

УДК 551.465

Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ, Н. В. КОНТОВОЙЦЕВА,  
С. М. НОВОЧИНСКИЙ

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДРЕЙФОВОГО И КОМПЕНСАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ МОДЕЛИ БЕРЕГОВОГО ОТКОСА

В настоящей работе поставлена цель — получить в лабораторных условиях, моделирующих шельфовые районы моря, экспериментальные данные о распределении средней скорости  $\bar{U}$  по глубине в дрейфовом и компенсационном (градиентном) течениях, а также об изменении с глубиной турбулентного трения  $\tau$  и коэффициента эффективной вязкости  $\mu$  в градиентном течении, возникающем вблизи берегового откоса при установившемся ветровом волнении.

Значения  $\tau$  и  $\mu$  определялись по формулам:

$$\tau = -\rho \overline{u'w'}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $u'$  и  $w'$  — пульсации соответственно горизонтальной и вертикальной составляющих скорости течения, и

$$\mu = \tau / \left( \frac{du}{dz} \right) \quad (2)$$

(вертикальная координата  $z$  отсчитывалась от уровня невозмущенной поверхности жидкости).

Опыты проводились в аэрогидроканале с размерами  $25 \times 3 \times 1,23$  м. Глубина заполнения над подвижным дном канала составляла  $H=30,5$  см. На расстоянии 12,6 м от входа воздушного потока на дно канала была установлена клиновидная ( $2,5 \times 1,23 \times 0,35$  м) модель берегового откоса, переходящего в равномерное дно с уклоном 0,01. Створ измерений располагался на расстоянии 0,6 м от излома дна, создаваемого откосом. При длине ветрового разгона  $l=12$  м средняя высота волн была равна 3 см, период  $T=0,33$  с (элементы волн измерялись струнным волнографом), длина  $\lambda=17$  см (определена по фотографиям поверхностного слоя жидкости).

Высота потока воздуха, создаваемого вентиляторной установкой, равнялась 2,2 м. Профиль скорости ветра в средней части канала снимался при помощи вертушки. Измерения проводились с высоты 5 см, считая от среднего уровня воды, через каждые 5 см до высоты 70 см.

Пульсации горизонтальной и вертикальной составляющих скорости течения измерялись термогидрометром [1]. В качестве чувствительного элемента были использованы платиновые нити диаметром 20 мкм и длиной 5 мм. Тарировка гидрометра проводилась в тарировочном лотке путем протяжки датчика в спокойной воде. На тарировочных кривых в интервале скоростей, имеющих место при наших измерениях (1—5 см/с), зависимость имела линейный участок; при этом чувствительность прибора к изменениям продольной компоненты скорости и к изменениям угла атаки датчика составляла соответственно  $s_1=0,15$  см/с и  $s_2=0,01$  рад на мм шкалы регистратора, в качестве которого использовался шлейфовый осциллограф НОЮМ.

Вертикальный профиль средней скорости течения определялся по углу отклонения шарика диаметром 6 мм, подвешиваемого на нити к перемещаемому по вертикали держателю. При измерениях на разных

глубинах, в зависимости от скорости течения, использовались шарики различной плотности. Положение шарика регистрировалось путем фотографирования с частотой 45 кадров в минуту в течение 6 мин на каждом горизонте. Тарировка шариков была проведена в потоке воды заданной скорости. По углу отклонения шарика определялась скорость течения для каждого фиксированного момента. После этого результаты усреднялись.

Профиль скорости ветра  $V$  над водой по оси аэрогидроканала до высоты 70 см в полулогарифмическом масштабе представлен на рис. 1. Из рисунка видно, что  $V$  изменяется по логарифмическому закону. Это дало возможность определить основные характеристики воздушного потока:

а) динамическую скорость  $V_* = \frac{\kappa(V_2 - V_1)}{2,3(\lg z_2 - \lg z_1)}$ ,

где  $V_1$  и  $V_2$  — скорости ветра на горизонтах  $z_1$  и  $z_2$ ,  $\kappa=0,4$  — постоянная Кармана;

б) параметр шероховатости  $Z_0$ :  $\lg Z_0 = \frac{v_2 \lg z_1 - v_1 \lg z_2}{V_2 - V_1}$ ;

в) касательное напряжение ветра:  $\tau_b = \rho_b V_*^2$ ,

где  $\rho_b = 1,25 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> — плотность воздуха в лабораторных условиях. Были получены следующие численные значения:  $V_* = 36,4$  см/с,  $Z_0 = 0,007$  см,  $\tau_b = 0,166$  Н/м<sup>2</sup>.

Измеренный профиль средней скорости течений  $\bar{U}$  приведен на рис. 2. Из рисунка видно, что между дрейфовым и градиентным течениями можно выделить слой толщиной порядка 30 мм, в котором средняя продольная скорость была мала. Рассмотрим рис. 3, на котором изображен тот же профиль в полулогарифмическом масштабе. По характеру изменения  $\bar{U}$  с глубиной весь график можно разбить на 3 участка, соответствующие трем различным слоям жидкости.

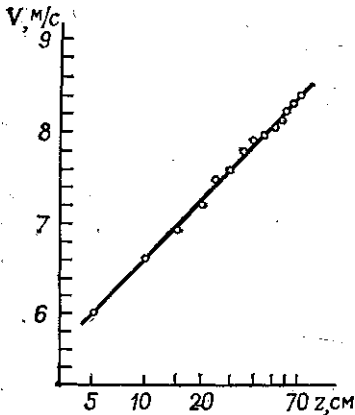


Рис. 1. Профиль скорости ветра в полулогарифмическом масштабе

1) Самый верхний слой (от поверхности до  $\eta = z/H = 0,17$ , где имеется излом графика) представляет собой поверхностную часть дрейфового течения. Его толщина в нашем эксперименте примерно равна удвоенной высоте волн. Можно предполагать, что его кинематика и динамика в основном определяются волнением (см. [2, 3]). Прослойка от  $\eta = 0,17$  до  $\eta = 0,23$  является частью дрейфового течения, где влияние волновых движений уменьшается.

2) Во втором слое (от  $\eta = 0,23$  до  $\eta = 0,4$ , где наблюдается следующий излом) при наличии значительных вертикальных движений жидкости направление продольной скорости, как показали визуальные наблюдения, часто меняет знак (осредненные значения ее близки к нулю). Таким образом можно считать, что между дрейфовым и градиентным течениями образуется переходный слой, в котором суммарное действие факторов, вызывающих эти течения, компенсируется или почти компенсируется. Для верхнего слоя такими факторами являются увлечение ветром и стоков волновой перенос, для нижнего — градиент давления.

3) Третий слой ( $\eta > 0,4$ ) представляет собой градиентное течение.

Для выяснения его динамики нами было получено распределение турбулентного трения  $\tau$  с глубиной. При вычислении  $\tau$  обрабатывались участки записи пульсаций  $u'$  и  $w'$  компонент мгновенной скорости длительностью 43,2 с, для которых выполнялось условие стационарности. В результате статистической обработки были получены среднеквадра-

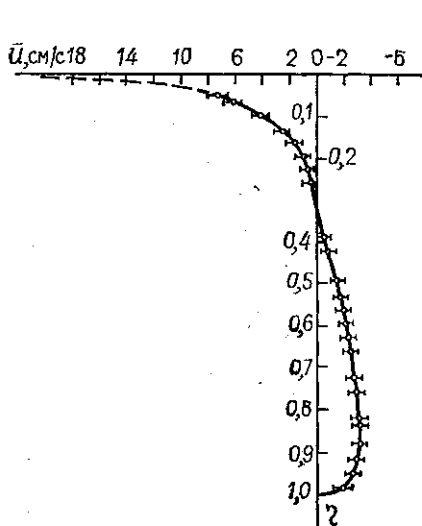


Рис. 2. Распределение средней скорости течения  $\bar{U}$

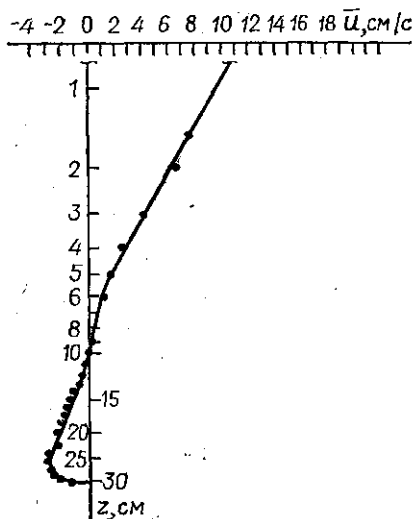


Рис. 3. Распределение средней скорости течения в полулогарифмическом масштабе

тные отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно продольной и вертикальной компонент скорости, а также взаимная корреляция  $R_{12} = \frac{\overline{u'w'}}{\sigma_1\sigma_2}$ , которые определялись по 432 значениям  $u'$  и  $w'$ .

Среднеквадратичные отклонения вычислялись по формулам:  $\sigma_1 = \sqrt{D_{u'}}$ , где  $D_{u'}$  — дисперсия пульсаций продольной составляющей скорости,

$$D_{u'} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N u_i'^2 \quad (N = 432),$$

а  $\sigma_2 = \sqrt{D_{w'}}$ , где  $D_{w'}$  — дисперсия пульсаций вертикальной составляющей скорости,

$$D_{w'} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N w_i'^2 \quad (N = 432).$$

Числовые значения турбулентного трения определялись по формуле

$$\tau = -\rho R_{12} s_1 s_2 \bar{U}.$$

График распределения  $\tau$  по глубине приведен на рис. 4. Из рисунка видно, что в области градиентного течения  $\tau$  имеет два противоположных по знаку максимума, при этом смена знака происходит на глубине, где средняя скорость компенсационного течения достигает наибольшего значения.

Следует также отметить, что абсолютные значения  $\tau$  убывают по мере приближения к верхней границе градиентного течения, которое поэтому можно в первом приближении рассматривать как течение между двумя параллельными стенками — дном и переходным слоем.

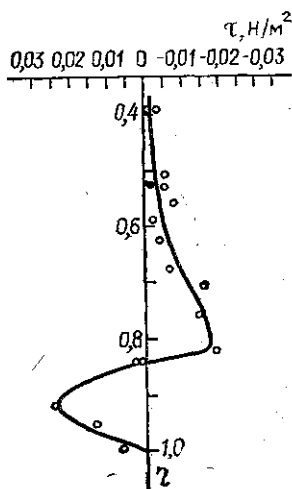


Рис. 4. Вертикальное распределение турбулентного трения в области градиентного течения

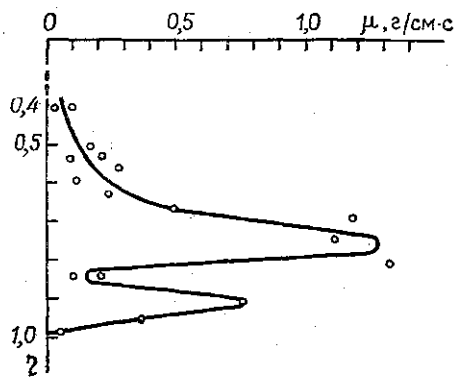


Рис. 5. Вертикальный профиль коэффициента эффективной вязкости в градиентном течении

По распределению турбулентного трения  $\tau$  и профилю средней скорости течения  $\bar{U}$  были рассчитаны значения коэффициента эффективной вязкости  $\mu$  согласно соотношению (2). При этом градиент средней скорости  $\bar{U}$  определялся как тангенс угла наклона касательной, проведенной через соответствующую точку графика  $\bar{U}$ , а также вычислялся по формуле

$$\frac{d\bar{U}}{dz} = \frac{a_i}{z}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $a_i$  — соответственно коэффициенты аналитических зависимостей  $\bar{U} = U_{0i} - a_i \ln z$ , полученных для трех прямолинейных участков профиля скорости течения в полулогарифмическом масштабе (см. рис. 3).

Значения  $U_{0i}$  и  $a_i$  приведены

$i$	$\eta$	$U_{0i}$ , см/с	$a_i$ , см/с
1	0—0,17	9,4	4,9
2	0,23—0,40	5,3	2,4
3	0,40—0,9	7,5	3,2

в таблице.

На рис. 5 приведен график изменения коэффициента турбулентной вязкости  $\mu$  с глубиной в градиентном течении. Из рисунка видно, что  $\mu$  резко возрастает при удалении от твердой границы потока и имеет максимумы на относительных глубинах  $\eta=0,9$  и  $\eta=0,8$ . Кроме того, всюду  $\mu > 0$ , даже при смене знака у градиента скорости течения, что объясняется одновременной сменой знака и у значений турбулентного трения  $\tau$ . Следует отметить также убывание  $\mu$  при приближении к переходному слою, разделяющему два течения.

Следует отметить также убывание  $\mu$  при приближении к переходному слою, разделяющему два течения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букина Л. А., Шелковников Н. К., Миронов П. В. Методика тарировки термогидрометров по модулю и угловой составляющей вектора скорости.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1974, 15, № 5, 574—579.
2. Доброклонский С. В., Лесников Б. М. Исследование динамических характеристик дрейфовых течений при ветровой волне в лабораторных условиях.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1975, 11, № 9, 942—949.
3. Доброклонский С. В., Лесников Б. М. Исследование приповерхностного слоя дрейфовых течений в лабораторных условиях.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1972, 8, № 11, 1177—1187.

Поступила в редакцию  
13.06.78