

ности пульсационного давления на пластине, учитывающие влияние размера датчика, которые не сложно определить по фиг. 4, могут быть использованы также и для установления значений спектральной плотности при $d/\delta^* = 0$ в исследуемых пограничных слоях с продольным градиентом среднего давления. Откорректированные безразмерные спектры мощности пульсационного давления, измеренные в различных сечениях пограничного слоя с $a = 0.3$, оказались совершенно идентичными (на фиг. 7 они представлены кривой *a*), что свидетельствует об автомодельности течения. Аналогичный результат получен и для пограничных слоев с $a = 0.1$ и 0.17 . Примечательным фактом будет совпадение откорректированных спектров мощности в пограничных слоях с различными значениями a , включая пограничный слой на пластине, где $a = 0$ (кривая *b* на фиг. 7, а также кривая *g* на фиг. 4). Таким образом, нормированные соответствующим образом характеристики пульсационного давления в пограничных слоях с распределением скорости свободного потока вида $U_1 \sim x_1^{-a}$, где $0 \leq a < 1/3$, не зависят от значения a .

В заключение отметим, что предварительные измерения спектров мощности пульсационного давления в неавтомоделных пограничных слоях с отрицательным продольным градиентом среднего давления показали, что безразмерная спектральная плотность тем меньше, чем больше абсолютное значение градиента среднего давления, причем эта тенденция проявляется главным образом на высоких частотах.

Поступило 16 IX 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Skudrzyk E. J., Haddle G. P. Noise production in a turbulent boundary layer by smooth and rough surfaces. J. Acoust. Soc. Amer., 1960, vol. 32, No. 1.
2. Willmarth W. W., Wooldridge C. E. Measurements of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick turbulent boundary layer. J. Fluid Mech., 1962, vol. 14, pt 2.
3. Willmarth W. W. Corrigendum: Measurements of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick turbulent boundary layer. J. Fluid Mech., 1965, vol. 24, pt 1.
4. Serafini J. S. Wall pressure fluctuations and pressure-velocity correlations in a turbulent boundary layer. Nat. Aer. Space Adm. Tech. Rep., 1963, R-165.
5. Corcos G. M. Resolution of pressure in turbulence. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, vol. 35, No. 2.
6. Corcos G. M. The structure of the turbulent pressure field in boundary-layer flows. J. Fluid Mech., 1964, vol. 18, pt 3.
7. Maestrello L. Measurement and analysis of the response field of turbulent boundary layer exited panels. J. Sound Vib., 1965, vol. 2, No. 3.
8. Willmarth W. W., Roos F. W. Resolution and structure of the wall pressure field beneath a turbulent boundary layer. J. Fluid Mech., 1965, vol. 22, pt 1.
9. Таунсенд А. А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
10. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Гостехиздат, 1957.
11. Klebanoff P. S., Diehl Z. W. Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient. Nat. Adv. Com. Aer. Tech. Note, 1951, No. 2475.
12. Фавр А. Пространственно-временные корреляции в турбулентных потоках жидкости. Механика. Период. сб. перев. иностр. статей, 1965, вып. 2/90.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ АМПЛИТУД ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

В. П. БОБКОВ, М. Х. ИБРАГИМОВ, Г. И. САВЕЛЕВ,
В. И. СИДОРОВ, В. И. СУББОТИН

(Обнинск)

Приведены результаты исследования распределения вероятностей амплитуд пульсаций температур в каналах круглого и квадратного поперечного сечения при турбулентном неизотермическом течении воды и ртути.

Для понимания структуры турбулентного потока и механизма процессов переноса, происходящих в нем, нужны сведения о статистических характеристиках турбулентности. Результаты измерения ряда статистических пульсаций температуры (интенсивность, пространственные коэффициенты корреляции, спектральная плотность в неизотермическом турбулентном потоке различных жидкостей) приведены в работах [3-7].

Распределение вероятностей пульсаций температур при турбулентном течении жидкости изучено мало. Первые отрывочные сведения, приведенные в [1, 2], показали слабое отклонение распределения вероятностей от нормального закона. В данной статье представлены результаты систематического исследования распределения вероятностей амплитуд пульсаций температуры при турбулентном течении воды и ртути в круглой трубе и в квадратном канале. Опыты проведены в следующем диапазоне чисел Рейнольдса: для круглой трубы $R = 10^4 \div 1.25 \cdot 10^5$ (ртуть), $R = 1.6 \cdot 10^4$ (вода), для квадратного канала $R = 3 \cdot 10^4$ (ртуть), $R = 4.9 \cdot 10^3 \div 10.7 \cdot 10^3$ (вода). Величина теплового потока составляла $2 \cdot 10^4$ ккал/м²·час для трубы и $1.36 \cdot 10^4$ ккал/м²·час при четырехстороннем обогреве квадратного канала. Экспериментальные участки и методика измерения описаны в работах [2, 3, 6].

Исследование распределения вероятностей амплитуд пульсаций температур в круглой трубе и в квадратном канале показало, что, несмотря на различную геометрию каналов, имеется ряд общих закономерностей. Наблюдаются небольшие, но закономерные отклонения от нормального закона распределения (фиг. 1 и 2), характеризующиеся моментами третьего и четвертого порядков. Известно, что такие распределения сглаживаются по закону распределения Шарлье [3], частным случаем которого будет нормальное распределение. Распределение Шарлье выражается формулой

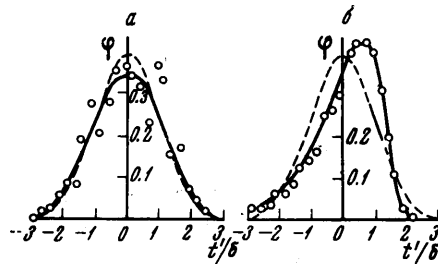
$$\varphi = \frac{n_i \sigma}{N_0 h} = \varphi' \left[1 + \frac{A}{6} (T^3 - 3T') + \frac{E - 3}{24} (T'^4 - 6T'^2 + 3) \right]$$

Здесь φ — экспериментальное значение плотности вероятности, n_i/N_0 — частота, σ — среднеквадратичное значение, h/σ — относительный шаг по амплитуде, φ' — плотность вероятности при нормальном распределении, $T' = t'/\sigma$ — относительная амплитуда пульсаций, $A = \langle t'^3 \rangle / \sigma^3$ и $E = \langle t'^4 \rangle / \sigma^4$ — коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Характер изменения параметров распределения вероятностей пульсаций температуры по сечению канала находится в тесной связи со структурой турбулентного потока и процессами переноса тепла. Вблизи твердой границы находятся зоны наибольшего зарождения и диссипации турбулентных вихрей. Эта область характеризуется наибольшей неоднородностью по пространству как средних, так и пульсационных характеристик потока. Как показывает эксперимент [3], вблизи стенки наблюдается асимметрия распределения вероятностей поперечной составляющей пульсаций скорости. Асимметрия связана с тем, что имеется преимущественный перенос количества движения от стенки в ядро потока, причем вихри, зарождающиеся вблизи стенки и диффундирующие в ядро потока, имеют свойства, отличные от свойств вихрей, зарождающихся в ядре потока и перемещающихся к стенке. Пристеночные вихри наиболее интенсивные, хотя и более мелкие, в то время как обратное течение менее интенсивно, но более крупномасштабно. Асимметрия распределения вероятностей вблизи стенки сохраняется и для пульсаций температуры (фиг. 1, б). Пристеночная турбулентная зона течения характеризуется преимущественным мелкомасштабным переносом тепла от стенки в ядро потока, хотя сюда могут изредка проникать крупные, образующиеся вдали от стенки, возмущения.

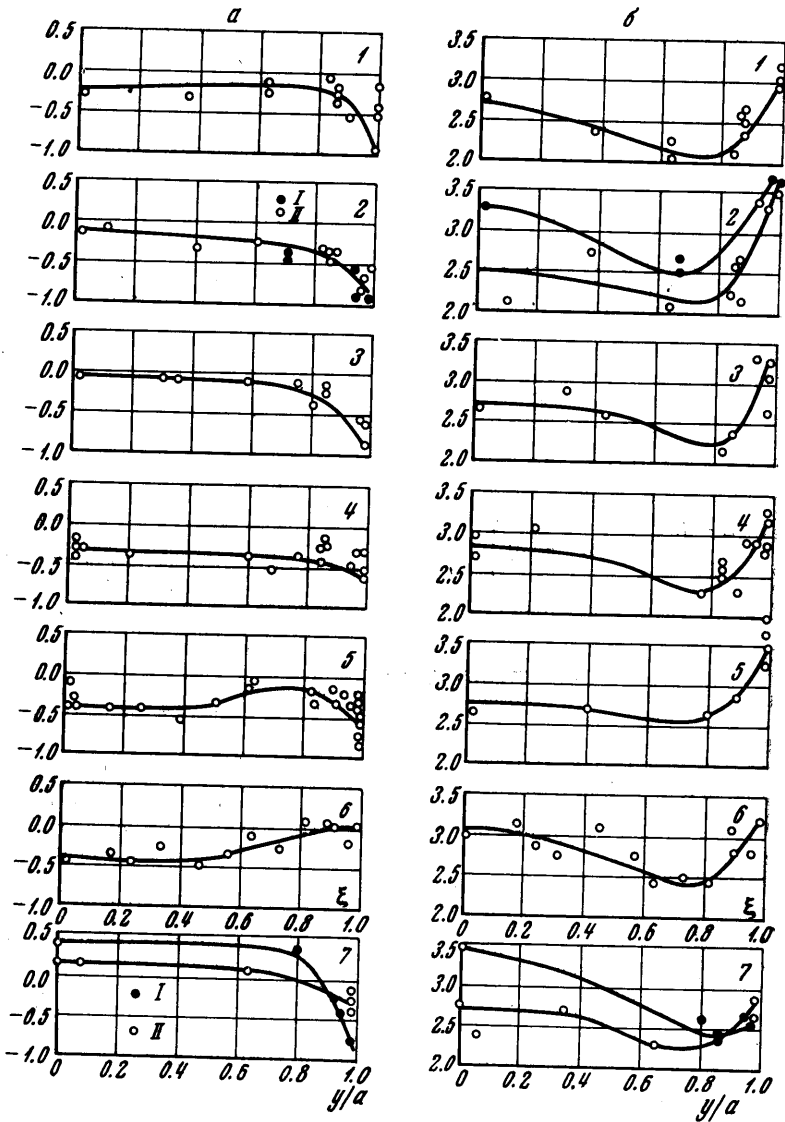
По мере удаления от стенки интенсивность зарождения и диссипации вихрей уменьшается, увеличивается интенсивность крупномасштабного переноса по сравнению с мелкомасштабным. Существующие здесь возмущения становятся более симметричными, что приводит к более симметричному распределению вероятностей пульсаций температур. Однако коэффициент A , даже на оси симметрии потока не равен нулю в отличие от пульсаций скорости. Объясняется это тем, что вихри, проходящие в различных направлениях через ядро потока, вызывают в основном положительные отклонения температуры. По данным работы [3], распределение вероятностей поперечной компоненты пульсаций скорости имеет коэффициент эксцесса больше трех, т. е. имеется повышенная плотность вероятности малых пульсаций скорости.

Распределение вероятностей пульсаций температуры и для воды и для ртути в области непосредственно вблизи стенки имеет ту же закономерность, что и для пульсаций скорости ($E_i > 3$). По мере удаления от стенки коэффициент эксцесса E_i



Фиг. 1. Распределение вероятностей амплитуд пульсаций температуры при течении жидкости в круглой трубе: а — ртуть, $R = 125\,000$, $r/r_0 = 0$; б — вода, $R = 16\,000$, $r/r_0 = 0.99$ (пунктир — плотность вероятности нормального распределения).

уменьшается и становится меньше трех. Распределение становится менее «острым», чем для случая нормального распределения, т. е. уменьшается плотность вероятности малых пульсаций температуры. По-видимому, вдали от стенки, вне зоны максимальной интенсивности образования вихрей, малые скоростные возмущения, хотя



Фиг. 2. Зависимость коэффициентов асимметрии и эксцесса от числа Рейнольдса и геометрии канала в потоке воды и ртути; *a* — коэффициент асимметрии, *b* — коэффициент эксцесса; круглая труба: *I* — $R = 10^4$, *2* — $R = 1.6 \cdot 10^4$, *3* — $R = 2.8 \cdot 10^4$, *4* — $R = 7 \cdot 10^4$, *5* — $R = 1.25 \cdot 10^5$, *6* — $R = 2.16 \cdot 10^5$, *I* — вода, *II* — ртуть; квадратный канал: *7* — вода, *I* — $R = 4910$, *II* — $R = 10\,700$ (по линии $x/a = 0$)

вероятность их появления высока, почти не вызывают пульсаций температуры вследствие плоского профиля температур в этой области. Кроме того, для случая течения ртути, по-видимому, играет роль ее высокая теплопроводность, из-за которой малые вихри быстро теряют свою тепловую индивидуальность.

В центральной области потока воды ($R = 10\,700$) и в потоке ртути при высоких числах Рейнольдса ($R = 2.16 \cdot 10^5$) коэффициент эксцесса $E_t > 3$, что обусловлено

плоским характером температурного поля. В этом случае даже крупные температурные возмущения не будут вызывать больших по величине пульсаций температуры, в связи с чем возрастает плотность вероятности малых амплитуд.

В распределении E по сечению канала наблюдается минимум (фиг. 2, б), находящийся в области максимальных масштабов температурных и скоростных возмущений [4, 10].

Здесь имеет место более низкая по сравнению с нормальным распределением плотность вероятностей больших температурных пульсаций ($\sim 2 \div 3\sigma$). Вероятность появления больших положительных пульсаций температуры ограничивается тем, что вихри, возникающие вблизи стенки, не могут быть крупными. Крупные же вихри, движущиеся из ядра потока, не могут вызвать больших отрицательных пульсаций температуры вследствие малой разности средних температур в центральной части потока.

Кроме отмеченных выше общих закономерностей в распределении вероятностей пульсаций температур имеются некоторые особенности в случае течения в квадратном канале, обусловленные вторичными течениями и наличием заторможенных зон течения жидкости в углах. По-видимому, наиболее сильного отклонения от нормального закона в распределении вероятностей пульсаций температуры следует ожидать в пристеночных областях, где наиболее заметно проявление вторичных течений, и вблизи углов, где имеются зоны слаботурбулентного потока. В канале квадратного поперечного сечения вторичные течения образуют замкнутые потоки в каждом октанте канала. Такой направленный определенным образом поток, хотя и малой интенсивности (скорости вторичных течений, по данным [11], составляют 2—3% скорости на оси канала), влияет на характеристики распределения вероятностей пульсаций температур. Действительно, в углах квадратного канала, распределение вероятностей амплитуд пульсаций температуры сильно отклоняется от нормального закона. Особенно велико в углах значение коэффициента эксцесса ($E_2 = 6.38$ для воды при $R = 4910$ и $E_2 = 4.23$ для ртути при $R = 30 \cdot 10^3$), что указывает на преобладание в этой области вихрей малого размера. В углах канала также наблюдаются редкие, но большие по величине отрицательные пульсации температур. Эти пульсации, по-видимому, вызваны переносом больших вихрей вторичным потоком из центра канала в угловые зоны. Величина коэффициентов асимметрии и эксцесса в углах канала уменьшается с ростом числа Рейнольдса, что связано с возрастанием турбулизации потока в углах канала.

Поступило 1 VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин В. И., Ибрагимов М. Х., Номофилов Е. В. Измерение турбулентных пульсаций температуры в потоке жидкости. Теплоэнергетика, 1962, № 3, стр. 64.
2. Субботин В. И., Ибрагимов М. Х., Номофилов Е. В. Статистическое исследование турбулентных пульсаций температуры в потоке жидкости. Теплофизика высоких температур, 1964, т. 2, № 1, стр. 71.
3. Бобков В. П., Грибанов Ю. И., Ибрагимов М. Х., Номофилов Е. В., Субботин В. И. Измерение интенсивности пульсаций температур при турбулентном течении ртути в трубе. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, № 5, стр. 708.
4. Бобков В. П., Ибрагимов М. Х., Номофилов Е. В., Субботин В. И. Исследование пространственных коэффициентов корреляции и поперечных масштабов температурных возмущений при турбулентном течении ртути в круглой трубе. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 3, стр. 380.
5. Бобков В. П., Ибрагимов М. Х., Субботин В. И. Статистические характеристики турбулентных пульсаций температур в потоке жидкостей. Сб. «Жидкие металлы», М., Атомиздат, 1967, стр. 53.
6. Ибрагимов М. Х., Работяшкин Ю. М., Сабелев Г. И., Сидоров В. И., Субботин В. И. Перенос тепла при турбулентном течении жидкости в квадратном канале. Сб. «Жидкие металлы», М., Атомиздат, 1967, стр. 82.
7. Бобков В. П., Ибрагимов М. Х., Субботин В. И. Временные характеристики и спектр пульсаций температур при турбулентном течении жидкости в трубе. Теплофизика высоких температур, 1968, т. 6, № 1.
8. Романовский В. И. Применение математической статистики в опытном деле. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
9. Comte-Bellot G. Les etudes experimentales de fluctuations de pression, 2 these, Theses pour obtenir le grade de docteur es sciences, Grenoble, 1963.
10. Lauffer J. Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel. Nat. Advis. Com. Aeronaut, 1951, Rep. No. 1053.
11. Gessner F. B., Jones J. B. On some aspects of fully-developed turbulent flow in rectangular channels. J. Fluid Mech., 1965, vol. 23, pt. 4, pp. 689—713.