

## КИНЕТИКА ДВИЖЕНИЯ ВЗВЕСЕЙ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ

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

Морской гидрофизический институт Национальной Академии наук Украины

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

Выполненные в МГИ НАНУ разработки последних лет позволяют вплотную приступить к численному моделированию различных характеристик поля взвеси на основе кинетических представлений. Комбинированная методика расчета характеристик взвеси в прибрежной области моря объединяет разработанные вероятностные функции распределения взвешенных частиц, кинетическую модель интенсивности ветрового волнения, спектральную модель подповерхностной турбулентности, генерируемой волнами, и полуэмпирическую модель пульсирующего придонного турбулентного пограничного слоя [1].

Частицы взвеси при осаждении в турбулентных потоках благодаря собственной инерции приобретают неосциллирующую среднюю составляющую ускорения  $\alpha_p$ , направленную против силы тяжести. В подповерхностном слое такого рода пульсационное торможение частиц взвеси составляет малую долю редуцированного ускорения силы тяжести  $g_p$ , а непосредственно у самого дна может возрасти более чем на порядок, благодаря высокой частоте турбулентных флуктуаций скорости в этой области. При разумных упрощениях описания процессов осаждения и подъема терригенных частиц в турбулентном потоке удастся получить равновесную вероятностную функцию  $\varphi(W)$  распределения взвешенных твердых частиц по гидравлической крупности  $W$  (скорость осаждения в неподвижной воде) [2].

Разработанные функции распределения частиц взвеси для прибрежной области моря зависят от двух параметров: дисперсия турбулентных флуктуаций скорости определяет расположение участка резкого спада функции распределения в диапазоне больших диаметров, а показатель степени  $2q = \gamma = \alpha_p / g_p$  определяет наклон степенного участка

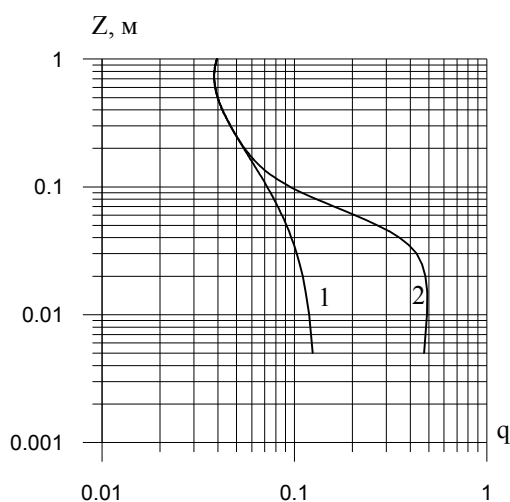


Рис. 1 Изменение с глубиной параметра  $q$  распределения  $\varphi(W)$ : 1 -  $q_3(z)$ , 2 - суммарный  $q(z)$

функции в области малых гидравлических и геометрических размеров.

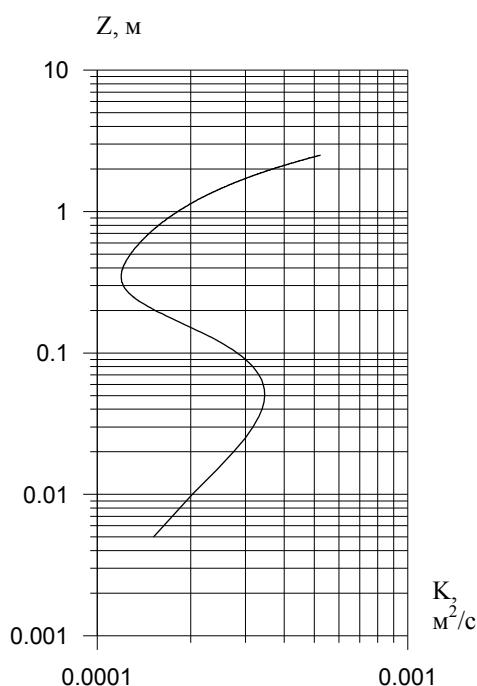
Существует достаточно протяженная придонная область, где взвесь одновременно взбалтывается под действием обоих видов турбулентности – придонной и подповерхностной. На рисунке 1 представлены рассчитанные для условий евпаторийских испытаний «Донной станции» (подробное описание этой аппаратуры можно найти в [1]) суммарный параметр  $q(z) = \gamma(z)/2$  (кривая 2) и отдельно обусловленная только воздействием подповерхностной турбулентности составляющая  $q_3(z) = \gamma_3(z)/2$  (кривая 1). Видно, что добавка за счет придонной турбулентности существенна только на расстояниях меньше 20 сантиметров от дна, но ниже пяти сантиметров она становится доминирующей, а суммарный показатель  $q(z)$

может достигать величины 0,5.

Вертикальное распределение концентрации взвесей  $C(z)$  описывается осредненным уравнением диффузионной модели [3]:

$$C(z)W_{\Sigma}(z) + K_{\Sigma}(z)\partial C(z)/\partial z = 0. \quad (1)$$

В (1)  $K_{\Sigma}(z)$  - вертикальная составляющая коэффициента турбулентной диффузии,  $W_{\Sigma}(z)$  - средняя скорость осаждения частиц взвеси в турбулентном потоке. Эти параметры могут быть рассчитаны на основе кинетических представлений.



**Рис. 2 Типичный профиль коэффициента турбулентной диффузии  $K_{\Sigma}(z)$**

Средняя скорость  $W_{\Sigma}(z)$  определяется как первый момент вероятностного распределения частиц по гидравлической крупности, а коэффициент турбулентной диффузии  $K_{\Sigma}(z)$  формируется суммарным воздействием более высокочастотной придонной турбулентности и турбулентных флуктуаций, генерируемыми волнами в подповерхностном слое.

Типичный суммарный профиль коэффициента  $K_{\Sigma}(z)$  изображен на рисунке 2. Можно отметить характерный минимум на высоте порядка 0,3 м над дном. Этот минимум отражает определенное «распределение обязанностей» между придонной и подповерхностной турбулентностью на мелководье. Придонная турбулентность производит первоначальное взмучивание осадков и действует на малом расстоянии от дна. Дальнейший транспорт взвеси в верхние слои осуществляется подповерхностной турбулентностью, которая в случае развитого ветрового волнения обладает намного большей энергией на единицу площади, чем придонная турбулентность.

Уравнение (1) имеет решение

$$C_1(z) = C_1(0) \exp \left[ - \int_0^z \frac{W_{\Sigma}(z)}{K_{\Sigma}(z)} dz \right]. \quad (2)$$

Численные расчеты во многих случаях дают профили  $C_1(z)$ , резко спадающие у дна и в дальнейшем при увеличении  $z$  сохраняющие практически постоянный уровень концентрации до самой поверхности, что не соответствует реальным наблюдениям. Причина может заключаться в том, что однородное уравнение (1) не учитывает разницу в потенциальной энергии тяжелых частиц взвеси, находящихся на различных горизонтах над дном, а также эффекты, возникающие при больших концентрациях.

Учет корреляции между пульсациями концентрации и скорости осаждения приводит к неоднородному уравнению:

$$\overline{C(z)} \cdot \overline{W(z)} + K_{\Sigma}(z) \partial \overline{C(z)} / \partial z = - \overline{C'(z)W'(z)}. \quad (3)$$

Схема численного решения неоднородного уравнения (3) может быть построена на основе решения однородного уравнения (1) с привлечением дополнительных предположений. Поскольку потенциальная энергия частиц линейно возрастает с увеличением  $z$ , частное решение неоднородного уравнения выбирается в компенсированном виде:

$$C_2(z) = \frac{C_2(0)D}{z+D} C_1(z) / C_1(0). \quad (4)$$

Здесь  $D$  - средний диаметр частиц песка на дне.

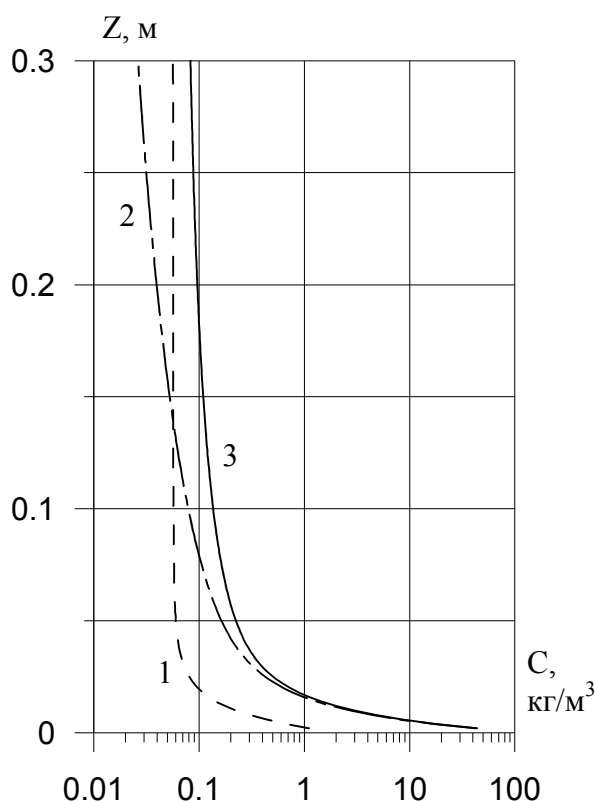


Рис. 3. Профили концентрации взвеси:

1 -  $C_1(z)$ , 2 -  $C_2(z)$ , 3 -  $C(z)$

Здесь представлена нижняя часть профилей при общей глубине три метра. Можно отметить, что суммарная концентрация вблизи дна следует  $C_2(z)$ , а при увеличении  $z$  стремится к  $C_1(z)$ .

Если имеются только волны зыби, подповерхностная турбулентность слаба, и взвесь остается в придонном слое. Энергии придонной турбулентности хватает, чтобы удерживать в активном состоянии у самого дна значительный объем песчаного материала, который при наличии вдольберегового течения обеспечивает большой поток влекомых наносов.

#### Литература

1. Современные методы и средства контроля морской среды. Под ред. В.А. Иванова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – 112 с.
2. Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И. Функция распределения частиц взвеси в прибрежной области моря // Доп. НАН України. –2005. –№1. –С. 111-117.
3. Dynamical processes in coastal regions. - Publishing house of the Bulgarian Academy of sciences, Sofia, 1990. – 190 p.

Концентрация  $C(z)$  представляется в виде суммы решений:

$$C(z) = C_1(z) + C_2(z) \quad (5)$$

Постоянные  $C_1(0)$  и  $C_2(0)$  находятся из сопоставления потенциальных энергий каждого из профилей с кинетической энергией вертикальной компоненты турбулентных флуктуаций скорости. Конкретная схема такого сопоставления должна вырабатываться на основе сравнения расчетных данных с результатами измерений, полученных при использовании аппаратуры «Донной станции».

Есть основания полагать, что такие схемы должны учитывать географические особенности района исследований и соотношение между силой ветра и глубиной в месте расчета.

Рассчитанные для постановки «Донной станции» в районе Качивели профили  $C_1(z)$ ,  $C_2(z)$ ,  $C(z)$  изображены на рисунке 3.