

УДК 532.526

Устойчивость периодического во времени течения с отрывом ламинарного пограничного слоя*

А.В. Бойко^{1,2}, А.В. Довгаль¹, А.М. Сорокин¹

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Тюменский государственный университет

E-mail: boiko@itam.nsc.ru, dovgal@itam.nsc.ru

Исследовано влияние низкочастотной модуляции течения за прямоугольным уступом поверхности на амплитудные характеристики возмущений оторвавшегося ламинарного пограничного слоя. Опытные данные получены термоанемометрическим методом в аэродинамической трубе при малой дозвуковой скорости воздушного потока. Определена реакция отрывного течения на его длинноволновые колебания, генерируемые локальным источником на поверхности экспериментальной модели. Низкочастотная нестационарность зоны отрыва приводит к возрастанию уровня пульсаций скорости оторвавшегося пограничного слоя, которые доминируют в процессе ламинарно-турбулентного перехода и определяют состояние течения в пристенной зоне потока.

Ключевые слова: гидродинамическая устойчивость, отрыв пограничного слоя, обтекание уступа поверхности, нестационарное течение.

Введение

Течения с отрывом ламинарного пограничного слоя являются объектом многолетних экспериментальных и теоретических исследований. Как правило, отрыв потока, за исключением диапазона предельно малых чисел Рейнольдса, приводит к возрастанию неустойчивости течения, вызывая усиление пульсаций скорости и развитие вихревого движения. В этих условиях образование отрывной зоны тесно связано с переходом к турбулентности, который завершается в ее пределах или вблизи участка присоединения оторвавшегося пограничного слоя [1]. Обширные результаты по данной тематике получены в представлении о не зависящем от времени основном течении, на фоне которого происходит усиление возмущений завихренности (см. ссылки на оригинальные публикации в обзорах [2, 3] и монографии [4]). В меньшей степени изучены эффекты неустойчивости областей отрыва пограничного слоя, подверженных низкочастотным колебаниям. Они могут быть вызваны, например, периодическим изменением поля скорости при натекании вихревого следа на лопасти турбин (см. статью [5] и цитируемую в ней литературу), осцилляциями несущей поверхности в набегающем потоке [6–8]. Результаты этих работ показывают, что нестационарность потока оказывает заметное влияние

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-19-00460).

на положение, размеры отрывной зоны и переход пристенного течения в турбулентное состояние. С другой стороны, низкочастотное движение в областях отрыва пограничного слоя связано с развитием автоколебаний, которые наблюдаются при отрыве стационарного потока от гладкой поверхности и на ее локальных геометрических неоднородностях. Самовозбуждение отрывных течений приводит к генерации крупномасштабных вихрей [9, 10] и «медленным» колебаниям оторвавшегося слоя сдвига скорости, которые обозначаются в зарубежной литературе термином «flapping». Последние отмечены авторами многочисленных экспериментов [11–16] и др., теоретическая модель их возникновения предложена в работе [17]. Характерные частоты этих колебаний и волн неустойчивости, нарастающих за точкой отрыва, различаются на порядки величины.

Результаты упомянутых выше исследований, наряду с данными других тематически близких работ, показывают, что низкочастотная нестационарность свойственна отрывным течениям, возникающим в различных геометрических условиях и широком диапазоне чисел Рейнольдса. Механизм ее влияния на отрыв потока, возможно, заключается в модуляции высокочастотных возмущений слоя сдвига скорости, усиление которых определяет переход к турбулентности и, в конечном счете, формирование области оторвавшегося течения. Подтверждение этого эффекта неустойчивости получено в настоящем эксперименте.

Методика эксперимента

Исследование проведено в дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН, которая представляет собой установку замкнутого типа с закрытой рабочей частью размером $4 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$, степень турбулентности свободного потока в ней не превышает 0,04 %. Экспериментальная модель длиной 765 мм и шириной 995 мм образована двумя пластинами из полированного оргстекла каждая толщиной 10 мм, на стыке которых располагался прямоугольный уступ обтекаемой потоком поверхности (рис. 1). Носовая часть передней пластины была выполнена в виде двух сопряженных полуэллипсов с соотношением полуосей 2 мм / 138 мм на ее рабочей стороне и 8 мм / 138 мм — на противоположной. Модель располагалась под нулевым углом атаки; уровень пульсаций скорости ламинарного пограничного слоя на начальном участке течения минимизировался с помощью отклоняемого закрылка в хвостовой части задней пластины.

Низкочастотные возмущения отрывной зоны за уступом поверхности порождались периодическим вдувом/отсосом воздуха в пристенную зону течения через поперечную щель длиной 70 мм и шириной 0,4 мм в поверхности модели на расстоянии 55 мм за уступом. Для этого использовался источник акустических колебаний, расположенный за пределами аэродинамической трубы. Генерируемые им пульсации давления распространялись до щели по пневмотрассе. Влияние периодической модуляции отрывной зоны на устойчивость течения определялось путем измерения характеристик контролируемых гармонических во времени возмущений завихренности оторвавшегося пограничного слоя. Нарастающие за линией отрыва высокочастотные волны неустойчивости возбуждались звуковыми

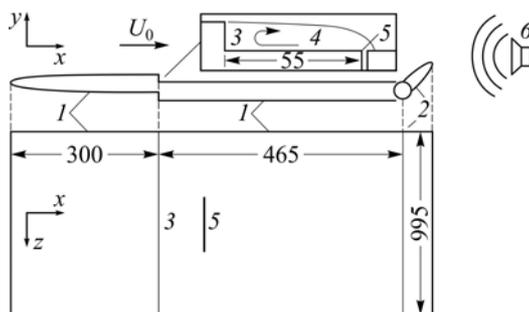


Рис. 1. Схема эксперимента.

- 1 — пластины, 2 — закрылок,
3 — уступ поверхности, 4 — зона отрыва пограничного слоя, 5 — поперечная щель в поверхности задней пластины,
6 — динамический громкоговоритель; размеры приведены в миллиметрах.

колебаниями динамического громкоговорителя, установленного в рабочей части аэродинамической трубы ниже по потоку от экспериментальной модели.

Результаты работы получены при измерении продольной компоненты скорости течения термоанемометрическим методом. С этой целью использовался термоанемометр постоянной температуры AN 1003 компании A.A. Lab Systems Ltd, одноточечный датчик которого с вольфрамовым чувствительным элементом диаметром 5 мкм и длиной 1,5 мм тарировался во внешнем потоке по показаниям трубки Прандтля. Датчик закреплялся на автоматическом координатном устройстве, которое обеспечивало его программируемое перемещение в области измерений с точностью 10 мкм вдоль потока, 10 мкм в поперечном ему направлении и 5 мкм по нормали к поверхности модели. Сигнал датчика регистрировался при величине перегрева нити, равной 80 %, оцифровывался 14-разрядным аналого-цифровым преобразователем L-card E14-440 и обрабатывался на персональном компьютере в среде MATLAB. В каждой точке измерений записывалась единичная реализация термоанемометрического сигнала длиной 2 секунды при частоте считывания 2500 Гц.

В выбранном экспериментальном режиме высота уступа h составляла 2,8 мм, скорость внешнего потока U_0 над уступом равнялась 8,7 м/с. При соответствующем числе Рейнольдса $Re_h = U_0 h / \nu = 1570$ в зоне отрыва было реализовано ламинарное неустойчивое течение, на протяженном участке которого можно было наблюдать развитие малых колебаний оторвавшегося пограничного слоя. Результаты измерений представлены ниже в декартовой системе координат с началом отсчета в плоскости симметрии модели на стыке пластин, при этом ось x направлена вдоль потока, y — по нормали к поверхности, z — в трансверсальном потоку направлении. Основные экспериментальные данные получены в сечении $z = 0$ (при последующем изложении результатов специально не оговорено).

Результаты исследований

Исходное течение в окрестности уступа поверхности представлено на рис. 2. Здесь изображены профили средней скорости $U(y)$ вблизи стенки в различных сечениях по продольной координате. Крайнее левое распределение скорости измерено при $x = -5$ мм в предотрывном ламинарном пограничном слое, остальные — по мере удаления от уступа в направлении потока. За уступом профили имеют характерный для отрывного течения вид с максимальным градиентом скорости вблизи внешней границы зоны циркуляции. Судя по приведенным данным, длина области отрыва составляет примерно 70÷80 мм; в последнем сечении ($x = 90$ мм) пограничный слой присоединен к поверхности модели.

Неустойчивость течения за точкой отрыва вызывает пространственное усиление его возмущений, в спектре которых выделяется волновой пакет колебаний на частотах 200÷350 Гц (см. рис. 3). На протяжении отрывной области интегральная амплитуда

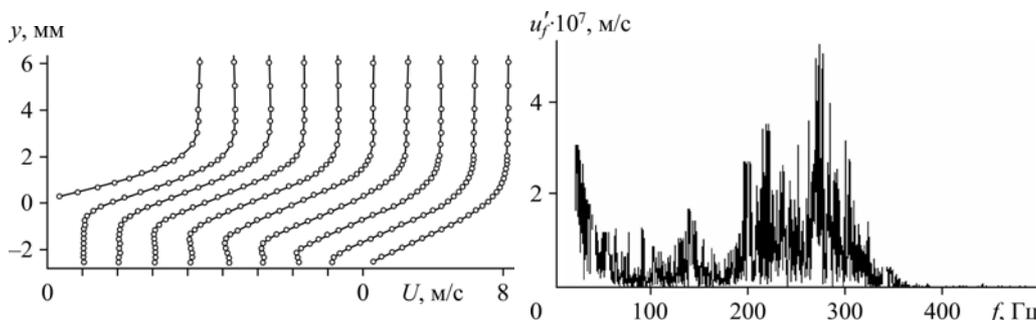


Рис. 2. Профили средней скорости течения вблизи уступа поверхности экспериментальной модели в сечениях (слева направо) $x = -5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ мм.

Рис. 3. Спектр пульсаций продольной компоненты скорости u'_f по частоте колебаний. $x = 40$ мм, $y = 0,2$ мм.

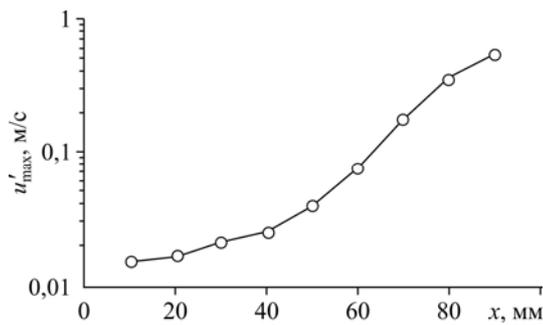


Рис. 4. Изменение с продольной координатой максимальной среднеквадратичной амплитуды возмущений u'_{\max} в диапазоне частот 4÷1250 Гц.

меньше тех, которые характерны для турбулентного режима течения в пристенной зоне потока. Таким образом, в настоящих экспериментальных условиях — при достаточно малом числе Рейнольдса и низком уровне фоновых возмущений в рабочей части аэродинамической трубы — переход к турбулентности завершается ниже по потоку области отрыва в присоединенном пограничном слое.

пульсаций скорости возрастает, достигая на участке присоединения оторвавшегося слоя 2÷4 % скорости внешнего потока (рис. 4). Эти величины заметно

Отрывное течение с приведенными выше характеристиками модулировалось во времени на предельно низких частотах колебаний, которые удавалось стабильно генерировать через поперечную щель в поверхности модели. Представления о вынужденном низкочастотном движении зоны отрыва дают амплитудно-фазовые распределения возмущения скорости на частоте возбуждения. Профили колебаний по нормали к стенке, измеренные в одном из поперечных сечений потока, показаны на рис. 5. Результатов измерений в глубине отрывной зоны не приведено, поскольку скорость течения на этом участке близка к нулю и характеристики пульсаций не могут быть определены термоанемометрическим методом с приемлемой точностью. Как и следовало ожидать, наибольшее отклонение мгновенной скорости течения от ее средней во времени величины наблюдается в сдвиговом слое на внешней границе зоны циркуляции. Максимальная среднеквадратичная амплитуда пульсаций, составляющая примерно 10 % скорости внешнего потока, регистрируется вблизи источника низкочастотного возмущения (рис. 6a). Монотонное уменьшение фазы колебаний в направлении потока, исключая ее скачок в окрестности щели, по существу отличает эти колебания от конвективных возмущений течения со сдвигом скорости (рис. 6b). Судя по полученным данным, длина

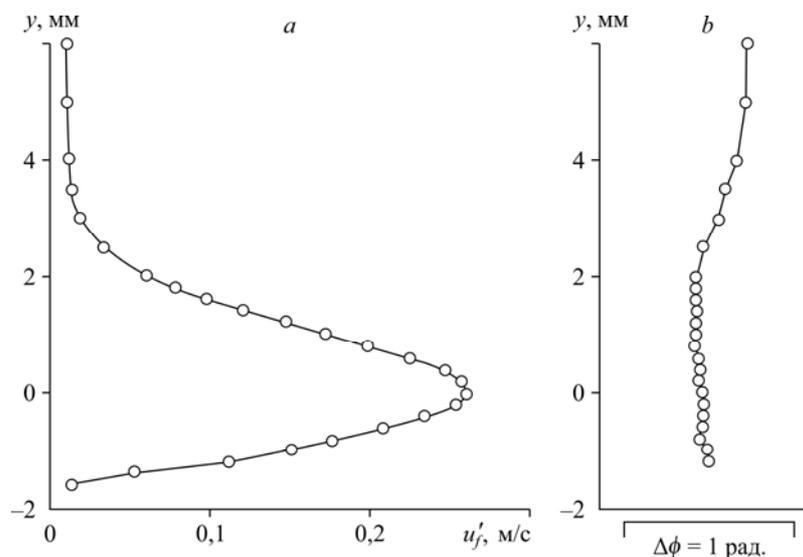


Рис. 5. Амплитудный (a) и фазовый (b) профили колебаний скорости течения на частоте модуляции 10 Гц в сечении $x = 30$ мм.

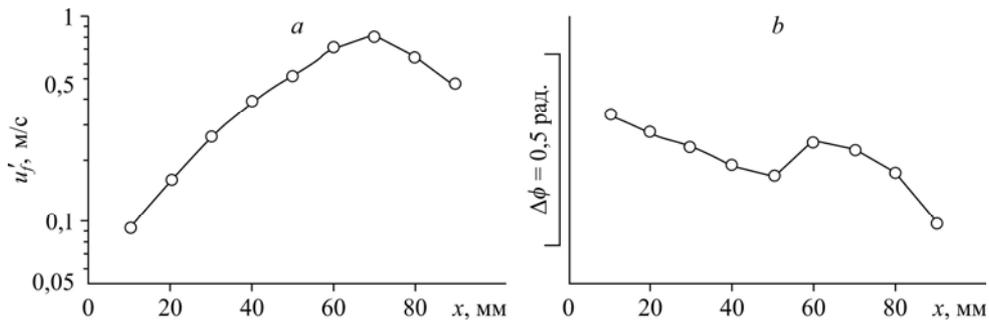


Рис. 6. Изменения с продольной координатой амплитуды (а) и фазы (б) колебаний на частоте модуляции 10 Гц в максимуме их интенсивности по нормали к поверхности модели.

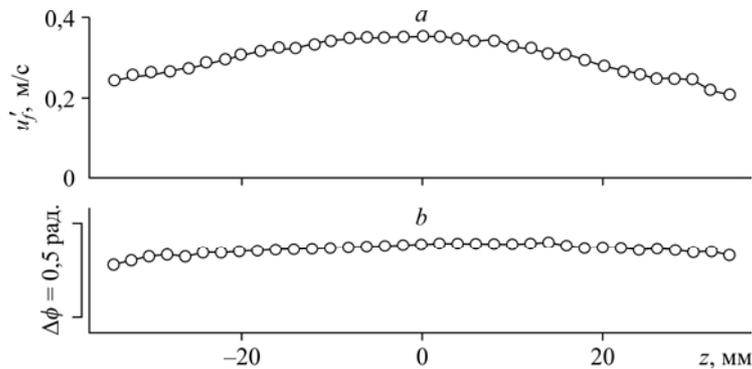
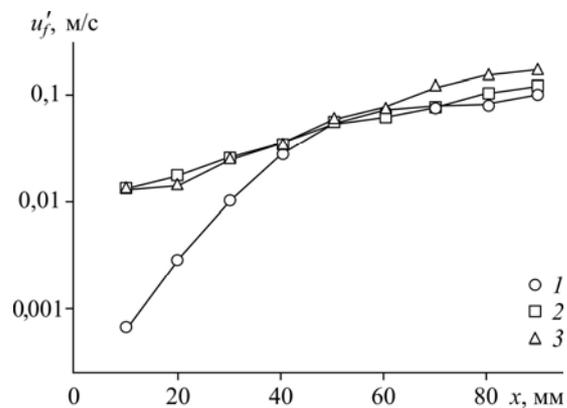


Рис. 7. Распределения амплитуды (а) и фазы (б) колебаний на частоте модуляции 10 Гц в трансверсальном потоке направлении. $x = 50$ мм, $y = 0,4$ мм.

волны осцилляций зоны отрыва на порядок величины превышает протяженность последней. Генерируемые возмущения отрывного течения близки к двумерным: фаза колебаний практически постоянна по трансверсальной координате z при слабом изменении их амплитуды по длине щели (рис. 7).

Влияние нестационарности течения на его устойчивость определялось при акустическом возбуждении коротковолновых возмущений оторвавшегося пограничного слоя на частоте 270 Гц, которая была выбрана вблизи спектрального максимума пульсаций скорости (см. рис. 3). Пространственное нарастание колебаний в исходном течении сопоставлено с изменением их амплитуды в направлении потока при низкочастотном возбуждении зоны отрыва на рис. 8. Периодическая модуляция течения вызывает заметное возрастание амплитуды волн неустойчивости на начальном участке отрывной области в диапазоне $x = 10 \div 40$ мм. Предлагаемые трактовки этого результата заключаются в следующем. В одной из них предполагается, что деформация поля скорости

Рис. 8. Изменение в направлении потока максимальной амплитуды волн неустойчивости на частоте 270 Гц в исходном течении (1) и при модуляции зоны отрыва на частотах 5 Гц (2) и 10 Гц (3).



вызывает периодические изменения характеристик акустической восприимчивости течения вблизи уступа поверхности и его устойчивости, приводящие к возрастанию осредненной во времени амплитуды высокочастотных возмущений завихренности. В этом случае подразумевается, что отрывное течение, подверженное низкочастотному воздействию, остается конвективно неустойчивым. Альтернативное объяснение полученным данным основано на предположении, что это происходит из-за смены конвективной неустойчивости локальных профилей скорости на абсолютную (т.е. усиление возмущений во времени) в фазе колебаний отрывной зоны, соответствующей максимальной скорости возвратного течения вблизи стенки. Подобное развитие событий предсказано результатами численного моделирования обтекания профиля крыла при периодическом сходе вихрей из области отрыва пограничного слоя [18]. В обоих случаях следует ожидать синхронизации низкочастотного движения отрывной зоны с усилением ее мелкомаштабных пульсаций, что и наблюдалось в настоящих экспериментах. Иллюстрацией служат осциллограммы сигнала термоанемометра, записанные в нескольких сечениях по продольной координате вблизи максимума низкочастотных колебаний по нормали к поверхности. Результаты представлены на рис. 9, где отчетливо видна корреляция высокочастотных возмущений отрывного течения с его осцилляциями.

Заключение

Результаты экспериментального моделирования течения за уступом поверхности демонстрируют сильное влияние низкочастотной нестационарности области отрыва ламинарного потока на возмущения завихренности оторвавшегося пограничного слоя. «Медленные» колебания отрывной зоны, индуцированные их локальным источником на обтекаемой поверхностью, приводят к возрастанию осредненной во времени амплитуды высокочастотных пульсаций скорости, развитие которых определяет переход отрывного течения в турбулентное состояние. В этом смысле низкочастотная модуляция зоны отрыва оказывает дестабилизирующее влияние на пристенное течение. Открытым

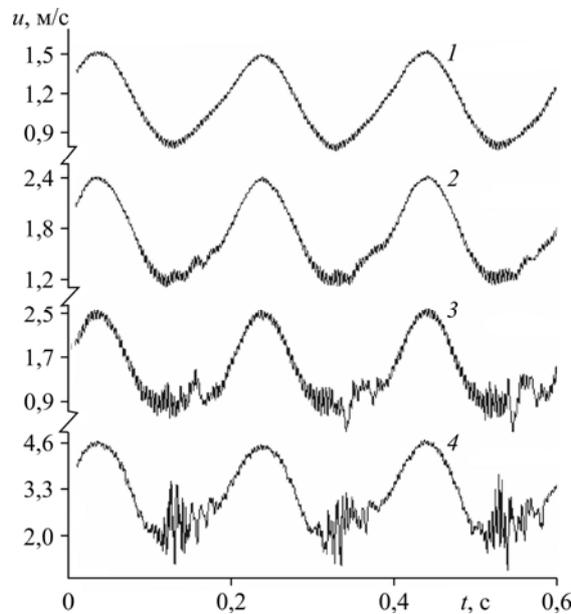


Рис. 9. Осциллограммы сигнала термоанемометра при модуляции отрывного течения на частоте 5 Гц.
 $x = 30$ (1), 40 (2), 50 (3), 60 (4) мм.

остаётся вопрос о том, каким образом полученные экспериментальные данные могут быть истолкованы в рамках существующих представлений о конвективной и абсолютной неустойчивостях локальных профилей скорости сдвигового течения. Выбор адекватной модели рассмотренного явления — возможный предмет дальнейших исследований.

Список литературы

1. **Chapman D.R., Kuehn D.M., Larson H.K.** Investigation of separated flows in supersonic and subsonic streams with emphasis on the effect of transition // NACA Rep. 1958. No. 1356.
2. **Бойко А.В., Довгаль А.В., Занин Б.Ю., Козлов В.В.** Пространственная структура отрывных течений на крыловых профилях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 1. С. 1–14.
3. **Бойко А.В., Довгаль А.В., Козлов В.В.** Неустойчивость отрывного течения за двумерными элементами неровности поверхности в низкоскоростном воздушном потоке // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 171–178.
4. **Boiko A.V., Dovgal A.V., Grek G.R., Kozlov V.V.** Physics of transitional shear flows. Dordrecht: Springer, 2012. 271 p.
5. **Schobeiri M.T., Öztürk B., Ashpis D.E.** Effect of Reynolds number and periodic unsteady wake flow condition on boundary layer development, separation, and intermittency behavior along the suction surface of a low pressure turbine blade // Transactions of the ASME. 2007. Vol. 129. P. 92–107.
6. **Lee T., Basu S.** Measurement of unsteady boundary layer developed on an oscillating airfoil using multiple hot-film sensors // Exp Fluids. 1998. Vol. 25, No. 2. P. 108–117.
7. **Kim D.-H., Chang J.-W.** Unsteady boundary layer for a pitching airfoil at low Reynolds numbers // J. Mech Sci Technol. 2009. Vol. 24, No. 1. P. 429–440.
8. **Nati A., de Kat R., Scarano F., van Oudheusden B.W.** Dynamic pitching effect on a laminar separation bubble // Exp Fluids. 2015. Vol. 56. P. 172–188.
9. **Wee D., Yi T., Annaswamy A., Ghoniem A.F.** Self-sustained oscillations and vortex shedding in backward-facing step flows: Simulation and linear instability analysis // Phys Fluids. 2004. Vol. 16, No. 9. P. 3361–3373.
10. **Hudy L.M., Naguib A., Humphreys W.M.** Stochastic estimation of a separated-flow field using wall-pressure-array measurements // Phys Fluids. 2007. Vol. 19. P. 024103-1–024103-18.
11. **Kiya M., Sasaki K.** Structure of a turbulent separation bubble // J. Fluid Mech. 1983. Vol. 137. P. 83–113.
12. **Driver D.M., Seegmiller H.L., Marvin J.G.** Time-dependent behavior of a reattaching shear layer // AIAA J. 1987. Vol. 25, No. 7. P. 914–919.
13. **Castro I.P., Haque A.** The structure of a shear layer bounding a separation region, effects of free-stream turbulence // J. Fluid Mech. 1988. Vol. 192. P. 577–595.
14. **Bragg M.B., Heinrich D.C., Khodadoust A.** Low-frequency flow oscillation over airfoils near stall // AIAA J. 1993. Vol. 31. P. 1341–1343.
15. **Spalart P.R., Strelets M.Кн.** Mechanisms of transition and heat transfer in a separation bubble // J. Fluid Mech. 2000. Vol. 403. P. 329–349.
16. **Hain R., Kähler C.J., Radespiel R.** Dynamics of laminar separation bubbles at low Reynolds-number aerofoils // J. Fluid Mech. 2009. Vol. 630. P. 129–153.
17. **Ehrenstein U., Gallaire F.** Two-dimensional global low-frequency oscillations in a separating boundary-layer flow // J. Fluid Mech. 2008. Vol. 614. P. 315–327.
18. **Jones L.E., Sandberg R.D., Sandham N.D.** Direct numerical simulations of forced and unforced separation bubbles on an airfoil at incidence // J. Fluid Mech. 2008. Vol. 602. P. 175–207.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2018 г.