 %.

Из данных, приведенных на рис. 4, следует, что отсос потока не вызывает существенного изменения амплитуды низкочастотных пульсаций на начальном участке зоны отрыва, подавляя их нарастание при $x > 40$ мм. Влияние отсоса возрастает с увеличением Re_s и максимально за зоной присоединения оторвавшегося слоя, где в условиях настоящих экспериментов интенсивность колебаний на частоте схода вихрей уменьшается почти в четыре раза. На рис. 5 видно, что подавление пульсаций происходит по всей толщине вязкого слоя $\delta = 5,39$ мм, определенной из условия $U = 0,99U_0$, где U_0 — местная скорость внешнего

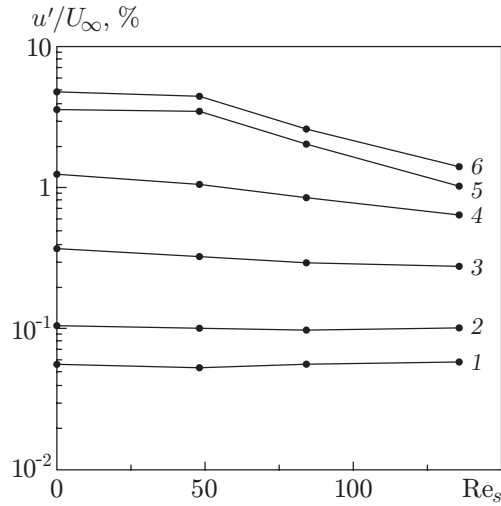


Рис. 4

Рис. 4. Изменение максимальной амплитуды низкочастотных колебаний в полосе частот $f = 25 \div 100$ Гц при отсесе:

1 — $x = 20$ мм; 2 — $x = 40$ мм; 3 — $x = 50$ мм; 4 — $x = 57$ мм; 5 — $x = 65$ мм; 6 — $x = 70$ мм

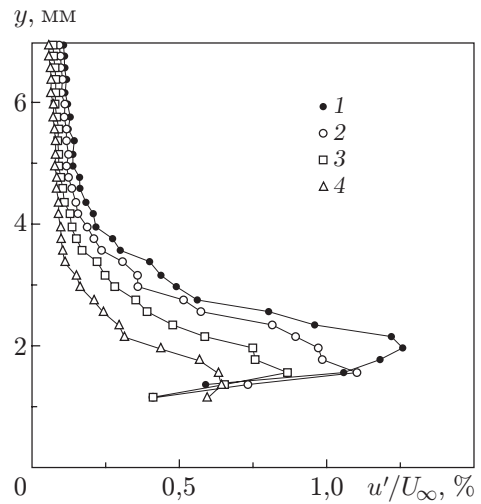


Рис. 5

Рис. 5. Профили возмущений в полосе частот $f = 25 \div 100$ Гц при отсесе ($x = 57$ мм):

1 — $Re_s = 0$; 2 — $Re_s = 48$; 3 — $Re_s = 84$; 4 — $Re_s = 136$

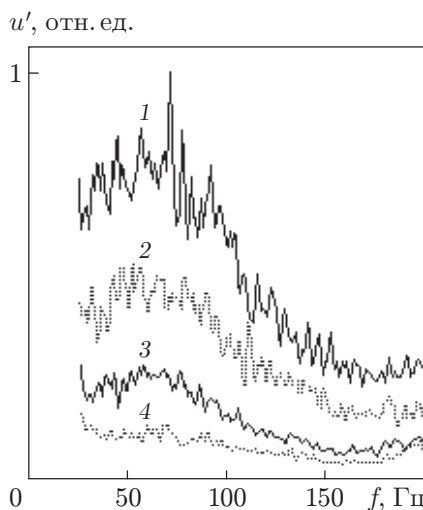


Рис. 6

Рис. 6. Подавление колебаний на частоте схода вихрей в точке $x = 54$ мм, $y = 2$ мм (обозначения те же, что на рис. 5)

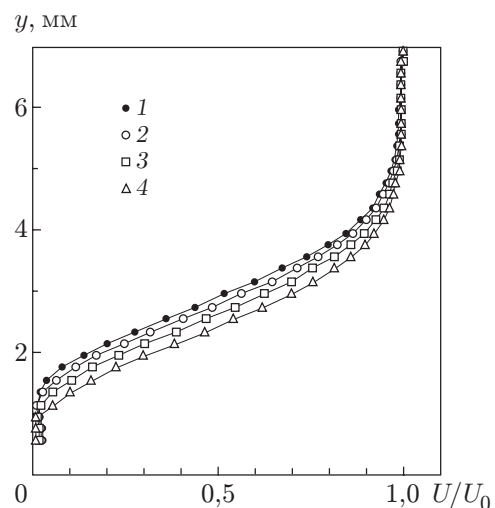


Рис. 7

Рис. 7. Профили средней скорости в зоне отрыва при отсесе течения с различной интенсивностью при $x = 50$ мм (обозначения те же, что на рис. 5)

потока (данные измерений вблизи обтекаемой поверхности не приведены, поскольку использованный метод не позволяет получить на этом участке корректные количественные результаты при малой средней скорости течения, сопоставимой с амплитудой возмущений). Обнаруженное влияние отсоса течения на сход крупномасштабных вихрей показано также на рис. 6.

По-видимому, зафиксированное в настоящих экспериментах воздействие отсоса на процесс генерации вихрей обусловлено его влиянием на средние во времени характеристики отрывной зоны. Общая тенденция, обнаруженная при расчетах, заключается в том, что по мере увеличения размера местных областей отрыва в них происходит переход от стационарного режима течения к нестационарному режиму с периодическим вихреобразованием [12–14]. Данные, полученные в этих исследованиях, коррелируют с результатами анализа устойчивости течений, предсказывающими возникновение глобальных мод колебаний в достаточно крупных областях отрыва пограничного слоя [15]. С учетом результатов этих работ можно предположить, что отсос течения, вызывающий уменьшение толщины и соответственно протяженности области отрыва (рис. 7), стабилизирует ее по отношению к сходу крупномасштабных вихрей. В этом смысле обсуждаемый способ управления аналогичен опробованному в экспериментах [11], где уменьшение размеров отрывной зоны и модификация вихревого движения достигались генерацией волн неустойчивости оторвавшегося пограничного слоя.

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. **Roos F. W., Kegelmann J. T.** Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers // AIAA J. 1986. V. 24, N 12. P. 1956–1963.
4. **Kiya M., Shimizu M., Mochizuki O., et al.** Active forcing of an axisymmetric leading-edge turbulent separation bubble. N. Y., 1993. (Paper / AIAA; N 93-3245).
5. **Hahn M., Pfenninger W.** Prevention of transition over a backward step by suction // J. Aircraft. 1973. V. 10, N 10. P. 618–622.
6. **Al-Maaitah A. A., Nayfeh A. H., Ragab S. A.** Effect of suction on the stability of subsonic flows over smooth backward-facing steps // AIAA J. 1990. V. 28, N 11. P. 1916–1924.
7. **Al-Maaitah A. A., Nayfeh A. H., Ragab S. A.** Effect of wall cooling on the stability of compressible subsonic flows over smooth humps and backward-facing steps // Phys. Fluids. Ser. A. 1990. V. 2, N 3. P. 381–389.
8. **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.
9. **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.
10. **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.

11. **Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Взаимодействие колебаний больших и малых масштабов при отрыве ламинарного пограничного слоя // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 4. С. 72–78.
12. **Dallmann U., Herberg Th., Gebing H., et al.** Flow field diagnostics: topological flow changes and spatio-temporal flow structure. N. Y., 1995. (Paper / AIAA; N 95-0791).
13. **Marquillie M., Ehrenstein U.** On the onset of nonlinear oscillations in a separating boundary-layer flow // J. Fluid Mech. 2003. V. 490. P. 169–188.
14. **Bestek H., Gruber K., Fasel H.** Self-excited unsteadiness of laminar separation bubbles caused by natural transition // The prediction and exploitation of separated flow. L.: Roy. Aeronaut. Soc., 1989. P. 14.1–14.16.
15. **Hammond D. A., Redekopp L. G.** Local and global instability properties of separation bubbles // Europ. J. Mech. Ser. B. Fluids. 1998. V. 17, N 2. P. 145–164.

Поступила в редакцию 16/IX 2005 г.
