

Л. А. БУКИНА, П. В. МИРОНОВ, Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ

О СТРУКТУРЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ В ОТКРЫТОМ ПОТОКЕ

Прямым методом измерены значения коэффициента турбулентной вязкости в лотке над шероховатым дном. Показано, что коэффициент обмена имеет три максимума: при $\eta \approx 0,03$, при $\eta \approx 0,27$, при $\eta \approx 0,5$.

Описание турбулентных течений с помощью уравнений Рейнольдса

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{F}_i = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (1)$$

дает возможность установить закономерности движения жидкости в некоторых частных случаях, но не позволяет решить задачу в общем виде в силу незамкнутости (1). Здесь \bar{u}_i , \bar{u}_j , \bar{p} , \bar{F}_i — компоненты осредненных значений скорости потока, давления и объемной силы, ν — коэффициент молекулярной вязкости, u'_i , u'_j — компоненты пульсационной составляющей скорости потока.

Незамкнутость системы уравнений (1) обусловлена наличием в них членов $\overline{u'_i u'_j}$. Попытка замкнуть систему (1) путем осреднения нелинейных уравнений не дала желаемых результатов. Поэтому для решения (1) ищутся другие способы. Наиболее плодотворным из них является нахождение дополнительных связей между осредненными и пульсационными характеристиками потока с последующим выражением их друг через друга. Один из таких способов был предложен Бусинеском, согласно которому связь между компонентом тензора напряжения $\rho u'_1 u'_3$ и $\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial y}$ может быть выражена следующим образом:

$$-\rho \overline{u'_1 u'_3} = k \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial y}, \quad (2)$$

где \bar{u}_1 , \bar{u}_3 — продольный и вертикальный компоненты скорости, k — коэффициент пропорциональности, введенный по аналогии с молекулярной вязкостью, и называется он коэффициентом турбулентной вязкости или коэффициентом турбулентного обмена. Коэффициент турбулентной вязкости

$$k = \frac{\overline{\rho u_1' u_3'}}{du_1/dy}$$

в отличие от ν характеризует «динамические» свойства жидкости и не является физически постоянной. Значения коэффициента обмена могут изменяться как во времени, так и в пространстве, в зависимости от динамической структуры потока. Это в значительной степени усложняет установление связи между средними и пульсационными составляющими турбулентного потока и предполагает знание пространственно-временной структуры коэффициента турбулентной вязкости.

Однако фактические данные, полученные при исследовании структуры турбулентности в открытых потоках, носят незавершенный характер. Дело в том, что большая часть работ, обзор которых дан в [1], выполнена в пограничных слоях жидкости, и лишь незначительная часть — во всей глубине потока. Причем детальное исследование пограничного слоя зачастую не сопровождалось столь тщательными исследованиями остальной части потока и наоборот. Поэтому экспериментальные данные о вертикальном профиле коэффициента турбулентной вязкости в открытых потоках до настоящего времени противоречивы. По данным Минского [2], коэффициент обмена имел максимум на глубине $\eta = h/H = 0,303$ (H — глубина исследуемого потока, h — расстояние от дна). В [2] исследования проводились в лотке с гладким дном методом кино съемки в области $0,06 \leq \eta \leq 0,9$. Детальное исследование придонного слоя в лотке с шероховатым дном было проведено Никитиным [1]. Измерения проводились методом кино съемки при различных шероховатостях дна. По данным [1], K , $\sqrt{\overline{u'^2}}$, $\sqrt{\overline{w'^2}}$ имели максимальное значение в придонной области ($\eta = 0,06$). Положения максимумов K и $\sqrt{\overline{u'^2}}$ совпадали и при увеличении \bar{V} смещались в сторону уменьшения η . Положение максимума σ_w' во всех опытах наблюдалось на глубине $0^\circ, 2H$.

Итак, если в [1] обнаружен максимум коэффициента обмена в придонной области, то в [2] этого максимума не было обнаружено. С другой стороны, в [2] коэффициент обмена имел максимум при $\eta \cong 0,303$, а в [1] этого максимума не было. В [3] при определении коэффициента обмена прямым и градиентным методом, так же как и в [2], было обнаружено наличие максимума K на глубине $\eta \cong 0,3$. Исследования в этом случае проводились термогидрометром в лотке над шероховатым дном. Наличие максимума коэффициента обмена в придонной области как в [2], так и в [3] обнаружено не было, так как измерения проводились в области $\eta > 0,06$.

С другой стороны, логарифмическому распределению скорости во всем турбулентном ядре равномерного потока в открытом русле соответствует распределение коэффициента турбулентной вязкости по квадратичной параболе с максимумом на середине глубины потока [4]:

$$K = \kappa V_z z_0 \left(1 - \frac{h}{H}\right),$$

где κ — постоянная Кармана ($\kappa = 0,4$), $V_z = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ — динамическая скорость. Наличие максимума коэффициента обмена в средней части потока было получено экспериментально [5].

Результаты экспериментальных работ указывают на сложный характер вертикального профиля коэффициента турбулентной вязкости и на необходимость его дальнейшего исследования.

В данной работе определен вертикальный профиль коэффициента турбулентной вязкости в открытом потоке в области глубин $0,02 \leq \eta \leq 0,82$. Исследования проводились в лотке размером $200 \times 400 \times 7000$ мм при гладком и шероховатом дне. Шероховатость создавалась гравием со средним диаметром 6—8 мм. Измерения продольного компонента скорости и вариаций угла атаки датчика α' осуществлялись термогидрометром [3]. Средняя скорость потока составляла ~ 22 см/с.

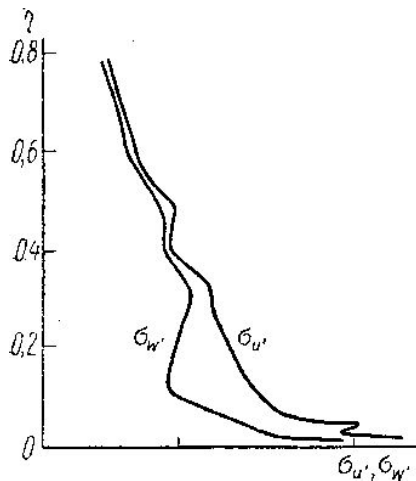


Рис. 1. Вертикальный профиль $\sigma_{u'}$, $\sigma_{w'}$

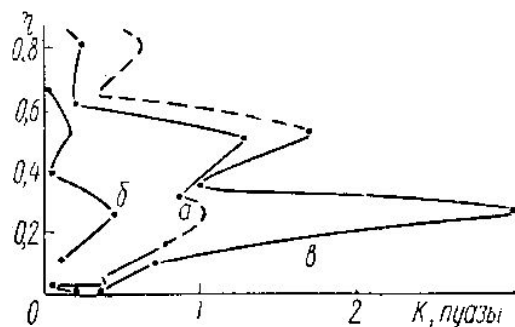


Рис. 2. Изменение коэффициента турбулентной вязкости с глубиной

В качестве чувствительного элемента использовались платиновые нити диаметром $d=20$ мк и длиной $l=5$ мм. Тарировка термогидрометра осуществлялась «пульсационным» методом, описанным в [5], при этом чувствительность к изменениям продольного компонента скорости составляла 0,4 см/с, а к вариациям угла атаки датчика — 0,55 град/мм, или 0,0099 рад/мм. Постоянная времени всего измерительного комплекса не превышала 0,02 с.

Измерения пульсационных составляющих скорости проводились на расстоянии $>20H$ от входного устройства, последовательно на разных глубинах. При этом считалось, что осредненные характеристики потока за время эксперимента не изменялись.

По данным измерений U' и W' были вычислены среднеквадратичные значения этих величин $\sigma_{u'} = \sqrt{u'^2}$ и $\sigma_{w'} = \sqrt{w'^2}$ и построены графики распределения их по глубине (рис. 1). Из рис. 1 видно, что $\sigma_{u'}$ имеет максимум на глубине $\eta \cong 0,028$, $\eta \cong 0,3$, и $\eta \cong 0,5$. Вертикальный профиль $\sigma_{w'}$ был близок к $\sigma_{u'} = f(\eta)$ в области $0,3 \leq \eta \leq 0,82$, т. е. турбулентность была близкой к изотропной. При $\eta < 0,3$ анизотропия возрастала и достигала максимума при $\eta = 0,1$. С увеличением η значения $\sigma_{u'}$ и $\sigma_{w'}$ несколько сближались. Однако максимального значения $\sigma_{w'}$ в придонной области не наблюдалось.

Наличие максимальных значений у $\sigma_{u'} = f(\eta)$ и $\sigma_{w'} = f(\eta)$ может привести к экстремальным значениям и у коэффициента обмена. Действительно, если выразить значение коэффициента турбулентного обмена через дисперсии, т. е. $K \frac{\tau}{du/dy} = \frac{\rho R \sigma_{u'} \sigma_{w'}}{du/dy}$, то при отсутствии экстремума

у du/dy и у коэффициента корреляции R максимальные значения будут совпадать с максимумами $\sigma_{u'}$ и $\sigma_{w'}$. При этом совпадение этих максимумов по глубине должно привести к увеличению максимального значения коэффициента обмена в этой области. При несовпадении максимумов $\sigma_{u'}$ и $\sigma_{w'}$ значение коэффициента K может иметь два максимума: $\eta = (\sigma_{u'})_{\text{макс}}$ и $\eta = (\sigma_{w'})_{\text{макс}}$. Совпадение максимального значения коэффициента обмена по глубине с максимумом $\sigma_{u'}$ обнаружено в опытах Никитина [1], о наличии второго максимума K , связанного с максимумом $\sigma_{w'}$, в [1] не сказано.

В настоящей работе исследуется вертикальный профиль коэффициента турбулентной вязкости. Измерения u' , w' и du/dy были проведены на десяти уровнях в пределах $0,02 \leq \eta \leq 0,82$. График изменения коэффициента обмена с глубиной представлен на рис. 2, а. На кривой $k=f(h)$ обращает на себя внимание минимум $k=0,07$ П на глубине $\eta=0,024$. При увеличении η значение коэффициента обмена возрастает и имеет незначительный максимум при $\eta \cong 0,03$. При этом же значении η наблюдается максимум $\sigma_{u'}$. В области значений $0,05 \leq \eta \leq 0,5$ k в среднем возрастает и достигает второго максимума $k_{\text{макс}}=1,29$ П. Этот максимум коэффициент обмена имел на глубине $\eta \cong 0,5$. При дальнейшем увеличении η значение k сначала резко падает до $k=0,2$ П при $\eta=0,62$, затем постепенно возрастает и на уровне $\eta=0,82$ составляет $k=0,27$ П. По предварительным данным кривая имела максимум (пунктир рис. 2, а). Как видно из рис. 2, а, в области $\eta=0,3$ максимума коэффициента обмена не оказалось. Участок кривой $k=f(\eta)$ в области $0,15 \leq \eta \leq 0,31$ лежит между двумя областями с разным изменением коэффициента обмена с глубиной. На рис. 2, а этот участок аппроксимирован пунктирной кривой предполагаемого изменения $k=f(\eta)$. Такая аппроксимация вызвана тем, что в области $0,15 \leq \eta \leq 0,31$ изменения k не производились в предположении, что максимум k находится в области $\eta \cong 0,3$.

Для выяснения положения максимума k в области $\eta \cong 0,3$ была использована другая серия измерений. Согласно этим данным (рис. 2, б) максимум коэффициента обмена наблюдался на глубине $\eta=0,27$, т. е. был смещен в сторону меньших глубин по сравнению с данными [2, 6]. Измерения в этом случае проводились также над шероховатым дном в области $0,1 \leq \eta \leq 0,67$. Из рис. 2, б $k=f(\eta)$ видно, что коэффициент обмена в этой области глубин имеет два максимума, первый — на глубине $\eta=0,31$ и второй в области $\eta=0,52$. На рис. 2, в приведен профиль $k=f(\eta)$ для области $0,02 \leq \eta \leq 0,5$, взятый из другой серии измерений. Как видно из этого рисунка, коэффициент обмена в области $0,02 \leq \eta \leq 0,27$ возрастает и достигает максимума при $\eta=0,27$. При дальнейшем увеличении η коэффициент обмена сначала уменьшается, а затем возрастает и достигает второго максимума на глубине $\eta=0,51$. В отличие от профиля $k=f(\eta)$, представленного на рис. 2, а, в этом случае максимум коэффициента обмена в придонной области не был обнаружен из-за недостаточности данных наблюдений.

Следует отметить, что кривые рис. 2 получены в одних и тех же условиях, но при разных значениях средней скорости потока. Вероятно, поэтому они отличаются по величине, хотя удовлетворительно совпадают по форме (кривые 2, б, в).

Таким образом, из данных прямых измерений вертикального профиля коэффициента обмена можно представить его обобщенный профиль, наиболее важным в котором является наличие трех максимумов: $\eta \cong 0,3$; $\eta \cong 0,5$; $\eta \cong 0,82$. Причем наблюдалось некоторое смещение максимумов на глубинах $\eta \cong 0,3$ и $\eta \cong 0,5$. По-видимому, это связано с изменением значений чисел Рейнольдса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин И. К. Турбулентный русловой поток. М., 1959.
2. Минский Е. М. Основные характеристики турбулентного потока в длинных руслах. Тр. ЦАГИ, № 625, 1947.
3. Букина Л. А., Доброклонский С. В., Миронов П. В., Шелковников Н. К. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 16, № 2, 169, 1975.
4. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. М., 1969.
5. Шелковников Н. К., Букина Л. А., Миронов П. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 15, № 5, 1974.
6. Шелковников Н. К., Букина Л. А., Миронов П. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 15, 1974.

Поступила в редакцию
22.5 1974 г.

Кафедра
физики моря и вод суши