

УДК 556.536:532.584

ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ТВЕРДОЙ ПРИМЕСИ В СУСПЕНЗИОННОМ ПОТОКЕ

Ю.Г. Пыркин, И.Б. Романова, М.А. Силаев

(кафедра физики моря и вод суши)

Получено выражение для коэффициента турбулентной диффузии твердых частиц в зависимости от параметров суспензионного потока. На основе экспериментальных данных выполнен расчет изменения этого коэффициента по глубине потока.

Известно, что при движении взвешенной жидкости в турбулентном режиме скорость осаждения содержащихся в ней твердых частиц уменьшается по сравнению со стоксовой [1–3]. В результате время существования этих частиц во взвешенном состоянии увеличивается, что заметным образом влияет на дальность их переноса потоком жидкости. Способность твердых частиц аккумулировать на своей поверхности вредные примеси обуславливает практический интерес к исследованию суспензионных течений в связи с их экологическими приложениями. Кроме того, по экспериментально определенным величинам замедления скорости осаждения твердых частиц в ряде случаев можно рассчитать коэффициенты турбулентной диффузии твердой примеси.

Знание коэффициента диффузии твердой примеси необходимо для оценки вертикального массопереноса твердой фазы. Такие оценки обычно делаются, исходя из предположения о том, что связь между средним количеством переносимой твердой примеси Q и градиентом концентрации ее в потоке записывается следующим образом [2–4]:

$$Q = -k \frac{\partial \bar{S}}{\partial z},$$

где k – коэффициент турбулентной диффузии.

В данной работе коэффициент диффузии k рассчитывается на основе уравнения сохранения массы при движении жидкости переменной плотности [4]. При этом используются экспериментальные значения скорости осаждения твердых частиц в турбулентном потоке, полученные в гидрофизической лаборатории физического факультета МГУ.

В лотке с наклонным дном формировался придонный суспензионный поток. Изучалась вертикальная скорость осаждения частиц разной крупности в зависимости от параметров потока. Измерялись следующие величины: средняя скорость течения жидкости и ее изменения как по глубине, так и вдоль направления распространения потока, вертикальные и продольные распределения концентрации частиц различной крупности.

Результаты эксперимента показали, что скорость осаждения частиц взвеси значительно уменьшается с увеличением степени турбулизованности

потока. Для оценки коэффициента диффузии запишем уравнение сохранения массы в динамике жидкости переменной плотности [4] в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \{ \rho V \} = J. \quad (1)$$

Величина J характеризует сток(приток) массы. В стационарном случае $\partial \rho / \partial t = 0$, тогда

$$\operatorname{div} \{ \rho V \} = J. \quad (2)$$

Выразим плотность турбулентного суспензионного потока ρ через плотность ρ_0 воды и массовую концентрацию взвеси:

$$\rho = \alpha S - \rho_0, \quad (3)$$

α – постоянный коэффициент. Плотность воды ρ_0 с достаточной степенью точности можно считать постоянной. При подстановке (3) в (2) получаем

$$\operatorname{div} \{ VS \} = J. \quad (4)$$

Для двумерного случая

$$\frac{\partial (US)}{\partial x} + \frac{\partial (WS)}{\partial z} = J. \quad (5)$$

Запишем компоненты скорости течения и массовую концентрацию твердой примеси для турбулентного режима движения потока в виде

$$U = \bar{U} + U', \quad W = \bar{W} + W', \quad S = \bar{S} + S', \quad (6)$$

где \bar{U} , \bar{W} , \bar{S} – средние, а U' , W' , S' – пульсационные составляющие соответственно продольной и поперечной компонент скорости потока и концентрации твердых частиц. После подстановки (6) в (5) и осреднения по времени получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial (\bar{US} + \overline{U'S'})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{WS} + \overline{W'S'})}{\partial z} = J. \quad (7)$$

Пренебрежем в уравнении (7) турбулентным продольным переносом взвеси $\overline{U'S'}$ по сравнению с переносом, обусловленным средним движением, \bar{US} и положим $\bar{W}=0$. Сделанные допущения подтверждаются нашими многочисленными лабораторными экспериментами.

Представим вертикальный поток твердой фазы

$W'S'$, как это часто делается, в виде

$$\overline{W'S'} = -k \frac{\partial \bar{S}}{\partial z}, \quad (8)$$

где k – коэффициент турбулентного обмена в вертикальной плоскости, а \bar{S} – массовая концентрация частиц. Расчет k представляет определенный интерес, так как коэффициент турбулентного обмена даёт информацию об интенсивности взаимодействия взвеси с жидкостью и структуре турбулентности.

Представим J в виде

$$J = \frac{\partial}{\partial z} [\bar{S}(\omega_{st} - \Delta\bar{\omega})], \quad (9)$$

где ω_{st} – скорость осаждения частиц в неподвижной воде, $\Delta\bar{\omega}$ – замедление скорости осаждения частиц в турбулентном потоке. После интегрирования по z уравнения (7) с учетом сделанных допущений получаем

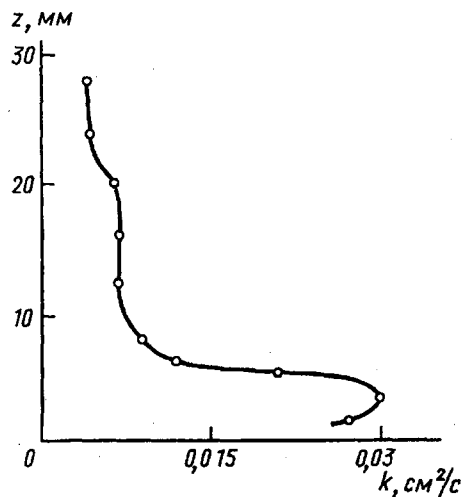
$$k = \frac{-\bar{S}\Delta\bar{\omega} + \int \bar{U} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} dz}{\partial \bar{S} / \partial z}. \quad (10)$$

Оценка, проведенная на основе данных эксперимента, показала, что вклад второго слагаемого в выражении (10) незначителен по сравнению с первым. Поэтому с достаточной степенью точности коэффициент k можно выразить в виде

$$k = - \frac{\bar{S}\Delta\bar{\omega}}{\partial \bar{S} / \partial z}. \quad (11)$$

Таким образом, k увеличивается с возрастанием скорости замедления осаждения частиц в потоке $\Delta\bar{\omega}$ и убывает с ростом вертикального градиента их концентрации $\partial \bar{S} / \partial z$.

Для расчета коэффициента диффузии k (рисунок) были взяты вертикальные профили распределения концентрации частиц диаметром около 20 мкм при числе Рейнольдса потока $Re=700$. Как следует из графика, распределение k имеет максимум,



расположенный в пределах зоны генерации турбулентной энергии, что представляется естественным, так как именно в этой зоне можно ожидать наибольшей интенсивности энергообмена в турбулентном взвесенесущем течении.

Литература

1. Пыркин Ю.Г., Силаев М.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. №2. С.77 (Moscow University Phys. Bull. 1993. N2. P.75).
2. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. М., 1954. Ч.1.
3. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М., 1971.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., 1987.

Поступила в редакцию
19.06.96