

УДК 532.526.013.4

© 2000 г. А.В. ДОВГАЛЬ, В.В. КОЗЛОВ, А.М. СОРОКИН

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛОКАЛЬНОГО СТАЦИОНАРНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТОРВАВШЕГОСЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

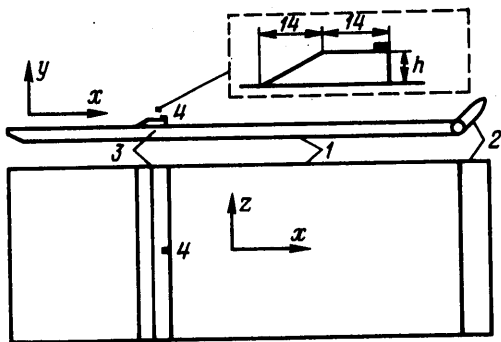
В аэродинамической трубе смоделировано отрывное обтекание поперечного выступа на поверхности пластины. Исследована линейная устойчивость двумерного ламинарного течения в зоне отрыва с наложенным на него стационарным возмущением, сосредоточенным в узкой области по размаху модели. Показано экспериментально, что локальная неоднородность течения приводит к изменению свойств его устойчивости: частот нарастающих колебаний, их коэффициентов усиления и дисперсионных характеристик. В результате поперечные градиенты скорости течения, индуцированные в отрывной зоне, оказывают на его сильное дестабилизирующее влияние.

Явление отрыва ламинарного пограничного слоя в набегающем установившемся потоке сопровождается, как правило, развитием пульсационного движения. Усиление возмущений течения связано с его гидродинамической неустойчивостью, которая возникает в отрывных зонах уже при сравнительно небольших числах Рейнольдса. Распространенность данного явления вызывает внимание исследователей к вопросам устойчивости отрывных течений.

Основные результаты в этой области получены к настоящему времени для отрыва в двумерных конфигурациях – сравнительно простых задачах с точки зрения теории и экспериментального моделирования. Более подробно изучена устойчивость течений к малым возмущениям. Итоги исследований проясняют причину дестабилизирующего воздействия отрыва на пристенное течение как следствие его возрастающей неустойчивости. В частности, сопоставление результатов классической теории устойчивости с данными экспериментов [1–6] и прямого численного моделирования [7–9] указывают на ее применимость к отрывным зонам малых размеров, где нарастание колебаний оторвавшегося слоя определяется его локальными характеристиками. Таким образом, в результате исследований установлены основные свойства устойчивости номинально двумерных (подразумевается поле осредненной скорости) отрывных течений.

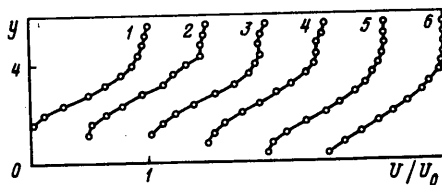
Задача настоящей работы заключается в выяснении того, каким образом характеристики нарастающих колебаний оторвавшегося слоя изменяются под действием пространственной неоднородности ламинарного течения. Экспериментально изучается устойчивость течения в зоне отрыва, возмущенного локально в поперечном направлении.

**1. Методы исследования.** Результаты работы получены в дозвуковой аэродинамической трубе МТ-324 ИТПМ СО РАН: установке с закрытой рабочей частью размерами  $200 \times 200 \times 800$  мм и степенью турбулентности свободного потока  $\epsilon \approx 0,1\%$ . В качестве экспериментальной модели использовалась пластина, помещенная в рабочей части аэродинамической трубы под нулевым углом атаки (фиг. 1). Пластина имела длину 725, ширину 200, толщину 10 (в мм) и была снабжена закрылком, регулировкой которого обеспечивалось безотрывное обтекание ее носика. Отрыв пограничного слоя происходил в 220 мм от передней кромки модели за выступом обтекаемой поверхности высотой  $h = 2$  мм, расположенными поперек потока. Локальное трехмерное возмущение течения создавалось элементом неровности квадратного сечения  $3 \times 3$  мм и высотой 0,46 мм, центр которого находился у заднего среза выступа на расстоянии 218,5 мм от передней кромки модели в плоскости ее симметрии.



Фиг. 1

Фиг. 1. Экспериментальная модель: 1 – пластина, 2 – закрылок, 3 – двумерный выступ поверхности, 4 – элемент неровности



Фиг. 2

Фиг. 2. Профили осредненной скорости в сечении  $z = 19$  мм: 1 – 6 –  $x = 5, 10, 20, 30, 40, 50$  мм

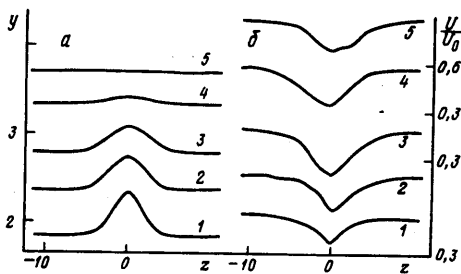
Исследование проводилось в естественных условиях аэродинамической трубы и при моделировании возмущений завихренности, развивающихся в отрывной зоне. Контролируемые колебания генерировались внешним акустическим полем динамического громкоговорителя, установленного ниже по потоку от экспериментальной модели. Осредненная во времени и пульсационная компоненты скорости течения измерялись термоанемометром (тип DISA 55 M01) с линеаризованной характеристикой и одноточечными датчиками.

**2. Обтекание модели в естественных условиях.** Основные измерения выполнены при скорости внешнего течения над выступом поверхности  $U_\infty = 5,5$  м/с, что соответствует числу Рейнольдса по высоте препятствия  $Re_h = 710$ . При изложении результатов используется прямоугольная система координат  $x, y, z$ :  $x$  измеряется в направлении потока от заднего края двумерного выступа поверхности пластины,  $y$  – нормальная к пластине,  $z$  отсчитывается от центрального сечения по размаху модели. Интегральные характеристики отрывающегося пограничного слоя связаны соотношением  $\delta_1/\theta = 2,36$ , где  $\delta_1$  – толщина вытеснения,  $\theta$  – толщина потери импульса соответственно. Нормированная высота двумерного выступа поверхности пластины  $h/\delta_1$  равна 2,0.

За препятствием в местной зоне отрыва пограничного слоя профили средней скорости измерены в стороне от трехмерного элемента неровности. В каждом сечении по координате  $x$  продольная компонента скорости на фиг. 2 нормирована на ее величину во внешнем потоке  $U_0$  (значение которой близко к  $U_\infty$ ). На начальном участке зоны отрыва средняя скорость у поверхности пластины мала. Для этой области течения данные не приведены, так как используемый метод не дает здесь точных количественных результатов. Отрыв пограничного слоя сопровождается его присоединением в диапазоне  $x = 40-50$  мм. Протяженность области циркуляции, отнесенная к высоте препятствия, приблизительно равна 20–25 и сопоставима с соответствующими данными [1, 10] для высот двумерных выступов поверхности порядка толщины пограничного слоя.

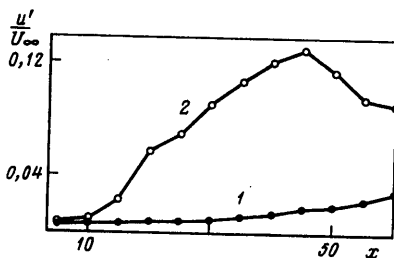
Элемент неровности, расположенный у линии отрыва, искажает поле скорости, форма которого показана на фиг. 3. Линии постоянных значений  $U$  в плоскости  $x = \text{const}$  приведены на фиг. 3, а. Изменение средней скорости в трансверсальном направлении на различном удалении от выступа вдоль потока изображено на фиг. 3, б: в каждом сечении по  $x$  измерения проведены на фиксированном расстоянии от поверхности модели, где  $U/U_0 \sim 0,5$  в двумерном течении при  $z = 19$  мм. Возмущение, вносимое трехмерным элементом неровности, слабо распространяется в трансверсальном направлении и локализовано в узкой области с размером по  $z$ , сопоставимым с толщиной отрывной зоны.

Неустойчивость отрывающегося ламинарного слоя вызывает усиление его возмущений в направлении потока. При этом в условиях настоящих экспериментов (при выбранной конфигурации модели, числе Рейнольдса, относительной высоте препятствия и уровне внешних возмущений) двумерное течение за выступом поверхности остается ламинар-



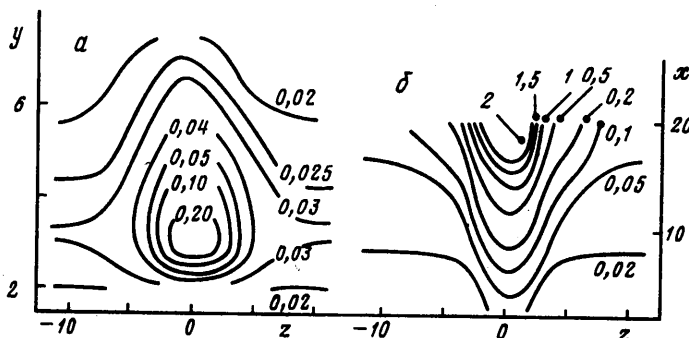
Фиг. 3

Фиг. 3. Возмущение скорости течения, индуцированное элементом неоднородности, *a* – в сечении  $x = 5$  мм: 1 – 5 –  $U/U_0 = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,8$ ; *b* – эволюция профиля скорости вдоль размаха: 1 – 5 –  $x = 5, 10, 20, 30, 40$  мм



Фиг. 4

Фиг. 4. Нарастание в направлении потока интегральной по частотному спектру амплитуды пульсаций: 1, 2, –  $z = 19; 0$  мм

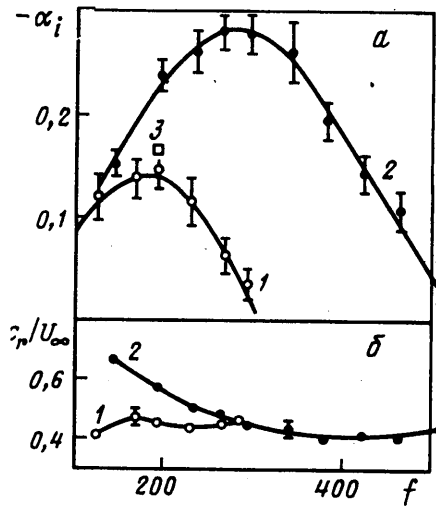


Фиг. 5. Пространственная структура колебаний оторвавшегося слоя для частоты возмущения 294 Гц: *a* – распределение  $u'/U_0$  (%) в сечении  $x = 10$  мм, *b* – эволюция  $u'/U_\infty$  (%) вдоль потока

ным на всем протяжении отрывной зоны. В следе за трехмерным элементом неровности возмущения нарастают значительно быстрее. Иллюстрацией служит фиг. 4, где приведены распределения вдоль потока интегральной по частотному спектру амплитуды пульсаций скорости, измеренные в максимуме возмущений по нормальной координате в обоих случаях. В области течения, возмущенного элементом неровности, точка перехода, отождествляемая с положением максимума кривой  $u'(x)$ , расположена при  $x \approx 45$  мм.

**3. Моделирование волн неустойчивости.** Устойчивость течения в зоне отрыва далее изучалась при слабом акустическом возбуждении монохроматических возмущений завихренности, что позволило определить количественные характеристики колебаний, нарастающих в оторвавшемся слое. На фиг. 5 изображены пространственные распределения среднеквадратичной амплитуды пульсаций  $u'_r$ , измеренные в узкой полосе  $\Delta f = 4$  Гц на частоте возбуждения, лежащей в пределах спектрального диапазона неустойчивости течения. Линии постоянной амплитуды пульсаций в плоскости  $y-z$  приведены на фиг. 5, *a*. Фигура 5, *b* иллюстрирует развитие возмущений в плане, данные получены в максимуме колебаний по нормальной координате. Сопоставление результатов с аналогичными распределениями осредненной скорости на фиг. 3 показывает сравнительно быстрый рост возмущений, относящихся к участку течения, искаженного трехмерным элементом неоднородности. При этом данные по усилению колебаний в направлении потока, полученные при варьировании интенсивности акустического возбуждения, подтвердили их линейность по амплитуде до ее величины, по меньшей мере равной 3–4%  $U_0$ .

Свойства устойчивости двумерного и возмущенного течений за выступом поверхности сравниваются на фиг. 6. Коэффициенты нарастания колебаний ( $-\alpha_r$ ) определены в области линейного развития волн из экспоненциальной аппроксимации зависимости их амплитуды



Фиг. 6. Устойчивость двумерного и возмущенного течений в зоне отрыва, *a* – пространственные инкременты ( $\text{мм}^{-1}$ ), *б* – скорости распространения колебаний в зависимости от частоты (Гц): 1, 2 –  $z = 19$ ; 0 мм, 3 – в двумерном течении при  $Re_h = 900$ ,  $h/\delta_1 = 2,4$

от  $x$ ; скорости распространения  $c_r$  – по изменению фазы колебаний в направлении потока. Характеристики волн неустойчивости – частотные диапазоны нарастающих возмущений, их инкременты и дисперсионные кривые – заметно различаются в том и другом случаях.

Локальное искажение основного течения приводит к дестабилизации оторвавшегося слоя. Ожидается, что она зависит от высоты препятствия, которая возрастает за счет элемента неровности. Оценку влияния относительной толщины зоны отрыва на устойчивость дает коэффициент усиления колебаний одной из частот, определенный в двумерном течении при большей скорости внешнего потока (фиг. 6, *a*). В этом случае параметры отрывающегося течения составляют  $Re_h = 900$  и  $h/\delta_1 = 2,4$ , величины которых близки к значениям 870 и 2,5, рассчитанным по высоте выступа  $h^*$  с расположенным на нем элементом неровности, в условиях настоящего эксперимента. Сохраняющееся при этом большое различие коэффициентов усиления возмущений в двух- и трехмерном течениях не удастся объяснить увеличением выступа поверхности. Таким образом, причина дестабилизации заключается именно в трехмерности основного течения – его неоднородности в трансверсальном направлении.

**Заключение.** Результаты настоящего исследования показывают, что течение в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя может быть значительно дестабилизировано малой неоднородностью. Характеристики колебаний, нарастающих в возмущенной области течения и двумерном оторвавшемся слое, заметно различаются между собой. Экспериментальные данные позволяют считать это эффектом трехмерности течения – появления дополнительных поперечных градиентов скорости, наведенных в зоне отрыва стационарным возмущением.

Волны неустойчивости, нарастающие в области течения, искаженной элементом неровности, можно расценивать в качестве вторичных возмущений по отношению к первичной стационарной деформации поля скорости. В этом смысле полученные результаты коррелируют с известными данными по ламинарно-турбулентному переходу в присоединенном пограничном слое, поперечная модуляция которого инициирует вторичные колебания [11]. Изученная здесь конфигурация течения, в частности, представляется простейшей экспериментальной моделью развития волновых явлений, регистрируемых в процессе турбулизации пограничного слоя при повышенной (до 4%) степени турбулентности набегающего потока, с образованием "продольных структур", которые могут породить высокочастотные нарастающие возмущения [12].

Работа поддержана Международным фондом INTAS, грант № 96-2225.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klebanoff P.S., Tidstrom K.D.* Mechanism by which a two-dimensional roughness element induces boundary-layer transition // *Phys. Fluids*. 1972. V. 15. № 7. P. 1173–1188.
2. *Бойко А.В., Довгаль А.В.* Неустойчивость локальных отрывных течений к возмущениям малых амплитуд // *Сибирский физ.-техн. журн.* 1992. Вып. 3. С. 19–24.
3. *Dovgal A.V., Kozlov V.V., Michalke A.* Laminar boundary layer separation: instability and associated phenomena // *Progr. Aerospace Sci.* 1994. V. 30. № 1. P. 61–94.
4. *Masad J.A., Nayfeh A.H.* The influence of imperfections on the stability of subsonic boundary layers // *Instabilities and Turbulence in Engineering Flows* / Ed. D.E. Ashpis et al. Netherlands: Kluwer, 1993. P. 65–82.
5. *Michalke A.* On the instability of wall-boundary layers close to separation // *Separated Flows and Jets* / Ed. V.V. Kozlov, A.V. Dovgal. Berlin: Springer, 1991. P. 557–564.
6. *Dovgal A.V., Kozlov V.V., Michalke A.* Contribution to the instability of laminar separating flows along axisymmetric bodies. Pt II. Experiment and comparison with theory // *Europ. J. Mech. B/Fluids*. 1995. V. 14. № 3. P. 351–365.
7. *Gruber K., Bestek H., Fasel H.* Interaction between a Tollmien-Schlichting wave and a laminar separation bubble // *AIAA Paper*. 1987. № 87-1256. 10 p.
8. *Maucher U., Rist U., Wagner S.* Direct numerical simulation of airfoil separation bubbles // *ECCOMAS 94* / J. Wiley & Sons, Ltd, 1994. P. 471–477.
9. *Rist U., Maucher U.* Direct numerical simulation of 2-D and 3-D instability waves in a laminar separation bubble // *AGARD-CP-551*. 1994. P. 36-1–36-7.
10. *Gibbings J.C., Goksel O.T., Hall D.J.* The influence of roughness trips upon boundary-layer transition. Pt 1. Characteristics of wire trips // *Aeronaut. J.* 1986. V. 90. № 898. P. 289–301.
11. *Bakchinov A.A., Grek G.R., Klingmann B.G.B., Kozlov V.V.* Transition experiments in a boundary layer with embedded streamwise vortices // *Phys. Fluids*. 1995. V. 7. № 4. P. 820–832.
12. *Бакчинов А.А., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В.* Экспериментальное исследование взаимодействия продольных "полосчатых" структур с высокочастотным возмущением // *Изв. РАН. МЖГ*. 1998. № 5. С. 39–49.

Новосибирск

Поступила в редакцию  
22.X.1998