2. *Dersch H., Schweitser L., Stuke J.* // Phys. Rev. 1983. **B28**. P. 4678.
3. *Stutzmann M., Jackson W.B., Tsai C.C.* // Phys. Rev. 1985. **B32.** P. 23.
4. *Dong X.M., Fritzsche H.* // Phys. Rev. 1987. **B36**. P. 9778.
5. *Jang J., Park S.C., Kim S.C., Lee C.* // Appl. Phys. Lett. 1987. **51**. P. 1804.
6. *Wang S.L., Taylor P.C.* // Solid State Commun. 1995. **95**. P. 361.
7. *Курова И.А., Ларина Э.В., Ормонт Н.Н., Сенашенко Д.В.* // ФТП. 1997. **31.** С. 1455.
8. *Stutzmann M., Jackson W.B., Tsai C.C.* // Phys. Rev. 1986. **B34.** P. 63.
9. *Chen L., Tauc J., Kocka J., Stuchlik J.* // Phys. Rev. 1992. **B46**. P. 2050.

Поступила в редакцию
13.03.01

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.46

О ВЛИЯНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА МАЛЫЕ ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ

Ю. Г. Пыркин, В. П. Перо в, И. Н. Иванова, М. А. Силаев

(*кафедра физики моря и вод суши*)

E-mail: silaevma@mail.ru

Экспериментально исследовано взаимодействие мельчайших частиц водной суспензии с турбулентностью, созданной колеблющейся решеткой. Разность дисперсий пульсации модуля скорости течения в чистой воде и суспензии сопоставлена с основными энергетическими параметрами твердых частиц.

Перенос твердых частиц турбулентными потоками жидкости определяется как энергетическими характеристиками самих потоков, так и параметрами частиц. Считается, что скорость переноса взвешенных частиц, имеющих чрезвычайно малый размер, совпадает со скоростью потока жидкости [1–5], т. е. их влияние на распределения скорости течения, интенсивности турбулентности и другие параметры не учитывается.

Другими словами, не учитывается энергия, которая, несомненно, должна затрачиваться на поддержание твердых, хотя и очень малых частиц во взвешенном состоянии [6], т. е. на замедление скорости их осаждения по сравнению со стоксовой. Согласно исследованиям авторов, в потоках с термохалинной стратификацией интенсивность турбулентности в зонах генерации была большей, чем в суспензионных потоках при той же степени стратификации и числе Рейнольдса потока [7].

Следовательно, для уточнения физических механизмов, отвечающих за процесс взаимодействия турбулентности и мельчайших твердых частиц в суспендированной жидкости, недостаточно рассматривать ее как континуум, т. е. подобие сплошной среды [5, 8, 9]. Необходимы совместные комплексные исследования основных характеристик и в суспензии и в жидкости в отсутствие твердых частиц. Однако в настоящее время подобных исследований практически нет, а результаты «пионерских» экспериментальных и теоретических работ весьма противоречивы [1, 2, 4–6, 10].

Влияние турбулентности на суспензию исследовалось нами на лабораторной установке [11, 12], в которой турбулентность генерируется колеблющейся с разными амплитудами и частотами решеткой. Решетка изготовлена из брусков органического стекла сечением 1×1 см с расстояниями между центрами брусков 2.8 см. Частота колебаний решетки может изменяться от 0.3 до 2 Гц, амплитуда колебаний в начальном цикле экспериментов была постоянной [12]. Согласно теории [13], интенсивность турбулентности, создаваемой колеблющейся решеткой (подобной той, что используется в наших экспериментах), определяется частотой и амплитудой колебаний решетки, ее геометрией и вязкостью жидкости. В нашем случае (при концентрациях твердых частиц в суспензии менее 1 мг/см^3) ее вязкость сравнима с молекулярной вязкостью чистой воды при той же температуре [8, 9].

Установка оснащена измерительной системой для регистрации модуля скорости течения и пробоотборниками для взятия проб жидкости. Эксперименты проводились в чистой воде, солевом растворе и в водной суспензии, содержащей илистые частицы размером до 30 мкм. По значениям регистрируемого модуля скорости течения на разных уровнях от колеблющейся решетки вычислялись дисперсии D пульсаций скорости течения. За начало отсчета

принимался центр отверстия решетки, когда она находилась в среднем положении.

Полная массовая концентрация частиц и концентрация частиц S интересующих нас фракций, например мелких (< 3 мкм), средних ($3 \div 8$ мкм) и крупных (> 8 мкм), определялась по отобранным пробам суспензии. По специальной методике оценивалась скорость падения частиц ω_p и рассчитывалась величина их замедления $(1 - \omega_p/\omega_{\mathrm{St}})$ по сравнению со стоксовой скоростью ω_{St} в неподвижной жидкости [14, 15]. В результате оказалось, что максимальные значения дисперсии D наблюдались в центральной части отверстий решетки. При уменьшении частоты колебаний решетки уменьшалась дисперсия и соответственно толщина слоя, охваченного турбулентным движением (рис. 1).

В связи с тем что основная цель экспериментов состояла в установлении влияния мельчайших частиц суспензии на турбулентность, было проведено сравнение вертикальных распределений дисперсий D в пресной и соленой воде, т. е. в однородных сплошных средах, отличающихся только плотностью. С учетом доверительных интервалов распределения значений дисперсии D для пресной и соленой воды практически совпадают [11]. Эти данные в свете последующих результатов, полученных для чистой воды и суспензии, имеют принципиальное значение, которое свидетельствует о различии механизмов развития и затухания турбулентности для случая сплошной среды и двухфазной водной суспензии, содержащей мелкие твердые частицы (со средней плотностью материала около 2.5 г/см^3).

Профили нормированных значений дисперсии D/D_0 для чистой воды и суспензии при разных частотах колеблющейся решетки, 0.4 и 0.8 Гц, приведены на рис. 2. (Нормировка на значения дисперсии D_0 при среднем положении колеблющейся решетки была произведена для исключения влияния ряда побочных факторов [11, 12].) Из рис. 2 хорошо видно, что для суспензии значения дисперсии

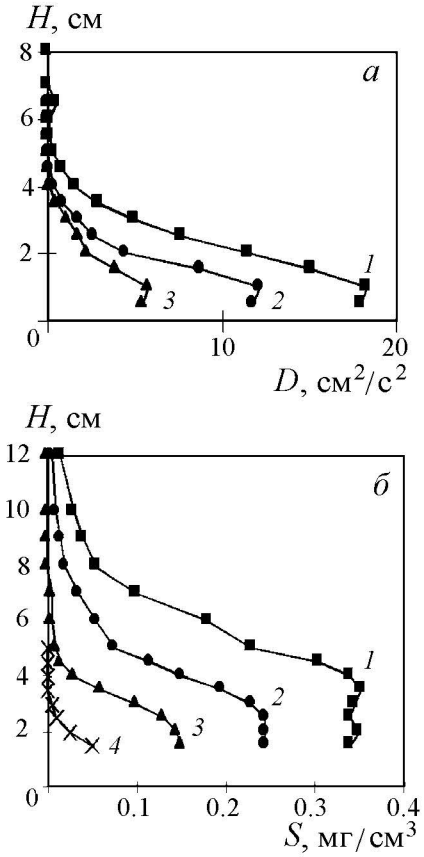

Рис. 1. Вертикальные распределения дисперсии D пульсаций модуля скорости течения (*а*) и массовой концентрации S частиц фракции $3 \div 8$ мкм (*б*) при различных значениях частоты колебаний решетки: $f = 0.8$ (*1*), 0.6 (*2*), 0.4 Гц (*3*) и при неподвижной решетке (*4*). Погрешность определения дисперсии составляет 3–5%, концентрации — 3%

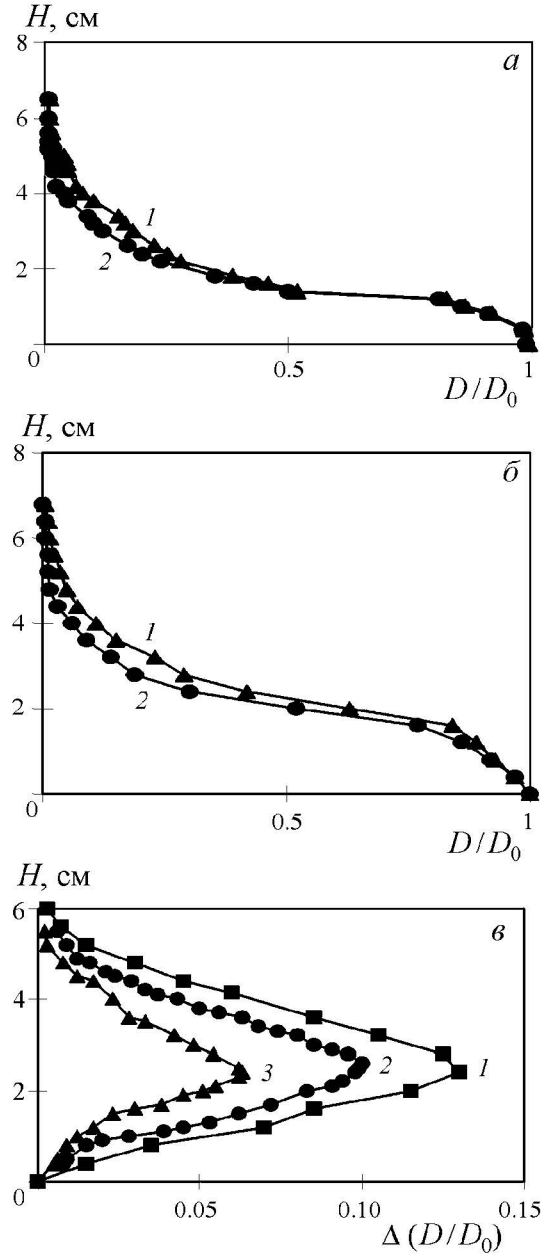

Рис. 2. Вертикальные распределения дисперсии D/D_0 пульсаций скорости для чистой воды (*1*) и суспензии (*2*) при частоте колебаний решетки $f = 0.4$ (*а*) и 0.8 Гц (*б*) и величины разности дисперсий (*в*) для частот 0.8 (*1*), 0.6 (*2*) и 0.4 Гц (*3*)

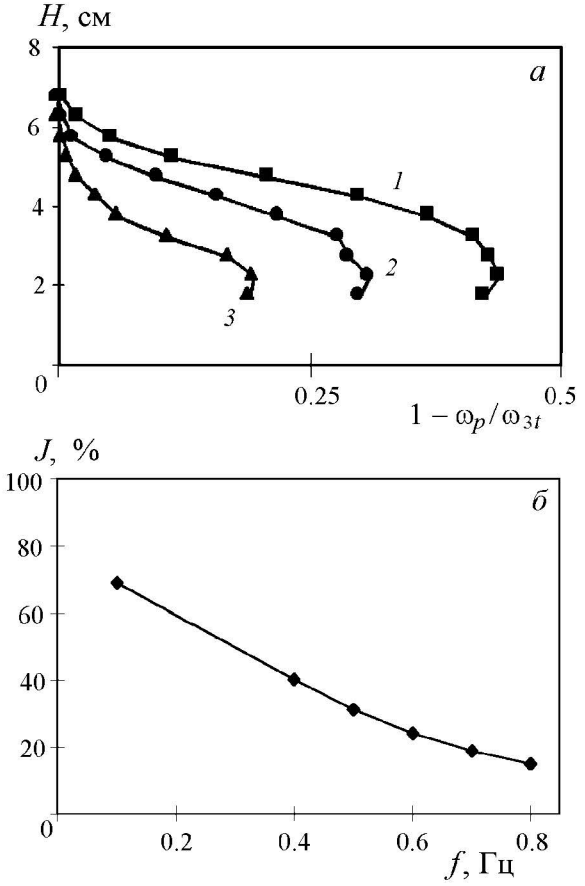

Рис. 3. Вертикальные распределения замедления выпадения частиц фракции $3 \div 8$ мкм $(1-\omega_p/\omega_{\mathrm{St}})$ из вихревой зоны для частот 0.8 (*1*), 0.6 (*2*) и 0.4 Гц (*3*) — (*а*) и зависимость доли выпавших частиц J этой фракции (*б*) от частоты колебаний решетки f. Погрешность определения величины замедления не превышает 5–7%

меньше (кривая *2*), чем для чистой воды (кривая *1*), причем это различие наиболее заметно в пределах вихревой зоны (см. рис. 1, *а*), на расстоянии $2 \div 6$ см от среднего (нулевого) положения решетки [11–13].

Как следует из полученных данных, дисперсия D в вихревой зоне движения по мере увеличения частоты колебаний решетки для взвеси все более и более отличается от дисперсии для чистой воды (для частоты 0.4 Гц примерно на 10%, для 0.8 Гц — уже на 18–20%). Это различие хорошо видно на рис. 2, *в*, где представлены вертикальные распределения разности дисперсий в чистой воде и суспензии для частот 0.4, 0.6 и 0.8 Гц. Полученные экспериментальные данные прямо свидетельствуют о расходе части турбулентной энергии на поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии, т. е. на уменьшение скорости их гравитационного осаждения по сравнению со стоксовой скоростью в неподвижной жидкости. При этом замедление осаждения частиц различных фракций (например, с размерами $3 \div 8$ мкм) возрастает с увеличением частоты колеблющейся решетки (рис. 3, *а*), а доля выпадающих из вихревой зоны частиц J соответственно уменьшается (рис. 3, *б*), что совпадает с данными, полученными ранее другими методами [7, 10, 11, 14, 15].

Следует отметить хорошую корреляцию анализируемых параметров: затрат турбулентной энергии (в нашем случае они определяются разностью дисперсий для чистой воды и суспензии), замедления скорости осаждения частиц средней крупности и ее массовой концентрации (рис. 1, *б*). Так, максимальное замедление осаждения и, следовательно, максимальная концентрация частиц наблюдаются в зоне максимального поглощения ими турбулентной энергии. С увеличением частоты колебаний решетки эта зона накопления частиц заметно расширяется (см. рис. 1–3).

В настоящее время на основе имеющегося в нашем распоряжении уникального экспериментального материала проводится взаимный корреляционный анализ представленных в данной работе параметров. Это позволит в перспективе получить энергетические спектры турбулентности (в чистой воде и в суспензии) и сопоставить их со спектрами крупности частиц, что даст возможность провести численный анализ процессов энергообмена в водной суспензии и, в частности, определить работу взвешивания твердых малых частиц в турбулентном потоке по методике М.А. Великанова [2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 00-05-64339).

Литература

1. *Баренблатт Г.И.* // Прикл. матем. и механика. 1953. **17**. С. 261.
2. *Великанов М.А.* Динамика русловых потоков. М.: Мир, 1955. Ч. 2.
3. *Медников Е.П.* Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981.
4. *Михайлова Н.А.* Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гостехиздат, 1966.
5. *Coy C.* Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971.
6. *Vanoni V.A.* // J. Hydraul. Eng. 1984. **112**, No. 8. P. 1837.
7. *Пыркин Ю.Г., Галкин С.В., Силаев М.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. №1. С. 56 (Moscow University Phys. Bull. 1991. No. 1. P. 56).
8. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
9. *Фортье А.* Механика суспензий. М.: Мир, 1971.
10. *Hwang P.A.* // J. Hydraul. Eng. 1983. **111**, No. 3. P. 485.
11. *Иванова И.Н., Пыркин Ю.Г., Петров В.П., Силаев М.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 6. С. 58 (Moscow University Phys. Bull. 1998. No. 6. P.71).
12. *Пыркин Ю.Г., Петров В.П., Иванова И.Н., Силаев М.А.* // Метеорология и гидрология. 2000. №2. С. 104.
13. *Long R.R.* // J. Fluid Mech. 1987. **84**, No. 4. P. 113.
14. *Пыркин Ю.Г., Силаев М.А.* // Метеорология и гидрология. 1993. №2. С. 53.
15. *Пыркин Ю.Г., Силаев М.А.* // Водные ресурсы. 1994. **21**, №6. С. 738.

Поступила в редакцию
29.11.00