

УДК 532.517.4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ,
СООТВЕТСТВУЮЩИХ НЕКОТОРЫМ ДВУХТОЧЕЧНЫМ
МОМЕНТАМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА, В РАЗВИТОМ
ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ В ТРУБЕ ***

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

*Московский физико-технический институт,
111700 Долгопрудный Московской области*

В [1, 2] изложены результаты термоанемометрических измерений спектральных распределений, соответствующих моментам второго и третьего порядков. В настоящей работе представлены данные о спектральных распределениях, отвечающих некоторым моментам четвертого порядка для пульсационных скоростей турбулентного потока.

Измерения проводились для развитого турбулентного потока в прямолинейной трубе с диаметром $2R_0 = 0,06$ м. Число Рейнольдса Re , определенное по средней скорости и диаметру трубы, равно $3,47 \cdot 10^4$, скорость на оси потока 10 м/с, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с, скорость трения $v_* = 0,433$ м/с. Описание установок и методических вопросов измерений изложено в [1–5].

Одной из целей работы было проверить существование в энергосодержащем интервале волновых чисел приближенного правила подобия, которое позволяет представить спектральные распределения, деленные на величины соответствующих одноточечных моментов, в достаточно универсальном виде при использовании нормировки волнового числа на интегральный корреляционный масштаб. В качестве такого масштаба выбрана величина «изотропного» продольного интегрального масштаба Λ_0 , рассчитанного по локальным значениям энергии пульсационного движения и скорости диссипации энергии [6].

Для оценки спектра использовались быстрое преобразование Фурье и процедура, изложенная в [7]. Более подробные данные о потоке приведены в [2].

Измерены спектры $E_{xx,rr}(k)$ и др. разности двухточечных моментов четвертого порядка и не убывающих с ростом расстояния между точками соответствующих им произведений одноточечных моментов второго порядка, например $\langle u_{xx,rr} \rangle - \langle u_x^2 \rangle \langle u_r^2 \rangle$ [8, 9]. Пульсации скорости: $u_x = u_1$, $u_r = u_2$, $u_\varphi = u_3$. Спектры отвечают индексам: $x = 1$, $r = 2$. Рассмотрены спектры моментов, в которых две компоненты пульсаций скорости относятся к одной точке и две компоненты скорости — к другой. Расстояние между точками изменяется вдоль оси потока. Переход к волновым числам проводился по формуле Тейлора $k = 2\pi f / \langle V_x \rangle$, где $\langle V_x \rangle$ — местное среднее значение продольной скорости потока, f — частота, зависимость от которой определяется экспериментально.

Соответствие спектров и моментов показано в табл. 1. В табл. 2 приведены данные об измеренных величинах одноточечных моментов четвертого порядка, деленных на v_*^4 . Данные о моментах второго и третьего порядков представлены в [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-17632).

Таблица 1

$E_{11,11}$	$E_{12,12}$	$E_{12,11}$	→
$\langle u_x^4 \rangle - \langle u_x^2 \rangle^2$	$\langle u_x^2 u_r^2 \rangle - \langle u_x u_r \rangle^2$	$\langle u_x^3 u_r \rangle - \langle u_x^2 \rangle \langle u_x u_r \rangle$	
→			
$E_{11,22}$	$E_{22,22}$	$E_{12,22}$	
$\langle u_x^2 u_r^2 \rangle - \langle u_x^2 \rangle \langle u_r^2 \rangle$	$\langle u_r^4 \rangle - \langle u_r^2 \rangle^2$	$\langle u_x u_r^3 \rangle - \langle u_r^2 \rangle \langle u_x u_r \rangle$	

Таблица 2

r'	$\langle u_x^4 \rangle / v_*^4$	$\langle u_x^2 u_r^2 \rangle / v_*^4$	$\langle u_x^3 u_r \rangle / v_*^4$	$\langle u_x u_r^3 \rangle / v_*^4$	$\langle u_r^4 \rangle / v_*^4$	$\langle u_\varphi^4 \rangle / v_*^4$
0	1,46	0,377	-0,01	0	0,70	0,687
0,2	2,78	0,621	0,655	0,336	0,88	1,02
0,4	6,70	1,33	1,77	0,795	1,45	2,08
0,6	9,67	1,82	2,55	1,07	1,82	2,88
0,8	24,0	3,82	6,07	2,14	3,11	6,07

Значения моментов четвертого порядка подсчитаны по спектральным распределениям. Величины одноточечных моментов для продольной пульсации скорости, полученные по измерениям x -образным и односторонним датчиками, различаются в пределах 6%. В табл. 3 проводится также сопоставление с результатами [10, 11] для коэффициентов эксцесса: $\delta_1 - 3 = \langle u_1^4 \rangle / \langle u_1^2 \rangle^2 - 3$, $\delta_2 - 3$ и $\delta_3 - 3$. Для [10] нижняя цифра соответствует $Re = 8 \cdot 10^4$, верхняя — $4 \cdot 10^4$. Согласие удовлетворительное.

Таблица 3

r'	$\delta_1 - 3$			$\delta_2 - 3$		$\delta_3 - 3$
	Данная работа	[10]	[11]	Данная работа	[11]	Данная работа
0	0,41	$\frac{0,43}{0,55}$	0,60	0,54	0,82	0,50
0,2	0,42	$\frac{0,40}{0,48}$	0,46	0,46	0,68	0,46
0,4	0,12	$\frac{0,08}{0,20}$	0,16	0,30	0,52	0,28
0,6	-0,14	$\frac{-0,17}{-0,07}$	-0,10	0,13	0,36	0,15
0,8	-0,26	$\frac{-0,25}{-0,27}$	-0,18	0,14	0,29	0,10

На рис. 1-6 даны зависимости для спектральных распределений моментов четвертого порядка в нормированных переменных $\rho_{\alpha,\beta\beta} = \frac{k E_{\alpha\alpha,\beta\beta}(k)}{\int E_{\alpha\alpha,\beta\beta}(k) dk}$ и $k\Lambda_0$ (по α и β суммирования нет). Здесь приведены значения безразмерного радиуса $r' = r/R_0 = 0; 0,4; 0,6; 0,8$.

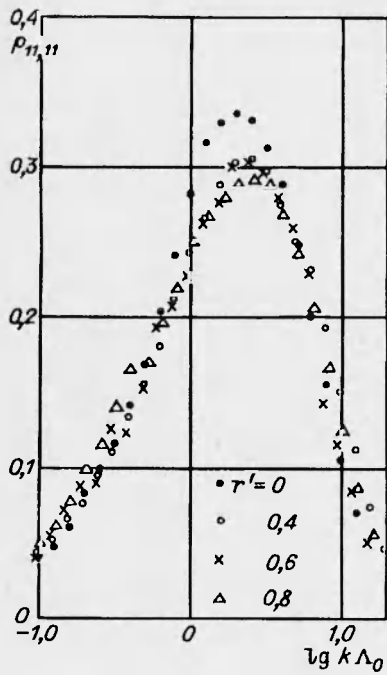


Рис. 1

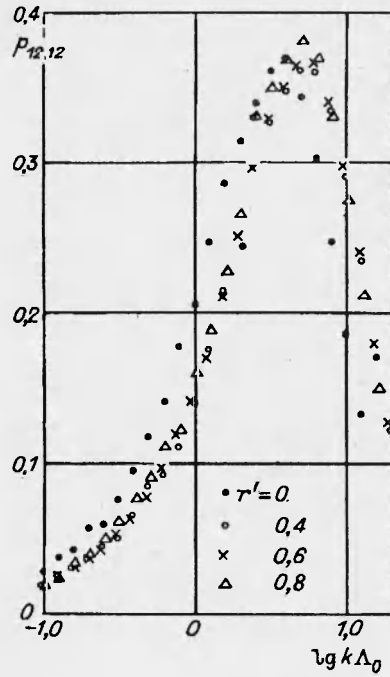


Рис. 2

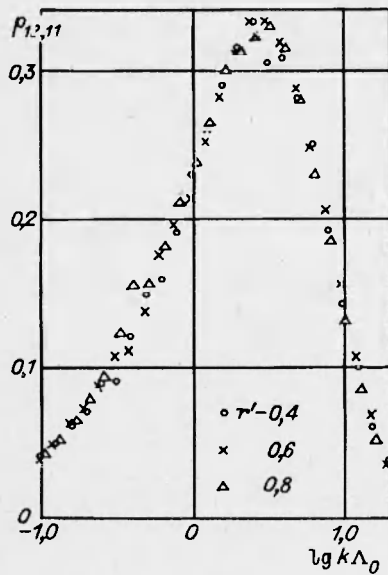


Рис. 3

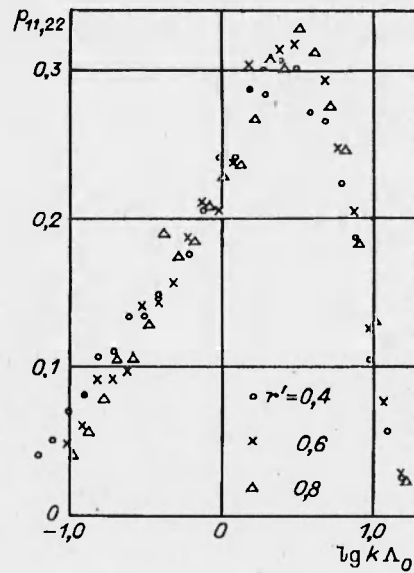


Рис. 4

Кривые спектральных распределений группируются около некоторых универсальных зависимостей подобно тому, как это происходит для моментов второго и третьего порядков [2]. Искажения в неоднородном потоке при приближении к стенке малы. Видимо, это связано с тем, что спектр для момента четвертого порядка близок к свертке спектров для моментов второго порядка, и искажения сглаживаются.

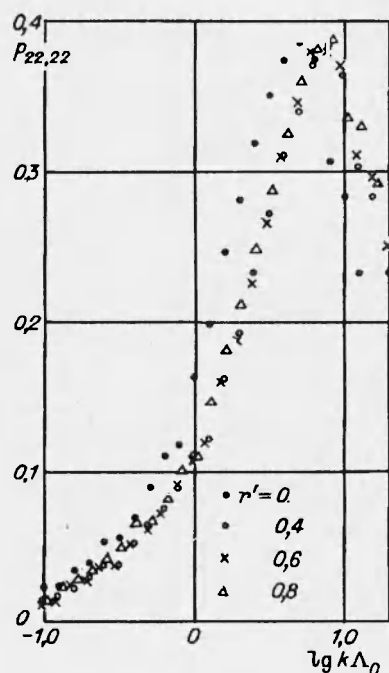


Рис. 5

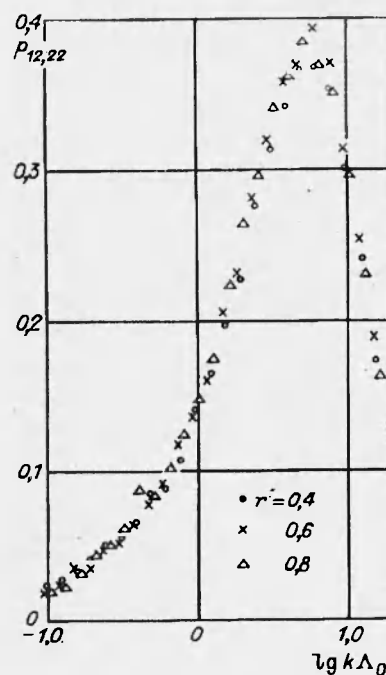


Рис. 6

Данные о поведении спектров для моментов четвертого порядка полезны и необходимы при совершенствовании полуэмпирической теории турбулентного переноса, в частности, можно будет проследить соотношения между гипотезой о равенстве нулю кумулянтов четвертого порядка и корреляционными моментами четвертого и второго порядков.

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. Заец П. Г., Онуфриев А. Т., Сафаров Н. А., Сафаров Р. А. Экспериментальное изучение спектров, соответствующих напряжению трения и моментам третьего порядка, в развитом турбулентном потоке в трубе // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 6. С. 99–104.
3. 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.
4. Сафаров Н. А. Поведение параметров развитого турбулентного потока в прямолинейной цилиндрической трубе, вращаемой относительно продольной оси: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МФТИ, 1986.
5. Заец П. Г. Экспериментальное исследование спектра турбулентности в потоке во вращающейся трубе: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МФТИ, 1986.
6. Driscall R. J., Kennedy K. A. A model for the turbulent energy spectrum // Phys. Fluids. 1983. V. 26, N 5. P. 1228–1233.
7. Бендат Д., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.

8. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1967. Ч. 2.
9. Бэтчелор Дж. Теория однородной турбулентности. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
10. 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.
11. Lawn С. J. The determination of the rate of dissipation in turbulent pipe flow // J. Fluid Mech. 1971. V. 48, pt 3. P. 477-505.

*Поступила в редакцию 6/V 1994 г.,
в окончательном варианте — 23/VI 1994 г.*
