

**А. В. Довгаль<sup>1</sup>, В. В. Козлов<sup>1,2</sup>, А. М. Сорокин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: am\_sorokin@ngs.ru

## ЛОКАЛЬНЫЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ С ОТРЫВОМ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА \*

Обсуждается гидродинамическая неустойчивость течений с местными областями отрыва ламинарного потока (пограничного слоя). Результатами исследований, выполненных в последние годы, утверждается представление об отрывных течениях, сочетающих качественно различные свойства неустойчивости: усиление проникающих в зону отрыва внешних возмущений и генерацию самоподдерживающихся колебаний.

*Ключевые слова:* отрыв потока, гидродинамическая неустойчивость, переход к турбулентности, вихреобразование, управление отрывом.

В различных задачах аэрогидродинамики широко распространены течения с местными областями отрыва ламинарного пограничного слоя. Обозначаемые многими авторами как «отрывные пузыри» подобные течения могут возникать при обтекании гладкой поверхности (на аэродинамических профилях, крыльях, в диффузорах), вблизи выступов, уступов поверхности и прочих элементов ее неоднородности. Как правило, протяженность отрывных пузырей мала по сравнению с размером обтекаемого тела и зона отрыва сама по себе не вносит больших изменений в общую картину течения. Вместе с тем уже при малых числах Рейнольдса отрыв ламинарного потока сопровождается развитием нестационарного движения в пристенной зоне течения и его переходом в турбулентное состояние, что оказывает существенное влияние на локальные и интегральные аэродинамические характеристики тела, находящегося в потоке жидкости или газа.

Многолетний исследовательский интерес к течениям рассматриваемого класса во многом объясняется их фундаментальным свойством гидродинамической неустойчивости. Ниже обсуждается современное положение дел в ее изучении и возможное применение

полученных знаний к управлению отрывом. Теоретические и экспериментальные данные по этой тематике в основном получены при низких дозвуковых скоростях потока.

### Модель переходных областей отрыва потока

Результатом ранних экспериментальных работ, посвященных местным зонам отрыва ламинарного потока, явилась модель течения, в которой формирование отрывной области определяется процессом ламинарно-турбулентного перехода. Упрощенная схема такого в среднем двумерного течения показана на рис. 1, более детально структура переходных областей отрыва отражена, например, в работах [1–3]. Внешние по отношению к зоне отрыва возмущения (турбулентные пульсации потока, акустические волны, вибрации обтекаемой поверхности) генерируют собственные колебания оторвавшегося слоя сдвига – волны неустойчивости. Нарастая в направлении потока, они проходят линейную и нелинейную стадии развития, приводя в итоге к турбулизации оторвавшегося пограничного слоя и его присоединению к поверхности тела.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Рособразования (проект РНП 2.1.2.3370 «Развитие научного потенциала высшей школы») и РФФИ (проект № 05-01-00034).

В этой модели зона отрыва выступает в роли усилителя внешних возмущений подобно другим конвективно неустойчивым сдвиговым течениям. К настоящему времени такое представление о местных областях отрыва потока обосновано результатами экспериментальных, теоретических исследований и прямого численного моделирования (см. ссылки на оригинальные работы в монографии [4]). Характеристики нарастающих в отрывной области колебаний определяются локальными свойствами течения и при малых амплитудах возмущений хорошо предсказываются линейной теорией гидродинамической устойчивости, развитой для пристенных и свободных пограничных слоев.

### Глобальная динамика отрывных течений

В ряде случаев наряду с переходом к мелкомасштабной турбулентности отрыв ламинарного потока индуцирует крупномасштабное квазипериодическое движение, определяемое как «сход вихрей», или «взрыв отрывного пузыря». Подобное явление наблюдается в экспериментах на аэродинамических профилях, за достаточно большими неоднородностями обтекаемой поверхности, и получено прямым численным моделированием отрывных течений (рис. 2).

Одно из объяснений механизма возникновения крупномасштабных вихрей вписывается в рассмотренную выше модель переходных отрывных пузырей. В этом случае источником вихревого движения считается неустойчивость оторвавшегося слоя, в котором происходит усиление и взаимодействие возмущений завихренности с возрастанием их размера по мере распространения вниз по потоку [6–9]. Иной взгляд на данное явление заключается в том, что в его основе лежат не локальные, а глобальные свойства устойчивости течения в масштабе всей отрывной зоны. Принципиальное отличие когерентного вихреобразования от нарастания возмущений оторвавшегося слоя сдвига было отмечено авторами работы [5], которые объяснили происхождение квазипериодических вихрей свойственной отрывной зоне «неустойчивостью к сходу вихрей».

Подтверждение этой точки зрения было получено в работах [10; 11] при исследовании течения с отрывом пограничного слоя

за уступом поверхности плоской пластины. В экспериментах, выполненных при низком уровне фоновых возмущений в рабочей части аэродинамической трубы, удалось проследить совместное развитие волн неустойчивости сдвигового течения и колебаний на частоте образования крупномасштабных вихрей, по ряду признаков имевших независимое происхождение. В спектре пульсаций волны неустойчивости оторвавшегося слоя и возмущения, соответствующие сходу вихрей, предстают в виде волновых пакетов, разнесенных по частоте колебаний (рис. 3).

Существенное различие между высокочастотными возмущениями оторвавшегося слоя и низкочастотными пульсациями зоны отрыва в условиях генерации крупномасштабных вихрей иллюстрируется фазовыми характеристиками колебаний на рис. 4. Волны неустойчивости представляют собой конвективные (сносовые) возмущения, распространяющиеся в направлении потока, тогда как колебания на частоте вихреобразования таковыми не являются: их фаза растет вниз по потоку в области циркуляции, монотон-

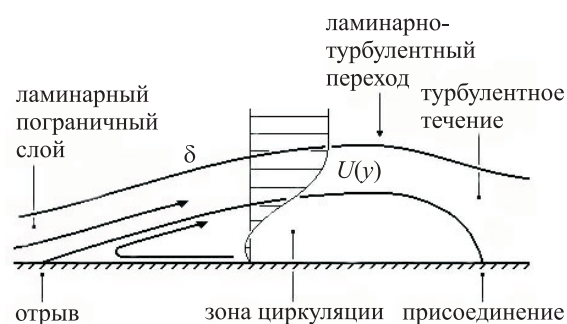


Рис. 1. Схема течения в переходной зоне отрыва пограничного слоя

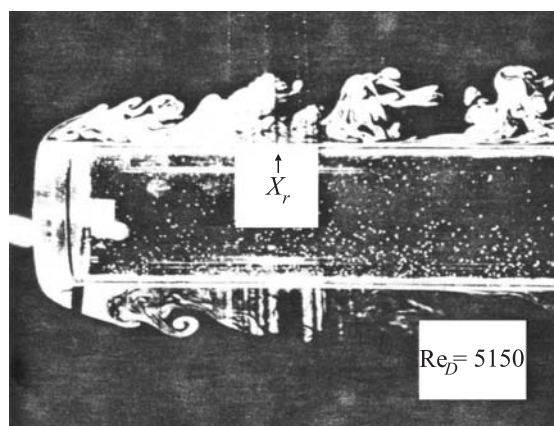


Рис. 2. Образование крупномасштабных вихрей при отрыве пограничного слоя на продольно обтекаемом цилиндре (визуализация течения из работы [5])

но убывая во внешней части оторвавшегося слоя. В отличие от волн неустойчивости, характеристики которых определяются локаль-

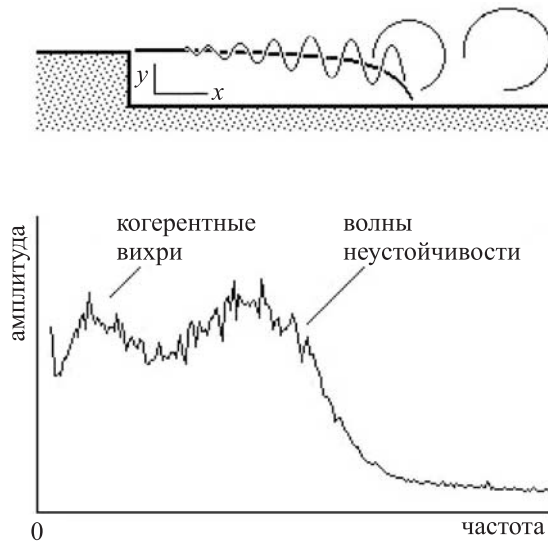


Рис. 3. Спектр пульсаций в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя за двумерным уступом поверхности продольно обтекаемой пластины [10]

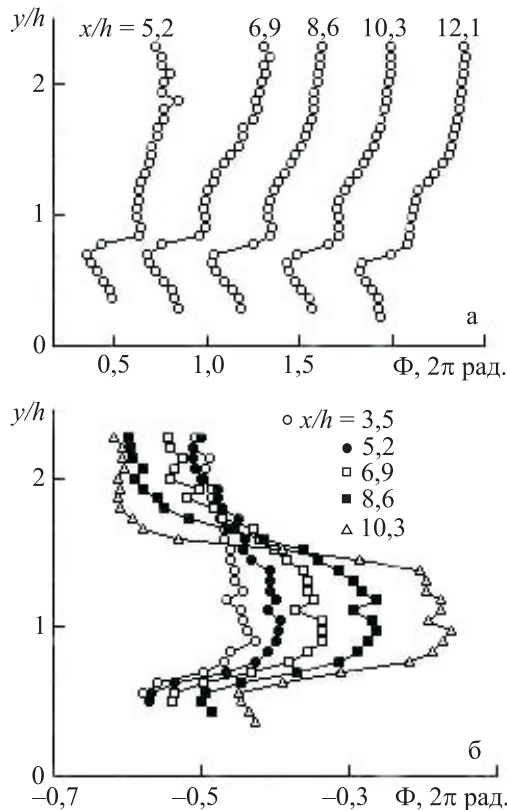


Рис. 4. Фазовые распределения волн неустойчивости (а) и колебаний на частоте схода вихрей (б) в начальном участке зоны отрыва пограничного слоя за двумерным уступом поверхности продольно обтекаемой пластины [11]; расстояние от стенки  $y$  и продольная координата  $x$  нормированы на высоту уступа  $h$

ными свойствами течения, колебания на частоте схода вихрей отражают динамику всей зоны отрыва.

Согласно результатам расчетных работ последнего времени, переход от стационарного режима отрывного обтекания тел к когерентному вихреобразованию происходит с ростом основных параметров течения [12; 13]. В теоретических исследованиях к объяснению возникновения крупномасштабного вихревого движения при отрыве пограничного слоя привлекается концепция локальной абсолютной неустойчивости [14]. Данные расчетов предсказывают смену неустойчивости с конвективной на абсолютную при достаточно большой скорости возвратного течения в глубине зоны отрыва [15–17], что может повлечь развитие глобальных мод колебаний. В результате за точкой отрыва будет формироваться когерентное вихревое движение, возникающее безотносительно конвективных возмущений, проникающих в отрывную зону из набегающего потока. Представление о том, что явление схода вихрей выходит за рамки традиционной модели переходных отрывных пузырей, подтверждается результатами анализа глобальной устойчивости течения в местных областях отрыва потока [18; 19]. В этом отношении отрывные течения подобны другим гидродинамическим системам, в которых сочетается усиление внешнего шума и генерация автоколебаний.

#### Управление неустойчивым течением в местных областях отрыва потока

Обширная тема многолетних исследований – поиск новых методов модификации средних во времени и пульсационных характеристик отрывных течений. При отрыве ламинарного потока, в условиях сильной неустойчивости течения и его глобального отклика на внесенные в зону отрыва возмущения, результат управления может быть получен контролирующими воздействиями слабой интенсивности. В полной мере это проявляется при управлении крупномасштабным отрывом потока, например при его срыве с передней кромки крыла, расположенного под большим углом атаки. Результаты работ по этой тематике обсуждаются в монографии [20] и обзорных статьях [21; 22].

Аналогично ряд возможных методов управления характеристиками течения в местных отрывных зонах опирается на

рассмотренные выше свойства их гидродинамической неустойчивости.

*Модификация среднего поля скорости.* В традиционной модели переходных областей отрыва средние во времени характеристики течения связаны с процессом турбулизации оторвавшегося пограничного слоя. Соответственно, влияя тем или иным способом на развитие волн неустойчивости, удастся, как правило, сократить размеры отрывной зоны. Это достигается изменениями начального спектра нарастающих за точкой отрыва пульсаций и локальных свойств устойчивости течения. В первом случае могут быть использованы внешние периодические воздействия на зону отрыва, например акустическое [23; 24], во втором – охлаждение обтекаемой поверхности и отсасывание пристенного течения [25–27].

*Управление когерентным вихревым движением.* В режиме крупномасштабного вихреобразования представляет интерес управление зарождением и динамикой энергонесущих вихревых структур, определяющих свойства течения на участке присоединения оторвавшегося слоя и ниже по потоку отрывной зоны. Эффективным средством модификации вихревого движения, вызванного неустойчивостью оторвавшегося пограничного слоя, оказываются внешние гармонические воздействия на отрывное течение, регулирующие формирование и взаимодействие вихревых структур [5; 28; 29]. При этом изменения в пульсационной составляющей течения сказываются и на его средних во времени характеристиках, соответствующая вихревая модель предложена в работе [30].

Возможности управления сходом вихрей, инициированных развитием самоподдерживающихся колебаний отрывного течения, были рассмотрены в экспериментах [31; 32]. Опробованные методы воздействия на отрывную зону сводились к искусственному сокращению ее размеров, что должно было повлечь уменьшение вклада глобальных мод колебаний в поле течения. С этой целью применялись генерация высокочастотных волн неустойчивости оторвавшегося слоя [31] и отсасывание пристенного течения на участке его присоединения к обтекаемой поверхностью [32]. В обоих случаях были отмечены существенные изменения вихревого движения. Возбуждение высокочастотных нарастающих колебаний оторвавшегося

слоя удаленным акустическим источником и локально через поперечную щель в поверхности экспериментальной модели приводило к одному и тому же результату: более раннему формированию вихревых структур и уменьшению их интенсивности за участком присоединения потока (рис. 5). Отсасывание пограничного слоя сопровождалось значительным подавлением крупномасштабных вихрей в присоединяющемся течении (рис. 6).

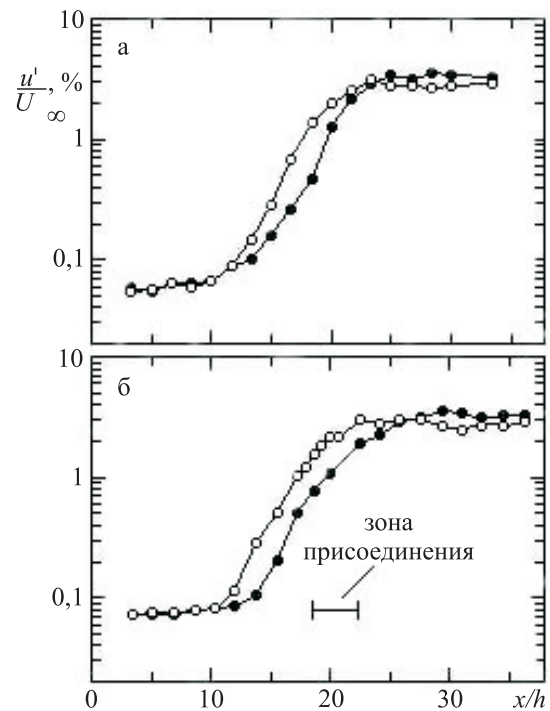


Рис. 5. Изменение максимальной амплитуды колебаний на частоте схода вихрей при отрыве пограничного слоя за двумерным уступом поверхности продольно обтекаемой пластины в условиях акустической (а) и локальной (б) генерации волн неустойчивости, невозмущенное (●) и управляемое (○) течения [31]

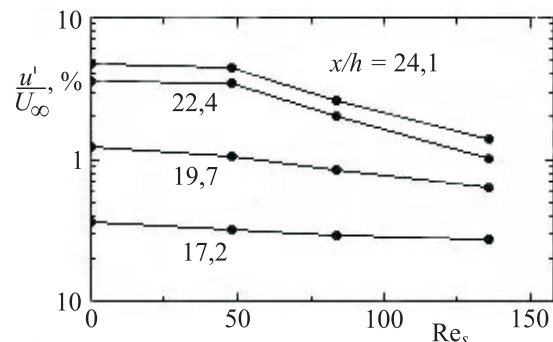


Рис. 6. Изменение максимальной амплитуды колебаний на частоте схода вихрей при отрыве пограничного слоя за двумерным уступом поверхности продольно обтекаемой пластины с интенсивностью отсасывания пристенного течения [32]

### Заключение

Изложенные выше результаты не охватывают многие «частные» в контексте настоящей статьи эффекты неустойчивости течений с местными областями отрыва потока. Предмет продолжающихся теоретических и экспериментальных работ – формирование отрывных течений в условиях конкуренции их локальных и глобальных свойств неустойчивости. В результате складывается уточненная физическая модель явления отрыва потока, в конечном счете необходимая для максимально точного предсказания характеристик отрывных течений и разработки эффективных методов управления ими.

### Список литературы

1. Horton H. P. A semi-empirical theory for the growth and bursting of laminar separation bubbles. Aeronaut. Research Council CP 1073, 1967.
2. Ward J. W. The behaviour and effects of laminar separation bubbles on airfoils in incompressible flow // Journ. of the Royal Aeronaut. Soc. 1963. Vol. 67. P. 783–790.
3. Brendel M., Mueller T. J. Boundary-layer measurements on an airfoil at low Reynolds numbers // Journ. of Aircraft. 1988. Vol. 25. P. 612–617.
4. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В. и др. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 328 с.
5. Sigurdson L. W., Roshko A. The structure and control of a turbulent reattaching flow // Turbulence Management and Relaminarization / Eds. H. W. Liepmann, R. Narasimha. Berlin: Springer Verlag, 1988. P. 497–514.
6. Bestek H., Gruber K., Fasel H. Self-excited unsteadiness of laminar separation bubbles caused by natural transition // The Prediction and Exploitation of Separated Flow. Royal Aeronaut. Soc. L., 1989. P. 14.1–14.16.
7. Hasan M. A. Z. The flow over a backward-facing step under controlled perturbation: laminar separation // J. Fluid Mech. 1992. Vol. 238. P. 73–96.
8. Kiya M. Separation bubbles // Theoretical and Applied Mechanics / Eds. P. Germain, M. Piau, D. Caillerie. Elsevier Sci. Pub. B.V., 1989. P. 173–191.
9. Pauley L. L., Moin P., Reynolds W. C. The structure of two-dimensional separation // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 220. P. 397–411.
10. 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.
11. 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.
12. Dallmann U., Herberg Th., Gebing H. et al. Flow field diagnostics: topological flow changes and spatio-temporal flow structure // AIAA-95-0791. 1995.
13. Marquillie M., Ehrenstein U. On the onset of nonlinear oscillations in a separating boundary-layer flow // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 490. P. 169–188.
14. Huerre P., Monkewitz P. A. Local and global instabilities in spatially developing flows // Annu. Rev. Fluid Mech. 1990. Vol. 22. P. 473–537.
15. Gaster M. Stability of velocity profiles with reverse flow // Instability, Transition and Turbulence / Eds. M. Y. Hussaini, A. Kumar, C. L. Street. Berlin: Springer Verlag, 1992. P. 212–215.
16. Hammond D. A., Redekopp L. G. Local and global instability properties of separation bubbles // Eur. J. Mech. B/Fluids. 1998. Vol. 17. No. 2. P. 145–164.
17. Alam M., Sandham N. D. Direct numerical simulation of «short» laminar separation bubbles with turbulent reattachment // J. Fluid Mech. 2000. Vol. 410. P. 1–28.
18. Theofilis V., Hein S., Dallmann U. On the origins of unsteadiness and three-dimensionality in a laminar separation bubble // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2000. Vol. 358. P. 3229–3246.
19. Theofilis V. Advances in global linear instability analysis of nonparallel and three-dimensional flows // Progress in Aerospace Sciences. 2003. Vol. 39. P. 249–315.
20. Gad-el-Hak M. Flow control: Passive, active and reactive flow management. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
21. Greenblatt D., Wygnanski I. The control of flow separation by periodic excitation // Progr. Aerosp. Sci. 2000. Vol. 36. P. 487–545.
22. Занин Б. Ю., Зверков И. Д., Козлов В. В. и др. О новых методах управления дозвуковыми отрывными течениями // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 1. С. 10–18.

23. Довгаль А. В., Козлов В. В. Влияние акустических возмущений на структуру течения в пограничном слое с неблагоприятным градиентом давления // Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. 1983. № 2. С. 48–52.
24. Zaman K. B. M. Q., McKinzie D. J. Control of laminar separation over airfoils by acoustic excitation // AIAA J. 1991. Vol. 29. No. 7. P. 1075–1083.
25. 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 A. 1990. Vol. 2. No. 3. P. 381–389.
26. 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. Vol. 28. No. 11. P. 1916–1924.
27. Hahn M., Pfenninger W. Prevention of transition over a backward step by suction // J. Aircraft. 1973. Vol. 10. No. 10. P. 618–622.
28. Kiya M., Mochizuki O., Tanaka H. et al. Control of a turbulent leading-edge separation bubble // Separated Flows and Jets. / Eds. V. V. Kozlov, A. V. Dovgal. Berlin: Springer Verlag, 1991. P. 647–656.
29. Рус Ф. В., Кегельман Дж. Т. Управление когерентными структурами в присоединяющихся ламинарных и турбулентных слоях смешения // Аэрокосм. техника. 1987. № 5. С. 137–146.
30. Kiya M., Shimizu M., Mochizuki O. et al. Active forcing of an axisymmetric leading-edge turbulent separation bubble // AIAA-93-3245. 1993.
31. 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.
32. Довгаль А. В., Сорокин А. М. Применение отсоса потока для управления сходом крупномасштабных вихрей при отрыве пограничного слоя // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 4. С. 60–65.

Материал поступил в редакцию 02.10.2007