

3. Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников А.В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. — Л.: Судостроение, 1973.
4. Турбулентные течения в пограничном слое. Ч. 2. Расчетные и экспериментальные исследования. — М.: ЦАГИ, 1980. — № 575.
5. Трехмерные турбулентные пограничные слои. — М.: Мир, 1985.
6. Klinksiek W.F., Pierce F.J. A finite difference solution of the two and three-dimensional incompressible turbulent boundary layer equations // Trans. ASME. Ser. I. J. Fluids Engng. — 1973. — V. 95, N 3. — P. 445—458.
7. Долгов В.Н., Шулемович В.М., Шпак С.И. Турбулентная вязкость для расчета двумерных пограничных слоев в широком диапазоне градиентов давления, чисел Маха, Рейнольдса и параметров проницаемости. — Новосибирск, 1978. — (Препр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, ИТПМ; № 17).
8. Computation of Turbulent Boundary Layers — 1968: AFOSR — IFP — Stanford Conf.: Proc. — Stanford, Calif., 1969.
9. Гогиш Л.В., Долгов В.Н. Использование свойств автомодельности течения в зоне возвратных токов для моделирования течений с отрывом // Моделирование в механике: Сб. науч. тр. — Новосибирск: ВЦ; ИТПМ СО АН СССР, 1988.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969.
11. East L.F., Hoxey R.P. Low-speed three-dimensional turbulent boundary layer data. Pt 1, 2. — London, 1971. — (Rept and Memo / Aeron. Res. Council; N 3653).
12. Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой. — М.: Физматгиз, 1962.
13. East L.F. Measurement of the three-dimensional incompressible turbulent boundary layer induced on the surface of a slender delta wing by the leading — edge vortex. — London, 1975. — (Rept and Memo / Aeron. Res. Council; N 3768).
14. Расторги А.К., Роди В. Расчет произвольных трехмерных турбулентных пограничных слоев // РТК. — 1978. — Т. 16, № 2.
15. Себеси Т. Расчет трехмерных пограничных слоев. II. Трехмерные течения в декартовых координатах // РТК. — 1975. — Т. 13, № 8.
16. Филло Дж.А., Барбэнк Р. Расчет трехмерных ламинарных пограничных слоев // РТК. — 1972. — Т. 10, № 3.
17. Ветлущая Л.М., Ветлущий В.Н. Ламинарный пограничный слой на пластине с препятствием // ЧММСС. — 1979. — Т. 10, № 3.

г. Новосибирск

Поступила 9/XII 1993 г.,
в окончательном варианте — 14/I 1994 г.

УДК 532.517.4

П.Г. Заец, А.Т. Онуфриев, Н.А. Сафаров, Р.А. Сафаров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЮ ТРЕНИЯ И МОМЕНТАМ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА, В РАЗВИТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ В ТРУБЕ

Анализ экспериментальных результатов по поведению спектров, соответствующих диагональным составляющим тензора рейнольдсовых напряжений [1], и привлечение свойств подобия обобщенной модели спектра изотропного потока [2, 3] показывают, что существует достаточно универсальное представление для упомянутых спектральных распределений. В энергосодержащем интервале волновое число при этом нормируется на величину продольного корреляционного интегрального масштаба. Неоднородность и неизотропия потока вносят систематические отклонения в спектральные распределения.

Использование интегрального масштаба в качестве характерной длины подобия содержится уже в формуле Кармана [4] и в работе [5] при выводе уравнения переноса для интегрального корреляционного масштаба. В связи с последним вопросом представляет интерес то, как будут вести себя спектры,

© П.Г. Заец, А.Т. Онуфриев, Н.А. Сафаров, Р.А. Сафаров, 1994

соответствующие моментам более высокого порядка. Здесь рассматриваются моменты третьего порядка, которые измерялись термоанемометром с помощью x -образного датчика.

Измерения проводились для развитого турбулентного потока в прямолинейной трубе с диаметром 0,06 м, при скорости на оси 10 м/с, кинематический коэффициент вязкости $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с, определенное по средней скорости число Рейнольдса $Re = 3,47 \cdot 10^4$. Скорость трения $v_* = 0,433$ м/с получена по зависимостям для развитого потока в трубе [6]. Описание установки и методических вопросов изложено в [7—9]. Использовались стандартный датчик P61 с двумя нитями длиной $l = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м, стандартные блоки аппаратуры DISA, производились запись на цифровой магнитофон и обработка сигналов на ЭВМ "Plurimat-S". Разработаны программы обработки, позволяющие охватить весь спектральный динамический диапазон. Характеристики линейризаторов выбраны с условием создания одинаковых линейных зависимостей для обеих нитей. Линейность преобразования скорость — напряжение не хуже 1%. Чувствительность выбиралась из условия передачи без искажения сигнала, достигающего четырех значений среднеквадратичного отклонения.

Для оценки спектра использовались быстрое преобразование Фурье и процедура, изложенная в [10]. Число реализаций $M = 1024$ (иногда 256), каждая реализация m длительностью T (число отсчетов в реализации $N = 2048$). Частота дискретизации $f_1 = 5000$ Гц. Применялось сглаживающее окно Ханна. Величины односторонних взаимных спектральных плотностей получались усреднением по всем реализациям:

$$E_{xy}(f) = \left\{ \sum_{m=1}^M G_{xy}(f) \right\} / M.$$

В каждой реализации

$${}_m G_{xy}(f) = 2 \overline{X_m(f)} Y_m(f) / T,$$

где $\overline{X_m(f)}$ — комплексно-сопряженное значение преобразования Фурье сигнала $x_m(t)$; $Y_m(f)$ — значение преобразования Фурье сигнала $y_m(t)$. Принято

$$x_m(t) = \begin{cases} (U_1)_m - \langle U_1 \rangle, \\ (U_2)_m - \langle U_2 \rangle, \end{cases}$$

$$y_m(t) = \begin{cases} [(U_1)_m - \langle U_1 \rangle]^2 - \langle u_1^2 \rangle, \\ [(U_1)_m - \langle U_1 \rangle][(U_2)_m - \langle U_2 \rangle] - \langle u_1 u_2 \rangle, \\ [(U_2)_m - \langle U_2 \rangle]^2 - \langle u_2^2 \rangle, \end{cases}$$

величины $\langle U_1 \rangle$ и $\langle u_1^2 \rangle = \frac{1}{NM} \sum_k U_{1k}^2 - \langle U_1 \rangle^2$, например, — средние значения по точкам всех реализаций.

Переход к волновым числам k проводился по формуле Тейлора $k = 2\pi f / \langle U_1(r') \rangle$ (r' — значение относительной радиальной координаты).

Размер двухнитевого датчика не позволил получить значения спектра в области волновых чисел $k' = k\eta \geq 0,2$ ($\eta = (\nu/\varepsilon)^{1/4}$ — колмогоровский микромасштаб). При использованной длине нити датчика для волнового числа $k' = 0,1$ погрешность, определенная по методике [11], составляет 10%. При том же k' погрешность из-за дискретизации сигнала может достигать 20%. Среднеквадратичная случайная ошибка для спектра напряжения трения составляет при использованных условиях 10% и, видимо, большую величину для спектров моментов третьего порядка. Поэтому дополнительно проводилось усреднение по частотам в интервале 0,3 в масштабе $\lg(k)$.

Т а б л и ц а 1

r'	$\langle u_x^2 \rangle$	$\langle u_r^2 \rangle$	$\langle u_\varphi^2 \rangle$	$\langle u_x u_r \rangle$	$\langle U_x \rangle$	Re_λ	Λ_0	$\eta \cdot 10^4$
0	0,125	0,0865	0,083	0	10,0	65	0,01	1,75
0,2	0,171	0,0986	0,100	0,036	9,82	81	0,012	1,66
0,4	0,278	0,130	0,149	0,072	9,38	106	0,015	1,49
0,6	0,404	0,167	0,205	0,108	8,72	120	0,015	1,31
0,8	0,555	0,197	0,262	0,143	7,66	120	0,013	1,12

Т а б л и ц а 2

r'	$-\langle u_x^3 \rangle / u_*^3$			$-\langle u_x u_r^2 \rangle / u_*^3$			$-\langle u_x u_\varphi^2 \rangle / u_*^3$		
	Данная работа	[12]	[13]	Данная работа	[12]	[13]	Данная работа	[12]	[13]
0	0,26	0,25	0,39	0,11	0,10	0,15	-0,01	0	-0,05
0,2	0,47	0,50	0,57	0,15	0,12	0,18	0,17	0,16	0,20
0,4	0,78	0,69	0,88	0,20	0,17	0,21	0,28	0,27	0,34
0,6	0,86	0,69	1,03	0,20	0,18	0,22	0,32	0,34	0,37
0,8	0,61	0,69	0,87	0,16	0,15	0,11	0,29	0,39	0,38

Т а б л и ц а 3

r'	$-\langle u_r^3 \rangle / u_*^3$			$-\langle u_x u_r^2 \rangle / u_*^3$	
	Данная работа	[12]	[13]	Данная работа	[12]
0	-0,01	0	-0,03	0,113	0,106
0,2	0,097	0,105	0,107	0,16	0,15
0,4	0,16	0,19	0,18	0,23	0,20
0,6	0,16	0,21	0,17	0,24	0,19
0,8	0,12	0,22	0,13	0,13	0,11

Т а б л и ц а 4

r'	$^{-s_1}$				$^{-s_2}$		
	Данная работа	[12]	[13]	[14]	Данная работа	[12]	[13]
0	0,498	0,373	0,462	0,50	-0,008	0	-0,064
0,2	0,550	0,50	0,486	0,56	0,271	0,191	0,208
				0,62			
0,4	0,438	0,354	0,385	0,54	0,291	0,241	0,245
				0,52			
0,6	0,271	0,200	0,267	0,45	0,201	0,169	0,169
				0,38			
0,8	0,119	0,123	0,140	0,30	0,123	0,098	0,105
				0,19			
				0,13			

Измерены спектры моментов третьего порядка для пульсаций скорости $u_x = u_1$ и $u_r = u_2$. Соответствующие спектры отвечают индексам $x - 1$, $r - 2$, $\varphi - 3$; например, спектр, соответствующий напряжению трения, обозначается E_{12} . Первым естественным шагом является попытка представить спектры в безразмерном виде с нормировкой волнового числа на величину "изотропного" продольного корреляционного интегрального масштаба Λ_0 , рассчитанного по локальным значениям энергии пульсационного движения $\langle E \rangle = \langle u_i^2 \rangle / 2$ и скорости диссипации энергии $\varepsilon = 15\varepsilon_{11}$ [2]:

$$\Lambda_0 / \eta = Re_0^{1/2} [2,47 + 0,081 Re_0^{1/2} (Re_0^{1/2} - 1)].$$

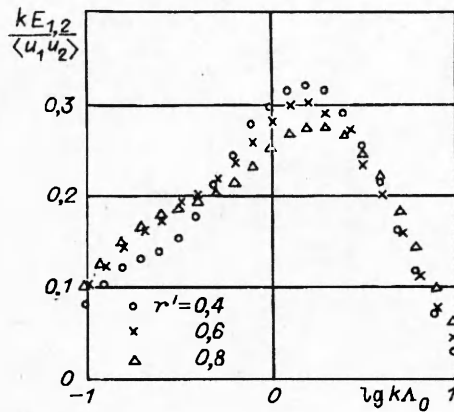


Рис. 1

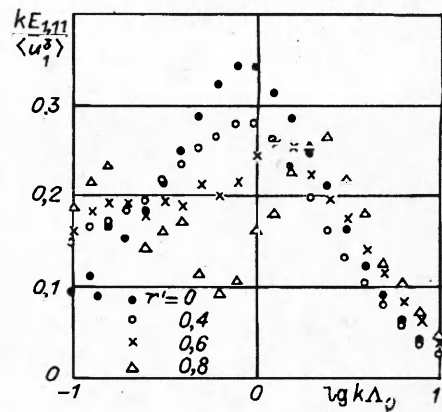


Рис. 2

Здесь $Re_0 = \lambda_0(2 \langle E \rangle / 3)^{1/2} / \nu$ — турбулентное число Рейнольдса; λ_0 — тейлоровский (поперечный) микромасштаб; $\lambda_0^2 = 10 \nu \langle E \rangle / \epsilon$.

В табл. 1 представлены данные о потоке и рассчитанных величинах (скорость, м/с, линейные размеры, м).

В табл. 2, 3 приводятся величины одноточечных моментов третьего порядка, деленные на v_*^3 . Наиболее полно одноточечные моменты третьего порядка для рассматриваемого течения изучены в [12, 13]. Величины моментов третьего порядка наиболее чувствительны к условиям достижения режима полностью развитого потока [12]. При выполнении измерений эти условия соблюдены. Отклонения значений ряда моментов от нуля на оси указывают на измерительную погрешность 0,01—0,05. В таких же пределах меняются измеренные значения моментов $\langle u_3 u_1^2 \rangle / v_*^3$ и $\langle u_3^3 \rangle / v_*^3$. Сопоставлены также результаты [12] для $Re = 1,72 \cdot 10^4$ и [13] для $Re = (9 - 25) \cdot 10^4$. Указанные в табл. 2 величины брались по графикам средних значений и пересчитывались. Это, конечно, ведет к дополнительной погрешности. В табл. 4 сопоставляются данные по величине коэффициентов асимметрии $s_1 = \langle u_1^3 \rangle / \langle u_1^2 \rangle^{3/2}$, $s_2 = \langle u_2^3 \rangle / \langle u_2^2 \rangle^{3/2}$ по работам МФТИ и [12—14]. Для [14] нижняя цифра соответствует числу Рейнольдса $8 \cdot 10^4$, а верхняя — $4 \cdot 10^4$. Несколько больший разброс от указанных значений имеют данные [15].

Отклонения значений моментов третьего порядка по сравниваемым результатам в основном не превышают 25 % до относительного радиуса трубы 0,8. Ближе к стенке разброс возрастает. Следует, видимо, иметь в

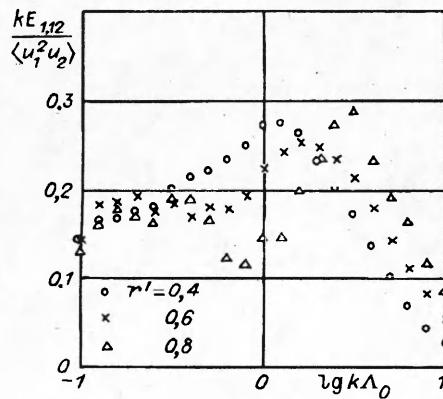


Рис. 3

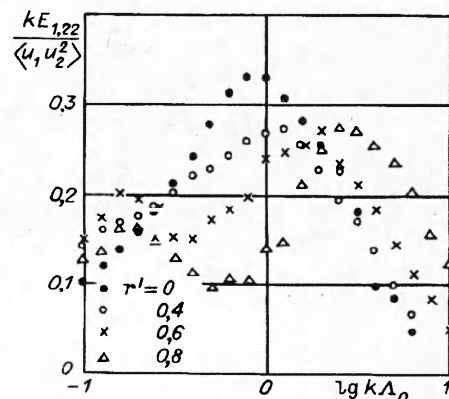


Рис. 4

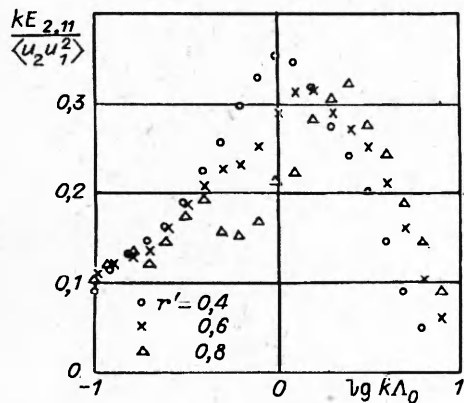


Рис. 5

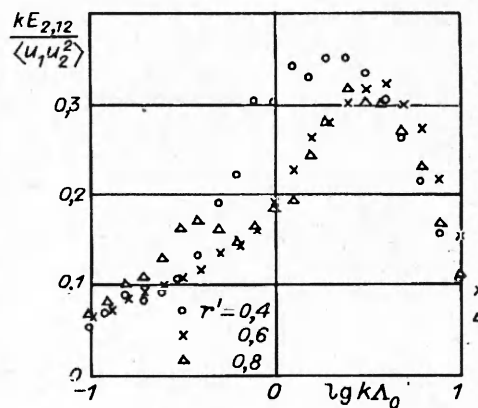


Рис. 6

виду, что при проведенном сравнении сглажено влияние различных значений числа Рейнольдса. Сильно влияет погрешность в определении скорости трения.

Цель проводимого сопоставления — убедиться, что представленные в настоящей работе экспериментальные данные по односточным моментам третьего порядка удовлетворительно согласуются с имеющимися в литературе и дополняют их, обосновывая достоверность данных для спектральных измерений. На рис. 1 представлен спектр, соответствующий напряжению трения, в безразмерном виде. На рис. 2—7 даны спектры моментов третьего порядка в безразмерном виде. На рис. 8 приведена зависимость величины когерентности

$$\gamma_{1,2}^2(f) = E_{12}^2(f) / [E_1(f)E_2(f)]$$

от частоты f .

Кривые спектральных зависимостей группируются около некоторых универсальных распределений. Ситуация подобна случаю для моментов второго порядка. По мере приближения к стенке турбулентный поток в трубе становится сильно неоднородным и неизотропным. При взаимодействии с полем неоднородного и неизотропного потока появляются систематические искажения в спектральных распределениях. Они смогут быть учтены будущим развитием теории турбулентного переноса. Появление систематических искажений спектров для напряжения трения и дисперсий пульсаций скорости отмечалось в [13, 16—19].

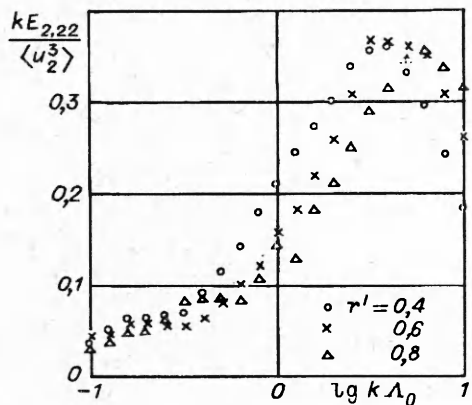


Рис. 7

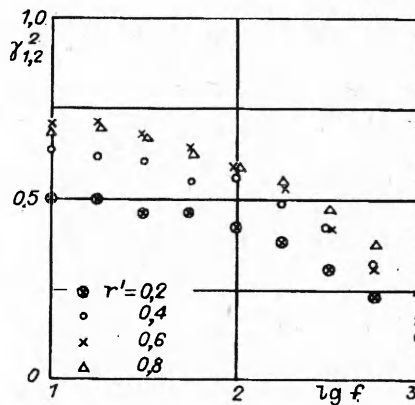


Рис. 8

В целом данные и представления о приближенном универсальном выражении спектров для моментов третьего порядка могут быть полезны при построении полуэмпирической теории турбулентного переноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93—013—17632).

ЛИТЕРАТУРА

1. Заец П.Г., Онуфриев А.Т., Сафаров Н.А., Сафаров Р.А. Экспериментальное определение поведения энергетического спектра в турбулентном потоке во вращающейся относительно продольной оси трубе // ПМТФ. — 1992. — № 1. — С. 33—38.
2. Driscall R.J., Kennedy K.A. A model for the turbulent energy spectrum // Phys. Fluids. — 1983. — V. 26, N 5. — P. 1228—1233.
3. Pao J.H. Structure of turbulent velocity and scalar fields at large wavenumber // Phys. Fluids. — 1965. — V. 8, N 6. — P. 1068—1075.
4. Karman Th. Progress in the statistical theory of turbulence // Proc. Nat. Acad. Sci., U.S. — 1948. — V. 34, N 11. — P. 530—539.
5. Rotta J.C. Statistische Theorie nichthomogener Turbulenz // Z. Phys.—1951. — Bd 129, N 5. — S. 547—572; Bd 131, N 1. — S. 51—77.
6. Шлехтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969.
7. Заец П.Г., Онуфриев А.Т., Пилипчук М.И. и др. Использование термоанемометрического комплекса в блоке с ЭВМ для измерения характеристик турбулентных завихренных потоков // Физические методы исследования прозрачных неоднородностей. — М.: Знание, 1986.
8. Сафаров Н.А. Поведение параметров развитого турбулентного потока в прямой цилиндрической трубе, вращаемой относительно продольной оси: Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. — М.: МФТИ, 1986.
9. Заец П.Г. Экспериментальное исследование спектра турбулентности в потоке во вращающейся трубе: Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. — М.: МФТИ, 1986.
10. Бендат Д., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. — М.: Мир, 1983.
11. Wyngaard J.C. Measurements of small-scale turbulence structure with hot wires // J. Phys. Ser. E: Scient. Instrum. — 1968. — V. 1, ser. 2. — P. 1105—1107.
12. Schildknecht V., Miller J.A., Meier G.E. The influence of suction on the structure of turbulence in fully developed pipe flow // J. Fluid Mech. — 1979. — V. 90, pt 1. — P. 67—107.
13. Lawn C.J. The determination of the rate of dissipation in turbulent pipe flow // J. Fluid Mech. — 1971. — V. 48, pt 3. — P. 477—505.
14. Букреев В.И., Зыков В.В., Костомаха В.А. Одномерные законы распределения вероятностей флуктуаций скорости при турбулентном течении в круглой трубе // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1975. — Т. 13, вып. 3. — С. 3—9.
15. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.И. и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. — М.: Атомиздат, 1978.
16. Bremhorst K., Walker T.B. Spectral measurements of turbulent momentum transfer in fully developed pipe flow // J. Fluid Mech. — 1973. — V. 61, pt 1. — P. 173—186.
17. Patel R.A. A note on fully developed turbulent flow down a circular pipe // Aeron. J. — 1974. — V. 78. — P. 93—97.
18. Perry A.E., Abel C.J. Scaling laws for pipe-flow turbulence // J. Fluid Mech. — 1975. — V. 67, pt 2. — P. 257—271.
19. Bremhorst K., Bullock K.J. Spectral measurements of temperature and longitudinal velocity fluctuations in fully developed pipe flow // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1979. — V. 13. — P. 1313—1329.

г. Долгопрудный
Московской области

Поступила 15/XI 1993 г.,
в окончательном варианте — 9/II 1994 г.