

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.46

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕТЧАТОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДАМИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Ю. Г. Пыркин, И. Н. Иванова, А. Э. Фролова

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: psiwc48@phys.msu.su

**В** цикле экспериментальных работ с помощью корреляционного и спектрального анализа исследуется пространственная структура жидкости, в которой турбулентность создается колеблющейся решеткой. Экспериментально показано наличие трех зон движения в такой жидкости: струйной, переходной и случайной, т. е. турбулентной. Проведена оценка интенсивности турбулентности в чистой воде и в суспензии, определен вертикальный масштаб турбулентных образований. При наличии суспензии часть турбулентной энергии жидкости поглощается частицами суспензии.

В последнее время как у нас, так и в других странах для моделирования влияния турбулентности на слой скачка плотности используют различные колеблющиеся системы, например решетки, диски с круглыми отверстиями или колеблющиеся прутки. В качестве исследуемого материала практически не изучены суспензии. Как правило, не обсуждается и характер возбуждаемых колебаний жидкости в разных частях бассейна. Предлагаемая работа во многом восполняет этот пробел.

На экспериментальной установке, описанной в [1], турбулентность в жидкости создавалась колеблющейся решеткой. Измерения проводились как в чистой, так и в мутной воде при частотах колебаний решетки 0.5–1.8 Гц. В качестве суспензии использовались частички природного ила плотностью  $2.5 \text{ г/см}^3$ , размером до 30 мкм.

В цикле экспериментальных исследований было получено объемное распределение значений дисперсии колебаний скорости жидкости [2]. Вблизи решетки наблюдается отчетливая горизонтальная периодическая структура колебаний скорости, имеющая струйный характер. Максимумы скорости течения расположены над центрами ячеек, а минимумы – над центрами брусков решетки. Отношение свободной поверхности решетки к ее общей площади равно 0.34. В этом случае можно считать, что генерируемая колеблющейся решеткой турбулентность будет результатом взаимодействия движущихся через ее окна струй жидкости. Аналогичные процессы наблюдаются и у других авторов [3]. По мере удаления от решетки струйное движение затухает и начинается зона, близкая по характеру движения к природной турбулентности. На основе этого материала прослежен переход струйного колебательного движения жидкости в турбулентное. Помимо дисперсионного анализа этот переход был исследован

и путем анализа автокорреляционных и спектральных функций для модуля скорости жидкости. На рис. 1 показаны автокорреляционные функции для частоты колебаний решетки 0.6 Гц, рассчитанные для двух горизонтов. Автокорреляционная функция, полученная в непосредственной близости от колеблющейся решетки, где сильнее струйное движение, имеет ярко выраженный колебательный характер. На расстоянии 3 см от решетки (кривая 1) колебательный характер частично еще сохраняется, однако амплитуда колебаний существенно уменьшается. И, наконец, на расстоянии 7 см от решетки (кривая 2) автокорреляционная функция имеет вид, близкий к аналогичным функциям для случайного процесса [4]. Таким образом, на горизонтах начиная от 7 см и выше, судя по автокорреляционным функциям, наблюдается зона, близкая по параметрам к турбулентной.

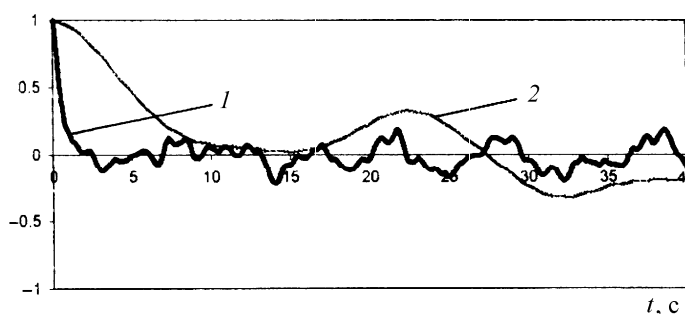


Рис. 1. Автокорреляционные функции для частоты колебаний решетки 0.6 Гц. на расстоянии: 1 — 3 см от верхнего положения решетки; 2 — 7 см от верхнего положения решетки

Аналогичный результат, подтверждающий наличие различного типа движения в турбулизованной жидкости по мере удаления от колеблющейся в ней решетки, можно получить, анализируя спектральную функцию для модуля скорости на разных

расстояниях от решетки. На рис. 2 (кривая 1) представлен график спектральной функции для модуля скорости на расстоянии 0.2 см от верхнего положения колеблющейся с частотой 0.6 Гц решетки. По оси абсцисс отложена частота колебаний решетки в герцах, а по оси ординат — квадрат амплитуды в единицах квадрата скорости движения жидкости; доверительный интервал для вероятности 75% показан вертикальным отрезком.

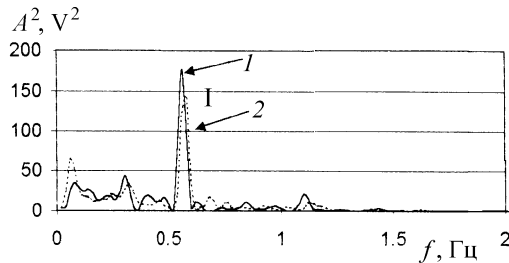


Рис. 2. Спектральная функция для модуля скорости для частоты колебания решетки 0.6 Гц на расстоянии: 1 — 0.2 см от верхнего положения колеблющейся решетки; 2 — 2.7 см от верхнего положения решетки

На кривой 1 имеется достоверный пик спектральной функции, который соответствует несущей частоте колебаний решетки. На кривой 2 показана спектральная функция для модуля скорости на расстоянии 2.7 см от верхнего положения решетки. Если сравнивать кривые 1 и 2, то видно, что с увеличением расстояния от колеблющейся решетки достоверный пик, соответствующий частоте колебаний 0.6 Гц, резко уменьшается по амплитуде. При этом появляются достоверные пики на меньших частотах, наличие которых показывает характер движения, отличный от струйного. Можно сказать, что в этой области наличие струй не вносит определяющей роли в характер движения жидкости, т. е. здесь движение жидкости имеет переходной характер от периодического к случайному. Максимум на спектральной функции, соответствующий частоте 0.6 Гц, с учетом доверительного интервала практически исчезает на расстояниях, больше чем 6 см от верхнего положения решетки, что свидетельствует об отсутствии на этих горизонтах периодического движения.

Таким образом, изучение поля дисперсий модуля скорости жидкости, анализ автокорреляционных и спектральных функций показали наличие в турбулизованной колеблющейся решеткой жидкости наличие трех зон движения: струйной, переходной и случайной, т. е. турбулентной.

При различных частотах колебаний решетки были взяты пробы суспензии. Предварительный анализ этих проб показал, что на всех уровнях происходит замедление скорости осаждения частиц по сравнению со стоксовой [5, 6]. В нижней зоне (у решетки) наблюдается накопление крупных частиц, а в вихревой — заметное увеличение концентрации мелких частиц. Механизмы этих явлений различны. Накоп-

ление частиц в колебательной зоне с преобладанием струйного механизма движения жидкости, вероятно, определяется нелинейным характером взаимодействия потока и частицы. В верхней же (вихревой) зоне происходит захват и удержание мелких частиц суспензии турбулентными образованиями.

Получен уникальный для подобных установок материал, поскольку он дает возможность исследовать энергообмен в жидкостях и суспензиях как в колебательном, так и в турбулентном режимах движения жидкости. При этом стало возможным определять соответствующий режим по расстоянию исследуемой зоны от колеблющейся решетки.

Для изучения особенностей энергообмена в жидкости и суспензии в турбулизованной колеблющейся решеткой жидкости был проделан также ряд экспериментов для определения уровня турбулентности жидкости. Уровень турбулентности при этом рассчитывается по формуле

$$K = \sqrt{u'^2} / \bar{u},$$

где  $u$  — характерная скорость,  $u'$  — пульсация скорости течения, которая используется для количественной оценки интегральной интенсивности турбулентности и характеризует степень общей возмущенности поля скоростей [7].

Эксперименты проводились в чистой воде и суспензии для частот 0.5, 1 и 1.5 Гц. В качестве характерной скорости использовалась скорость движения самой решетки. Рис. 3 иллюстрирует один из полученных результатов для частоты колебаний решетки 1.5 Гц. Здесь по оси ординат отложена интенсивность турбулентного движения  $I$ , по оси абсцисс — расстояние от колеблющейся решетки. Кривая 1 получена после аппроксимации результатов эксперимента в чистой воде полиномом 2-й степени, кривая 2 — после такой же аппроксимации результатов эксперимента в суспензии. Как видно из графика, наблюдается уменьшение интенсивности турбулентности с увеличением удаленности

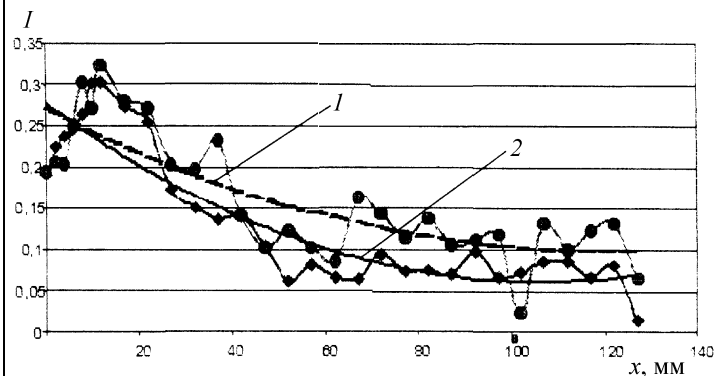


Рис. 3. Зависимость интенсивности турбулентного движения  $I$  (аппроксимация полиномом 2-й степени) от расстояния от колеблющейся решетки в чистой воде (1) и в суспензии (2) при частоте колебаний решетки 1.5 Гц. Кружки — данные эксперимента в чистой воде, квадраты — в суспензии

от решетки как для чистой воды, так и для суспензии. Кривая зависимости интенсивности турбулентности от удаленности до решетки при частоте 1.5 Гц для чистой воды имеет явное расхождение с кривой зависимости интенсивности турбулентности от удаленности до решетки для суспензии, причем интенсивность турбулентности для чистой воды больше интенсивности турбулентности для суспензии.

В целом, как показал ряд экспериментов, разница между интенсивностью турбулентности для чистой воды и интенсивностью турбулентности для суспензии возрастает при увеличении частоты колебаний решетки и соответственно энергии турбулентного движения жидкости.

На основе представленных результатов можно сделать вывод, что для турбулизованной жидкости при наличии суспензии уровень интенсивности турбулентного движения уменьшается по сравнению с чистой водой за счет поглощения части энергии частицами суспензии.

Процесс поглощения части энергии турбулентного движения частицами суспензии хорошо демонстрируется графиком на рис. 4, где представлен энергетический спектр модуля пульсаций скорости в чистой воде и суспензии при частоте колебаний решетки 0.5 Гц. на расстоянии 8 мм от колеблющейся решетки. По оси абсцисс отложена частота колебаний решетки в герцах, а по оси ординат — квадрат амплитуды в единицах квадрата скорости движения жидкости; доверительный интервал для вероятности 75% показан вертикальным отрезком. Здесь кривая 1 характеризует спектр модуля пульсаций скорости в чистой воде, кривая 2 — в суспензии. Достоверный пик на несущей частоте, показывающий регулярное движение в жидкости на этой частоте, для чистой воды оказывается больше достоверного пика на частоте колебаний решетки в воде при наличии суспензии. Этот факт можно объяснить поглощением части энергии (порядка 10–12%) турбулентного движения частицами суспензии. Аналогичный результат наблюдается на всех горизонтах и при других частотах колебаний решетки. Это хорошо заметно на графиках энергетических спектров, где еще сохраняется достоверный максимум, соответствующий несущей частоте.

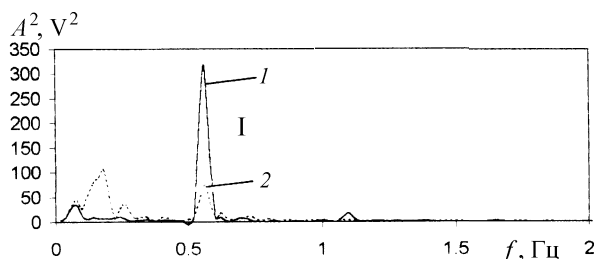


Рис. 4. Спектр пульсаций модуля скорости в чистой воде (1) и суспензии (2) при частоте колебаний решетки 0.5 Гц. на расстоянии 8 мм от колеблющейся решетки

При анализе процессов в жидкости, где турбулентность создается колеблющейся решеткой, нами использовались не только временные автокорреляционные функции, но и пространственные. Если временные автокорреляционные функции позволяют оценить степень связности значений скорости в различные моменты времени и тем самым судить о временных масштабах колебаний скорости, то пространственные корреляции дают возможность оценить пространственную структуру турбулизованной жидкости [7]. С помощью двух датчиков была проведена серия экспериментов для чистой воды и суспензии в турбулентной зоне. Нижний датчик располагался над колеблющейся решеткой за пределами струйной зоны движения, второй датчик перемещался вверх от нижнего с шагом 1–5 мм. На рис. 5 приводится в качестве примера одна из полученных зависимостей пространственного коэффициента корреляции от расстояния между датчиками. Точка пересечения коэффициента пространственной корреляции с осью абсцисс называется «точкой отсечения». Эта точка характеризует пространственный масштаб турбулентного образования [7]. С помощью пространственных корреляционных функций определен масштаб вихревых турбулентных образований в чистой воде для частот колебаний решетки 0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.6 и 1.8 Гц, а для суспензии — при частоте 0.5, 0.8, 1.0 Гц. При увеличении частоты колебаний решетки, а следовательно, и энергии турбулентного движения, размер турбулентных образований возрастает как для чистой воды, так и для суспензии. Кроме того, сравнение значения размеров турбулентных образований в чистой воде и суспензии для частот колебаний 0.5, 0.8 и 1.0 Гц показало, что размер вихревых образований в мутной воде существенно больше, чем в чистой воде. Соотношение размеров этих образований в чистой воде и в суспензии приблизительно равно 1:2.5. Мы полагаем, что так как наличие частиц суспензии в турбулизованной жидкости увеличивает плотность жидкости (ее инерционность), то это

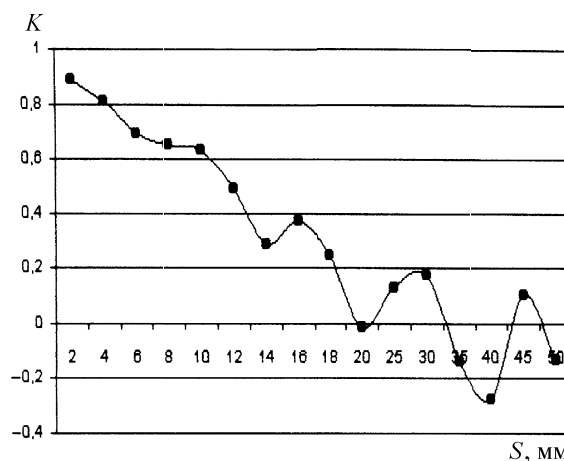


Рис. 5. Зависимость пространственного коэффициента корреляции от расстояния между датчиками

в свою очередь приводит к тому, что при одинаковых скоростях жидкости на объем воды с суспензией действует большая центробежная сила. Результатом этого процесса является то, что размеры вихреобразования в суспензии больше, чем в чистой воде.

Проделанный корреляционный и спектральный анализ хорошо показывает вертикальную структуру жидкости, в которой турбулентность создается колеблющейся решеткой. Наличие в такой жидкости суспензии приводит к тому, что часть турбулентной энергии расходуется на поддержание твердых частиц суспензии во взвешенном состоянии, т. е. практически поглощается частицами суспензии.

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

#### Литература

1. Пыркин Ю.Г., Петров В.П., Иванова И.Н., Силаев М.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. **37**, № 5. С. 730.
2. Пыркин Ю.Г., Петров В.П., Иванова И.Н., Силаев М.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 6. С. 78.
3. Villermaux E., Sommeria J., Hopfinger E.J. // Fluid Mech. 1991. **10**, No. 4. P. 427.
4. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М., 1971.
5. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М., 1981.
6. Hwang P.A. // J. Hydraulic Eng. 1985. **111**, No. 3. P. 85.
7. Гринвальд Д.И. Турбулентность русловых потоков. Ленинград, 1974.

Поступила в редакцию  
29.11.02

УДК 550.831(26); 528.563(26); 550.831.23

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ УСКОРЕНИЙ ОПОРЫ ПРИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА МОРЕ

**В. Л. Пантелеев, З. Н. Левицкая, Т. С. Чеснокова, А. В. Логинов**

(ГАИШ)

E-mail: pant@sai.msu.ru

**Работа является продолжением серии статей, посвященных численному моделированию измерения удельной силы тяжести в движении. Получены математические алгоритмы для построения моделей случайных процессов, включающих в себя смещение, скорость смещения и ускорение опоры, обусловленные качкой корабля.**

Качка корабля, в условиях которой приходится выполнять определения силы тяжести, является случайным процессом. Выбор того или иного алгоритма обработки наблюдений зависит от свойств этого случайного процесса. Например, является ли случайный процесс стационарным или нет, следует вывод о пригодности или не пригодности применения разработанного теоретиками метода фильтрации нижних частот (фильтр Винера или алгоритм Калмана). В случае стационарности случайного процесса удается построить оптимальный алгоритм, существующий в реальном времени [1]. За критерий оптимальности принят минимум средней квадратической погрешности при фильтрации удельной силы тяжести. Однако если допустить запаздывание во времени, то точность значительно возрастает [2]. Как известно, обработка случайных процессов связана либо с фильтрацией, либо с прогнозом, либо со сглаживанием. Задача измерения какой-либо группы гармоник безотносительно ко времени стоит несколько особняком от выше перечисленных. Именно с ней сталкиваются специалисты, работающие в области измерения силы тяжести на подвижном основании.

Ситуация осложняется и тем, что опора совершает не только поступательные движения, но и вращательные. Кроме того, возмущающие ускорения, даже если они и не содержат очень низких частот ( $0.05 \text{ с}^{-1}$  и ниже), возникают из-за нелинейности измерительных устройств. Эти возмущающие ускорения нельзя отфильтровать, не искажая «полезный сигнал» — изменение силы тяжести. Отсюда возникает необходимость моделирования таких ускорений с тем, чтобы из выходного сигнала гравиметра их удалить.

Моделирование возмущающих ускорений прежде всего необходимо для построения алгоритмов фильтрации силы тяжести на фоне инерциальных помех, какие создает вертикальная компонента ускорения, превышающая изменение полезного сигнала в десятки тысяч раз. Основным свойством алгоритма фильтрации нижних частот является заграждение гармоник с частотой, превышающей некоторое значение  $\omega_0$ , называемое частотой среза, но при этом все гармоники с меньшей частотой должны проходить через фильтр нижних частот без искажения. Строго говоря, таких алгоритмов не существует.