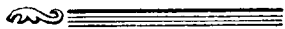
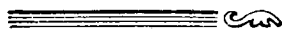


# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



№ 3—1972



УДК 551.463

С. В. ДОБРОКЛОНСКИЙ, В. Ф. МАХРОВ, Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ И ВЫСОТЫ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО СЛОЯ НАД ДНОМ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Рассматриваются результаты измерений параметров шероховатости морского дна в прибрежной зоне Черного моря и высоты логарифмического слоя над дном. Обнаружено, что распределение скорости в придонном слое не всегда следовало логарифмическому закону. Для случаев выполнения логарифмического распределения были вычислены параметры шероховатости, которые для данного района имели порядок 13—40 см.

В настоящее время имеется очень мало работ, посвященных определению параметров шероховатости морского дна в придонных условиях и особенно высоты, до которой изменение скорости происходит по логарифмическому закону. Одной из первых работ, посвященных измерению параметра шероховатости морского дна, надо считать работу [1]. Параметр шероховатости  $z_0$ , который определялся на основании измерений скорости приливного течения на высотах 26, 51 и 126 см над дном, составлял 2 см. Характер грунта и профиль дна при этом не определялись.

В работе Лессера [2] измерение скорости велось вертушками на горизонтах 20, 40, 80 и 160 см от дна при полной глубине воды около 46 м. Над дном из песчаного гравия и илистого песка режим течения был «шероховатым» с параметрами шероховатости дна соответственно 1,3 и 1,6 мм. Анализ грунта показал, что он был плохо отсортирован по размерам; для песчаного гравия определяющий диаметр был равен 2 мм, а для илистого песка 1,5 мм. Отсюда следует, что 35% частиц грунта имели в первом случае диаметр больше 2 мм, а во втором случае — 1,5 мм. В этом же исследовании при измерениях над илистым дном имел место режим течения без проявления шероховатости (гидродинамически гладкий поток), и параметр шероховатости грунта оказался равным 0,2 мм. Материал был хорошо отсортирован и имел средний диаметр 0,05 мм. В конце работы Лессер отмечает, что кроме собственной шероховатости материала грунта на гидродинамические характеристики потока могли оказывать влияние рябь или другие неровности профиля дна.

Исследования шероховатости были проведены также Стернбергом [3] в Тихом океане на больших глубинах (от 2030 до 3785 м). По-

следовательное фотографирование облачков краски, выпускавшихся из трех сопел установки, стоявшей на дне, позволяло определить скорости течения на горизонтах от 4 до 64 см над дном. Согласно Стернбергу, поток был переходным и параметр шероховатости, имевший, очевидно, условный смысл, колебался в очень широких пределах от 0,0001 до 4,4 см. Гранулометрический анализ донных осадков не делался, однако подводные фотографии говорят о наличии на дне шероховатостей в виде рифелей высотой 0,5—1 см. Во всех упомянутых работах определение максимальной высоты, до которой простирался над дном слой с логарифмическим законом изменения скорости, не проводилось. Более того, многие из полученных Стернбергом профилей скорости (даже на этих малых высотах) не были логарифмическими и в силу этого не учитывались. Однако в [3] указано, что, согласно частному сообщению Вимбуша и Манка (США), в том же районе Тихого океана ими проводились измерения высоты логарифмического слоя, который составлял 1—1,6 м при значении  $z = 2$  см.

Как следует из полуэмпирических теорий турбулентности Прандтля и Кармана, распределение скоростей в турбулентном пограничном слое как в трубах, так и над плоской поверхностью, должно следовать до некоторой высоты логарифмическому закону

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right), \quad (1)$$

где  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  — так называемая «динамическая скорость» ( $\tau_0$  — напряжение трения на обтекаемой поверхности,  $\rho$  — плотность движущейся среды),  $\kappa$  — постоянная Кармана,  $z$  — расстояние от дна,  $z_0$  — параметр шероховатости для потока над стенкой [4, 5].

При малых скоростях потока, когда вязкий подслой вблизи стенки с преобладанием сил молекулярной вязкости достаточно толст, чтобы покрыть выступы шероховатой поверхности, параметр шероховатости  $z_0$  не является свойством граничной поверхности и зависит главным образом от характеристик потока. В этом случае говорят о гидродинамически гладком потоке. Для труб с «песочной» шероховатостью, когда на их гладкую поверхность наклеиваются одинаковые зерна песка, расположенные как можно ближе друг к другу, запишем

$$z_0 = \frac{\nu}{9,02U_*}, \quad (2)$$

где  $\nu$  — кинематическая молекулярная вязкость жидкости [4]. Критерием этого режима служит неравенство

$$0 \leq \frac{k_s u_*}{\nu} \leq 5, \quad (3)$$

в котором  $k_s$  — геометрическая высота (диаметр) зерен песка при песочной шероховатости. Обычно соотношение (2) применяется для течений над плоской поверхностью, хотя тогда вместо 9,02 берется несколько иное числовое значение [6].

При больших скоростях, когда вязкий подслой становится тоньше и все выступы песчаной шероховатости в трубах полностью выступают из вязкого подслоя, возникает «гидродинамически шероховатый поток». Критерием его служит условие

$$\frac{k_s u_*}{v} > 70. \quad (4)$$

При этом параметр шероховатости постоянный и зависит только от высот зерен песчаной поверхности трубы:

$$z_0 \approx \frac{k_s}{30}. \quad (5)$$

При  $5 \leq \frac{k_s u_*}{v} \leq 70$  мы имеем переходный режим.

В реальных условиях дело обстоит сложнее, так как шероховатость бывает часто вовсе непохожей на песочную. Отдельные элементы шероховатости материала дна (зерна песка и гравия, камни, водоросли) уже не имеют одинаковую высоту и приближенно сферическую форму. Кроме того, крупные элементы шероховатости с высотой  $k$ , оказывающие большое влияние на поток, обычно вовсе не располагаются близко друг к другу. Еще более значительное воздействие на структуру потока у морского дна оказывают неровности его профиля, имеющие по большей части волнообразный характер, так называемые донные рифели и дюны. У этих «донных волн» высоты  $k_w$  бывают часто одного порядка с высотами структурных элементов материала дна, однако чаще они превосходят размеры частиц материала грунта на несколько порядков.

Как указывает Шлихтинг [4], в трубах такие небольшие волнообразные возвышения с гребнями, расположенными поперек потока, дают в 12,5—25 раз больший эффект, чем песчаная шероховатость такой же высоты. По-видимому, этот эффект связан с образованием около гребней волн вихрей большего масштаба с горизонтальной осью, которые не образуются около отдельных структурных шероховатостей грунта, имеющих размер по высоте и в поперечном направлении одного порядка.

Таким образом, если аналогично трубам полагать, что рифели и дюны на дне моря также будут оказывать свое влияние на поток, то для гидродинамически шероховатого потока вместо (5) запишем

$$z_0 = \frac{k_w \cdot 12,5}{30} \div \frac{k_w \cdot 25}{30} \text{ или } z_0 = \frac{k_w}{2,4} \div \frac{k_w}{1,2}. \quad (6)$$

Можно отметить, например, что приведенные выше данные Лессера для  $z_0$  не согласуются с формулой (5) для песочной шероховатости, если считать, что фактическая высота шероховатости структурных элементов осадков  $k = k_s$ . И лишь считая, что малые рифели с высотами  $k_w$  равны или близки к высотам  $k$ , можно получить согласие с выражением (6). Для гидродинамически гладкого потока соотношение (6), очевидно, непригодно.

В настоящей работе на основе измерений профиля скорости приводятся результаты определения основных гидродинамических характеристик дна и пограничного слоя воды (включая высоту логарифмического слоя) в прибрежной зоне Черного моря при повышенной микро- и макрошероховатости дна. Измерения средней скорости течения  $u$  производились в течение суток 22 и 23 августа 1970 г. у Южного берега Крыма с борта НИС «Московский университет». Скорость ветра изменялась от 1 до 5 м/сек, волнение не превышало двух баллов, глубина моря в районе измерения была 33—34 м.

Регистрация  $u$  производилась с помощью вертушки чашечного типа [7] на разных горизонтах: начиная с 1 м от дна, когда прибор уста-

навливался на грунт, и до 5 м от поверхности воды. Одновременно на этих же горизонтах велись измерения температуры и солености воды. Вертушка крепилась к специальной треноге, при установке которой на дно высота вертушки над грунтом составляла 100 см. Регистрация скорости производилась с помощью шлейфового осциллографа Н-700, на вход которого подавались импульсы отсчета с электронного устройства вертушки. Шлейфовый осциллограф находился на борту корабля и был связан с вертушкой морским кабелем.

Результаты измерений  $u$  в придонной области до горизонта 13 м над дном приведены в таблице. На рисунке показан график зависимости средней скорости течения от глубины в различное время суток. Из графика видно, что высота придонного слоя, в котором скорости распределены по логарифмическому закону, изменяется от 8 до 9 м. Далее, из формулы (1) были получены следующие выражения для параметров шероховатости  $z_0$ , динамической скорости  $u_*$  и коэффициента трения  $c_{100}$  на высоте 100 см от дна:

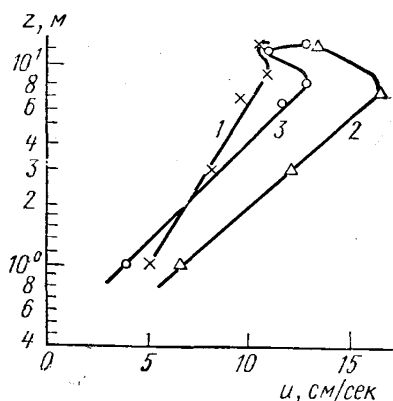
$$\ln z_0 = \frac{u_{12} \ln z_1 - u_1 \ln z_2}{u_2 - u_1}, \quad u_* = \frac{\kappa (u_2 - u_1)}{\ln z_2 - \ln z_1},$$

$$c_{100} = \frac{n^2}{u_{100}^2},$$

где  $u_1$  и  $u_2$  — скорости течения на горизонтах  $z_1$  и  $z_2$  соответственно, а коэффициент  $c_{100}$  определяется обычной квадратичной формулой для донного трения  $\tau_0 = c_{100} \rho u_{100}^2$ .

Вычисленные значения указанных в формуле величин также приведены в таблице.

Время, час	$z$ , м	$u$ , см/сек	$u_*$ , см/сек	$z_0$ , см	$c_{100}$
9	13	10,4	1,02	13,4	0,0384
	9	10,8			
	7	9,05			
	3	8,3			
	1	5,2			
10	13	13,4	1,93	25,9	0,0828
	7,8	16,5			
	3	12,1			
	1	6,7			
15	13	12,7	1,67	40,8	0,1743
	12	10,8			
	8	12,9			
	6,7	11,6			
	1	4			



Зависимость средней скорости течения от высоты над дном  $z$  в разное время суток: 1 — в 9; 2 — в 15 и 3 — в 10 час 23 августа 1970 г

Полученные сравнительно большие значения параметров шероховатости и высоты логарифмического слоя, по-видимому, можно объяснить наличием водорослей и больших неровностей профиля дна в районе измерений. Поскольку измерения глубины при небольших смещениях судна, стоявшего на якорю, давали колебания 1—1,5 м, то, полагая, что в данном случае на дне имелись дюны с указанными выше высотами, для объяснения такого явления можно применить формулу (6). Действительно, при  $k_{10} = 100$  см  $z_0$  будет иметь порядок 40—80 см. Сравнение этих величин с данными измерений указывает на их одинаковый порядок.

В заключение следует отметить, что профиль скорости у дна не всегда следовал отчетливо выраженному логарифмическому закону. Так, из 15 измерений было отобрано только 3, для которых логарифмический закон хорошо прослеживался до достаточно больших высот. В остальных случаях наблюдались нерегулярные изменения скорости с высотой. Можно предположить, что такое поведение скорости связано с появлением в воде «переслоенности» ее свойств; причина этого явления, отмечавшегося некоторыми исследователями, пока не ясна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sverdrup H. V., Johnson M. W., Fleming R. H. «The Oceans», Prentice-Hall Inc., N. Y., 1942, p. 480.
2. Lesser R. M. Some observations of the velocity profile near the sea Floore, TAGU 32, No. 2, 207—211, 1951.
3. Sternberg R. W. Field measurements of hydrodynamic roughness of the deep — sea boundary. Deep — sea Research, 17, 413—420, 1970.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
5. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидродинамика. т. 1. М., «Наука», 1965.
6. Deacon E. L., Weab E. K. Interchange of Properties between sea and air. Small—Scale interaction. The Sea (ed. by M. N. Hill), vol. 1, N. Y.—London, 1962, Interscience Publ., pp. 43—87.
7. Пыркин Ю. Г., Пивоваров А. А., Хунджуга Г. Г. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 2, 1967.

Поступила в редакцию  
27.1 1971 г.

Кафедра  
физики моря и вод суши