

Н. В. КОНТОБОЙЦЕВА

## О ПОТОКАХ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ В МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ БОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ

Проведено лабораторное исследование потоков количества движения в верхнем слое воды при распространении регулярных волн монохроматического типа большой крутизны. Получены распределения суммарных и чисто турбулентных потоков количества движения по глубине. Численные значения суммарных потоков количества движения на верхних горизонтах примерно на порядок больше потоков количества движения, определенных по пульсациям вертикальной и горизонтальной составляющих скорости.

В последнее время в лабораторных условиях в монохроматической волне достаточно большой высоты ( $h=3-16$  см) при безразличных условиях стратификации была зафиксирована область генерации турбулентности в верхнем слое воды. Толщина турбулентного слоя составляла одну-две высоты волны; зависимость безразмерной толщины турбулентного слоя от безразмерной высоты волны оказалась линейной [1].

Статистические характеристики турбулентности — средние абсолютные значения пульсаций горизонтальных и вертикальных составляющих скорости, средняя величина энергии турбулентных пульсаций на единицу массы — в этом слое затухали с глубиной [2].

В настоящей работе исследовалось распределение с глубиной потоков количества движения в волнах монохроматического типа большой высоты, где турбулентность была обусловлена градиентами орбитальной скорости и волновой переносной скорости Стокса, а также нерегулярностью орбитального движения.

Для получения потоков количества движения необходимо иметь данные одновременных измерений горизонтальных и вертикальных составляющих скорости в волне. Корреляция этих пар скоростей, умноженная на плотность, и дает знак и величину потока количества движения.

Мгновенное значение вертикального и горизонтального компонента скорости в монохроматической волне есть сложная величина:

$$V_x = (V_x)_{орб} + V_{ст} + V'_x, \quad (1)$$

$$V_z = (V_z)_{орб} + V'_z, \quad (2)$$

где,  $(V_x)_{\text{орб}}$  — горизонтальная составляющая орбитальной скорости,  $(V_z)_{\text{орб}}$  — вертикальная составляющая орбитальной скорости,  $V_{\text{ст}}$  — мгновенное значение скорости Стокса, или

$$V_x = V + V'_x \text{ и } V_z = W + V'_z,$$

где  $V = (V_x)_{\text{орб}} + V_{\text{ст}}$  — регулярная составляющая горизонтального компонента скорости,  $W = (V_z)_{\text{орб}}$  — регулярная составляющая вертикального компонента скорости,  $V'_x$  и  $V'_z$  — пульсации скорости.

Регулярные скорости  $V$  и  $W$  характеризуют регулярное движение с периодом волны, они находились при помощи гармонического анализа. Это можно было сделать, так как по теории волн Стокса скорости частиц  $V$  и  $W$  с высокой степенью точности определяются только первой гармоникой и не включают в себя более высокие гармоники [2]. Тогда

$$\overline{V_x V_z} = \overline{[V + V'_x][W + V'_z]} = \overline{VW} + \overline{V'_x W} + \overline{V V'_z} + \overline{V_x V'_z}.$$

Таким образом, для волн монохроматического типа корреляция мгновенных скоростей  $\overline{V_x V_z}$  включает в себя корреляцию регулярных скоростей  $\overline{VW}$  и корреляцию чисто турбулентных пульсаций вертикальной и горизонтальной составляющих скорости  $\overline{V'_x V'_z}$ , а также взаимные корреляции вида  $\overline{V V'_z}$  и  $\overline{V'_x W}$ , которые мы принимали равными нулю.

Следовательно, для волн монохроматического типа вертикальный поток количества движения выражается формулой

$$\tau = -\rho \overline{[V_x V_z]} = -\rho [\overline{VW} + \overline{V'_x V'_z}],$$

где  $\overline{VW}$  — взаимная корреляция регулярных скоростей,  $\overline{V'_x V'_z}$  — взаимная корреляция пульсаций,  $\rho$  — плотность воды.

Взаимная корреляция регулярных скоростей  $\overline{VW}$  не равна нулю, поскольку для монохроматических волн при турбулентном режиме движения сдвиг фаз между горизонтальной и вертикальной составляющими регулярных скоростей отличается от  $90^\circ$  на  $23$ — $30^\circ$  [1].

Корреляция мгновенных скоростей  $\overline{V_x V_z}$  рассчитывалась по экспериментальным данным для рядов, содержащих  $100$ — $110$  пар мгновенных значений вертикальных и горизонтальных составляющих скорости. Затем рассчитывались взаимные корреляции пульсаций  $\overline{V'_x V'_z}$ , для этого также составлялись ряды значений  $V'_x$  и  $V'_z$ . При этом интервал сдвига составлял  $0,1$  с, а весь основной интервал составлял  $30$ — $40$  с.

Суммарные и «чисто» турбулентные потоки количества движения определялись соответственно по формулам

$$\tau_1 = -\rho \overline{V_x V_z} \text{ и } \tau_2 = -\rho \overline{V'_x V'_z}$$

при  $\rho = 1$ .

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице.

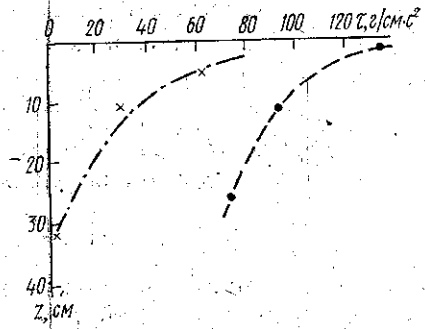
По данным табл. построены распределения по глубине потоков количества движения для двух режимов волнения.

Как видно из таблицы, среднее абсолютное значение горизонтальной составляющей мгновенной скорости  $|\overline{V_x}|$  уменьшается с глубиной, однако среднее абсолютное значение вертикальной составляющей мгновенной скорости  $|\overline{V_z}|$  на глубине  $11$  см возрастает, а затем убывает.

Результаты измерений и расчетные данные при разных режимах волнения

	Глубина $z$ , см	$ \overline{V_x} $ , см/с	$ \overline{V_z} $ , см/с	$ \overline{V_x V_z} $ , см/с <sup>2</sup>	$\overline{V_x}$ , см/с	$\overline{V_z}$ , см/с	$\overline{V_x V_z}$ , см/с <sup>2</sup>
Первый режим волнения $h=15$ см, $T=0,88$ с, $\delta=0,124$	1,65	90,88	31,77	-135,4	11,42	28,83	-13,05
	11,0	50,65	45,70	-94,1	23,88	22,51	-19,45
	25,20	22,20	23,50	-76,4	9,89	11,30	-0,63
Второй режим вол- нения $h=10,9$ см, $T=0,77$ с, $\delta=0,104$	1,40	34,0	36,20	-777,80	14,70	23,50	-48,50
	4,50	24,70	24,70	-62,10	4,15	6,55	-6,80
	10,30	22,20	15,00	-29,04	7,15	5,75	-6,50
	12,20	9,70	13,30	-0,68	10,40	4,20	-2,46
	31,50	3,20	3,20	-5,44	2,50	1,85	-0,12

Взаимная корреляция этих скоростей  $\overline{V_x V_z}$  имеет знак минус и по абсолютной величине убывает с глубиной. Суммарные потоки количества движения, равные произведению взаимной корреляции мгновенных скоростей  $-\overline{V_x V_z}$  на плотность  $\rho$ , имеют знак плюс. Тогда  $\tau_1 = -\rho \overline{V_x V_z}$  также убывает с глубиной. Суммарные потоки в верхних слоях воды на порядок больше потоков количества движения, вычисленных по пульсациям вертикальной и горизонтальной составляющих скорости, и эти потоки количества движения за счет турбулентных пульсаций затухают быстрее, чем суммарные потоки. Распределения суммарных потоков количества движения по глубине для первого и второго режима волнения даны на рис. 1.



Эти потоки количества движения, начиная с глубины  $z=1,65$  см и  $z=1,40$  см, затухают по экспоненциальному закону  $z=t^{-nx}$ .

Распределения потоков по глубине, построенные в логарифмическом масштабе (рис. 2), отвечают линейной зависимости вида:

$$\lg z = -n \lg e x \text{ или } z = -Kx,$$

где  $z = \lg z$  и  $K = n \lg e$ .

Значение параметра  $K$  для двух режимов волнения равно: для первого режима  $K_1=0,04065$  и для второго  $K_2=0,03041$ . С увеличением высоты волны абсолютное значение  $K$  увеличивается.

В таблице приведены также значения средней абсолютной величины пульсаций горизонтальной ( $|\overline{V_x}|$ ) и вертикальной ( $|\overline{V_z}|$ ) составляющей скорости, кроме того, указана величина взаимной корреляции этих скоростей.

Сопоставление величин взаимных корреляций мгновенных значений вертикальной и горизонтальной составляющих скорости с величинами взаимных корреляций пульсаций вертикального и горизонтального компонентов скорости показало, что они отличаются, как правило, на порядок.

Сравнение с данными, приведенными в [3], говорит о том, что численные значения потоков количества движения в монохроматических волнах, рассчитанных для глубины порядка высоты волны, близки к значениям потоков количества движения, определенных в прибрежной части моря на глубине 1 м.

Итак, в монохроматических волнах большой высоты, в верхнем турбулизированном слое (от  $z=1,4$  см и  $z=31,5$  см) суммарные потоки количества движения, рассчитанные по взаимным корреляциям мгновенных скоростей, затухали с глубиной по экспоненциальному закону и изменялись от 777,8 до 0,68 дн/см<sup>2</sup>. Эти суммарные потоки количества движения определяли турбулентный обмен в поверхностном слое, где турбулентность в монохроматических волнах большой высоты вызывалась основными физическими причинами — уменьшением орбитальной и стоковой скорости с глубиной, а также нерегулярностью орбитального движения за счет сдвига фаз между вертикальной и горизонтальной составляющими орбитальной скорости не на  $\pi/2$ , а на  $\pi/2 + \alpha$  ( $\alpha$  составляет 23—30°).

Выполненные на основании наших экспериментальных данных расчеты показали, что в величину суммарных потоков количества движения основной вклад вносят потоки количества движения, возникающие за счет нерегулярности орбитального движения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Доброкловский С. В., Контобойцева Н. В. — «Физика атмосферы и океана», № 2, 1973.
2. Добровольский С. В., Контобойцева Н. В., Балашова Е. В. — «Океанология», 12, вып. 5, 1972.
3. Shonting D. H. — «J. Marine Res.», 25, N 2, 1967.

Поступила в редакцию  
5.5.1975 г.

Кафедра  
физики моря  
и вод суши