

УДК 532.5; 551.46; 551.51

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБМЕНА В ГРАВИТАЦИОННОМ СУСПЕНЗИОННОМ ПОТОКЕ

Ю. Г. Пыркин, С. В. Галкин, М. А. Силаев

*(кафедра физики моря и вод суши)*

Экспериментально исследованы процессы энергообмена в гравитационном суспензионном потоке. Получено уравнение переноса потенциальной энергии частиц твердой фазы. Зарегистрирована анизотропия пульсационных движений в потоке, показана возможность генерации турбулентности при разрушении структур с неустойчивым характером стратификации. Обсуждены особенности движения потока в режиме отрицательной турбулентной вязкости.

Экспериментальное исследование процессов энергообмена в придонных суспензионных потоках имеет важное значение при изучении ряда природных явлений, например осадконакопления в акваториях морей и водохранилищ, формирования качества природных вод. Изучение энергообмена также существенно для выявления физических закономерностей, характерных для течений данного класса. Моделирование придонных взвесенесущих течений в лабораторных условиях позволяет получать детальные и воспроизводимые результаты.

Для исследования физической природы образования тонкой пространственной структуры суспензионных потоков и характерных для них процессов энергообмена необходимо детально исследовать статистические характеристики полей скорости течения и концентрации твердой фазы. Процессы энергообмена в гравитационных суспензионных течениях из-за значительных технических трудностей исследования, особенно при турбулентном режиме движения, в настоящее время экспериментально изучены слабо. Для получения необходимых данных нами была создана специальная аппаратура [1, 2], разработаны методики сбора и обработки информации и проведена большая серия лабораторных экспериментов.

Моделирование придонного гравитационного суспензионного потока производилось на лабораторной установке в гидрофизической лаборатории физического факультета МГУ. Она представляет собой лоток со стеклянными стенками и дном с размерами  $7 \times 0,4 \times 0,2$  м. Установка включает в себя также бак-накопитель суспензии, демпфирующую емкость для создания постоянного напора, устройство для формирования суспензионного потока и механизм, позволяющий регулировать уклон дна в пределах от  $-0,05$  до  $+0,05$  рад. Сформированный суспензионный поток распространялся вдоль наклонного дна лотка под слоем неподвижной чистой воды. Твердая фаза суспензии представляла собой природный ил с размерами частиц от 1 до 50 мкм и средней плотностью материала  $2,5 \text{ г/см}^3$ . При проведении экспериментов массовая концентрация твердой фазы не превышала  $5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ , скорость течения — 3 см/с, а толщина потока — 3 см. Уровень турбулентности, согласно прямым инструментальным измерениям, составлял 10—15%.

Методика проведения исследований включала в себя дискретное сканирование толщи потока малогабаритным двухкомпонентным тер-

моанеметрическим измерителем скорости течения [1] в совокупности с отбором проб суспензии специальным пробоотборником одновременно с 14 горизонтов [2]. Длительность экспериментов составляла 50—60 мин; за это же время осуществлялось до 18 циклов сканирования толщи потока датчиком скорости с шагом по вертикальной оси 2 мм. Измеритель скорости течения позволил получать в режиме реального времени средние значения продольной ( $\bar{u}$ ) и вертикальной ( $\bar{w}$ ) составляющих скорости (осреднение проводилось на интервале времени 20 с), соответствующие энергии пульсационных движений  $k_1 = (1/2)\bar{u}'^2$  и  $k_3 = (1/2)\bar{w}'^2$ , а также параметры  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{u'^2w'}$  и  $\overline{w'^3}$ , характеризующие турбулентные потоки импульса и энергии вдоль оси  $z$ , перпендикулярной дну лотка. Применение процедуры двумерной кубической сплайн-интерполяции к первичным экспериментальным данным позволило «восстанавливать» мгновенные распределения по оси  $z$  соответствующих параметров.

Эксперименты показали, что моделируемый в лабораторных условиях придонный взвесенесущий поток характеризуется вертикальными распределениями средней скорости и массовой концентрации твердой фазы, типичными для данного класса течений. При этом распределения вертикальных градиентов этих параметров имеют четко выраженную зональную структуру (слоистость потока), ранее наблюдавшуюся различными исследователями в природных условиях. Следует отметить, что для исследуемых потоков характерны такие же значения интегрального числа Ричардсона ( $Ri \approx 0,5 \div 1,2$ ), как и для придонного суспензионного течения в условиях Нурекского водохранилища ( $Ri \approx 0,3 \div 1,6$ ) [3] при различии на несколько порядков величины геометрических параметров объектов. Следовательно, в этом смысле такие разные по масштабам течения можно считать подобными.

Анализ экспериментальных данных позволил выявить ярко выраженную анизотропию пульсационных движений в потоке, при этом пульсации продольной компоненты скорости наиболее интенсивны в периферийных областях течения, а пульсации вертикальной — в его центральной зоне. Это говорит о том, что в толще потока протекают мощные процессы трансформации энергии. Преобладание пульсаций вертикальной компоненты скорости в центральной области потока позволяет сделать предположение, что они генерируются при разрушении структур с неустойчивым характером стратификации, что в свою очередь подтверждается анализом распределений в толще течения массовой концентрации твердой фазы.

Детальный анализ энергообменных процессов во взвесенесущем потоке можно провести на основе уравнений переноса различных форм энергии:

$$\frac{DE}{Dt} = -G - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u \cdot u'w'}) + \overline{vu} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{\bar{u}^3}{2\beta g} \frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\alpha\beta g}{\rho} \overline{S\bar{u}} \quad (1)$$

$$\frac{Dk_1}{Dt} = G - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{k_1'w'}) + \nu \frac{\partial^2 k_1}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \overline{\rho' \frac{\partial w'}{\partial z}} \quad (2)$$

$$\frac{Dk_3}{Dt} = -B - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{k_3'w'}) + \nu \frac{\partial^2 k_3}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \overline{\rho' \frac{\partial w'}{\partial z}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho'w'}}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{D\Pi}{Dt} = B - \frac{\beta z g}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{S\bar{w}_0} + \overline{S'w_0'}) + \frac{\beta g}{\rho} \overline{S\bar{w}} - \frac{\alpha\beta g}{\rho} \overline{S\bar{u}} \quad (4)$$

Здесь  $h$  — расстояние от дна лотка вдоль вертикальной оси;  $\beta=1-\rho_w/\rho_p$ ;  $\rho_p$  и  $\rho_w$  — плотности материала частиц твердой и жидкой фаз соответственно;  $\rho$  — эффективная плотность суспензии;  $\alpha$  — угол наклона дна лотка к горизонту ( $\alpha \ll 1$ );  $\bar{s}$  — массовая концентрация частиц твердой фазы;  $w_0$  — скорость скольжения частиц вдоль оси  $z$ , перпендикулярной дну, средневзвешенная по всем фракциям. Все энергетические параметры рассчитываются для единицы массы суспензии.

Уравнения (1)–(3) представляют собой известные уравнения переноса средней кинетической ( $E=(1/2)\bar{u}^2$ ) и пульсационной (2), (3) энергий движения потока. Уравнение (4) характеризует процесс переноса потенциальной энергии частиц твердой фазы ( $\Pi=(\beta g/\rho)\bar{S}h$ ) при условии отсутствия стратификации жидкой фазы. Оно получено непосредственным дифференцированием параметра  $\Pi$  с учетом уравнения баланса массы. Пунктиром обозначены «каналы» трансформации энергии из одних видов в другие. Параметры  $G$  и  $B$  характеризуют скорости трансформации соответствующих форм энергии и выражаются через характеристики течения следующим образом:

$$G = -\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \quad (5)$$

$$B = \frac{\beta g}{\rho} \overline{S'w'}. \quad (6)$$

В области положительных значений параметр  $G$  часто называют генерацией или порождением турбулентной энергии, а параметр  $B$  — мощностью взвешивания. Скорость энергообмена  $B$  является метрологически нетривиальной величиной. Однако ее можно рассчитать из уравнений (2), (3) при пренебрежении малыми слагаемыми:

$$B = G - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{k'w'}) + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial z^2}, \quad k = k_1 + k_3. \quad (7)$$

Анализ экспериментальных данных показал, что в толще потока периодически возникают зоны, в которых параметр  $G < 0$ , что соответствует режиму отрицательной турбулентной вязкости. При этом для верхней области потока зона отрицательной вязкости достаточно стабильна. В режиме отрицательной вязкости должна происходить трансформация энергии пульсационных движений в кинетическую энергию среднего движения потока. Для подтверждения этого необходимо рассчитать значения полной производной по времени от средней кинетической энергии движения потока ( $DE/Dt$ ). Это можно сделать, если выразить  $DE/Dt$  через непосредственно измеряемые характеристики течения. Дифференцируя величину  $E$  и исключая с помощью уравнения неразрывности производную по продольной оси  $x$ , получим

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial t} + \overline{wu} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \bar{u}^2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}. \quad (8)$$

Расчет значений параметра  $DE/Dt$  показал, что зонам, в которых  $G < 0$ , соответствуют области, где  $DE/Dt > 0$ , и наоборот. Таким образом, экспериментально зарегистрирован факт локального ускорения движения взвесенесущего потока в режиме отрицательной турбулентной вязкости. Известно [4], что для реализации такого режима необходим

внешний источник энергии. В данном случае таким источником является гравитационное поле Земли. Процесс отбора энергии от внешнего потенциального поля может быть охарактеризован накоплением частиц твердой фазы в определенных зонах потока. При этом оказывается, что областям накопления частиц соответствуют отрицательные значения параметра  $\partial B/\partial z$ . Этот параметр входит в уравнения переноса средней кинетической энергии (1) через комплекс  $(-\bar{u}^2/2\beta g) \times \partial B/\partial z$ . Следовательно, процесс накопления частиц должен быть коррелирован с ускорением движения потока. Это подтверждается анализом вертикальных распределений параметров  $DE/Dt$  и  $\partial^2 \bar{S}/\partial z^2$  (в областях накопления частиц  $\partial^2 \bar{S}/\partial z^2 < 0$ ,  $DE/Dt > 0$ ).

Полученные экспериментальные данные и проведенный анализ подтверждают ранее предложенную физическую модель энергообмена во взвешенном гравитационном потоке [5]. Согласно этой модели частицы твердой фазы способны отбору энергии от внешнего источника (гравитационного поля): энергия пульсационных движений затрачивается на уменьшение скорости осаждения частиц («взвешивание»), что приводит к их накоплению в соответствующих зонах. Локальное увеличение концентрации твердой фазы приводит (за счет дополнительной работы продольной компоненты сил плавучести) к ускорению движения потока. Эта модель явления не противоречит основным законам физики и хорошо согласуется с уравнениями энергетического баланса (1)–(4). Физически обоснованные взаимосвязи результатов, полученных независимыми методами измерения (скорости, концентрации твердой фазы), подтверждают достоверность представленных выводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пыркин Ю. Г., Галкин С. В., Силаев М. А. // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Проблемы стратифицированных течений», Юрмала-1988. Саласпилс, 1988. Ч. 2. С. 220.  
[2] Галкин С. В., Силаев М. А., Пыркин Ю. Г. Дел. ВИНТИ № 6081-В88. М., 1988. [3] Самолюбов Б. И., Галкин С. В., Зеленев А. А., Силаев М. А. // Водные ресурсы. 1986. № 2. С. 77. [4] Старр В. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М., 1971. [5] Пыркин Ю. Г., Галкин С. В., Зеленев А. А., Силаев М. А. // Водные ресурсы. 1986. № 5. С. 177.

Поступила в редакцию  
14.06.90