

УДК 532.526

## **Немодовое нарастание стационарных возмущений ламинарного течения в зоне отрыва пограничного слоя\***

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

<sup>1</sup>*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет*

E-mail: dovgal@itam.nsc.ru

В дозвуковой аэродинамической трубе исследован отклик ламинарного отрывного течения за двумерным уступом на продольно обтекаемой пластине к стационарным возмущениям потока. Их источниками служат элементы неровности поверхности экспериментальной модели, расположенные вблизи линии отрыва. При сопоставлении полученных результатов с аналогичными данными предыдущих работ для других периодических систем элементов выявлены закономерности генерации стационарных возмущений, подтвержденных немодовому нарастанию в отрывной зоне.

**Ключевые слова:** гидродинамическая неустойчивость, отрыв потока, немодовое усиление, аэродинамический эксперимент.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В работах последних лет по возникновению турбулентности в пограничных слоях обсуждается роль эффектов установления в процессе разрушения ламинарного течения. Неортогональность мод колебаний, составляющих возмущение пограничного слоя, приводит к тому, что в определенных условиях генерации оно может испытывать немодовое временное (transient) усиление, в том числе при затухании элементарных волн, которые рассматриваются в классической теории устойчивости [1, 2]. Общее состояние дел в этом направлении исследований ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях изложено в [3]. В лабораторном эксперименте такие возмущения предстают в виде так называемых продольных (полосчатых) структур, возбуждаемых в слое сдвига локальными стационарными и нестационарными неоднородностями потока. Модулируя исходное течение, полосчатые структуры создают предпосылки для развития высокочастотной вторичной неустойчивости пограничного слоя с его последующей турбулизацией.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-01-00027), Министерства образования и науки РФ (грант № РНП. 2.1.2.541).

Подобный сценарий перехода к турбулентности предполагается авторами теоретических и экспериментальных исследований [4, 5].

Возможность немодового усиления возмущений при отрыве ламинарного пограничного слоя показана в экспериментах [6], где рассматривалось развитие полосчатых структур, возбужденных в течении за двумерным прямоугольным уступом на плоской пластине элементами неровности обтекаемой поверхности. В работе наблюдалось нарастание вдоль потока амплитуды стационарной деформации поля скорости отрывного течения, индуцированной вблизи линии отрыва. Результаты получили подтверждение в последующих работах, выполненных в аналогичной экспериментальной постановке с использованием периодических систем элементов неровности различной формы [7–9].

В этих исследованиях при модуляции отрывного течения полосчатыми структурами обнаружено возрастание его неустойчивости относительно нестационарных колебаний, коррелированных с пространственной периодичностью среднего во времени поля скорости. Отмеченный эффект дестабилизации заслуживает внимания в силу того, что интегральные характеристики течений с отрывом ламинарного пограничного слоя в большой мере определяются их свойствами устойчивости и поведением нарастающих в них волновых возмущений. В ряде случаев это позволяет эффективно управлять отрывом ламинарного пограничного слоя с помощью слабых внешних воздействий. Результаты упомянутых выше работ дают основание полагать, что с этой целью может быть использовано также немодовое усиление стационарных гидродинамических возмущений за точкой отрыва.

Изучение развития полосчатых структур при отрыве ламинарного потока продолжено настоящими экспериментами. Полученные данные в сочетании с результатами предыдущих работ позволяют сделать общие выводы относительно условий генерации стационарных возмущений, испытывающих пространственное нарастание в зоне отрыва пограничного слоя за уступом поверхности.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения выполнены в малотурбулентной аэродинамической трубе дозвуковых скоростей потока Т-324 ИТПМ СО РАН, Новосибирск. Экспериментальная установка имеет закрытую рабочую часть сечением  $1 \times 1$  м, длиной 4 м, степень турбулентности свободного потока в которой не превосходит 0,04 %. Исследовалось отрывное обтекание двумерного прямоугольного уступа поверхности на стыке двух пластин из полированного оргстекла толщиной 10 мм и шириной 995 мм, помещенных под нулевым углом атаки (рис. 1). Носовая часть передней пластины в продольном сечении представляла собой два сопряженных полуэллипса, большие полуоси которых имели длину 132 мм, а малые — 2 мм с рабочей стороны модели и 8 мм с противоположной. Задняя пластина была оборудована отклоняемым закрылком для регулирования продольного градиента давления на начальном участке течения и обеспечения минимального уровня фоновых пульсаций скорости предотрывного пограничного слоя.

Отрыв ламинарного течения происходил на уступе поверхности высотой  $h = 3,3$  мм в 300 мм от передней кромки модели. Источниками стационарных возмущений отрывной зоны служили цилиндрические элементы неровности поверхности фиксированного диаметра 2 мм и переменной высоты  $b = 1, 2$  и 3 мм, периодически размещенные в центральной части передней пластины на расстоянии 3 мм

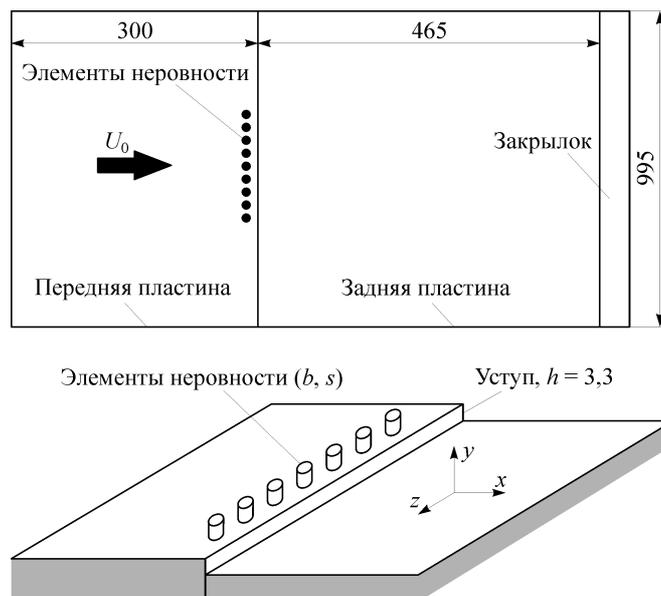


Рис. 1. Экспериментальная модель, размеры в миллиметрах.

перед уступом. Элементы располагались с пространственным периодом  $s = 5, 10$  и  $20$  мм, охватывая участок течения протяженностью  $200$  мм по поперечной координате. Таким образом, экспериментальные данные были получены в девяти режимах измерений, различавшихся геометрическими условиями генерации возмущений.

Средние по времени и пульсационные характеристики течения определялись с помощью термоанемометра постоянной температуры AN 1003 производства компании A.A. Lab Systems Ltd и одноточечного датчика, закрепленного на автоматическом координатном устройстве. Измерения проводились с переменным шагом от  $0,2$  до  $0,5$  мм по нормали к поверхности модели и от  $1$  до  $5$  мм в ее плоскости. Сигнал датчика оцифровывался 16-разрядным АЦП и обрабатывался на персональном компьютере в среде MATLAB.

В используемой ниже системе координат  $x$  — расстояние от уступа в направлении основного потока,  $y$  — нормальная плоскости модели координата, отсчитываемая от поверхности передней пластины,  $z$  — расстояние в поперечном потоку направлении от центрального сечения модели. При дальнейшем изложении полученных результатов все линейные размеры и пространственные координаты нормированы, исключая специально оговоренные случаи, на высоту уступа.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Невозмущенное течение вблизи уступа поверхности

Эксперименты выполнены при скорости внешнего потока над уступом, равной  $U_0 = 6,4$  м/с, что соответствует числу Рейнольдса  $Re_h = U_0 h/\nu = 1350$ . Исходное течение в окрестности уступа иллюстрируется на рис. 2 профилями продольной компоненты средней скорости, измеренными в отсутствие элементов неровности. Сравнение данных, полученных в различных сечениях по координате  $z$ , показывает, что у поверхности экспериментальной модели реализуется близкое двумерному невозмущенное течение. Начальные условия формирования зоны отрыва определяются распределением скорости, измеренным в пограничном слое перед

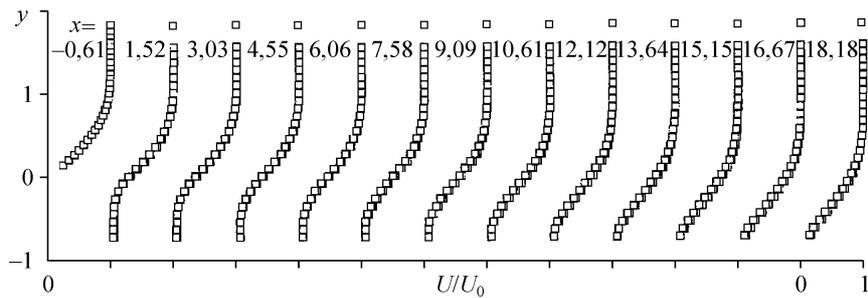


Рис. 2. Распределения средней скорости течения в окрестности уступа при  $z = \pm 20$  мм.

уступом ( $x = -0,61$ ), с толщиной вытеснения  $\delta^* = 1,26$  мм, толщиной потери импульса  $\theta = 0,52$  мм и формпараметром  $\delta^*/\theta = 2,41$ . За уступом ( $x > 0$ ) профили скорости приобретают характерную для областей отрыва форму с точкой перегиба вблизи границы зоны циркуляции и оторвавшегося пограничного слоя. В глубине отрывной зоны, где используемый метод измерений неприменим для получения надежных количественных результатов, скорость возвратного тока не превышает несколько процентов  $U_0$ .

При данном числе Рейнольдса по высоте уступа и низком уровне фоновых пульсаций в рабочей части аэродинамической трубы течение в зоне отрыва оказывается слабо неустойчивым и на всем ее протяжении остается ламинарным. Интегральная амплитуда возмущений скорости  $u'/U_0$ , определенная в полосе частот  $St = fh/U_0 = 0,0025 - 0,25$ , изменяется от 0,12 % вблизи уступа до 0,32 % в конце области измерений ( $x = 18,18$ ). Эти величины значительно ниже уровня пульсаций в турбулентном течении, переход к которому завершается за участком присоединения пограничного слоя. В этих условиях длина отрывной области близка максимальной  $x_r \approx 20$  для течений рассматриваемой конфигурации [10].

## 2.2. Стационарные возмущения зоны отрыва

В каждом из экспериментальных режимов диапазон измерений по координате  $z$  охватывал две длины волны стационарного возмущения зоны отрыва в центральной части модели. Иллюстрацией полученных результатов служат пространственные распределения средней скорости отрывного течения, модулированного элементами неровности фиксированной высоты при их различном взаимном расположении (рис. 3). В случае  $s = 1,52$  наблюдается реверс периодичности поля скорости с продольной координатой: смена фазы его колебаний в направлении  $z$  на противоположную в диапазоне  $x = 1,52 - 4,55$ . Развитие стационарного возмущения зоны отрыва вдоль потока становится монотонным с возрастанием пространственного периода до величины  $s = 3,03$ .

Отмеченная смена фазы колебаний более очевидна на рис. 4, который показывает влияние на отрывное течение элементов неровности переменной высоты, размещенных с одним и тем же периодом. На рисунке приведены изменения с продольной координатой максимальных по толщине вязкого слоя положительных и отрицательных отклонений средней скорости от ее осредненной по  $z$  величины в двух плоскостях  $x$ - $y$ , одна из которых проходит через центр элемента неровности, а другая расположена посередине между двумя соседними элементами. При  $b = 0,30$  возмущение (уровень которого определяется разницей скорости течения в “пике” и во “впадине” ее распределения вдоль  $z$ ) затухает во всей области отрыва. В то же время при  $b = 0,61$  и  $0,91$  первоначальное уменьшение модуляции

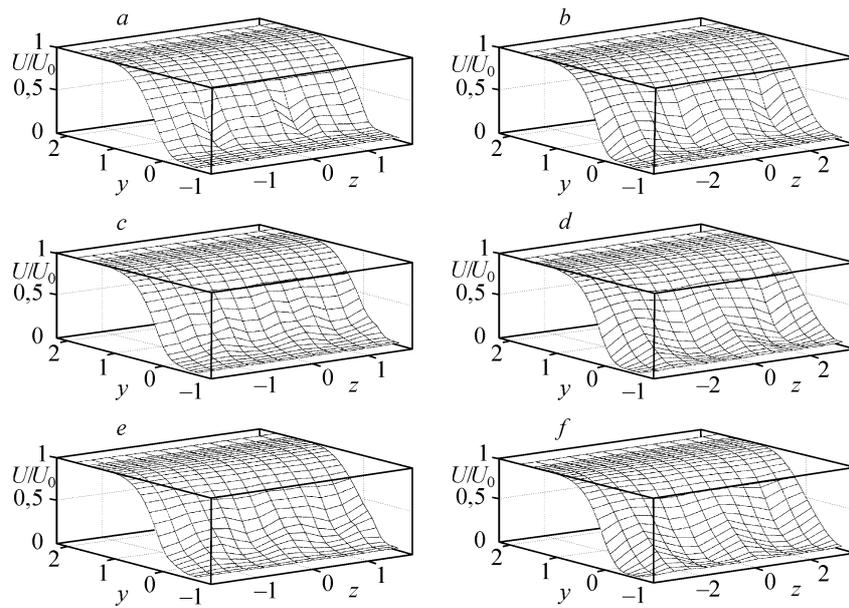


Рис. 3. Среднее течение за уступом поверхности в сечениях  $x = 1,52$  (a, b), 4,55 (c, d) и 7,58 (e, f), возмущенное элементами неровности при  $b = 0,61$  и  $s = 1,52$  (a, c, e), 3,03 (b, d, f).

средней скорости сменяется ее нарастанием на участке  $x \approx 4-7$ , что служит явным признаком немодового усиления стационарного возмущения отрывного течения. Аналогичный эффект известен из результатов работ других авторов для пограничного слоя на плоской пластине, модифицированной элементами неровности обтекаемой поверхности [11, 12].

Результаты, полученные в этих и других режимах измерений, сопоставлены с данными предыдущих работ, выполненных в схожей экспериментальной постановке (см. рис. 5). В координатах  $b, s$  отмечено поведение возмущений зоны отрыва, индуцированных периодическими системами элементов прямоугольной [7], полусферической [8, 9] и цилиндрической (настоящая работа) формы. Темные символы соответствуют экспериментальным условиям, в которых обнаружено нарастание амплитуды стационарной деформации средней скорости течения за точкой отрыва, светлыми — ее монотонное затухание в направлении основного потока. Результаты показаны в координатах, соотношенных с высотой уступа (см. рис. 5, a), толщи-

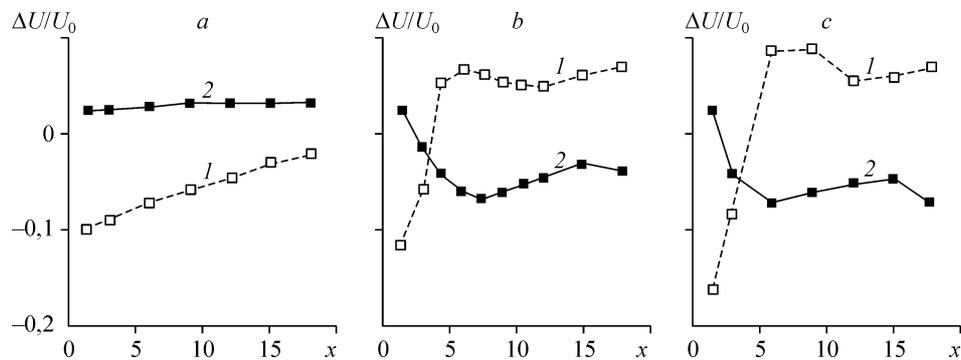


Рис. 4. Максимальные возмущения скорости среднего течения в следе за элементом неровности (1) и в плоскости симметрии между соседними элементами (2) при  $s = 1,52$  и  $b = 0,30$  (a), 0,61 (b) и 0,91 (c).

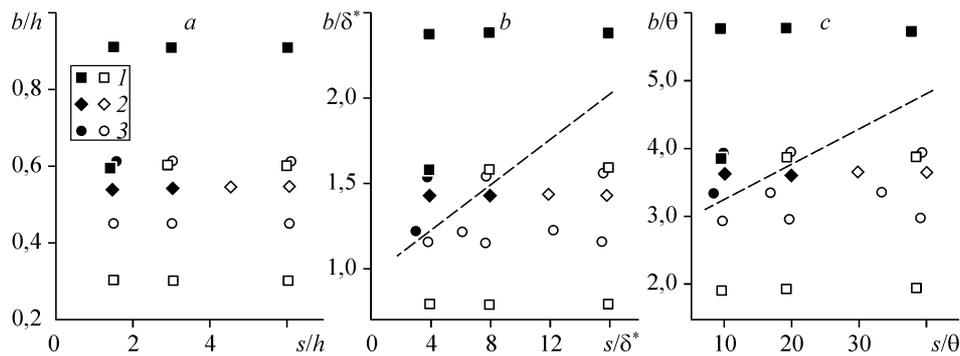


Рис. 5. Обобщение результатов по развитию стационарных возмущений отрывного течения за двумерным уступом поверхности в диапазоне  $Re_h = 1060-1350$ .

Настоящая работа (1), эксперименты [7] (2) и [8, 9] (3).

ной вытеснения (см. рис. 5, *b*) и толщиной потери импульса (см. рис. 5, *c*) отрывающегося двумерного пограничного слоя. Приведенные на рисунке данные позволяют установить общую для исследованных конфигураций источников возмущений закономерность развития полосчатых структур в течении за обратным уступом поверхности. Немодовое усиление стационарных колебаний возникает с уменьшением их пространственного периода и возрастанием начальной амплитуды. Сильное влияние высоты элементов неровности на развитие индуцируемых ими стационарных возмущений ламинарного течения ранее наблюдалось в пограничном слое плоской пластины [13].

Обсуждаемый эффект гидродинамической неустойчивости реализуется в слоях сдвига скорости при оптимальном сочетании условий генерации возмущений с локальными свойствами течения. Поэтому универсальность полученным результатам придает нормировка параметров ( $b$ ,  $s$ ) на характеристики предотрывного пограничного слоя. Примерное положение границы диапазона, в котором происходит нарастание полосчатых структур, отмечено на рис. 5, *b*, *c* штриховыми линиями. При соответствующих характеристиках системы периодически расположенных элементов неровности следует ожидать немодовое усиление стационарных искажений поля скорости и сопутствующей ему неустойчивости отрывного течения относительно нестационарных (вторичных) колебаний. Сопоставление экспериментальных данных по развитию вторичных возмущений в условиях нарастания стационарных полосчатых структур с результатами расчетов линейной устойчивости пространственно периодического отрывного течения — предмет продолжающихся исследований по теме настоящей работы.

Авторы признательны Фонду Александра фон Гумбольдта за поддержку выполненных исследований, Штефану Хайну (Stefan Hein) и Бастиану Вилке (Bastian Wilke) за полезные обсуждения полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ellingsen T.E., Palm E. Stability of linear flow // Phys. Fluids. 1975. Vol. 18. P. 487–488.
2. Landahl M.T. A note on an algebraic instability of inviscid parallel shear flows // J. Fluid Mech. 1980. Vol. 98. P. 243–251.
3. Schmid P.J., Henningson D.S. Stability and transition in shear flows. New York: Springer, 2001. 556 p.
4. Alfredsson P.H., Bakchinov A.A., Kozlov V.V., Matsubara M. Laminar-turbulent transition at a high level of a free stream turbulence // Proc. IUTAM Symposium on Nonlinear Instability and Transition in Three-Dimensional Boundary Layers / Eds P.W. Duck, P. Hall. Dordrecht: Kluwer, 1996. P. 423–436.

5. **Cossu C., Brandt L.** On Tollmien–Schlichting-like waves in streaky boundary layers // Eur. J. Mech. B/Fluids. 2004. Vol. 23. P. 815–833.
6. **Бойко А.В., Довгал А.В., Лохов Д.С.** Развитие стационарных локализованных возмущений ламинарного течения в присоединенном и оторвавшемся пограничных слоях // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 4. С. 533–539.
7. **Boiko A.V., Dovgal A.V., Hein S.** Control of a laminar separating boundary layer by induced stationary perturbations // Eur. J. Mech. B/Fluids. 2008. Vol. 27, No. 4. P. 466–476.
8. **Boiko A.V., Dovgal A.V., Sorokin A.M.** Secondary instability of a laminar separation bubble perturbed by stationary streamwise structures // XIV Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, CD-ROM Proc., ISBN 978-5-98901-040-0. Novosibirsk, 2008. 5 p.
9. **Boiko A.V., Dovgal A.V., Hein S., Henning A., Sorokin A.** Particle image velocimetry of streaky structures in a laminar separation bubble // DLR-IB. 2008. No. 224-2008 A 20. 18 p.
10. **Sinha S.N., Gupta A.K., Oberai M.M.** Laminar separating flow over backsteps and cavities, Pt. I: Backsteps // AIAA J. 1981. Vol. 19. P. 1527–1530.
11. **Kendall J.** Laminar boundary layer velocity distortion by surface roughness: Effect upon stability // AIAA Paper. 1981. No. 81-0195. 10 p.
12. **White E.B.** Transient growth of stationary disturbances in a flat plate boundary layer // Phys. Fluids. 2002. Vol. 14. P. 4429–4439.
13. **White E.B., Rice J.M., Ergin F.G.** Receptivity of stationary transient disturbances to surface roughness // Phys. Fluids. 2005. Vol. 17. P. 064109-1–064109-12.

*Статья поступила в редакцию 15 сентября 2010 г.*