

Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ

МЕТОДИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ

Описана методика определения размеров турбулентных неоднородностей, их формы и скорости движения. Предполагается, что исследуемый случайный процесс является стационарным во времени. Поэтому, располагая записями пульсаций температуры или скорости в четырех пространственно-разнесенных точках, можно вычислить по ним пространственно-временные функции корреляции и определить геометрию и динамику турбулентных неоднородностей. Приведен пример определения размеров турбулентных неоднородностей по экспериментальным данным А. Фавра.

Турбулентный характер движения жидкости приводит к образованию скоростных, плотностных и температурных неоднородностей. В свою очередь, неоднородная структура оказывает существенное влияние на физические процессы, происходящие в потоке, в том числе на перенос тепла, вещества и импульса, а также на формирование вертикальных профилей течений. Поэтому исследование структуры турбулентных потоков представляет как научный, так и практический интерес.

Экспериментальное исследование микроструктуры турбулентности жидкости, как правило, ведется с помощью термометров сопротивления или термогидрометров. При этом регистрируются пульсации скорости u_i или температуры t' в одной или нескольких точках потока. В случае одноточечных измерений, в предположении «замороженной» турбулентности, интегральный масштаб турбулентности определяется формулой

$$L = v \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где L — интегральный масштаб турбулентности в направлении потока, v — средняя скорость потока, $R(\tau)$ — функция автокорреляции исследуемого процесса. Такой способ определения масштабов позволяет оценить осредненные размеры неоднородностей в направлении потока без учета их хаотической изменчивости.

Для исследования пространственной структуры турбулентности необходимо иметь синхронные регистрации u_i или t' одновременно в нескольких точках потока. В этом случае «совокупность» интегральных масштабов определяется как

$$L_{ij}^{(k)} = \int_0^{\infty} R_{ij}^{(k)}(r) dr, \quad (2)$$

где $R_{ij}^{(k)}$ — коэффициент пространственной корреляции, i, j — относятся к номерам проекций коррелируемых величин, k — к координатной оси, в направлении которой рассматриваются корреляции.

Экспериментальное определение пространственной структуры турбулентности согласно (2) предполагает либо большее число идентичных регистраторов u'_i или t' , либо устройства, позволяющего наблюдать за одним и тем же объемом жидкости в течение определенного промежутка времени. Однако такой способ определения масштабов довольно трудно использовать в природных условиях. Поэтому в работе [1] экспериментально исследована пространственная структура турбулентности в море по записям пульсаций температуры в четырех пространственно-разнесенных точках. В основу методики исследования был положен объемный корреляционный анализ, который в предположении стационарности и однородности исследуемого процесса позволяет определить размеры, скорость дрейфа и форму турбулентных неоднородностей. С помощью этого метода были получены данные о геометрии и динамике температурных неоднородностей в море. К сожалению, практическое использование объемного корреляционного анализа связано с большими трудностями в силу его громоздкости.

В данной работе дается более простой способ определения основных параметров неоднородностей в турбулентных потоках.

Если рассматриваемые случайные изменения скорости (или температуры) турбулентного потока являются стационарными во времени, то для исследования структуры турбулентности можно воспользоваться пространственно-временной функцией корреляции:

$$R_{ij}^{(k)}(x_1, x_2, x_3, \tau) = \frac{\overline{(u'_i)_A (u'_j)_B}}{\sqrt{\overline{u_i'^2}} \sqrt{\overline{u_j'^2}}}, \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3 — смещения датчиков относительно друг друга в продольном, поперечном и вертикальном направлениях соответственно, τ — временное смещение. Черта означает операцию статистического осреднения.

Продольные интегральные масштабы турбулентности в этом случае определим как

$$L_{ij}^{(1)} = v \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ij}(x_1, 0, 0, \tau) d\tau, \quad (4)$$

где v — скорость изменения пространственно-временной функции корреляции.

Для случая, когда пространственно-временная функция имеет вид, изображенный на рис. 1, выражение (4) может быть представлено следующим образом:

$$L_{ij}^{(1)} = v \int_0^{\tau_0} R_{ij}(x_1, 0, 0, \tau) d\tau, \quad (5)$$

или, используя теорему о среднем, получим

$$L_{ij}^{(1)} = v\tau_0 h, \quad (6)$$

где h — некоторая средняя величина R_{ij} .

Для экспериментального определения размеров турбулентных неоднородностей необходимо иметь синхронные записи пульсаций u'_i или t' в нескольких точках, разнесенных в пространстве. При этом желательно, чтобы датчики пульсаций были расположены по осям прямоугольной системы координат так, чтобы один датчик находился в начале координат, а остальные располагались на оси x (направленной

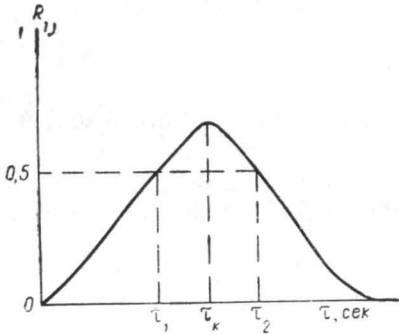


Рис. 1. Определение временного масштаба и смещения максимума функции взаимной корреляции, относительно $\tau=0$. τ_0 — временной масштаб, определяемый по нулевому уровню корреляции. $\tau_{0,5} = \tau_2 - \tau_1$ — временной масштаб, определяемый по уровню корреляции 0,5

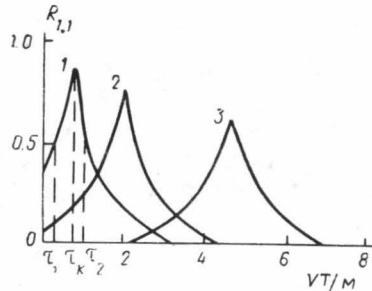


Рис. 2. Экспериментальные пространственно-временные функции корреляции для различных значений x_1/M [2]: 1 — $x_1/M=0,720$, 2 — $x_1/M=1,93$ и 3 — $x_1/M=4,56$

вдоль потока), оси y (поперек потока) и оси z (направленной вертикально вверх).

Далее, вычислив по этим записям пространственно-временные корреляции и построив их графики, можно определить по уровням равной корреляции размеры неоднородностей в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Для определения размеров в продольном направлении необходимо определить из R_{ij} временное смещение τ .

Отношение расстояния между соответствующей парой датчиков x_1 и временным смещением τ будет характеризовать скорость движения неоднородностей:

$$v = \frac{x_1}{\tau}. \quad (7)$$

Для записей, полученных в двух точках, расположенных вдоль потока, скорость изменения пространственно-временной функции корреляции будет совпадать со средней скоростью потока [2].

Зная скорости изменения пространственно-временных функций корреляции, определим размеры турбулентных неоднородностей по нулевому уровню корреляции:

$$l_0 = v\tau_0. \quad (8)$$

Сравнивая (6) и (8), видим, что они отличаются параметром, характеризующим влияние мелкой структуры неоднородностей на уровень корреляции. Если же R_{ij} имеет «осциллирующий» характер, то в вы-

ражение (6) необходимо включить член, учитывающий дополнительную площадь. В этом случае выражение (6) будет отличаться от (8) не только параметром h , но и этим дополнительным членом.

Учитывая тот факт, что малые значения пространственно-временной функции корреляции соответствуют малому подобию рассматриваемых процессов и что в этом случае растут относительные погрешности за счет статистических ошибок, связанных с ограниченностью времени наблюдения, по аналогии с [1] при экспериментальном определении размеров неоднородностей ограничимся областью $R_{ij} \geq 0,5$.

В этом случае размеры турбулентных неоднородностей будем определять по уровню корреляции 0,5, т. е.:

$$l = v\tau_{0,5}, \quad (9)$$

где $\tau_{0,5}$ — временной масштаб, определяемый из соответствующей R_{ij} по уровню 0,5.

Зная размеры турбулентных неоднородностей в трех взаимно перпендикулярных направлениях, можно определить анизотропию формы неоднородностей по отношению их размеров [1]:

$$e_1 = \frac{l_1}{l_2}, \quad e_2 = \frac{l_1}{l_3}, \quad e_3 = \frac{l_2}{l_3}.$$

Таким образом, имея экспериментальные записи пульсаций скорости или температуры синхронно в нескольких пространственно-разнесенных точках, с помощью изложенной методики можно определить скорость движения турбулентных неоднородностей, их размеры в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также анизотропию их формы.

В заключение рассмотрим пример определения некоторых параметров турбулентных неоднородностей описанным способом. С этой целью воспользуемся данными Фавра [2].

В этой работе пульсации составляющих скоростей в направлении основного потока регистрировались в двух точках, расстояние между которыми в процессе эксперимента изменялось. Средняя скорость потока составляла 12,25 м/сек. В начальном участке потока была установлена турбулизирующая решетка с размером ячеек М-24,5 мм. Измерительный прибор позволял вести регистрацию пульсаций скорости от 2,5 до 2000 гц. По полученным данным были построены пространственно-временные корреляции, некоторая часть которых приведена на рис. 2.

Рассмотрим график пространственно-временной функции корреляции $R_{11}(vT_m/M, x_1, 0, 0)$ при $vT_m/M = 0,720$. Согласно (7) определим скорость движения турбулентных неоднородностей вдоль потока $v = x_1/\tau = 12,25$ м/сек далее из графика найдем временной масштаб, соответствующий нулевому уровню корреляции $\tau_0 = 0,01$ сек. Размер неоднородностей в этом случае будет равен $l_0 = v\tau_0 = 12,25$ см.

Для определения размеров неоднородностей по уровню 0,5 найдем $\tau_{0,5} = 0,0015$ сек; тогда $l_{0,5} = v\tau_{0,5} = 1,84$ см.

Аналогично определим v , l_0 , $l_{0,5}$ для случая, когда $vT_m/M = 1,93$. В данном случае

$$v = \frac{x_1}{\tau} = \frac{4,9 \text{ см}}{0,004 \text{ сек}} = 12,25 \text{ см/сек},$$

$$l_0 = v\tau_0 = 12,08 \text{ см}, \quad l_{0,5} = v\tau_{0,5} = 1,47 \text{ см}.$$

И, наконец, для $vT_m/M = 4,56$ найдем

$$v = \frac{x}{\tau} = 12,25 \text{ см}, \quad l_0 = v\tau_0 = 11,45 \text{ см},$$

$$l_{0,5} = v\tau_{k0,5} = 1,04 \text{ см}.$$

Из приведенного примера видно, что скорость движения турбулентных неоднородностей совпадает со средней скоростью потока, а их размеры уменьшаются со временем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доброклонский С. В., Миркотан С. Ф., Хунджуа Г. Г., Шелковников Н. К. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 4, № 4, 1968.
2. Фавр А. Сб. «Механика», т. 2, № 90, 1965.

Поступила в редакцию
16.5 1972 г.

Кафедра
физики моря и вод суши