

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 532.526.4

**Эволюция кинетической энергии  
турбулентности в возмущенном  
турбулентном пограничном слое**

**О.М. Оевола<sup>1,2</sup>, С.М. Адарамола<sup>3</sup>, С.К. Фазогбон<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Университет Нового Южного Уэльса, Австралия*

<sup>2</sup>*Университет Ибадана, Ибадан, Нигерия*

<sup>3</sup>*Университет Саскачеван, Саскатун, Канада*

<sup>4</sup>*Университет Обафемиде Аволово, Иле-Ифе, Нигерия*

E-mail: ooyewola@yahoo.com

Рассматривается изменение кинетической энергии турбулентности в пограничном слое, вызванное его отсосом. Результаты показывают, что равновесие пограничного слоя нарушается нелинейно вследствие подавления структур, развивающихся в пристенной области течения. При этом изменение числа Рейнольдса и интенсивности отсоса не влияют на протяженность зоны течения, в которой происходит нарушение равновесия слоя.

**Ключевые слова:** турбулентность, структуры потока, отсос, пограничный слой.

**ВВЕДЕНИЕ**

Для решения ряда технических задач большое значение имеет управление структурой пограничного слоя [1–3]. Работа над этой проблемой привела к значительным результатам, особенно в области управления переходом к турбулентности. В этом отношении воздействие на большие структуры течения дает возможность изменения энергии всего слоя, что неудивительно, поскольку ее производство тесно связано с крупномасштабной турбулентностью. По всей видимости, модифицируя структуры с помощью подходящей методики, можно изменять кинетическую энергию турбулентности, а также производство энергии турбулентности в большом масштабе. В работе [4] для управления течением использовался отсос пограничного слоя и было показано, что при достаточно большой его интенсивности почти сразу же за участком отсоса происходит реламинаризация течения. Последовавшие за этим результаты исследований [3] привели к заключению, что

реламинаризация зависит главным образом от числа Рейнольдса и интенсивности отсоса. Следует отметить, что выводы обоих исследований основывались на данных, полученных для коэффициента поверхностного трения и нормальных напряжений без рассмотрения кинетической энергии турбулентности и ее производства. Вместе с тем, понимание поведения этих характеристик в условиях отсоса, особенно их изменения вдоль потока, позволит улучшить моделирование турбулентности.

В настоящей работе, выполненной в продолжение [3], изучается изменение кинетической энергии турбулентности вдоль потока в турбулентном пограничном слое при различных числах Рейнольдса и интенсивности локализованного отсоса.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Исследовалось течение в турбулентном пограничном слое плоской пластины, который подвергался локализованному отсосу на коротком пористом участке обтекаемой потоком поверхности. Пограничный слой формировался на нижней стенке прямоугольной рабочей части экспериментальной установки после его турбулизации на выходе конфузора полосой шероховатости протяженностью 100 мм (рис. 1). Предварительные испытания показали, что в месте отсоса на расстоянии примерно 1200 мм вниз по потоку от турбулизатора пограничный слой находился в полностью развитом состоянии. Измерения проводились при  $U_\infty = 3,5, 5$  и  $7$  м/с; соответствующие значения числа Рейнольдса по исходной толщине потери импульса  $Re_{\theta_0}$  были равны 600, 1000 и 1350. Пористый участок поверхности толщиной 3,25 мм и шириной 40 мм, изготовленный из синтерированной бронзы, с размерами пор в диапазоне 40–80 мкм или  $(0,4-0,9) \nu/U_\tau$ , монтировался заподлицо с нижней стенкой рабочей части; с учетом монтажного заглубления эффективная ширина пористого участка была равна 35 мм. Находившаяся под ним камера давления соединялась круглой трубой (внутренним диаметром  $D = 130$  мм и  $L/D \approx 38$ , где  $L$  — длина трубы) с отсасывающим устройством, которое приводилось в действие двигателем постоянного тока. Расход газа  $Q_r$  оценивался с помощью трубки Пито, радиально расположенной в конце трубы, при различных значениях скорости в центре ( $U_c$ ) этой трубы. График  $Q_r$  как функции  $U_c$  позволил получить скорость отсоса ( $V_w$ ) с помощью уравнения неразрывности ( $Q_r = A_w V_w$ , где  $A_w$  — площадь поперечного сечения пористой полосы). Предполагалось, что скорость отсоса равномерна по пористой поверхности, это допущение представляется разумным, если вариация коэффициента проницаемости пористого материала составляет  $\pm 3\%$ .

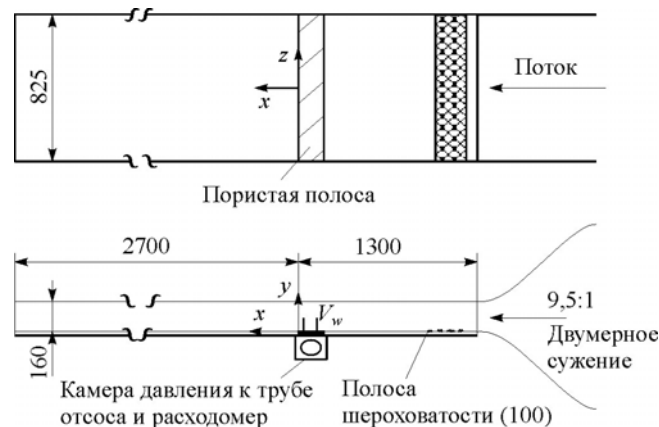


Рис. 1. Схема рабочей части.

Измерения проводились при нормированной скорости отсоса  $\sigma$  (или  $V_w b / \theta_0 U_\infty$ , следуя [4]), равной 0,3 и 5. Отправными данными для определения влияния отсоса были результаты, полученные при  $\sigma = 0$ . Касательное напряжение на стенке  $\tau_w$  измерялось с помощью трубки Престона внешним диаметром 0,72 мм, расположенной примерно в 35 мм над ней, при той же координате  $x$  трубки статического давления. Трубка Престона была откалибрована в полностью развитом течении в канале с помощью метода, аналогичного описанному в работе [4]. Касательное напряжение на стенке определялось из соотношения  $\tau_w = -h(dp/dx)$ , где  $h$  — полуширина канала, а  $p$  — статическое давление. Измерения пульсаций скорости в продольном и нормальном к стенке направлениях выполнялись с использованием  $x$ -образных датчиков термоанемометра. Травленая часть чувствительных элементов датчиков (воластоновых нитей, Pt-10 % Rh) имела диаметр 2,5 мкм и отношение длины к диаметру около 200. Расстояние между нитями, расположенными под углом  $45^\circ$  к направлению потока, составляло около 0,6 мм. Аналоговый сигнал термоанемометра при перегреве датчика, равном 1,5, обрезался фильтром низких частот при 5–8 кгц и компенсировался с усилением в пределах  $\pm 5$  в.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Перед тем как обратиться к влиянию числа Рейнольдса и интенсивности отсоса на распределение кинетической энергии турбулентности вдоль потока, были рассмотрены изменения псевдоравновесного состояния пограничного слоя. На рис. 2 показаны распределения параметра равновесности для различных чисел Рейнольдса и скоростей отсоса. Отметим нелинейность отклонения состояния слоя от равновесного и реакцию течения на отсос, сходную при разных значениях числа Рейнольдса. В частности,  $G/G_0$  убывает перед полосой отсоса, затем постепенно увеличивается, достигая максимума, после чего релаксирует вниз по потоку от пористого участка поверхности. Это поведение указывает на то, что размер области течения, в которой нарушается равновесие слоя, не зависит от числа Рейнольдса и скорости отсоса; вместе с тем, они оказывают количественное влияние на величину  $G/G_0$ . Например, максимумы  $G/G_0$  при  $\sigma = 5,5$  достигают 1,58, 1,2 и 1,05 для  $Re_{\theta_0} = 600, 1000$  и  $1350$ , тогда как при  $\sigma = 3$  они равны 1,2, 0,95 и 0,9 соответственно. Величина  $x/\delta_0$  также непостоянна при изменении  $G/G_0$ . Общий вывод заключается в том, что состояние слоя зависит от скорости отсоса и этот эффект более заметен по мере уменьшения числа Рейнольдса. Полученный результат, подтверждающий данные работы [3], не вызывает удивления, поскольку с ростом числа Рейнольдса продольные вихри становятся более интенсивными и для их ослабления требуется значительное увеличение отсоса.

Изменение вдоль потока кинетической энергии турбулентности  $k = (\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle w^2 \rangle) / 2$  при отсосе и без него иллюстрируется на рис. 3, данные приведены для  $Re_{\theta_0} = 600, 1350$  и  $x/\delta_0 = 3, 6, 10$ . Обратим внимание на универсальное свойство пока-

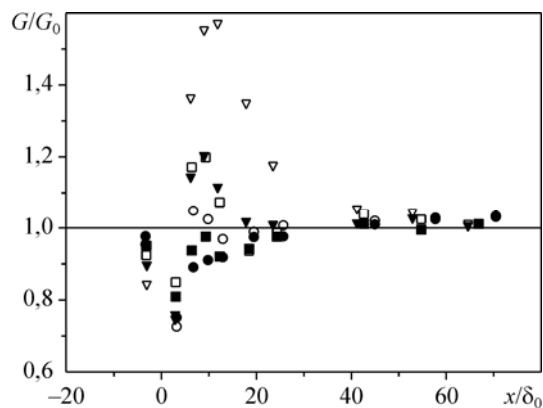


Рис. 2. Параметры равновесности. Символы: при  $\sigma = 5$  — светлые,  $\sigma = 3$  — темные.

$Re_{\theta_0} = 600$  ( $\nabla, \triangledown$ ),  $1000$  ( $\blacksquare, \square$ ),  $1350$  ( $\bullet, \circ$ ).

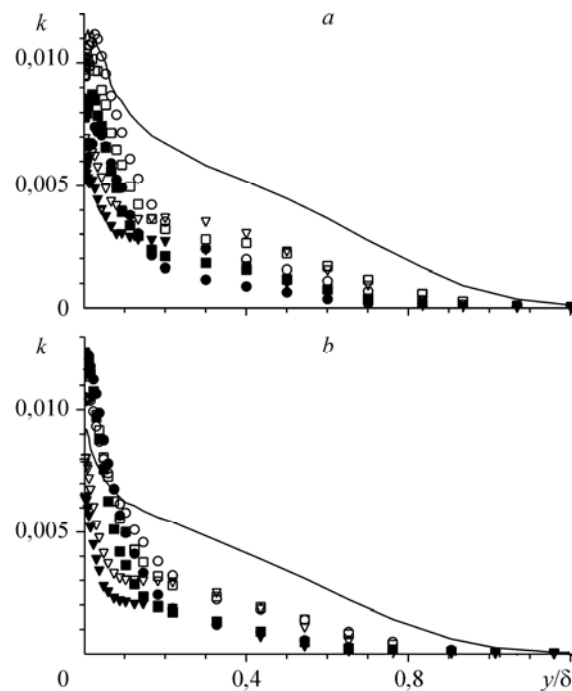


Рис. 3: Продольное изменение кинетической энергии турбулентности  $k$ . Символы:  $\sigma=5$  — темные,  $\sigma=3$  — светлые.  $Re_{\theta_0} = 600$  (a), 1350 (b).

$x/\delta_0 = 3$  ( $\nabla, \nabla$ ), 6 ( $\blacksquare, \square$ ), 10 ( $\bullet, \circ$ ), сплошные линии — без отсоса.

занных на рисунке распределений: во всех случаях результаты, полученные при отсосе и без него, различаются по всей толщине пограничного слоя. Это указывает на структурное изменение пограничного слоя вследствие ослабления вихревых образований в пристенной зоне течения. Данный эффект становится сильнее с возрастанием интенсивности отсоса и уменьшением числа Рейнольдса, что согласуется с реакцией пульсаций скорости на отсос пограничного слоя [3].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние локализованного отсоса газа через короткий пористый участок обтекаемой потоком поверхности на кинетическую энергию турбулентности в пограничном слое. Результаты показывают, что под действием отсоса равновесие слоя нарушается существенно нелинейным образом. В основе этого явления — ослабление структур течения вблизи стенки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bushnell D.M., McGinley C.B.** Turbulence control in wall flows // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1989. Vol. 21. P. 1–21.
2. **Gad-el-Hak M.** Flow control // *Appl. Mech. Rev.* 1989. Vol. 42. P. 261–293.
3. **Oyewola O., Djenidi L., Antonia R.A.** Combined influence of Reynolds and localized wall suction on a turbulent boundary layer // *Exp. Fluids.* 2003. Vol. 35. P. 199–206.
4. **Antonia R.A., Zhu Y., Sokolov M.** Effect of concentrated wall suction on a turbulent boundary layer // *Phys. Fluids.* 1995. Vol. 7. P. 2465–2474.

*Статья поступила в редакцию 26 ноября 2009 г.,  
после переработки 11 декабря 2010 г.*