

испарение (q_e) составляет 40% от поступающей в систему океан–атмосфера энергии. Таким образом,

$$\Delta Q_l = 1.4 \cdot 10^{22} \cdot 0.40 = 5.6 \cdot 10^{21} \text{ Дж.}$$

Следовательно, количество водяного пара, поступающего в атмосферу (m_v), при полном расходе энергии ΔQ_l будет равно

$$m_v = \Delta Q_l / L = 5.6 \cdot 10^{21} / 2.5 \cdot 10^6 \sim 2.2 \cdot 10^{15} \text{ кг,}$$

где L — удельная теплота парообразования ($2.5 \cdot 10^6$ Дж/кг). Накопленная в Тихоокеанском тропическом бассейне энергия огромна. Чтобы наглядно представить эту величину, сравним ее с энергией тропического циклона.

Средняя энергия тропического циклона, по оценкам, приведенным в работе [8], равна энергии, освобождающейся при одновременном взрыве четырехсот 20-мегатонных ($2 \cdot 10^{10}$ кг) ядерных зарядов. Так как энергия, выделяемая при взрыве 1 кг тротила, равна $4.2 \cdot 10^6$ Дж, то выделенная при взрыве энергия четырехсот зарядов составит

$$Q = 400 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 4.2 \cdot 10^6 \sim 3.4 \cdot 10^{19} \text{ Дж.}$$

Зная величины ΔQ_l и Q , оценим максимально возможное число тропических циклонов (N), которые могут образоваться при поступлении в атмосферу дополнительной энергии ΔQ_l из Тихоокеанского тропического бассейна:

$$N = \Delta Q_l / Q \sim 160.$$

По среднестатистическим данным, когда возникает Эль-Ниньо, в тропической части Тихого океана зарождается около 30 тропических циклонов; следовательно, запас энергии в Тихоокеанском тропическом бассейне намного больше энергии тропических циклонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 01-05-64435).

Литература

1. Иванов А.А. Введение в океанографию. М.: Мир, 1978.
2. Webster P.J., Palmer T. // Nature. 1997. **390**, No. 6660. P. 562.
3. Джоунс Ф.Д., Уигли Т. // В мире науки. 1990. № 10. С. 62.
4. Тимофеев Н.А., Юровский А.В. // Иссл. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 31.
5. Общая геофизика / Под ред. В.А. Магницкого. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 203.
6. Хунджуа Г.Г., Нелепо А.Б. Препр. физ. ф-та МГУ. 2000. № 4.
7. Хунджуа Г.Г., Нелепо А.Б. и др. // Изв. РАН, ФАО. 1997. № 33. С. 298.
8. Вайсберг Дж. Погода на Земле. Л.: Гидрометеиздат, 1980.

Поступила в редакцию
01.10.01

УДК 551.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

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

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: psiwc48@phys.msu.su

В работе приведены результаты исследования вертикальной и горизонтальной структур турбулентности, генерируемой колеблющейся решеткой, как в чистой воде, так и в суспензии. Вблизи решетки обнаружена горизонтальная периодическая структура колебаний жидкости, имеющая струйный характер. С удалением от колеблющейся решетки возвратно-поступательное движение жидкости затухает, причем при прочих равных условиях значения скорости (дисперсии) в суспензии меньше, чем в чистой воде. Это связано с поглощением энергии возмущений твердыми частицами и замедлением их скорости выпадения.

Турбулентный режим движения жидкостей является наиболее характерным режимом движения как в природных потоках, так и во многих технологических процессах (движение различных жидкостей по трубопроводам, каналам и пр). Экспериментальные исследования влияния турбулентности на природные или технологические процессы можно одинаково успешно проводить как в естественных, так и в лабораторных условиях. Причем весьма часто последнее направление бывает даже предпочтительнее [1–13].

Ряд известных лабораторных исследований [2, 6, 9–11, 13] проводился на установках, представляющих собой емкость, заполненную жидкостью, в которой турбулентность создается горизонтальной решеткой (в некоторых случаях двумя), колеблющейся в вертикальной плоскости с небольшой амплитудой. Выбор именно такой схемы генерации турбулентности (имеющиеся установки отличаются лишь некоторыми особенностями в конструкции и технико-экспериментальным оборудованием) сделан

по нескольким причинам. Прежде всего колеблющуюся решетку нетрудно изготовить и оперировать ею. Кроме того, выбранная схема эксперимента позволяет проводить исследования по изучению целого ряда задач помимо турбулентности, будь то перемешивание в стратифицированной жидкости, различного рода вовлечения, проникающая конвекция и т. д. [1, 2, 4, 10, 11, 13]. Однако процесс, порождаемый колеблющейся решеткой, достаточно сложен. По мнению Тернера [6], нельзя определенно сказать, является ли здесь вовлечение некоторой разновидностью процесса, происходящего на кромке турбулентной плавучей струи или обычной струи, или работает существенно иной механизм вовлечения. Отмечается также [2, 6, 11], что произведено слишком мало детальных измерений внутренней структуры переходной зоны, так как в основном используются визуальные наблюдения.

В результате на подобных установках были получены законы затухания турбулентности и выявлена зависимость ее вертикальной структуры от основных параметров решетки. Мы не будем приводить полученные зависимости [2, 10, 11, 13], а отметим только, что в них входит (кроме безразмерных коэффициентов) амплитуда колебаний решетки, ее частота, а также шаг решетки. При этом среднеквадратичная скорость турбулентного движения (а именно такое определение турбулентного параметра чаще встречается в литературе) изменяется по вертикали с расстоянием z от среднего уровня решетки до горизонта измерений по закону z^{-1} . Горизонтальное же распределение турбулентности считается изотропным (в пределах ошибок эксперимента) либо о ней нет никаких упоминаний. Наши исследования на подобной установке показали, что изотропность турбулентности наблюдается лишь на определенных расстояниях от колеблющейся решетки. Кроме того, нами получен ряд оригинальных результатов [5, 14, 15].

Наша установка [15] оснащена измерительной системой (блоком датчиков на базе микротермистора МТ-54 с температурной компенсацией) для регистрации модуля скорости течения и пробоотборниками для взятия проб жидкости. Данные с датчиков поступали на АЦП компьютера, где с помощью спецпрограмм вычислялись значения модуля скорости, среднеквадратичного отклонения и дисперсии пульсаций модуля скорости, а также массовая концентрация частиц и их гранулометрический состав. При этом точность определения скоростных характеристик была не хуже 5%, а параметров частиц суспензий — 7%.

Исследовалась вертикальная и горизонтальная структура турбулентности, причем как в чистой воде, так и в суспензии, т. е. в воде, содержащей твердые илистые частицы крупностью до 30 мкм. Сначала регистрировался горизонтальный профиль скорости над двумя ячейками и тремя узлами, расположен-

ными в центральной области решетки. Затем датчик перемещался на другой уровень H (по вертикали), и снова регистрировался горизонтальный профиль скорости в тех же реперных точках. При этом шаг перемещения датчика по горизонтали составлял 0.3–0.5 см при размере ячейки решетки 1×1 см, а по вертикали — 0.2–0.5 см. В чистой воде на каждом горизонте регистрировалась скорость не менее чем в 15 точках, в водной суспензии таких точек было почти вдвое меньше. Такое заметное различие в количестве точек объясняется тем, что общее время эксперимента в суспензии было ограничено, поскольку твердые частицы имеют хотя и очень небольшую (менее 0.01 см/с), но конечную величину скорости осаждения и за время эксперимента (1–2 ч в зависимости от частоты колебаний решетки) суспензия может заметно поменять свой гранулометрический состав. Сократив время эксперимента до 30–40 мин, мы сохранили гранулометрический состав суспензии практически неизменным [14].

На основе полученных данных были построены кривые, отображающие профили скорости на различных горизонтах для чистой воды (рис. 1, а) и для суспензии (рис. 1, б). Из представленных графиков видно, что вблизи решетки наблюдается отчетливая горизонтальная периодическая структура колебаний скорости, имеющая струйный характер. Максимумы скорости течения расположены над центрами ячеек, минимумы — над центрами брусков решетки. Причем на горизонтах, близких к решетке, разница

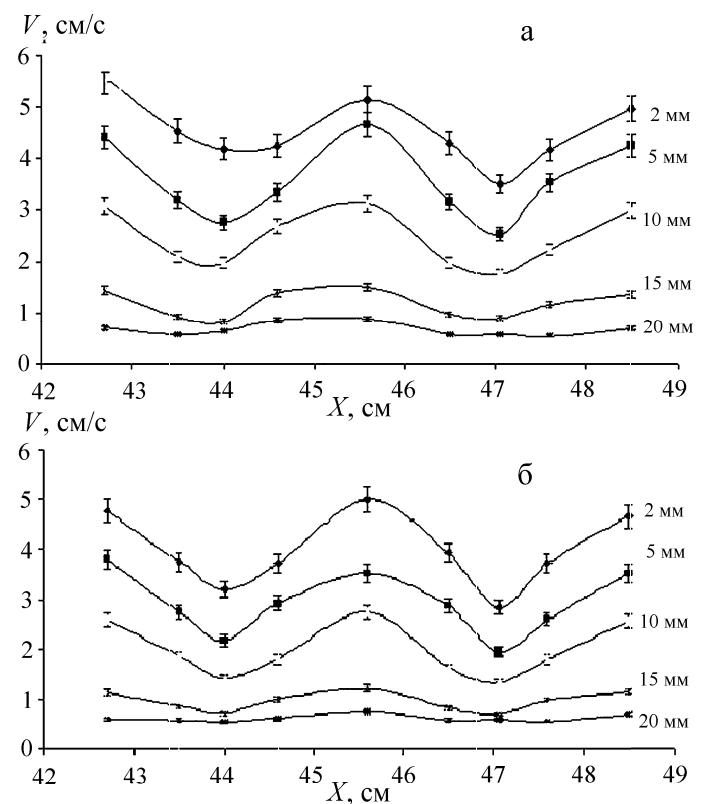


Рис. 1. Горизонтальный профиль модуля скорости течения на различных горизонтах H от верхнего положения решетки при частоте колебаний 0.8 Гц для чистой воды (а) и в суспензии (б)

между значениями скорости над ячейкой и над узлом решетки велика (на горизонте 2 мм: V_{\min} примерно равна $0.5V_{\max}$). По мере удаления от решетки не только уменьшается скорость, но и сглаживается это различие. То есть струйное возвратно-поступательное движение затухает и постепенно переходит в вихревое [13–15]. Аналогичные данные были получены для различных частот колеблющейся решетки (0.4–2 Гц). При этом чем больше частота вынужденных колебаний решетки, тем на большее расстояние распространяется струйное движение. Это общая тенденция для чистой воды и суспензии. В суспензии, в отличие от чистой воды, значения скорости меньше (при прочих равных условиях), и сглаживание горизонтального профиля скорости происходит на границе раздела по крупности (о чем речь шла в работах [5, 15]), а в чистой воде на том же горизонте еще заметно различие скорости в точках над центром узла и над центром ячейки решетки.

Были получены поля дисперсии пульсаций модуля скорости течения D для чистой воды и в суспензии (рис. 2, а, б). По сравнению с распределением скорости горизонтальные профили дисперсии дают более ярко выраженные максимумы и минимумы соответственно над ячейками и узлами решетки. Дисперсионные кривые дают представление о распределении энергии возмущений, создаваемых колеблющейся решеткой. При прочих равных условиях значения дисперсии в суспензии существенно меньше, чем в чистой воде. Это связано с поглощением турбулентной энергии твердыми частицами

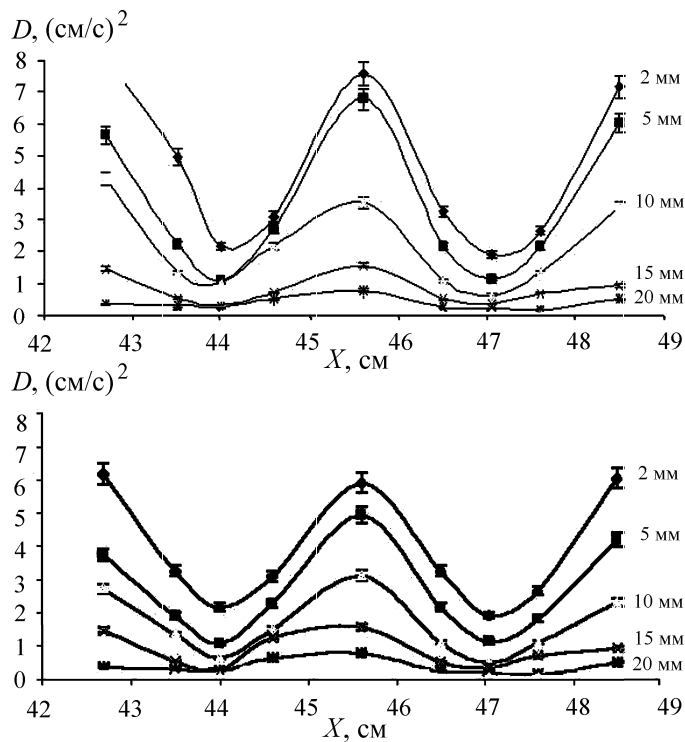


Рис. 2. Горизонтальный профиль дисперсии пульсаций модуля скорости течения на различных горизонтах H от верхнего положения решетки при частоте колебаний 0.8 Гц для чистой воды (а) и в суспензии (б)

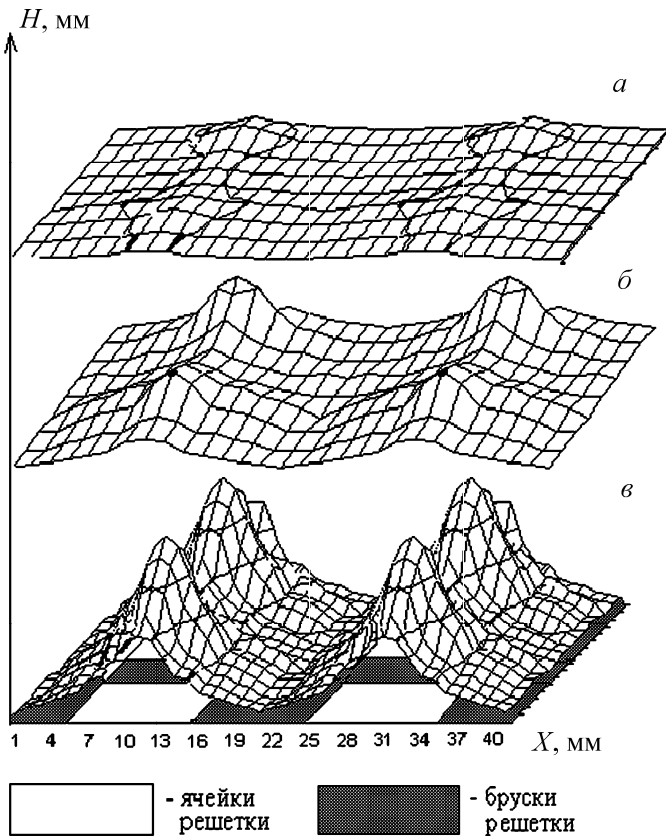


Рис. 3. Изменение поля значений дисперсии пульсаций модуля скорости течения с удалением от решетки, колеблющейся с частотой 0.8 Гц, в чистой воде: 60 (а), 40 (б) и 2 мм (в) от верхнего положения решетки; 1 — ячейки решетки, 2 — бруски решетки

и замедлением выпадения последних [5]. При этом замедление скорости осаждения частиц различных фракций возрастает с увеличением частоты колеблющейся решетки и величины разности дисперсий в чистой воде и в водной суспензии [5, 14, 15].

Таким образом, впервые проведена работа, в результате которой получено распределение энергии над осциллирующей решеткой. С учетом того, что установка симметрична в горизонтальной плоскости (об этом свидетельствуют и горизонтальные профили скорости, и дисперсии — см. рис. 1, 2), на рис. 3 представлена общая трехмерная картина распределения дисперсий колебаний скорости течения.

Результаты, приведенные в настоящей работе, возможно, не только будут интересны для исследователей, работающих с подобными установками, но и внесут необходимые поправки в проводимые ими различного рода эксперименты.

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

Литература

1. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
2. Воронаев С.И. Лабораторное моделирование процессов перемешивания в верхнем слое океана: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Ин-т океанологии РАН, 1979.

3. Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента // Тр. V Всесоюз. науч. совещ. по теорет. и прикл. аспектам турбулентных течений / Под ред. М.К. Лаатса. Таллин, 1985.
4. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981.
5. Пыркин Ю.Г., Петров В.П., Иванова И.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2001. № 4. С. 65 (Moscow University Phys. Bull. 2001. No. 4. P. 78).
6. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
7. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
9. Hopfinger E.J., Toly J.A. // J. Fluid Mech. 1976. **78**, No 1. P. 155.
10. Long R.R. // J. Fluid Mech. 1987. **84**, No 4. P. 113.
11. Turner J.S. // J. Fluid Mech. 1986. **173**, No 6. P. 431.
12. Vanoni V.A. // J. Hydraul. Eng. 1984. **112**, No. 8. P. 1837.
13. Villermaux E., Sommeria J., Hopfinger E.J. // J. Fluid Mech. 1991. **10**, No. 4. P. 427.
14. Аббасов К.Ш., Иванова И.Н., Пыркин Ю.Г. и др. // Водные ресурсы. 1998. **25**, № 1. С. 24.
15. Пыркин Ю.Г., Петров В.П., Иванова И.Н. и др. // Известия АН, ФАО. 2001. **37**, № 5. С. 730.

Поступила в редакцию
13.02.02