

УДК 532.526.4+532.5.013

## **ВЛИЯНИЕ УЗКОЙ ПОЛОСЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА СТРУКТУРУ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ**

**М.О. ОЕВОЛА<sup>1</sup>, М.С. АДРАМОЛА<sup>2</sup>, А.Ф. ОЛАБЕРИНЬЕ<sup>3</sup>, ДЖ.А. АКНИНЕМИ<sup>4</sup>,  
ДЖ.О. ОЕВОЛА<sup>4</sup>**

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

<sup>2</sup>*Университет Саскачевана, Саскатун, Канада*

<sup>3</sup>*Университет Лагоса, Нигерия*

<sup>4</sup>*Государственный политехникум Лагоса, Нигерия*

Проведены термоанемометрические измерения в турбулентном пограничном слое, подверженном воздействию узкой полосы шероховатости обтекаемой потоком поверхности, для определения ее влияния на структуру течения. Показано, что шероховатость поверхности приводит к спектральному смещению энергонесущих пульсаций от малых к большим волновым числам вблизи стенки и наоборот — во внешней области течения. При видимом изменении анизотропии мелкомасштабного пульсационного движения, с увеличением расстояния до обтекаемой поверхности влияние шероховатости на крупномасштабное движение практически отсутствует. Воздействие полосы шероховатости на течение приводит к перераспределению длины смещения в пограничном слое.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Результаты исследований различного рода воздействий на структуру течения в пограничном слое могут иметь ряд практических приложений. В частности, они открывают возможность управления течением, что, в свою очередь, позволяет получить полезный эффект управления за счет изменения поверхностного трения. Исследования в этом направлении дают также новые знания о гидродинамических явлениях и процессах, происходящих в пограничном слое. Указанными соображениями было мотивировано большое количество работ последних десятилетий [1, 2]. Важный вывод из их результатов заключается в возможности управления течениями пассивными и активными методами, а также их сочетанием [1].

Исследования отклика турбулентного пограничного слоя на локальные воздействия предпринимались рядом авторов [5–7]. В частности, было показано, что в пристенной области пограничного слоя течение быстрее реагирует на возмущение, чем во внешней области [6], что привело к предположению о существовании в них различных временных масштабов. В экспериментах работы [5] для определения реакции турбулентного пограничного слоя на возмущение, вносимое в течение

полосой шероховатости поверхности, применялся лазерный доплеровский измеритель скорости. Авторы этой работы обнаружили возрастание турбулентных напряжений в зоне течения между двумя внутренними слоями, берущими начало у переднего и заднего краев полосы шероховатости. Аналогичный источник возмущений использовался в экспериментах [3], в которых изучалось его влияние на тензор напряжений Рейнольдса. Было показано, что в указанной зоне пограничного слоя над полосой шероховатости тенденция к изотропии течения выше, чем над гладкой поверхностью. В работе [4] экспериментально исследовалось воздействие полосы шероховатости на структуру турбулентного течения; оказалось, что вносимое в пограничный слой возмущение нарушает псевдоравновесное состояние течения.

Результаты отмеченных выше экспериментов недостаточны для полного количественного описания влияния узкой полосы шероховатости обтекаемой поверхностью на структуру турбулентного пограничного слоя. В настоящей работе, продолжающей исследование [4], данное явление изучено термоанемометрическим методом. В течении над гладкой стенкой и полосой шероховатости определены его спектральные характеристики, взаимные спектры, спектральный коэффициент корреляции и длина смещения.

#### 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты получены в аэродинамической трубе, воздух в которой приводится в движение радиальным вентилятором мощностью 15 кВт до скорости свободного потока, равной 40 м/с. Рабочая часть установки сопряжена двухступенчатым диффузором с форкамерой поперечным сечением  $1,6 \times 0,9$  м<sup>2</sup>, оборудованной шестью равномерно расположенными детурбулизирующими сетками и пятимиллиметровым алюминиевым хонейкомбом (рис. 1). Двумерное поджатие потока при переходе из форкамеры в рабочую часть аэродинамической трубы составляет 9,5:1.

Пограничный слой развивался за турбулизатором шириной 100 мм, расположенным на нижней стенке рабочей части прямоугольного поперечного сечения у выхода из форкамеры. Двумерность течения проверялась измерениями профилей его скорости при различных значениях поперечной координаты; максимальный

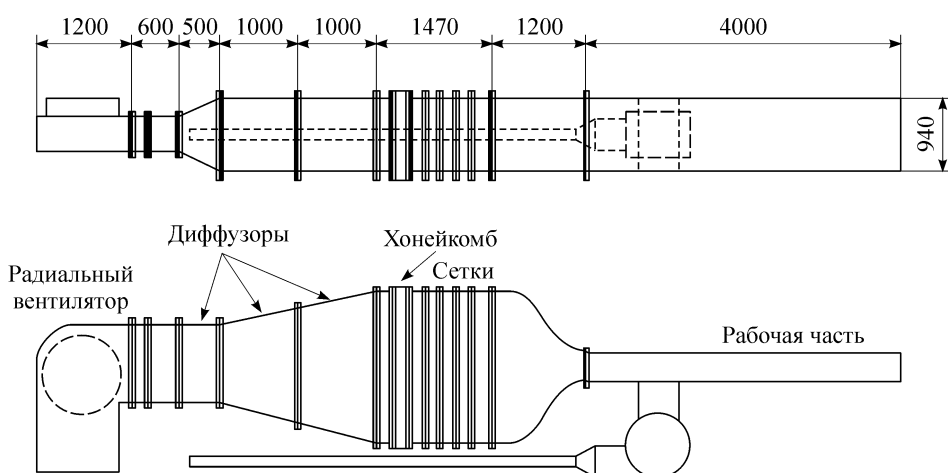


Рис. 1. Схема аэродинамической трубы.

разброс полученных данных не превышал 4 % скорости течения в центральном сечении установки. Полоса шероховатости шириной 40 мм, использованная для воздействия на структуру турбулентного пограничного слоя, была изготовлена из наждачной бумаги зернистостью 40 единиц и помещалась в 1200 мм за турбулизатором, выступая на один миллиметр над обтекаемой поверхностью.

Скорость внешнего потока  $U_1$  на расстоянии 1300 мм за турбулизатором была равна 7 м/с при соответствующем числе Рейнольдса  $Re_\theta = U_1\theta/\nu = 1400$  ( $\theta$  — толщина потери импульса пограничного слоя,  $\nu$  — кинематическая вязкость). Характеристики пульсаций скорости течения определялись при  $x = 100$  мм ( $x/\delta = 3$ ), где  $x$  — продольная координата, отсчитываемая от заднего края полосы шероховатости,  $\delta$  — толщина пограничного слоя. Измерения проводились термоанемометром постоянной температуры и X-образными воластоновскими датчиками при их перегреве, равном 1,5. Чувствительные элементы датчиков имели диаметр 2,5 мкм и относительную длину, близкую 200. Аналоговый сигнал термоанемометра, отфильтрованный на частотах до 3000–5000 Гц, компенсировался и усиливался до уровня в пределах  $\pm 5$  В, после чего оцифровывался при 6000–10000 Гц. Реализации сигнала, фиксируемые в каждой точке измерений, длительностью 40 с обеспечивали малый (в пределах 0,5 %) разброс данных по средней во времени и пульсационной составляющим скорости течения.

## 2. СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ И ВЗАИМНЫЕ СПЕКТРЫ

В предшествующих исследованиях [5] было показано, что в присутствие полосы шероховатости поверхности происходят изменения псевродинамики пристенных когерентных структур течения, проявляющиеся в распределениях нормальных и сдвиговых напряжений Рейнольдса. Более подробная информация об этом может быть получена спектральным анализом пульсаций скорости. Спектры энергии продольной компоненты возмущений течения, обозначаемые как  $\Phi_{uu}(k)$ , где  $k$  — волновое число, нормируются следующим образом:

$$\int_0^{\infty} \Phi_{uu}(k) dk = \langle u^2 \rangle.$$

Аналогичная нормировка принята для спектра энергии  $\Phi_{vv}(k)$  компоненты пульсаций по нормали к стенке. Взаимный спектр  $\Phi_{uv}(k)$  вводится как

$$1/A \int_0^{\infty} \Phi_{uv}(k) dk = -\langle u^2 \rangle, \text{ где } A = \int_0^{\infty} \Phi_{uv}(f) df, \text{ } f \text{ — частота возмущений.}$$

Спектральные данные для внутренней и внешней областей пограничного слоя приведены, соответственно, на рис. 2 и 3. Для определения волнового числа  $k$  использована гипотеза Тейлора. Таким образом,

$$k = 2\pi f/U,$$

здесь  $U$  — локальная средняя скорость течения.

При воздействии полосы шероховатости на пограничный слой происходит изменение спектральных распределений в его внутренней области, которое отражает смещение энергонесущего движения от малых к большим волновым числам

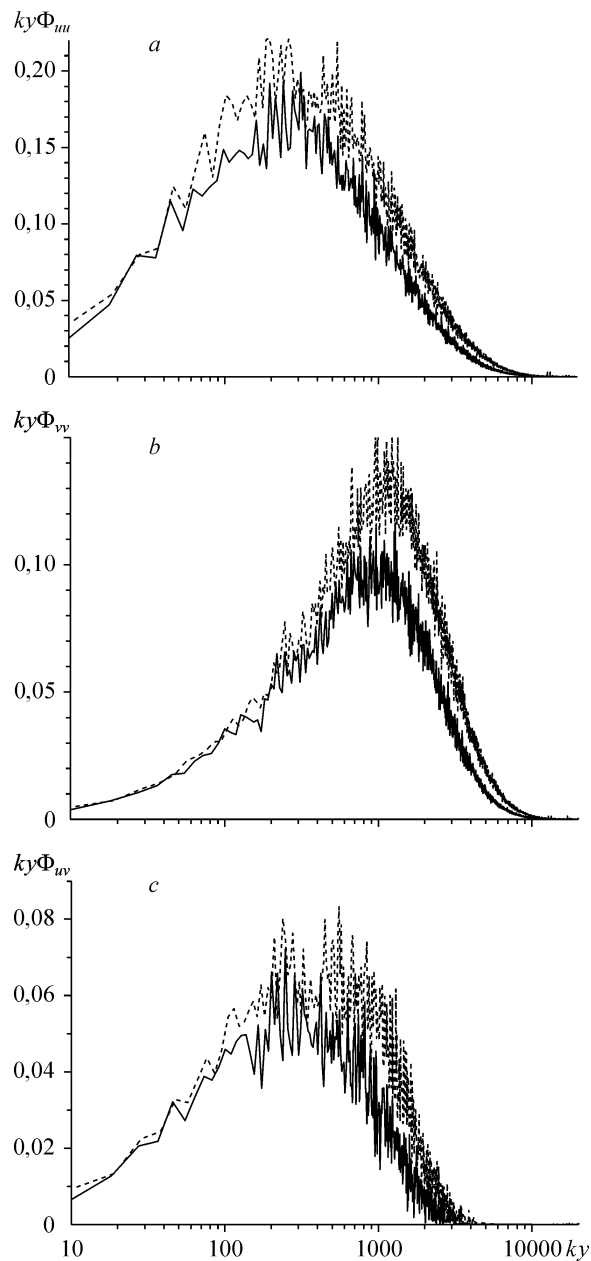


Рис. 2. Спектры мощности и взаимные спектры при  $y/\delta = 0,1$  для  $k\gamma\Phi_{uu}$  (a),  $k\gamma\Phi_{vv}$  (b),  $k\gamma\Phi_{uv}$  (c): течение над гладкой стенкой (линия), пограничный слой с полосой шероховатости (штрих).

(рис. 2). По всей видимости, это коррелирует с отмеченным в работе [5] усилением когерентных структур пристенного течения, подверженного влиянию полосы шероховатости. Заметим, что возмущение пограничного слоя изменяет интенсивность составляющих спектр колебаний, не сказываясь на его ширине. Наблюдаемое перераспределение спектров и взаимных спектров — признак модификации механизма порождения турбулентности в пограничном слое и, соответственно, пульсационного движения больших и малых масштабов; при этом мелкомасштабная составляющая реагирует на возмущение течения в большей степени, чем крупномасштабная. Последний вывод основан на существенном различии

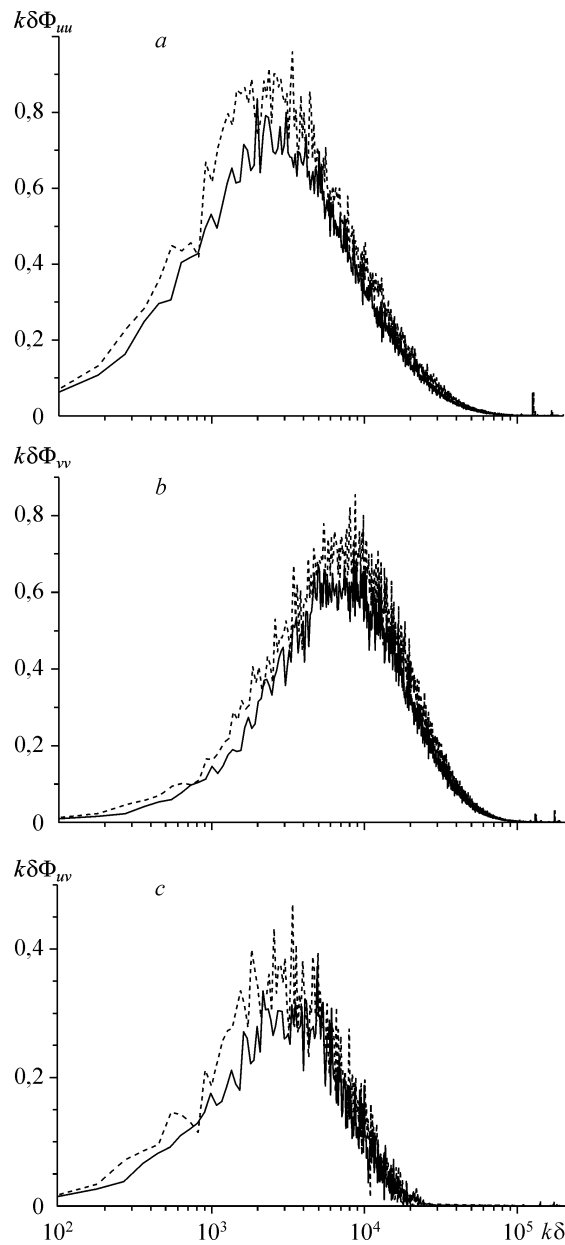


Рис. 3. Спектры мощности и взаимные спектры при  $y/\delta = 0,5$  для  $k\delta\Phi_{uu}$  (a),  $k\delta\Phi_{vv}$  (b),  $k\delta\Phi_{uv}$  (c): течение над гладкой стенкой (линия), пограничный слой с полосой шероховатости (штрих).

спектров в их диссипативном интервале. Также отметим, что влияние полосы шероховатости распространяется во внешнюю область пограничного слоя, где энергонесущее движение сдвигается в спектрах пульсаций к малым волновым числам (рис. 3).

### 3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ

Распределения спектрального коэффициента корреляции

$$R_{uv} = C_{0uv}/(\Phi_u\Phi_v)^{1/2}$$

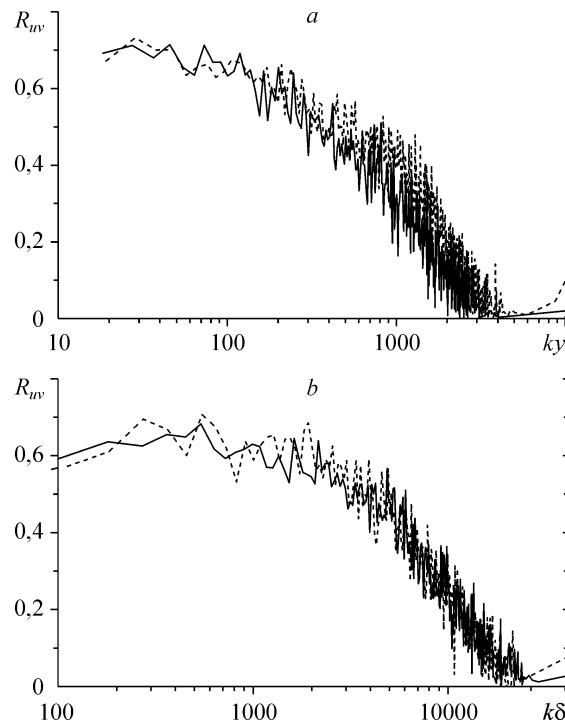


Рис. 4. Распределения спектрального коэффициента корреляции при  $y/\delta = 0,1$  (a) и  $0,5$  (b), обозначения см. на рис. 2.

в течениях над гладкой поверхностью и с полосой шероховатости сравниваются на рис. 4. В последнем выражении  $Co_{uv}(\equiv \Phi_{uv})$  — взаимный спектр,  $\Phi_u (\equiv \Phi_{uu})$  и  $\Phi_v (\equiv \Phi_{vv})$  — спектры мощности продольной и нормальной стенке составляющих пульсаций скорости. При неплохом совпадении данных в диапазоне  $ky \leq 100$ , наблюдается их заметное отличие для  $ky > 100$ . Можно предположить, что это свидетельствует о влиянии полосы шероховатости на когерентные структуры турбулентности и, соответственно, перенос ее энергии. Приведенные распределения указывают на существенное изменение степени анизотропии течения на малых масштабах. В пограничном слое у гладкой стенки коэффициент  $R_{uv}$  принимает нулевое значение при меньших  $ky$ , чем в присутствии полосы шероховатости. Это, по-видимому, служит признаком того, что во втором случае течение ближе к локально изотропному.

Сопоставление результатов измерений при двух значениях нормальной координаты  $y/\delta$  показывает их хорошее совпадение в области малых волновых чисел и различие в коротковолновой части спектра,  $k\delta > 2000$ . Это неудивительно, поскольку мелкомасштабные структуры турбулентности в большей степени проявляются при  $y/\delta = 0,1$ , чем при  $y/\delta = 0,5$ . Таким образом, можно предположить, что полоса шероховатости оказывает достаточно сильное влияние на пульсационное движение малых масштабов, что приводит к соответствующему изменению степени его анизотропии, сильнее выраженному при меньшем значении  $y/\delta$ .

#### 4. ДЛИНА СМЕШЕНИЯ

Воздействие полосы шероховатости на пограничный слой проявляется в ее влиянии на длину смешения турбулентного течения, которая определяется выражением

$$L = (-\langle uv \rangle)^{1/2} / (dU/dy).$$

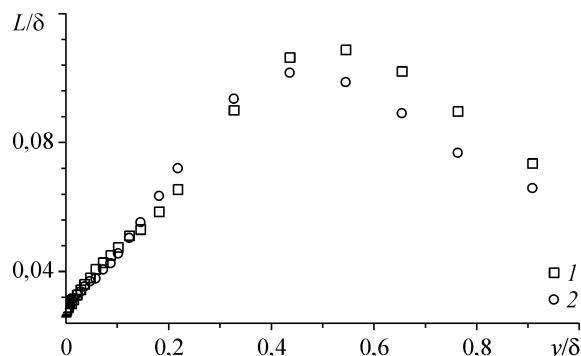


Рис. 5. Распределения длины смешения в течениях над гладкой поверхностью (2) и с полосой шероховатости (1) при  $x/\delta = 3$ .

Рис. 5 показывает, что длины смешения в возмущенном и невозмущенном течении близки друг другу в области  $y/\delta \leq 0,4$ , заметно отличаясь в остальной части пограничного слоя. Полученный результат можно объяснить увеличением  $-\langle uv \rangle$ , связанным с возрастанием величины  $\langle v^2 \rangle \partial U / \partial y$  [5]. Таким образом, разумно предположить изменение динамики пристенного течения вследствие модификации структуры турбулентности полосой шероховатости.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы указывают на изменение динамических свойств турбулентного пограничного слоя, возмущенного узкой полосой шероховатости обтекаемой поверхности. Взаимодействие полосы шероховатости со структурами пристенного течения приводит к перераспределению энергонесущих пульсаций от малых к большим волновым числам. Во внешней части пограничного слоя, напротив, возрастает интенсивность пульсационного движения при малых волновых числах. Данные по спектральному коэффициенту корреляции свидетельствуют об изменении степени анизотропии течения на малых масштабах и ее практическом постоянстве на масштабах больших. С увеличением расстояния до обтекаемой поверхности воздействие полосы шероховатости на анизотропию мелкомасштабного движения уменьшается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gad-el-Hak M.** Flow control: fundamental and practices / Lecture note in Physics edited by M.Gad-el-Hak, A. Pollard and J-P. Bonnet in Springer, 1998. — P. 1–154.
2. **Oyewola O., Djenidi L. and Antonia R.A.** Combined influence of the Reynolds number and localized wall suction on a turbulent boundary layer // Exp. Fluids. — 2003. — Vol. 35. — P. 199–206.
3. **Oyewola M.O.** Influence of short roughness strip on the anisotropy of Reynolds stress tensor in a turbulent boundary layer // Proc. of 5th Symp. on Turbul., Heat and Mass transfer. — 2006. — Croatia (to appear).
4. **Oyewola M.O., Adaramola S.M. and Olaberinjo A.F.** Effect of short roughness strip on a turbulent boundary layer structure // Proc. of 3rd BSME/ASME conference on thermal engineering. — 2006 (to appear).
5. **Pearson B.R., Elavarasan R. and Antonia R.A.** Effect of a short roughness strip on a turbulent boundary layer // Appl. Sci. Res. — 1998. — Vol. 59 (1). — P. 61–75.
6. **Smits A.J. and Wood D.H.** The response of turbulent boundary layers to sudden perturbations // Ann. Rev. Fluid Mech. — 1985. — Vol. 17. — P. 321–358.
7. **Tani, I.** Review of some experimental results on the response of a turbulent boundary layer to sudden perturbations // Proc. 1968 AFOSR-IFP-Stanford Conference on Computation of Turbulent boundary layers, 1969. — Vol. 1. — P. 483–494.

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2006 г.