

## ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА НАД ПЕСЧАНЫМ ДНОМ

Ефремов О.И., Иванов В.А., Дыкман В.З.

Морской гидрофизический институт Национальной Академии наук Украины

E-mail: efremov\_39@mail.ru; zaharovich\_41@mail.ru; vaivanov@alpha.mhi.iuf.net

Пульсирующие горизонтальные волновые движения на мелководье генерируют придонную турбулентность, которая фактически формирует поле взвеси на расстоянии первых сантиметров от дна и является, таким образом, важнейшим компонентом кинетических моделей движения наносов.

Моделирование придонной турбулентности при колебательном характере скорости обтекания в значительной степени основывается на результатах специальных лабораторных экспериментов. В этой связи важной является работа [1], в которой представлен большой объем данных о структуре лабораторной модели пульсирующего турбулентного пограничного слоя. Флуктуации продольной и вертикальной компонент скорости течения измерялись с помощью лазерного анемометра в водном лотке, раскачиваемом с периодом 4,5с. В конструировании теоретической модели здесь используются результаты шести серий измерений для песчаного покрытия дна лотка со средним диаметром частиц  $D = 1,63\text{мм}$ .

В итоговой таблице работы [1] представлены основные параметры каждой из серий: средний диаметр элементов шероховатости  $D$ , амплитуда скорости колебаний воды  $U_0$ , молекулярная вязкость воды  $\nu$ , амплитуда скорости трения  $u_*$ ,  $u_* = (-\overline{u'v'})^{1/2}$ , отношение  $u_*/\overline{u_*}$ , толщина пограничного слоя  $\delta$ .

Общий результат измерений заключается в том, что интенсивность турбулентности обнаруживает значительные вариации с удвоенной частотой в течение цикла, причем амплитуда вариаций уменьшается с высотой, а сдвиг фазы линейно растет. Распределение по высоте средней интенсивности турбулентных флуктуаций скорости качественно совпадает с тем, которое наблюдается при устойчивых потоках. Этот факт может служить основанием для построения осредненной модели пульсирующего придонного пограничного слоя, где фазовые сдвиги не учитываются, а все соотношения выводятся для амплитуд и средних значений рассматриваемых величин.

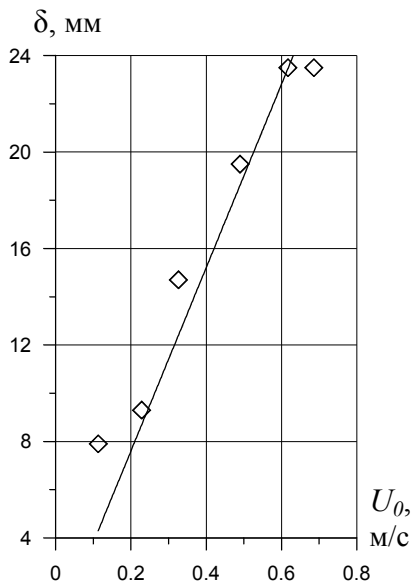


Рис.1. Зависимость толщины пограничного слоя  $\delta$  от амплитуды скорости колебаний воды  $U_0$

На рисунке 1 представлена построенная на основе табличных данных работы [1] зависимость толщины пограничного слоя  $\delta$  от амплитуды скорости колебаний воды  $U_0$ . Линейная аппроксимация дает соотношение

$$\delta = \theta U_0, \quad (1)$$

где  $\theta = 38 \cdot 10^{-3}$  с, если  $\delta$  выражено в метрах. Таким же образом получается другое используемое ниже эмпирическое соотношение

$$U_0 = 30 \cdot u_* \quad (2)$$

Важнейшей характеристикой турбулентного

пограничного слоя является профиль продольной скорости в той его части, которая называется логарифмическим пограничным слоем. Распределение средней скорости обычно записывается в виде [2]:

$$U(z) = Au_* \ln(z/z_0) + Bu_* \quad (3)$$

$z$  - вертикальная координата,  $z_0$  - масштаб логарифмического распределения,  $A$  и  $B$  - числовые коэффициенты, не зависящие от  $z$ . Часто профиль средней скорости оказывается логарифмическим при использовании *вытесненной* ординаты, со смещением нуля на высоту  $z_b$  [3]. В нашем случае  $z_b = D$ . Удобно, поскольку в разрабатываемой модели пограничного слоя дно считается шероховатым, обозначить в качестве  $z$  именно смещенную ординату, полагая обычную высоту равной  $y = z + D$ .

На базе введенной в (1) эмпирической константы  $\theta$  можно сформировать вихревой масштаб  $z_2$ ,  $z_2 = \theta u_*$ . Выбирая масштаб  $z_0 = z_2$ , выражение (3) можно переписать для амплитуд  $U_0$ , и в соответствии с эмпирическими данными [1],  $B = B_2 = 21,107$ ,  $A = A_2 = 1/\kappa_1 = 2,172$ ,  $\kappa_1 = 0,46$ :

$$U_0(z) = A_2 u_* \ln(z/z_2) + B_2 u_* \quad (4)$$

Распределение амплитуд (4) в наибольшей степени отвечает идеям кинематического подобия и принимается здесь в качестве модели для логарифмической части придонного пульсирующего пограничного слоя. В соотношении (4)  $z \geq z_2$ .

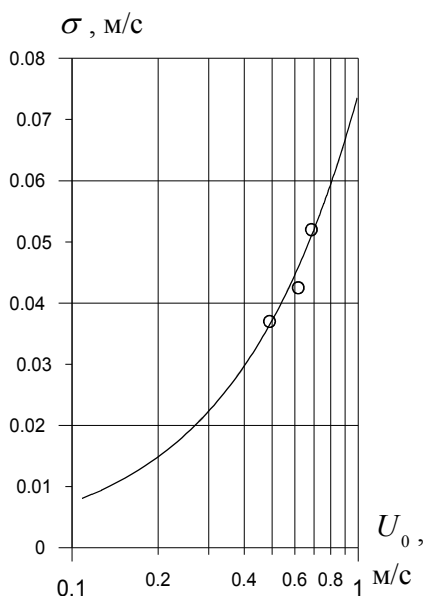
Профиль при  $z \leq z_2$  выбирается параболическим, из условия гладкого сопряжения с логарифмической частью. В модели полагается, что пристеночная турбулентность генерируется в тонком слое, прилегающем к уровню  $z = 0$  ( $y = D$ ), и затем диффундирует вверх, формируя пульсирующий придонный пограничный слой толщины  $\delta$  с экспоненциальным распределением средней турбулентной энергии  $E_T$ :

$$E_T(z) = (3/2) \rho \sigma^2 e^{-z/\delta} \quad (5)$$

Здесь  $\rho$  - плотность воды,  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение любой из компонент пульсаций скорости на уровне  $z = 0$ . По модельному предположению, уровень этой энергии поддерживается за счет потерь импульса в слое  $0 \leq z \leq z_2$ , из этих соображений можно найти:

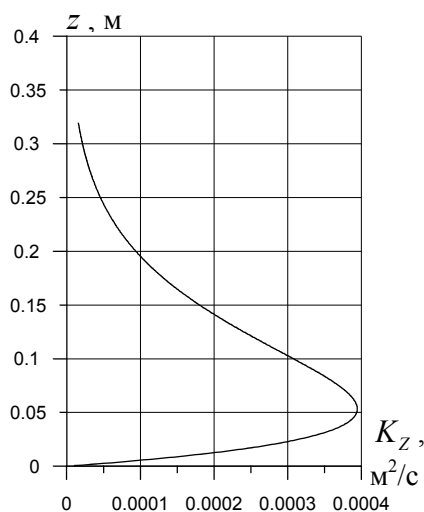
$$\sigma^2 = \frac{z_2 B_2^2 u_*^2}{3\delta} \quad (6)$$

Полученная таким образом зависимость  $\sigma(U_0)$  представлена на рисунке 2. Точки на этом рисунке соответствуют данным работы [1], где приводятся результаты измерений средней интенсивности турбулентных пульсаций горизонтальной компоненты скорости для трех амплитуд скорости обтекания  $U_0$  - 0,686 м/с; 0,617 м/с; 0,490 м/с. В соответствии с полуэмпирическими представлениями, вертикальный турбулентный коэффициент обмена должен быть равен произведению типичной скорости на типичный масштаб длины. В силу принятой в модели



**Рис. 2** Зависимость интенсивности придонной турбулентности от амплитуды скорости  $U_0$ , точки соответствуют экспериментальным данным работы [1]

равноправности компонент роль характерной вертикальной пульсационной скорости отводится  $\sigma(z)$ , а вертикальный масштаб турбулентности в пограничном слое обычно



**Рис. 3. Профиль  $K_z(z)$  для амплитуды скорости  $U_0 = 0,7$  м/с**

представляется в виде  $l(z) = \kappa_1 z$ , или, с учетом шероховатости,  $l(z) = \kappa_1 z + D$ . В итоге коэффициент вертикальной турбулентной диффузии принимается равным

$$K_z(z) = \sigma(z)l(z) = \sigma(0)e^{-z/(2\delta)}(\kappa_1 z + D). \quad (7)$$

Профиль  $K_z(z)$  для амплитуды скорости  $U_0 = 0,7$  м/с представлен на рисунке 3.

Для кинетического описания процессов взвешивания твердых частиц в турбулентном потоке важным параметром является левая граница  $\omega_0$  в спектре флуктуаций скорости. В соответствии с гипотезой «замороженности» средняя за цикл колебаний скорости обтекания граница  $\omega_0(z)$  может быть определена как частное от деления среднего модуля скорости  $\overline{U(z)}$  на характерный горизонтальный масштаб турбулентных флуктуаций скорости в пограничном слое  $l_\Gamma(z)$ ,

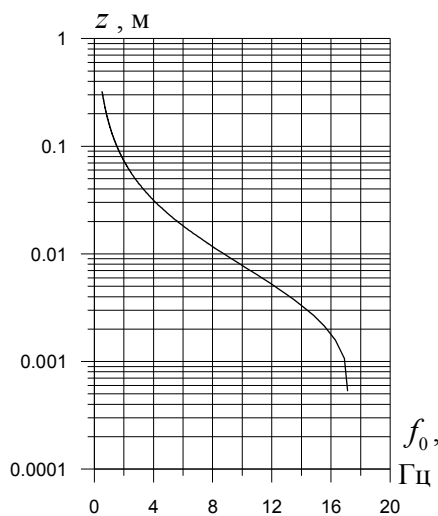
который превышает вертикальный масштаб  $l(z)$  на величину вихревого масштаба

$z_2 = u_* \theta$  (здесь учитывается фиксируемая при измерениях небольшая анизотропия турбулентных флуктуаций у самого дна). Учитывая, что

$\overline{U(z)} = 2U(z)/\pi$ , получим для  $\omega_0(z)$  выражение:

$$\omega_0(z) = \frac{2(A_2 \ln(z/z_2) + B_2)u_*}{\pi(\kappa_1 z + D + z_2)} \quad (8)$$

На рисунке 4 представлено распределение  $f_0(z) = \omega_0(z)/(2\pi)$  для амплитуды  $U_0 = 0,7$  м/с.



**Рис. 4. Распределение  $f_0(z)$  для амплитуды скорости  $U_0 = 0,7$  м/с**

Разработанная полуэмпирическая модель пульсирующего пограничного слоя предназначена для использования в качестве одной из составляющих метода расчета вертикального распределения массовой концентрации взвесей в прибрежной области моря.

#### Литература

1. Sleat J.F.A. Turbulent oscillatory flow over rough beds // J. Fl. Mech. 1987. – vol. 182. – P. 369 - 409.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
3. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Часть 1. – М.: Наука, 1965. – 640 с.