

УДК 551.465

Н. К. Шелковников
Л. А. Букина
П. В. Миронов
С. М. Новочинский

К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА
ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ
В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ
СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Для решения уравнений Рейнольдса в рамках полуэмпирической теории необходимо знать закономерность вертикального распределения турбулентного трения $\tau = -\overline{\rho u'w'}$ или коэффициента турбулентной вязкости $K = \tau / \frac{du}{dz}$ в исследуемом потоке жидкости.

В случае плоскопараллельного течения вблизи стенки (вне вязкостного интервала) предположение о пропорциональности $K(z)$ расстоянию от границы приводит к неплохим результатам и из него вытекает логарифмическое распределение скорости [1]

$$u(z) = \frac{u_{*c}}{\kappa} \ln \frac{z_0 + z}{z_0}$$

Здесь ρ — плотность среды, $u'w'$ — пульсации продольного и вертикального компонентов скорости, u — скорость движения воды, ось z направлена по вертикали поперек движения потока, $u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ — динамическая скорость, z_0 — динамическая шероховатость, κ — постоянная Кармана.

Однако такое представление о распределении $K(z)$ справедливо до относительных высот над стенкой $\eta = \frac{z}{H} \ll 0,2$. По данным, приведенным в [2], $K(z)$ линейно возрастает с увеличением расстояния от границы до $\eta \cong 0,2$, а затем характер распределения изменяется и при $\eta = 0,3$ $K(z)$ достигает максимального значения. Для течения в трубах характерно наличие двух максимумов коэффициента турбулентной вязкости на расстоянии $0,5 R$ от оси [1, 3].

Для течения в прямоугольных каналах со свободной верхней границей характерным является наличие максимума $K(z)$ на относительной высоте над дном $\eta = 0,3$ [4, 5]. При увеличении расстояния от дна $K(z)$ монотонно убывает и на поверхности, по данным [4, 6], коэффициент обмена равен нулю.

Следует отметить, что при определении $K(z)$ обычно предполагается, что имеет место логарифмическое распределение скорости течения во всей толще потока, т. е. максимальное значение скорости находится на свободной поверхности жидкости. Однако тщательные измерения, проведенные [7] в канале со свободной верхней границей, показали, что в приповерхностном слое величина средней скорости не укладывается в основной логарифмический профиль. На относительной высоте $\eta \geq 0,9$ происходит смена знака у градиента скорости, т. е. в на-

правлении границы раздела вода — воздух скорость течения уменьшается (см. рис. 2 и [7]).

Одной из возможных причин уменьшения скорости течения в приповерхностном слое является динамическое воздействие водной поверхности на прилегающий слой воздуха. В результате такого взаимодействия движущийся поток жидкости увлекает пограничные слои воздуха, отдавая при этом часть энергии, что приводит к уменьшению скорости течения и, следовательно, к смене знака у градиента скорости в приповерхностном слое. В таком случае либо турбулентное трение должно также изменять знак, либо коэффициент турбулентной вязкости в приповерхностном слое должен быть отрицательным, т. е. должно наблюдаться явление отрицательной вязкости. К такому выводу пришел Никитин, сопоставляя отрицательные значения τ в области $\eta \geq 0,91$ с положительными значениями du/dz [8].

Для выяснения этого вопроса и получения детальных профилей τ и K были проведены измерения средней скорости потока и синхронные записи продольного и вертикального компонента скорости в слое текущей жидкости. Измерения проводились в осевой части канала. Глубина потока H составляла 20 см. По данным эксперимента и указанным выше формулам были вычислены вертикальные распределения τ и K .

На рис. 1, а приведен график вертикального профиля турбулентного трения в области $0,1 \leq \eta \leq 0,98$. Как видно из этого графика, τ имеет максимум при $\eta \approx 0,8$. В самом приповерхностном слое в области $\eta \geq 0,92$ турбулентное трение имеет отрицательное значение, хотя абсолютная величина τ здесь мала и лежит в пределах ошибки измерения.

Результаты расчета коэффициента турбулентной вязкости представлены на рис. 1, б, из которого видно, что K в области $0,1 \leq \eta \leq 0,98$ имеет положительное значение и характеризуется наличием двух максимумов в придонной и приповерхностной областях потока.

На рис. 2 приведена эпюра скорости, которая показывает, что в области относительных высот над дном $\eta \approx 0,92$ происходит смена знака градиента скорости течения. Следует отметить, что смена знака и у du/dz и у τ происходит в области одних и тех же η , и отсюда вытекает, что коэффициент турбулентной вязкости во всей области потока положительен.

Характер распределения $u(z)$, $\tau(z)$, $K(z)$ свидетельствует о взаимодействии движущейся жидкости с прилегающими слоями воздуха и позволяет условно считать, что верхняя граница потока является квазижесткой. Это, в свою очередь, дает возможность несколько шире представить кинематическую структуру потока. Согласно [10] все русло турбулентного потока заполнено иерархией вращающихся вихрей, наибольшие из которых соизмеримы с потоком в целом. Такая схема отражает реальные процессы, происходящие в турбулентном потоке при наличии одной твердой границы. Однако в тех случаях, когда силами трения на верхней границе раздела пренебречь уже нельзя (т. е. когда имеет место уменьшение скорости течения в приповерхностном слое), необходимо внести некоторые изменения в схему кинематической структуры потока. Действительно, в области, где градиент средней скорости меняет знак, должно наблюдаться уменьшение угловой скорости, тогда как по предложенной схеме [9] она возрастает (считается, что максимальная скорость потока находится на поверхности).

Но экспериментальные данные (см. рис. 2 и [7]) свидетельствуют о смене знака у градиента скорости в области $\eta \geq 0,9$. А согласно [10], когда «турбулентный вихрь с положительным касательным напряже-

нием вторгается в зону отрицательного градиента скорости, порождение энергии турбулентности становится отрицательным и вихрь быстро затухает». Поэтому, исходя из изложенного, предлагается дополнить существующую схему кинематики потока (для случая, когда трением на верхней границе пренебречь нельзя) наличием цепочки вращающихся вихрей и в приповерхностном слое.

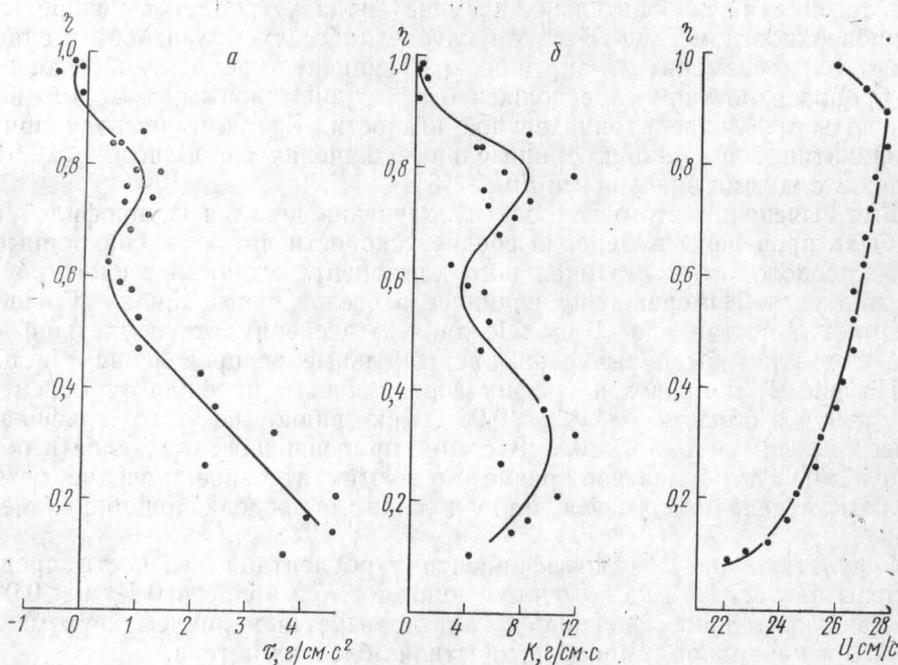


Рис. 1. Вертикальное распределение турбулентного трения $\tau(z)$ (а) и вертикальное распределение коэффициента турбулентной вязкости $K(z)$ (б)

Рис. 2. Вертикальный профиль скоростей течения в открытом прямоугольном канале

Размеры областей, охваченных вихрями в придонной и в приповерхностной частях потока, равно как и положение максимумов в распределении τ и K , свидетельствуют о разных свойствах границ потока и их силовом воздействии на движущуюся жидкость. Увеличение трения на верхней (свободной) границе, вероятно, приведет к распространению приповерхностного профиля скорости течения с отрицательным значением du/dz на большие области потока и к смещению максимумов τ и K в область меньших значений η . То есть в этом случае движение жидкости можно рассматривать как некий аналог движения между двумя параллельными стенками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. 1. М., 1965.
2. Хинце И. О. Турбулентность. М., 1963.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974.
4. Минский Е. М. Основные характеристики турбулентного потока в длинных руслах. В трудах ЦАГИ, № 625, 1947.

5. Букина Л. А., Миронов П. В., Шелковников Н. К. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1975, 16, № 5.
6. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.
7. Букина Л. А., Шелковников Н. К. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1975, 16, № 6.
8. Никитин И. К. Гидротехника и гидромеханика. Киев, 1964.
9. Гринвальд Д. И. Турбулентность русловых потоков. Л., 1974.
10. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М., 1974.

Поступила в редакцию
19.5 1976 г.
Кафедра
физики моря и вод суши