

УДК 532.526

А. В. Бойко^{1,2}, А. В. Довгаль¹, А. М. Сорокин^{1,3}

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

² *Тюменский государственный нефтегазовый университет
ул. Володарского, 56, Тюмень, 625000, Россия*

³ *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

boiko@itam.nsc.ru; dovgal@itam.nsc.ru; am_sorokin@ngs.ru

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА ОТРЫВ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ*

Экспериментально изучено воздействие пространственно локализованного стационарного температурного возмущения на отрыв ламинарного пограничного слоя за прямоугольным уступом поверхности. Опытные данные получены в малотурбулентной аэродинамической трубе при низкой дозвуковой скорости потока. Для генерации температурной неоднородности использован элемент Пельтье, размещенный на поверхности тестовой модели перед линией отрыва. Отработана методика термоанемометрического исследования отрывного течения с градиентом температуры, определены количественные характеристики поля скорости, которые позволяют судить о влиянии на него теплопередачи.

Ключевые слова: отрыв ламинарного потока, управление отрывом, температурное возмущение, гидродинамическая устойчивость.

Введение

Разработке методов управления отрывом потока / пограничного слоя посвящены многолетние теоретические и экспериментальные исследования. Ранние результаты по этой тематике подытожены в монографии [1]. Развитые в последнее время и перспективные подходы к контролируемому изменению характеристик отрывного обтекания тел обсуждаются в обзорных статьях [2; 3], рассмотрены, наряду с другими, вопросы управления течениями жидкости и газа авторами работ [4–6]. По опубликованным данным, в числе возможных способов воздействия на отрыв пограничного слоя в широком диапазоне скоростей потока – использование его температурных неоднородностей. Более полувека назад обнаружены эффекты стационарного теплообмена поверхности тела с окружающим газом, кото-

рые заключаются в затягивании отрыва при охлаждении стенки и, напротив, его сравнительно раннем возникновении при нагревании (см. ссылки на оригинальные исследования в [5; 7]).

В условиях отрыва ламинарного пограничного слоя и сопутствующей ему гидродинамической неустойчивости температурные возмущения позволяют управлять средними во времени и пульсационными характеристиками отрывной зоны. Примером служит модификация вихреобразования за поперечно обтекаемыми цилиндрами при их нагревании [8–10]. Помимо стационарных тепловых возмущений эффективны и нестационарные, которые стимулируют вихревое движение за точкой отрыва, воздействуя на осредненное во времени поле скорости. Сокращение размеров области оторвавшегося течения при срыве потока с передней кромки крыла периодическим

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 13-08-00129, 13-01-00270.

во времени нагреванием участка его поверхности получено численным моделированием [11].

К числу подверженных неустойчивости отрывных течений относятся местные области отрыва ламинарного пограничного слоя, так называемые отрывные пузыри. Представление о влиянии стационарных температурных возмущений на их характеристики дают результаты теории. Отрывное обтекание двумерных выступов и уступов поверхности пластины при ее охлаждении / нагревании в дозвуковом потоке газа исследовалось авторами работ [12; 13]. Расчеты показали, что теплообмен стенки с потоком отражается на размерах зоны отрыва и пространственных инкрементах малых колебаний оторвавшегося пограничного слоя. В настоящей работе локальное отрывное течение за уступом поверхности в условиях теплопередачи моделируется экспериментально. Задача исследования – получить количественные данные по средней скорости течения, его нарастающим возмущениям и таким образом определить возможную реакцию области отрыва на температурную неоднородность.

Методика

Эксперименты проведены в малотурбулентной дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН – установке с за-

крытой рабочей частью поперечным сечением $1 \times 1 \text{ м}^2$, длиной 4 м, степень турбулентности свободного потока в которой не превышает 0,04 %. Тестовая модель, изготовленная из полированного оргстекла, представляла собой две стыкованные пластины каждая толщиной 10 мм и шириной 995 мм, расположенные под нулевым углом к направлению набегающего потока (рис. 1). Длина передней пластины составляла 300 мм, задней – 465 мм. В хвостовой части первой из них помещалась прямоугольная в плане накладка размером $100 \times 300 \text{ мм}^2$, максимальной толщиной 7 мм. Отрыв ламинарного пограничного слоя происходил за прямоугольным срезом накладки – уступом поверхности, высота которого задавалась при смещении пластин относительно друг друга в поперечном потоке направлении. Продольный градиент давления в окрестности носика модели, выполненного в виде двух сопряженных полуэллипсов, регулировался закрылком, что позволяло минимизировать уровень фоновых пульсаций в предотрывном пограничном слое. На расстоянии 10 мм перед уступом в обтекаемую потоком поверхность был встроен элемент Пельтье (термоэлектрический модуль ТВ-127-1.0-2.5), которым нагревался ее квадратный участок со стороной 30 мм.

Характеристики течения определялись с использованием термоанемометра постоянной температуры AN 1003 компании

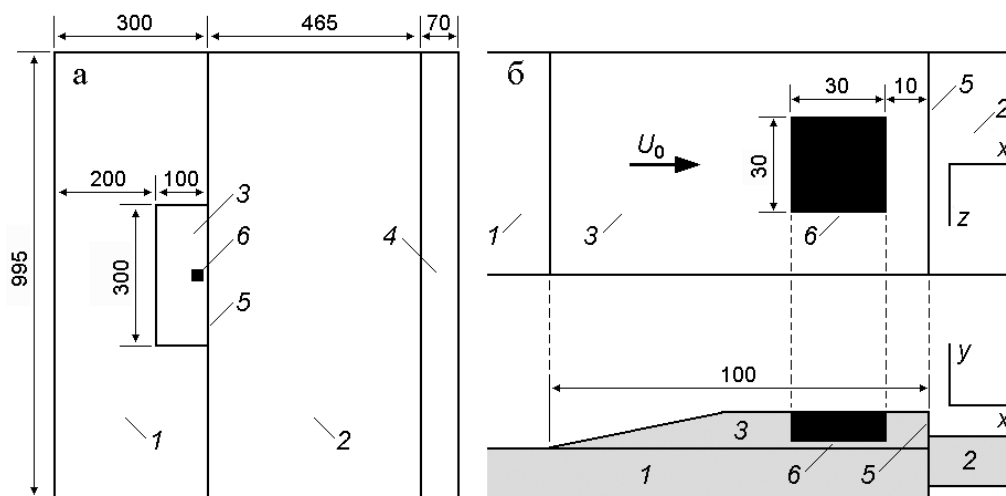


Рис. 1. Экспериментальная модель: вид в плане (а), фрагмент модели с накладкой и элементом Пельтье (б). Передняя пластина (1), задняя пластина (2), накладка (3), закрылок (4), уступ поверхности (5), нагревательный элемент (6), размеры указаны в миллиметрах

А.А. Lab Systems Ltd. В условиях теплообмена исходные данные о скорости и температуре потока фиксировались одноточечным датчиком при его перегревах $N = T_s/T_e = 1,3$ и $1,7$, где T_s и T_e – температура датчика и невозмущенной окружающей среды соответственно. Измерения проводились после установления постоянного во времени распределения температуры ниже по потоку нагревательного элемента, что определялось по прекращению дрейфа показаний термоанемометра при $N = 1,7$.

Датчик калибровался при двух отмеченных выше значениях его перегрева в свободном потоке с помощью трубки Прандтля. Оказалось, что при использовании метода наименьших квадратов калибровочные данные хорошо аппроксимируются следующей зависимостью:

$$E^2 = (A + BU^n)[(T_s + T_e)/T_e]^2(T_s - T_e), \quad (1)$$

где E – выходное напряжение термоанемометра, U – скорость потока, A и B – константы закона Кинга, показатель степени $n = 0,45$. Отклонение полученной зависимости от калибровочных данных в диапазоне измеряемых скоростей потока не превышало 3 %.

Так как определяемые в эксперименте характеристики течения не должны зависеть от перегрева датчика, для разделения в сигнале термоанемометра локальных значений скорости U и дефекта температуры $\Delta T = T - T_e$, где T – температура потока в тепловом следе за элементом Пельтье, решалась задача нахождения нуля следующей нелинейной функции (что соответствует требованию равенства скоростей при измерениях с разным перегревом):

$$f(\theta) = a(N_1, \theta)E_1^2 - a(N_2, \theta)E_2^2,$$

где

$$a(N_i, \theta) = [1 + N_i / (1 + \theta)]^2 / (N_i - 1 - \theta),$$

индекс i , равный 1 или 2, соответствует перегреву 1,3 или 1,7, а $\theta = \Delta T/T_e$. Далее, с использованием полученной величины θ восстанавливалась скорость по формуле

$$U = \{ [E_i^2 (T_e \times (1 + N_i / (1 + \theta))^2 / (N_i - 1 - \theta)) - A] / B \}^{1/n},$$

непосредственно следующей из (1).

Влияние теплопередачи на пульсационную компоненту неустойчивого отрывного течения определялось при регистрации его искусственных колебаний, которые генерировались на уступе поверхности внешними звуковыми волнами. Нарастающие за точкой отрыва гармонические возмущения за-

вихренности возбуждались с помощью акустической системы, подключенной к звуковому выходу компьютера, установленной в диффузоре аэродинамической трубы. В каждой точке измерений сигнал датчика термоанемометра оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя L-card E14-440 с частотой 2 000 Гц в течение двух секунд. Запуск генерации возмущений был синхронизован с оцифровкой считываемых данных с помощью управляющей программы в среде MATLAB, что позволило определить амплитудно-фазовые характеристики колебаний, необходимые для разделения пульсаций скорости и температуры на частоте возбуждения.

Измерения проведены при высоте уступа $h = 3,0$ мм, скорости внешнего течения над ним $U_0 = 5,9$ м/с, соответствующем числе Рейнольдса $Re_h = U_0 h / \nu = 1\,130$, температурах невозмущенного потока и нагреваемого участка поверхности, равных $18,6$ и $29,4^\circ\text{C}$. В ходе эксперимента датчик перемещался над моделью автоматическим координатным устройством с переменным шагом $0,2$ – $0,5$ мм по нормали к стенке, 5 мм вдоль потока и $2,5$ мм в трансверсальном направлении. Далее, x – расстояние вниз по потоку от уступа, y – от поверхности модели перед уступом в нормальном к ней направлении, начало отсчета трансверсальной координаты z находится в центральном сечении модели, где расположен нагревательный элемент.

Результаты

Характеристики исходного течения за уступом поверхности тестовой модели в отсутствие теплового воздействия и контролируемого акустического возбуждения представлены на рис. 2–4. Среднее во времени поле скорости показано распределениями ее

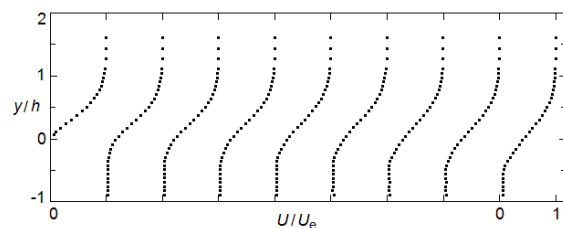


Рис. 2. Профили средней скорости невозмущенного течения в сечении $z = 0$: слева направо при $x/h = -1,7, 3,3, 6,7, 10,0, 13,3, 16,7, 20,0, 23,3, 26,7$

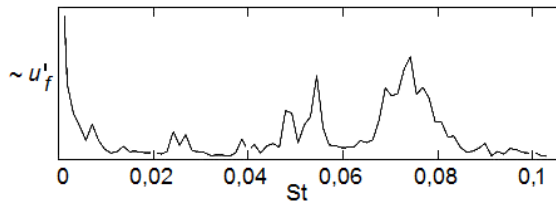


Рис. 3. Спектр мощности возмущений скорости отрывного течения в максимуме их интегральной интенсивности поперек вязкого слоя при $x/h = 18,3, z = 0$

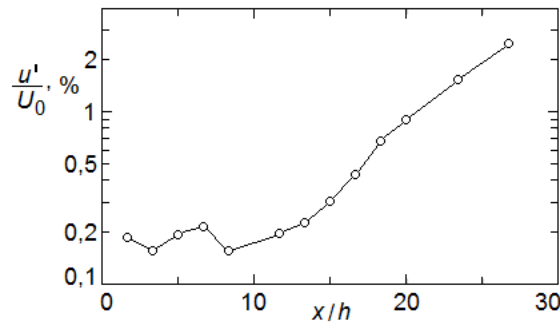


Рис. 4. Изменение вдоль потока максимальной по координате y амплитуды возмущений, проинтегрированной на частотах от $St = 0,008$ до $0,508$ в сечении $z = 0$

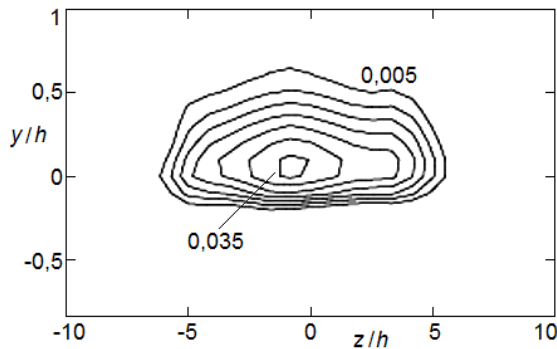


Рис. 5. Распределение температуры (К) в сечении $x/h = 6,7$: контуры $(T - T_e)/T_e$ с шагом $0,005$

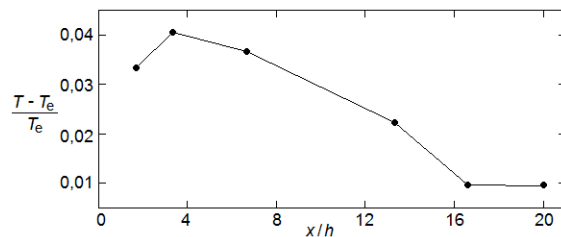


Рис. 6. Изменение максимума температуры (К) за нагревательным элементом в направлении потока

продольной компоненты по нормали к поверхности, измеренными над уступом и по мере удаления от него вниз по потоку (см. рис. 2). В каждом сечении данные нормиро-

ваны на местную скорость внешнего потока U_e , которая в области измерений от $x/h = -1,7$ до $26,7$ изменяется в пределах 4%. Крайний левый профиль соответствует предотрывному пограничному слою с толщинами вытеснения $\delta^*/h = 0,42$, потери импульса $\theta/h = 0,15$ и формпараметром $H = \delta^*/\theta = 2,75$. Неустойчивость оторвавшегося пограничного слоя приводит к усилению фоновых пульсаций скорости. В их спектре выделяются колебания, нарастающие в широкой полосе частот $St = fh/U_0 \approx 0,045 \div 0,085$ (см. рис. 3). С ростом продольной координаты интегральная по спектру амплитуда возмущений u'/U_0 увеличивается примерно от 0,2 % в сечении $x/h = 1,7$ до $2 \div 3$ % в сечении $x/h = 26,7$ (см. рис. 4). При этом уровне пульсаций течение находится в состоянии ламинарно-турбулентного перехода, который завершается за пределами области измерений.

Нагревание поверхности экспериментальной модели порождает температурную неоднородность течения, локализованную в слое максимального сдвига скорости (рис. 5), наибольшая разница температур теплового следа за элементом Пельтье и окружающего потока достигается на начальном участке области отрыва (рис. 6).

Изменяя физические свойства среды, тепловое воздействие сказывается на среднем во времени течении и, как следствие, на его нарастающих возмущениях. Соответствующие термоанемометрические результаты, полученные в условиях акустического возбуждения отрывной зоны на частоте $St = 0,058$, приведены на следующих рисунках.

При выбранном в настоящей работе перепаде температуры около десяти градусов между нагреваемым участком поверхности и внешним потоком локальные изменения средней скорости ΔU не превышают нескольких процентов U_e (рис. 7, 8). Столь малые вариации исходного течения оказываются достаточными для их заметного влияния на амплитудные характеристики вихревых возмущений. Иллюстрацией служат изображенные на рис. 9 профили колебаний, измеренные на частоте акустической генерации в узкой спектральной полосе $\Delta St = 0,000508$; в каждом сечении величины отнесены к локальному максимуму пульсаций в отсутствие температурной неоднородности. Эффектами теплопередачи, представленными на рис. 10, являются возрастание

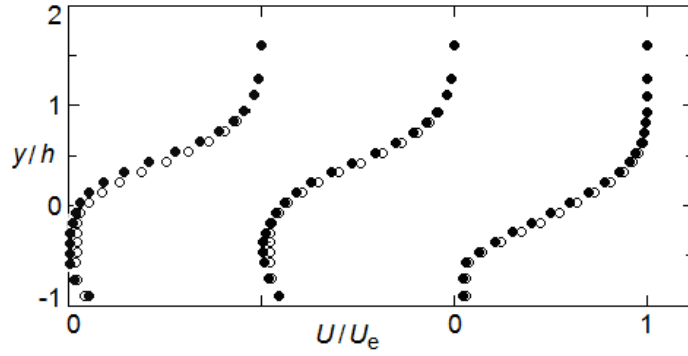


Рис. 7. Профили средней скорости отрывного течения в сечении $z = 0$ с теплообменом (●) и без него (○): слева – направо при $x/h = 1,7, 6,7, 16,7$

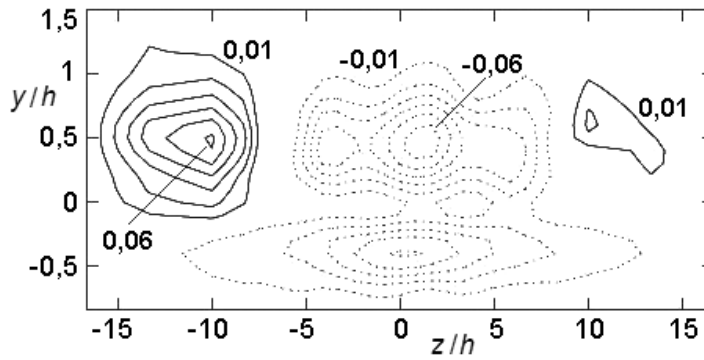


Рис. 8. Отклонение средней скорости течения при нагревании от ее невозмущенной величины в сечении $x/h = 6,7$: контуры $\Delta U/U_e$ с шагом 0,01

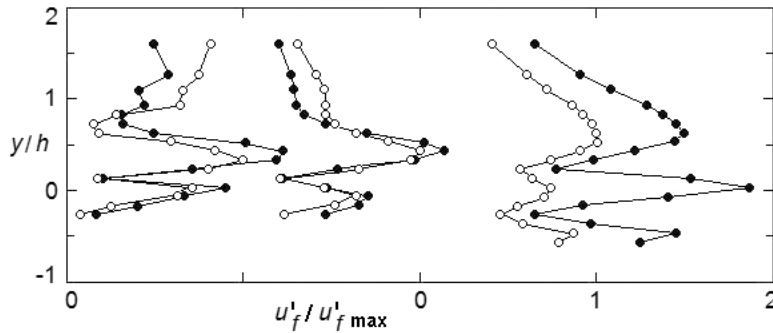


Рис. 9. Амплитудные профили возбужденных колебаний в сечении $z = 0$ с теплообменом (●) и без него (○): слева – направо при $x/h = 1,7, 6,7, 16,7$

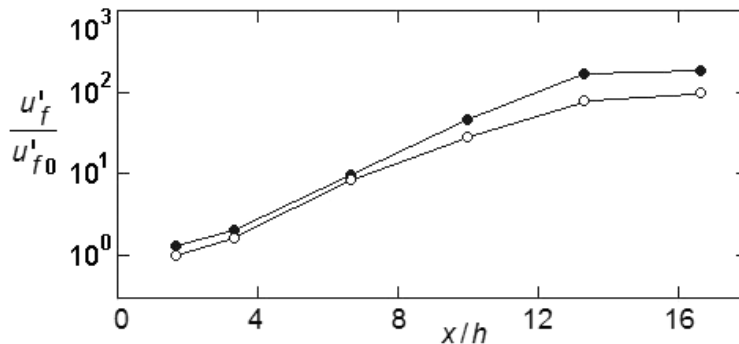


Рис. 10. Изменение вдоль потока максимальной амплитуды возбужденных колебаний в сечении $z = 0$ с теплообменом (●) и без него (○)

начального уровня колебаний и их сравнительно быстрое усиление в направлении потока; здесь для нормировки использована амплитуда возбужденной волны, измеренная в сечении $x/h = 1,7$ без теплового воздействия, равная $0,0312 \% U_0$.

Первый из этих эффектов разумно объяснить зависимостью восприимчивости сдвигового слоя к акустическим волнам – преобразования последних в возмущения завихренности – от распределения средней скорости течения вблизи уступа. Второй – модуляцией локальных характеристик устойчивости отрывной зоны в следе за элементом Пельтье. Теоретически влияние теплообмена на развитие малых колебаний пограничного слоя с его отрывом за выступом поверхности продольно обтекаемой пластины рассматривалось в работе [13]. Используя e^N -метод предсказания перехода к турбулентности, авторы получили сильное изменение числа Рейнольдса перехода при нагревании стенки на различных ее участках при числах Маха $M \leq 0,8$. Анализ линейной устойчивости течения за уступом и выступом поверхности пластины [12] показал дестабилизацию течения в зоне отрыва при охлаждении стенки и, напротив, уменьшение инкрементов колебаний при нагревании. Отметим, что в обоих случаях [12; 13] задача решалась в двумерной постановке. Вместе с тем результат теплового воздействия, очевидно, определяется, не только интенсивностью температурного возмущения, но и формой, размером и расположением его источника относительно зоны циркуляции. Влияние этих факторов на формирование местных областей отрыва пограничного слоя – предмет дальнейших исследований при прямом сопоставлении экспериментальных данных с результатами расчетов устойчивости отрывного течения.

Заключение

Экспериментально, с использованием элемента Пельтье и термоанемометрического метода определения характеристик течения, смоделировано влияние теплопередачи на отрыв ламинарного пограничного слоя в низкоскоростном воздушном потоке. При локальном нагревании тестовой модели зафиксированы изменения среднего во времени поля скорости и амплитудных распределений нарастающих возмущений в от-

рывной зоне за прямоугольным уступом обтекаемой потоком поверхности. Обнаруженные в принятых экспериментальных условиях температурные эффекты невелики, но, вместе с тем, надежно регистрируемы. Таким образом, в опыте подтверждена возможность модификации локальных областей отрыва ламинарного пограничного слоя и их устойчивости стационарными температурными неоднородностями потока.

Список литературы

1. Чжен П. Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979.
2. Gad-el-Hak M., Bushnell D. Status and Outlook of Flow Separation Control // AIAA Paper. 1991. No. 91-0037.
3. Greenblatt D., Wygnanski I. The Control of Flow Separation by Periodic Excitation // Progr. Aerosp. Sci. 2000. Vol. 36. P. 487–545.
4. Fernholz H. H. Management and Control of Turbulent Shear Flows // Z. Angew. Math. Mech. 1993. Vol. 73. No. 11. P. 287–300.
5. Gad-el-Hak M. Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
6. Collis S. S., Joslin R. D., Seifert A., Theofilis V. Issues in Active Flow Control: Theory, Control, Simulation, and Experiment // Progr. Aerosp. Sci. 2004. Vol. 40. P. 237–289.
7. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1973.
8. Yahagi Y. Structure of Two-Dimensional Vortex Behind a Highly Heated Cylinder // Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. B. 1998. Vol. 64. P. 209–215.
9. Wang A.-B., Trávníček Z., Chia K.-C. On the Relationship of Effective Reynolds Number and Strouhal Number for the Laminar Vortex Shedding of a Heated Circular Cylinder // Phys. Fluids. 2000. Vol. 12. No. 6. P. 1401–1410.
10. Vít T., Ren M., Trávníček Z., Maršík F., Rindt C. C. M. The Influence of Temperature Gradient on the Strouhal – Reynolds Number Relationship for Water and Air // Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. Vol. 31. P. 751–760.
11. Maestrello L., Badavi F., Noonan K. Control of the Boundary-Layer Separation about an Airfoil by Active Surface Heating // Proc. AIAA/ASME/SIAM/APS 1st Nation. Fluid Dynam. Congr. Cincinnati, Ohio, 1988. P. 830–837.

12. 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.

13. Masad J. A., Iyer V. Transition Prediction and Control in Subsonic Flow over a Hump // Phys. Fluids. 1994. Vol. 6. No. 1. P. 313–327.

Материал поступил в редколлегию 23.06.2014

A. V. Boiko, A. V. Dovgal, A. M. Sorokin

**LAMINAR BOUNDARY LAYER SEPARATION AFFECTED
BY A LOCAL TEMPERATURE PERTURBATION**

Backward-facing step flow with laminar boundary layer separation forced by a local stationary temperature disturbance was experimentally investigated. The results of the study were obtained in quiet wind-tunnel conditions at low subsonic flow velocity. To generate the temperature perturbation, the test model was equipped with a Peltier element placed flush with the wall before the line of separation. At first, the hot-wire technique was adapted to examine the flow with temperature gradients; then, the velocity characteristics were determined making clear the effects of heat transfer on boundary layer separation.

Keywords: laminar flow separation, separation control, temperature perturbation, hydrodynamic stability.