

Н. В. КОНТОБОЙЦЕВА

К ИССЛЕДОВАНИЮ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ВОЛНЕНИИ

В результате корреляционного анализа осциллографных записей пульсаций модуля скорости при волнении в море выяснено, что с возрастанием высоты волны и скорости ветра радиус автокорреляции уменьшается. Это свидетельствует о расширении высокочастотной области спектра при увеличении степени волнения. Интегральные временные масштабы, определенные по корреляционным функциям, с которых снята периодическая составляющая, изменяются от 0,2 до 1,2 сек. Закон Колмогорова — Обухова приближенно выполняется только в области этих масштабов.

Исследование турбулентности при волнении представляет интерес для изучения баланса энергии при волнении и для выяснения вопроса о механизме перемешивания в море.

Турбулентность при волнении исследовалась теоретически С. В. Доброклонским [1]. На основании трохоидаальной теории волн и соотношений полуэмпирической теории турбулентности им была получена формула для коэффициента турбулентной вязкости в волне.

Теория С. В. Доброклонского была проверена рядом авторов и довольно хорошо согласуется с данными, полученными из наблюдений [2].

Однако для полного ответа на вопрос, каков механизм турбулентности в море при волнении, знание одного коэффициента турбулентной вязкости еще недостаточно, необходимо исследовать структуру турбулентных вихрей, возникающих при орбитальном движении.

В последнее время в литературе появились работы, относящиеся к экспериментальным исследованиям турбулентности в морях и океанах. Эти работы выполнены с помощью высокочувствительной аппаратуры [2—8].

Однако даже при отсутствии волнения данных по исследованию корреляционных и структурных функций все еще мало [5, 6].

Механизм турбулизации в наиболее сложном случае при волнении, когда частицы жидкости совершают орбитальные движения, до сего времени экспериментально не исследовался.

В экспедициях кафедры физики моря и вод суши МГУ в 1957—1958 гг. под руководством А. Г. Колесникова производились экспериментальные исследования турбулентности в поверхностном слое моря при волнении. Получен большой материал в виде осциллографных запи-

сей флуктуаций модуля вектора скорости и волнового давления на разных глубинах: от 0,5 до 2 м.

Некоторые результаты этих экспериментов, относящиеся к исследованию кинематики волн, опубликованы в статье [8].

Дальнейшая статистическая обработка этого материала позволила получить характеристики пульсаций модуля вектора скорости при разном режиме волнения.

Проведение эксперимента

Измерения пульсаций модуля вектора скорости в волне производились полупроводниковым термогидрометром. Датчиком скорости служил термистор марки МТ-54. Волновое давление измерялось тензovolнографом.

Скорость ветра записывалась на осциллограф с помощью контактных анемометров, установленных на 5 горизонтах над поверхностью моря.

Описание аппаратуры и методики измерения волнового давления и модуля скорости подробно дано в работе [8].

Для записи пульсаций модуля вектора скорости в этой работе использовали осциллограф ОМС-1 с шлейфами чувствительностью $2,8 \cdot 10^{-8}$ а/мм и $1,8 \cdot 10^{-8}$ а/мм, с частотой собственных колебаний 20 гц.

Основной частью электрической схемы являлся мост МВЛ-47. Питание моста осуществлялось постоянным током от сухих элементов с э. д. с. 2—4 в.

Определенный ток накала устанавливался с помощью КМС-6 и фиксировался по миллиамперметру. Чувствительность полупроводникового термогидрометра, как известно, зависит от режима работы и чувствительности шлейфов. В наших измерениях чувствительность изменялась от 0,3 до 2 см/сек на 1 мм записи.

Исследуемые записи были получены при токе накала 1,2 миллиампера. В этом режиме тарировочная кривая была близка к линейной в диапазоне скоростей от 10 до 40 см/сек.

Чувствительность установки для этого диапазона скоростей составляла 1 см/сек на 1 мм записи. Коэффициент инерции установки не превышал 0,1 сек.

Для расшифровки записей пульсаций модуля скорости необходимо рассчитать орбитальную скорость и определить для каждого интервала скорости чувствительность по тарировочному графику.

Измерения модуля скорости и волнового давления производились в поверхностном слое моря при развивающемся и установившемся волнении на расстоянии 45 и 130 м от берега.

На расстоянии 45 м от берега датчики модуля скорости и волнового давления укреплялись на раме, скользящей по направляющим. На расстоянии 130 м, где глубина была 10 м, датчики крепились на вехе, установленной на большой притопленной плавучести.

Регистрирующая аппаратура и мостовые схемы размещались в палатке на скале прибоев. Измерения производились на Крымском побережье Черного моря (пос. Качивели, Черноморское отделение Морского гидрофизического института АН СССР). С помощью вышеописанной аппаратуры были получены синхронные записи флуктуаций модуля вектора скорости в волне и колебания волнового давления (см. рис. 1). Как видно из осциллограммы пульсации модуля вектора, скорости в волне имеют вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого среднего значения. На фоне колебаний с периодом волны ($T_{cp} = 2,6$ сек)

видны пульсации турбулентного происхождения с периодами 0,2, 0,3, 0,4, 0,6 сек и с амплитудами от 0,6—10 см/сек, которые составляют 20—30% от орбитальной скорости. Эти записи отражают тот факт, что при затухании орбитальной скорости с глубиной, когда имеет место сдвиг одних слоев относительно других, возникают вихри различных масштабов.

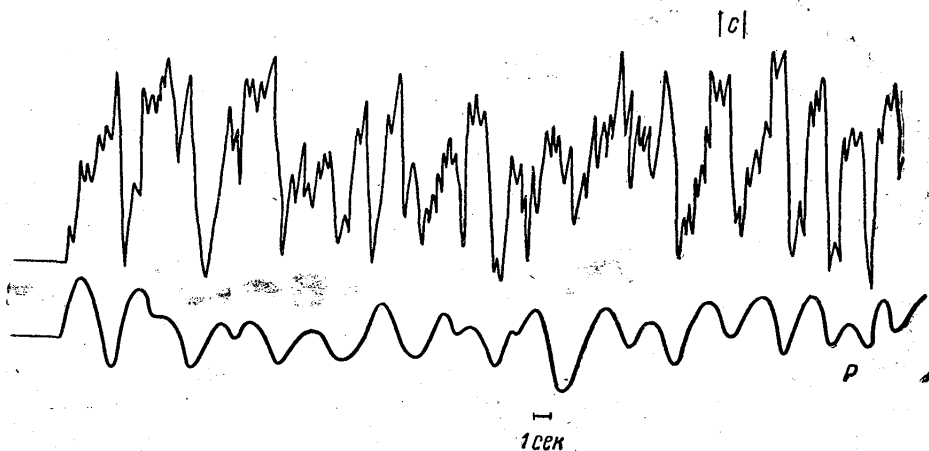


Рис. 1. Копия осциллограммы. Верхняя кривая—колебания модуля скорости $|c|$, нижняя кривая—волновое давление $|p|$ при $h_{cp}=40$ см и $T_{cp}=2,6$ сек

Результаты измерений пульсаций модуля скорости в волне

Известно, что турбулентность в море обусловлена течением, волнением, конвекцией.

Для экспериментального исследования механизма турбулентности при волнении необходимо производить измерения, когда скорость течения невелика и градиенты температуры малы. Такие условия имели место в наших экспериментах: скорость ветра изменялась от 2,5 м/сек до 8,5 м/сек и средняя скорость течения не превышала 2,5 см/сек, градиенты температуры не превышали 0,05 град/м.

Обрабатывались трехминутные записи пульсаций модуля скорости, на которых не было ухода средних величин, следовательно, выполнялось условие стационарности.

Для обработки таких записей может быть применен математический аппарат случайных функций.

С помощью электрических счетных машин и коррелятора были получены среднеквадратичные значения пульсаций, автокорреляционные функции, структурные функции и интегральные временные масштабы турбулентности, соответствующие разным режимам волнения.

На рис. 2 даны примеры нормированных автокорреляционных функций для развивающегося ветрового волнения. τ — период осреднения, изменяющийся от 0,1 ÷ 15 сек.

Кривые 1, 2 и 3 соответствуют средним высотам волн $h_1=30$ см, $h_2=50$ см, $h_3=90$ см и скоростям ветра $v_1=3,1$ м/сек, $v_2=5,5$ м/сек и $v_3=8,6$ м/сек, средние периоды волн равны $T_1=2,7$ сек, $T_2=2,8$ сек, $T_3=3,7$ сек.

Из графиков рис. 2 видно, что различный режим волнения сказывается на виде корреляционных функций. С возрастанием скорости ветра и высоты волны заметно уменьшается радиус автокорреляции и отчетливее вырисовывается периодическая составляющая на фоне общего спада кривой. Автокорреляционная функция пульсаций модуля скорости

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T c'(t) c'(t + \tau) dt \quad (1)$$

может быть представлена в виде суммы затухающей функции и периодической функции. В наших расчетах интервал времени T равен 3 мин.

В случае установившегося волнения и зыби нормированные автокорреляционные функции пульсаций модуля вектора скорости $r(\tau)$ и волнового давления почти совпадают (рис. 3). Как это следует из графика рис. 3, средний период основных колебаний модуля скорости равен среднему периоду волн — это имеет место при совпадении на-

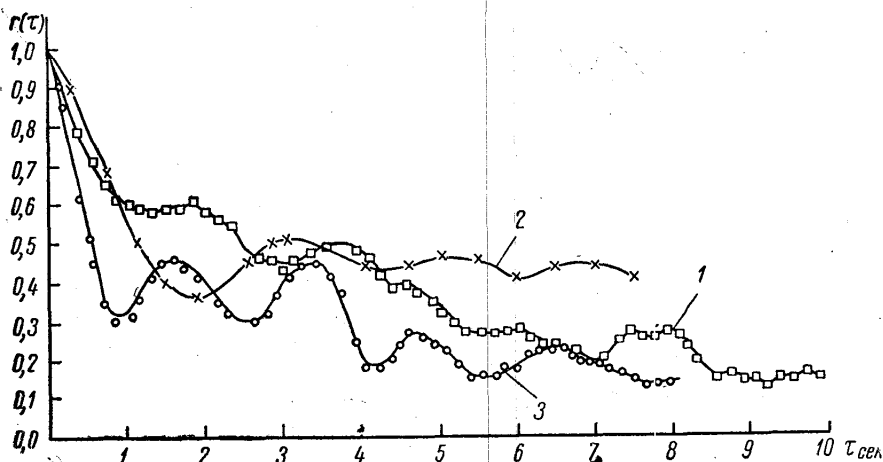


Рис. 2. Примеры автокорреляционных функций для развивающегося ветрового волнения: 1—при $h_{\text{ср}}=30$ см, $T_{\text{ср}}=2,7$ сек; 2—при $h_{\text{ср}}=50$ см, $T_{\text{ср}}=2,8$ сек; 3—при $h_{\text{ср}}=90$ см, $T_{\text{ср}}=3,7$ сек

правлений скорости распространения правильной синусоидальной волны и скорости течения [8].

В сложном случае для системы волн (зыби и ветровой волны) и при скорости течения, не совпадающей с направлением распространения волн, средний период модуля скорости не равен среднему периоду волн (рис. 4). Таким образом, по виду автокорреляционных функций $r(\tau)$ можно судить о степени волнения и о направлении течения.

Для записей в случае зыби (без ветровой волны) мы получили автокорреляционную функцию, которую можно представить в виде суммы некоторой затухающей функции, характеризующей случайный процесс, и периодической функции, характеризующей почти правильный волновой процесс. Образец такой автокорреляционной функции дан на рис. 5. Эту автокорреляционную функцию можно рассматривать как функцию суммы периодического и случайного процессов. Из теории известно, что для стационарных случайных процессов выполняется условие

$$r(\tau) = r_1(\tau) + r_2(\tau), \quad (2)$$

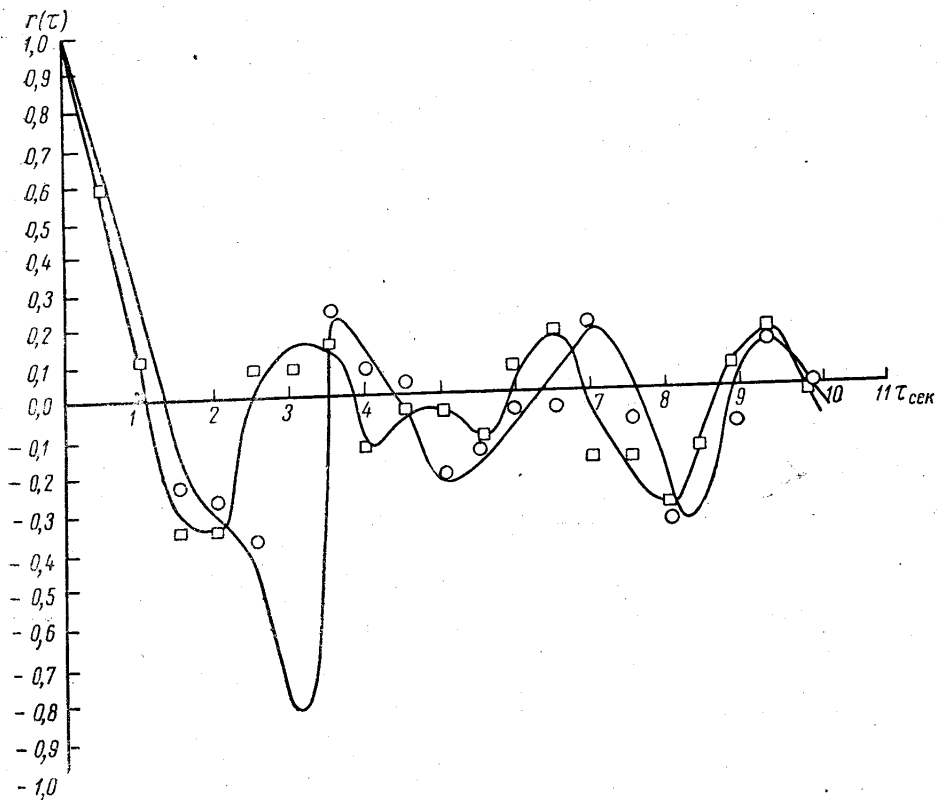


Рис. 3. Автокорреляционные функции модуля вектора скорости $\square - r_c(\tau)$ и волнового давления $\circ - r_p(\tau)$ в случае установившегося волнения и зыби при $h_{cp}=40$ см, $T_{cp}=3,6$ сек

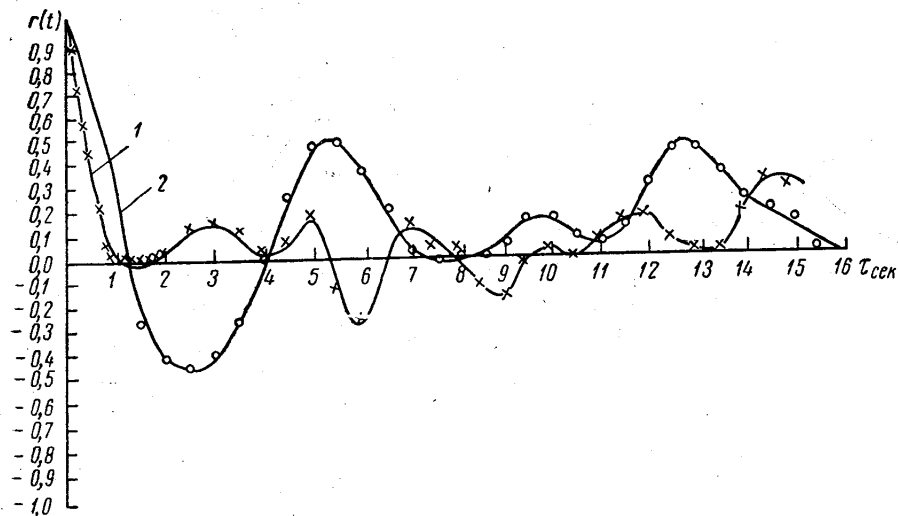


Рис. 4. Автокорреляционные функции $r_c(\tau)$ (кривая 1) и $r_p(\tau)$ (кривая 2) в случае зыби и ветровой волны при $h_{cp}=40$ см, $T_{cp}=3,6$ сек.

где $r(\tau)$ — автокорреляционная функция суммы периодического и случайного процессов, $r_1(\tau)$ — автокорреляционная функция периодического процесса, $r_2(\tau)$ — автокорреляционная функция случайного процесса [9].

Приближенно можно считать, что это равенство (2) выполняется и для рассматриваемого нами случая. На рис. 5 также дана автокор-

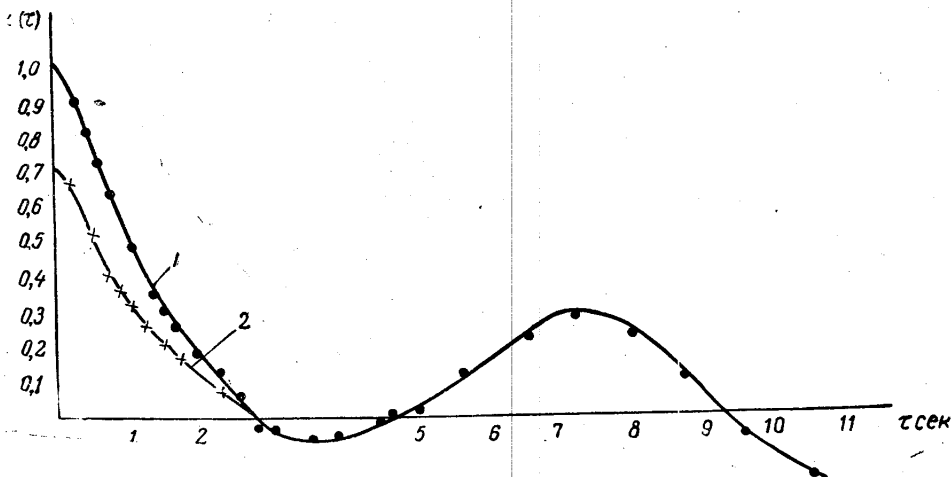


Рис. 5. Автокорреляционная функция $r(\tau)$ (кривая 1) в случае зыби при $h_{cp}=70$ см, $T_{cp}=4,8$ сек

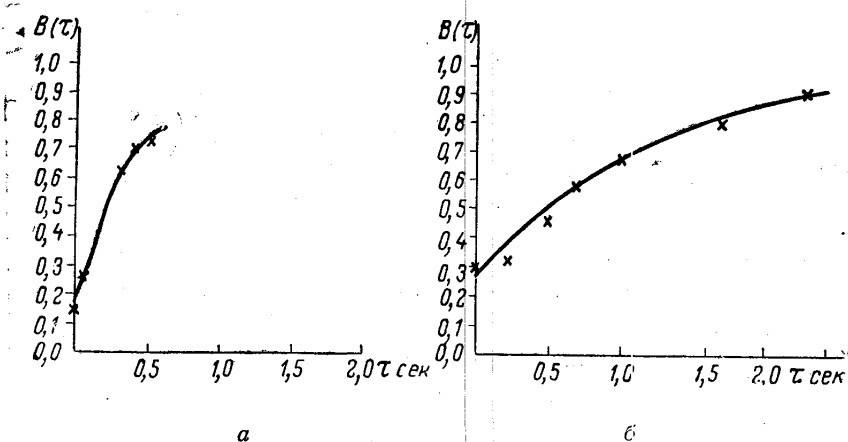


Рис. 6. Примеры структурных функций, соответствующие разным режимам волнения: а—при $h_{cp}=90$ см, $T_{cp}=3,7$ сек, $V=8,6$ м/сек, б—при $h_{cp}=70$ см, $T_{cp}=4,8$ сек, $V=5,7$ м/сек

реляционная функция $r_2(\tau)$ (кривая 2), которая получена как разность между корреляционными функциями суммарного и периодического процессов. Используя эту корреляционную функцию $r_2(\tau)$, можно определить интегральный масштаб турбулентных неоднородностей по формуле

$$\Theta = \int_0^{\infty} r_2(\tau) dt. \quad (3)$$

При определении Θ численное интегрирование производилось до значения $\tau = \tau_1$, при котором корреляционная функция уже подошла достаточно близко к нулю. Масштаб этих неоднородностей в случае

зыби, полученный путем численного интегрирования, равен 1,2 сек. При установившемся ветровом волнении интегральные временные масштабы изменялись от 0,2 до 1,2 сек.

По корреляционным кривым, с которых были сняты периодические составляющие, находились структурные функции $B(\tau)$ по соотношению

$$B(\tau) = 1 - r(\tau), \quad (4)$$

где $B(\tau)$ и $r(\tau)$ — нормированные функции. Примеры структурных функций, соответствующих разным режимам волнения, даны на рис. 6. Из зависимости $\lg B(\tau)$ от $\lg \tau$ были найдены показатели структуры $n_1 = 0,72$, $n_2 = 0,45$ и $n_{\text{ср}} = 0,58$. Теоретическое значение показателя структуры n из закона Колмогорова—Обухова для локальной изотропной турбулентности равно 0,66.

Таким образом, при ветровом волнении в условиях почти полного перемешивания закон Колмогорова—Обухова приближенно выполняется только в области малых масштабов от 0,2 до 1,2 сек.

Интересно сравнить полученные результаты с опубликованными данными по исследованию корреляционных функций для моря. Такое сравнение мы могли сделать по данным Н. А. Пантелеева [5, 6].

По данным Пантелеева, интегральные временные масштабы турбулентных образований в подледном слое океана составляют 4—8 сек. По нашим данным, интегральные временные масштабы, определенные по корреляционным кривым, с которых снята периодическая составляющая, изменялись от 0,2—1,2 сек.

Выводы

1. Различный режим волнения сказывается на виде корреляционных функций, радиус автокорреляции уменьшается с возрастанием высоты волны и скорости ветра, что свидетельствует об увеличении высокочастотной области спектра с увеличением степени волнения.

2. Закон Колмогорова—Обухова при ветровом волнении в условиях почти полного перемешивания приближенно выполняется только в области малых временных масштабов от 0,2—1,2 сек.

В заключение приношу глубокую благодарность А. Г. Колесникову и С. В. Доброклонскому за ценные советы и указания при выполнении этой работы. Выражаю благодарность Г. М. Никитиной за большую помощь при статистической обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доброклонский С. В. ДАН СССР, VIII, № 7, 1947.
2. Богуславский С. Г. Тр. Морского гидрофизического ин-та, АН СССР, XIII, 1958.
3. Колесников А. Г., Пантелеев Н. А. и др. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 3, 1958.
4. Колесников А. Г., Иванов В. Н. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астрон., физ., химии, № 6, 1959.
5. Пантелеев Н. А. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астрон., физ., химии, № 4, 1959.
6. Колесников А. Г. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 11, 1960.
7. Контобойцева Н. В. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 1, 1958.
8. Кононкова Г. Е., Контобойцева Н. В. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физики, астрономии, № 1, 1961.
9. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике, гл. 5, 1957.
10. Кононкова Г. Е., Контобойцева Н. В. «Океанология», № 6, 1962.

Поступила в редакцию
18. I 1961 г.

Кафедра
физики моря и вод суши