

В. М. Кушнир

Структура волнового придонного пограничного слоя над ровным и неровным дном

Сопоставление шести известных моделей волнового придонного пограничного слоя (ВППС) показало их идентичность для ровного дна и значительное различие для других условий. Оценки толщины ВППС и коэффициента вертикальной диффузии импульса выполнены на основе соотношений $k - \varepsilon$ -теории. Обоснованность этих оценок проверена путем сопоставления измеренных и вычисленных величин скорости трения. Это сопоставление показало достаточно хорошее совпадение, которое характеризуется коэффициентом корреляции, равным, 0,851.

Введение

Простые оценки показывают, что при высотах штормовых волн 5...7 м, периодах 6...8 с амплитуда скорости придонных волновых течений равна ~ 1 м/с на глубине 20 м и ~ 0,1 м/с на глубине 50...60 м. При больших высотах и периодах волн их влияние в придонной области может распространяться на глубины до 100...200 м. Таким образом, волновой придонный пограничный слой может охватывать обширные шельфовые зоны Мирового океана. В этих районах в настоящее время сосредоточена интенсивная хозяйственная деятельность: производится добыча полезных ископаемых, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений, расположены курортные зоны и районы аквакультуры.

Актуальность исследований структуры ВППС определяется следующими факторами.

1. В придонной области происходит переработка минеральной взвеси и детрита в биогенные элементы, вертикальные потоки которых активно влияют на первичные продукционные характеристики.

2. Вертикальные потоки кислорода в придонной области определяют скорость происходящих там окислительных процессов, условия жизни различных придонных сообществ, возможность гипоксии и, следовательно, качество водной среды.

3. Загрязнения, как правило, попадают в придонную область и затем после различных превращений их распространение в водной среде определяется параметрами диффузионных потоков.

4. ВППС в значительной мере влияет на параметры формирования слоя осадков, динамику наносов и придонное трение, которое необходимо учитывать в гидродинамических моделях мелководных районов.

Важность исследований структуры ВППС определяется не только этими факторами, но также диктуется необходимостью решения многих прикладных проблем морского строительства и эксплуатации различных гидротех-

нических сооружений, развития аквакультуры и курортных зон, разработки морских месторождений полезных ископаемых.

Несмотря на актуальность проведения исследований ВППС, он остается недостаточно изученным. С одной стороны, это связано с трудностью проведения там натуральных измерений, с другой, — со сложностью происходящих физических процессов. Эта сложность обусловлена следующим: движения жидкости тормозятся морским дном, причем нормальные и касательные составляющие этих движений замедляются по-разному; внешние движения являются безвихревыми или имеющими очень низкий уровень интенсивности турбулентности по сравнению с основной областью пограничного слоя; волновые составляющие движения оказывают значительное влияние на инерционные эффекты в пограничном слое.

Исследованию нестационарного придонного пограничного слоя посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ.

Обзоры [1, 2] посвящены детальным оценкам характеристик динамики водной среды на океанском шельфе, включая ветер, приливы, перепады плотности, градиенты атмосферного давления, колебания уровня. Наличие интенсивных вихревых движений ассоциируется со значительной вязкой диссипацией энергии в пограничном слое и играет важную роль при определении переноса импульса [3].

Различные аналитические и численные модели турбулентного волнового придонного слоя были созданы на основе представлений о пути перемешивания [4], турбулентной вязкости [5 – 11], $k - \varepsilon$ -моделей [12]. Были получены решения неоднородных уравнений пограничного слоя с различными аналитически заданными профилями коэффициентов диффузии импульса [13]. Модели ВППС, учитывающие течения и неровное дно, представлены в [1, 14 – 16]. Показано, что в ВППС осуществляется направленный перенос массы [17, 18].

Известны результаты лабораторных и натуральных экспериментов, выполненных с целью изучения структуры нестационарных (пульсирующих и волновых) придонных пограничных слоев над ровным и неровным дном [15, 19 – 35]. Во многих работах изучались условия развития и характеристики турбулентности в таких слоях [18, 36]. В [37] изложены результаты измерений характеристик придонного пограничного слоя в пульсирующем течении с гладким и шероховатым дном при больших числах Рейнольдса, определенных как $Re = aU_{mo} / \nu$, где U_{mo} , a — соответственно амплитуды горизонтальных колебаний скорости потока и смещения частиц жидкости, ν — коэффициент кинематической вязкости. Это исследование охватило диапазон параметра шероховатости a/k_s от 400 до 3 700 (k_s — средняя высота неровностей дна). Основным результатом состоял в том, что при введении относительной неровности дна $a/k_s = 2,7 \cdot 10^{-4}$ ($a/k_s = 3 700$) и при $Re = 6 \cdot 10^6$ интенсивность турбулентности увеличивалась на 50%, а напряжения Рейнольдса возрастали на 100 % по отношению к этим параметрам при ровном дне.

Показано, что во многих случаях профили скорости течения в ВППС в первом приближении соответствуют логарифмическому закону [14, 35, 38 – 40].

П. Матисен и О. Мадсен [31 – 33] сообщили об экспериментальных исследованиях ВППС в присутствии постоянного течения и без него. Они показали, что единственный масштаб неровности дна может быть использован для того, чтобы характеризовать состояние пограничного слоя, причем этот масштаб не меняется как в присутствии постоянного течения, так и без него.

Влияние неровностей дна на транспорт донного материала (наносов) изучалось во многих теоретических и экспериментальных работах [41, 42]. Показано, что такие характеристики зависят от безразмерных параметров a/k_s или k_s/h , где h – глубина, а также от числа Шильдса Y [12, 27, 37, 43]. Вследствие неровностей дна формируются дополнительные тангенциальные напряжения. Они определяют рост транспортной способности ВППС, и при этом переменные турбулентные напряжения распространяются с фазовым сдвигом, равным $\sim 30^\circ$ по отношению к колебаниям орбитальной волновой скорости. Были получены различные эмпирические соотношения для оценки этих напряжений в зависимости от параметров волновых возмущений и размеров фракций донного материала [44 – 48].

Анализ выполненных исследований показал, что основные результаты моделирования структуры и экспериментальных исследований ВППС получены при условии ровного дна или когда характерные размеры неровностей дна значительно меньше амплитуды волновых колебаний вблизи его поверхности [49]. Общие зависимости между масштабами неровностей дна и параметрами ВППС изучены недостаточно. Цель настоящей работы состоит в анализе этой проблемы и получении некоторых новых решений.

Сопоставление некоторых моделей ВППС

Обычно параметризация турбулентных напряжений в ВППС $\tau = -\rho \langle u'w' \rangle$ выполняется в следующем общем виде: $\langle u'w' \rangle = u_*^2$, $C_f = (u_* / U_{mo})^2$, где

u_* — скорость трения; $U_{mo} = \frac{\pi H}{T \operatorname{sh}(k_\lambda h)}$ — амплитуда скорости на верхней

границе пограничного слоя; H — высота волны; T — ее период;

$k_\lambda = 2\pi / \lambda$ — волновое число. Известны различные модели типа

$\sqrt{C_f} = (u_* / U_{mo}) = F(p_i, i = 1, 2, \dots)$, где p_i — параметры ВППС, в том числе величины, характеризующие неровность морского дна. Рассмотрим наиболее известные модели такого типа.

1. Модель из работы [50]:

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = 0,5 \sqrt{f_w \left(\frac{a}{k_N} \right)}, \quad (1)$$

$$f_w = \exp \left[-5,977 + 5,213 \left(a / k_N \right)^{-0,194} \right] \quad \text{при } 1,47 < a / k_N < 300,$$

$$f_w = 0,32 \quad \text{при } 1,47 > a / k_N,$$

где $k_N = 4k_s$ — масштаб неровности дна, или эквивалент шероховатости Никурадзе.

2. Модель из работы [48]:

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \frac{\kappa}{\ln(1,6 \frac{a}{k_s} + 1)}, \quad (2)$$

где $\kappa = 0,41$ — постоянная Кармана.

3. Модель из работы [27]:

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = 0,104 \left(\frac{h}{a} \frac{a}{k_s} \right)^{-0,182}. \quad (3)$$

4. Модели из работ [51] и [4]:

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{3\pi}{4} \sqrt{\frac{2}{\text{Re}}} \frac{a}{k_s}\right) + 5}, \quad \text{Re} = \sqrt{\frac{\pi}{\nu T}} \frac{H}{\text{sh}(k_\lambda h)}. \quad (4)$$

5. Модель из работы [1]:

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \frac{0,5\kappa}{[\text{ker}^2(2\sqrt{\zeta_0}) + \text{kei}^2(2\sqrt{\zeta_0})]^{0,5}}, \quad (5)$$

где $\zeta_0 = k_N / l_p = 4k_s / l_p$; $l_p = \kappa u_* / \omega$ — путь перемешивания; $\text{ker}(z), \text{kei}(z)$ — функции Кельвина нулевого порядка. После аппроксимации

$N_0(z) = [\text{ker}^2(z) + \text{kei}^2(z)]^{0,5} = Az^{-n}$, $A = 0,5355$, $n = 0,2594$, $5,5 < z < 0,55$, получим

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \left(\frac{0,5\kappa^{1-n}}{A} \right)^{1/(1+n)} \left(\frac{a}{4k_s} \right)^{-n/(n+1)}.$$

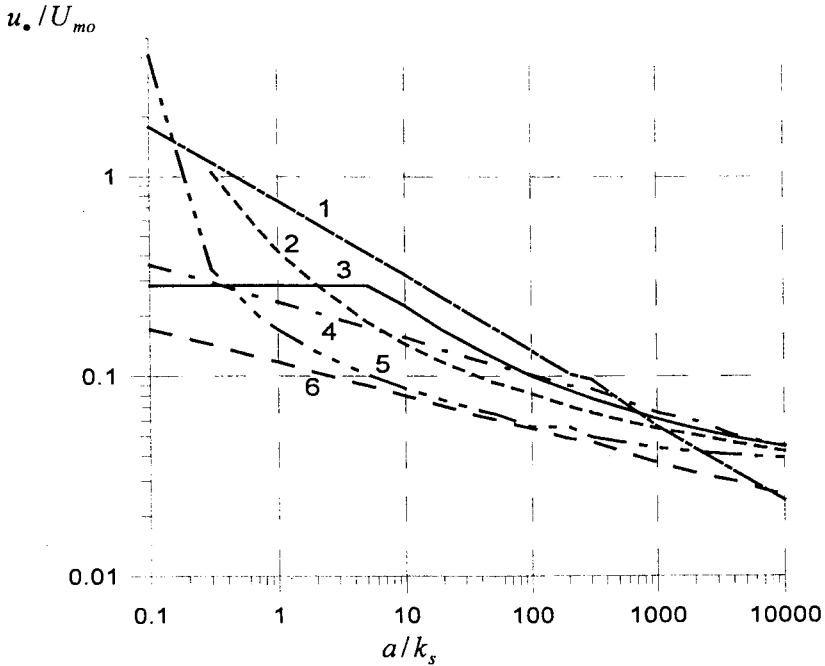
6. Модель из работы [15]:

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = 0,122 \left(\frac{a}{h} \right)^{0,1665} \left(\frac{a}{4k_s} \right)^{-0,1665}. \quad (6)$$

Зависимости $u_* / U_{mo} = f(a / k_s)$ для этих моделей приведены на рис. 1.

Выполненные различными методами оценки величины u_* / U_{mo} для ровного дна находятся в диапазоне 0,025 – 0,056 [23, 52], что соответствует приведенным на рис. 1 величинам при больших значениях a / k_s для всех рассмотренных моделей. При относительно небольших величинах a / k_s , что соответствует неровностям дна порядка 0,1...10 м, все рассмотренные модели дают существенно различающиеся результаты. Это является следствием недостаточной изученности структуры волнового пограничного слоя над не-

ровным морским дном, хотя указанные размеры неровностей часто встречаются в реальных условиях.



Р и с. 1. Зависимости $u_* / U_{mo} = f(a / k_s)$, вычисленные для различных моделей ВППС над ровным дном: 1 – из работы [50], 2 – [48], 3 – [27], 4 – [51] и [4], 5 – [1], 6 – [15]

Оценки коэффициента турбулентной диффузии и толщины ВППС

Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии ν_t и толщины ВППС δ выполнена на основе $k - \varepsilon$ -теории [9] и общего соотношения вида $u_* / U_{mo} = A(a / k_s)^{-n}$, которое соответствует функциональному виду рассмотренных выше модельных зависимостей (рис. 1). Для средней зависимости $u_* / U_{mo} = f(a / k_s)$ параметры A и n равны соответственно 0,25 и 0,6. Преобразование соотношения u_* / U_{mo} приводит к следующим оценкам пути перемешивания: $l_p = \kappa u_* / \omega$, $l_p = L k_s^n$, $L = \kappa A a^{1-n}$. Характерные величины кинетической энергии турбулентности K , скорости диссипации энергии в единице объема ε и скорости производства турбулентной энергии P определяются на основе известных соотношений $k - \varepsilon$ -теории:

$$K = \left(\frac{\nu_t}{l_p}\right)^2, \quad \varepsilon = C_\mu \frac{K^{1,5}}{l_p} = \frac{C_\mu \nu_t^3}{l_p^4}, \quad P = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 = \nu_t \left(\frac{U_{mo}}{\delta}\right)^2. \quad (7)$$

Преобразование соотношений (7) и $k - \varepsilon$ -уравнений

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \left(\frac{\partial K}{\partial z} \right) \right] + P - \varepsilon, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \right] + (c_1 P - c_2 \varepsilon) \frac{\varepsilon}{K}$$

при отсутствии плотностной стратификации приводит к следующей системе уравнений для неизвестных величин v_t, δ :

$$v_t^2 \left(\frac{1}{\sigma_k \delta^2} - \frac{C_\mu}{l_p^2} \right) T + \frac{U_{mo}^2 l_p^2 T}{\delta^2} = v_t, \quad (9)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{v_t}{\delta^2 \sigma_\varepsilon} + \left(\frac{c_1 U_{mo}^2 l_p^2}{v_t \delta^2} - \frac{c_2 C_\mu v_t}{l_p^2} \right),$$

где $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $c_1 = 1,44$; $c_2 = 1,92$ — постоянные параметры. Эта система приводится к кубическому уравнению для v_t :

$$v_t^3 \left(\frac{\sigma_\varepsilon c_2}{\sigma_k} - 1 \right) C_\mu T + v_t^2 \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_k} - 1 \right) l_p^2 + v_t (c_2 - c_1) U_{mo}^2 l_p^2 C_\mu T \sigma_\varepsilon + (1 - \frac{c_1 \sigma_\varepsilon}{\sigma_k}) U_{mo}^2 l_p^4 \sigma_\varepsilon = 0, \quad (10)$$

которое имеет решение

$$v_t = 2,13 U_{mo}^{2/3} l_p^{4/3} T^{-1/3} - 0,835 l_p^2 T^{-1}. \quad (11)$$

Толщина пограничного слоя δ вычисляется по следующему соотношению:

$$\delta = l_p \sqrt{\frac{T}{\sigma_k v_t} \left(\frac{v_t^2 + U_{mo}^2 l_p^2 \sigma_k}{l_p^2 + v_t C_\mu T} \right)}. \quad (12)$$

Рассмотрим пример расчета величин коэффициента турбулентной диффузии и толщины ВППС для следующих условий: глубина моря h равна 30 м, скорость ветра W — 10, 20, 30 и 40 м/с, размеры неровностей дна k_s изменяются от 0,0002 до 3 м. Вычисление параметров ветровых волн выполнено на основе известных соотношений полуэмпирической теории, в соответствии с которой средняя высота волны H и ее период T равны [53]:

$$H = 0,07 W^{0,8} g^{-0,4} H^{0,6}, \quad T = 18,7 W^{-0,2} g^{-0,4} H^{0,6}, \quad (13)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

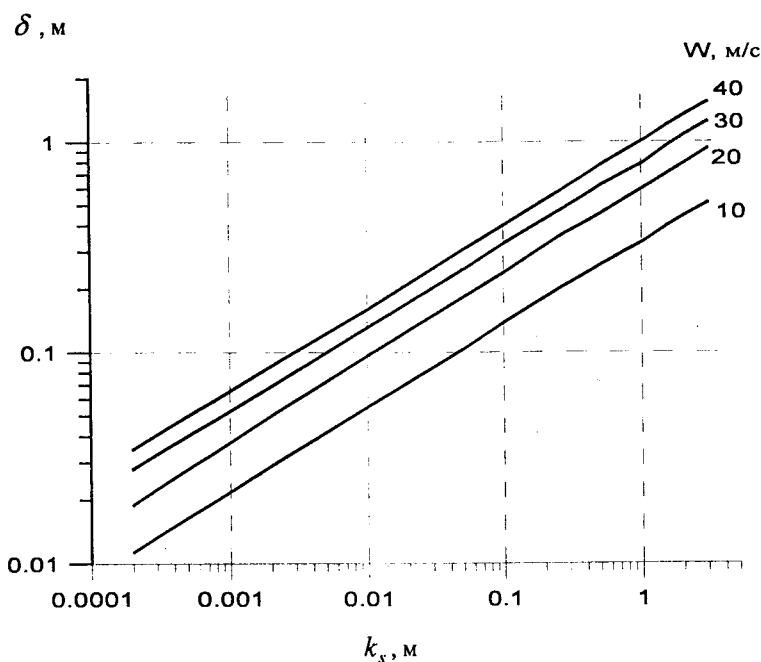
Вычисленные параметры поверхностных волн приведены в табл. 1.

Параметры поверхностных волн

Параметр	Скорость ветра, м/с			
	10	20	30	40
Средняя высота волны, м	1,36	2,37	3,28	4,13
Период, с	5,7	6,91	7,75	8,4
Скорость на верхней границе ВППС, м/с	0,220	0,460	0,685	0,904

Зависимости толщины ВППС и коэффициента турбулентной диффузии от размеров неровностей дна при указанных величинах скорости ветра приведены на рис. 2 и 3.

Таким образом, при ровном дне (размеры неровностей 1 — 10 см) характерные значения толщины пограничного слоя и коэффициента вертикальной диффузии составляют величины порядка 10^0 см и $10^{-1} \dots 10^1$ см²/с соответственно. Эти оценки совпадают с данными других исследований [1, 2].

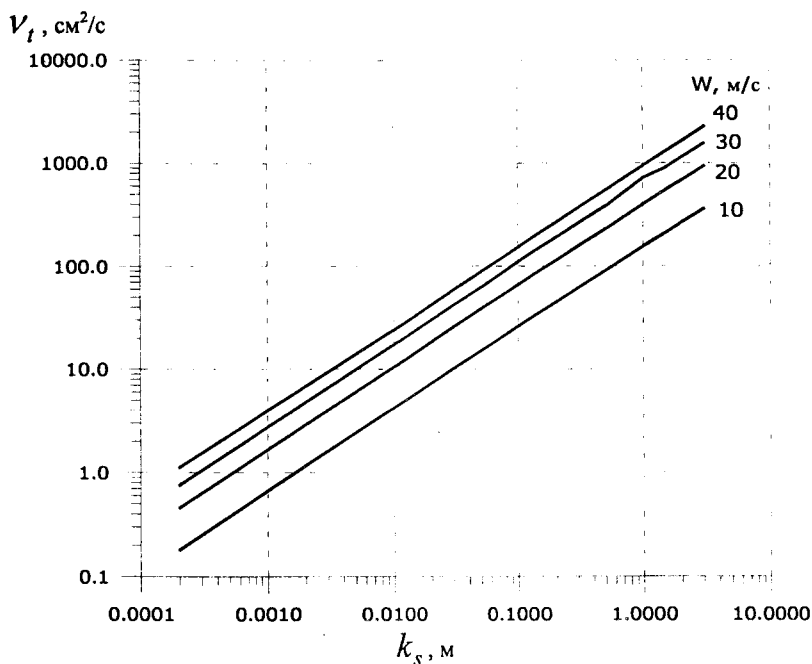


Р и с. 2. Зависимость толщины ВППС от размеров неровностей дна

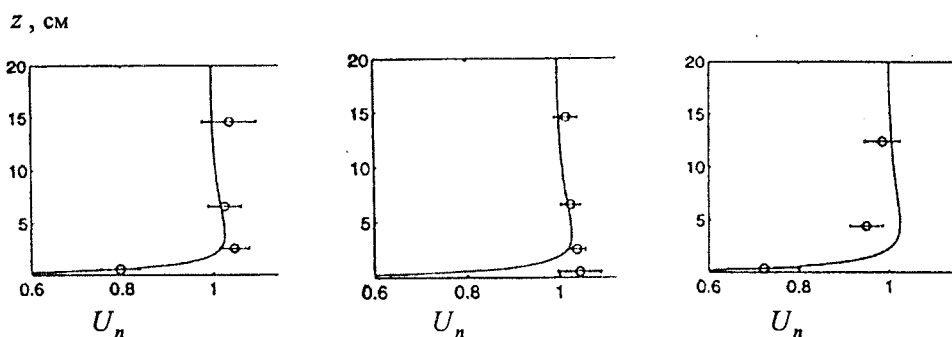
Экспериментальные данные

К сожалению, в настоящее время имеется ограниченное число экспериментальных исследований структуры ВППС, данные которых можно было бы использовать для верификации изложенных выше результатов. В [35] приведены результаты измерения профилей скорости течения в ВППС при помощи доплеровского лазерного измерителя скорости *LDV*. Эти измерения

были выполнены в условиях песчаного дна на глубине 6 м, в периоды стационарного режима волнения. На рис. 4 приведены характерные профили горизонтальной скорости в ВППС из [35] (стр. 20739 и 20400, рис. 10 и 12). Толщина пограничного слоя по данным измерений составляет 5...10 см, что хорошо соответствует зависимости, показанной на рис. 2 для условий ровного дна.

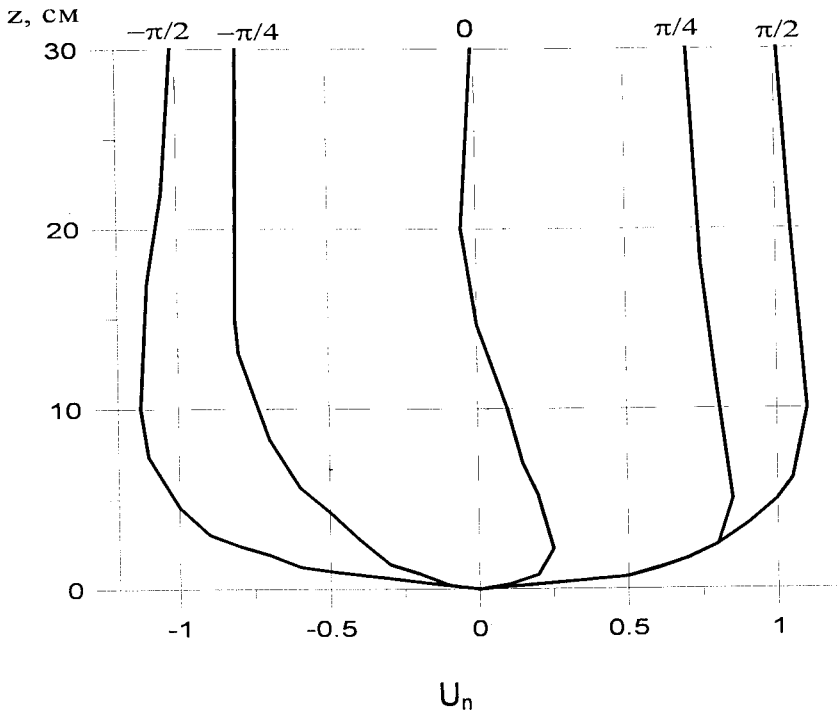


Р и с. 3. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии от размеров неровностей дна



Р и с. 4. Характерные примеры профилей амплитуды волновой скорости течения в ВППС по данным [35], U_n – нормированная амплитуда горизонтальной волновой скорости

Данные аналогичных измерений приведены в [54], профили горизонтальной скорости течения (рис. 11 из [54]) — на рис. 5.



Р и с. 5. Профили горизонтальной волновой скорости в ВППС, U_n — нормированная величина волновой скорости течения при различных фазах волнового возмущения

Особенностями этих профилей являются S-образная структура при фазе волнового возмущения $\varphi = 0^\circ$ и экстремум при $\varphi = \pm 90^\circ$. Толщина пограничного слоя по данным этих измерений составляет ~ 10 см, что также соответствует полученным оценкам.

В [27] приведены данные 22 серий измерений параметров ВППС, включая профили течений, скорость трения u_* и характерные размеры неровностей дна k . Аналогичные данные трех серий имеются в [1]. Эти данные были использованы для оценки достоверности соотношений (22) и (23). В табл. 2 приведены основные параметры ВППС по данным измерений и расчетов.

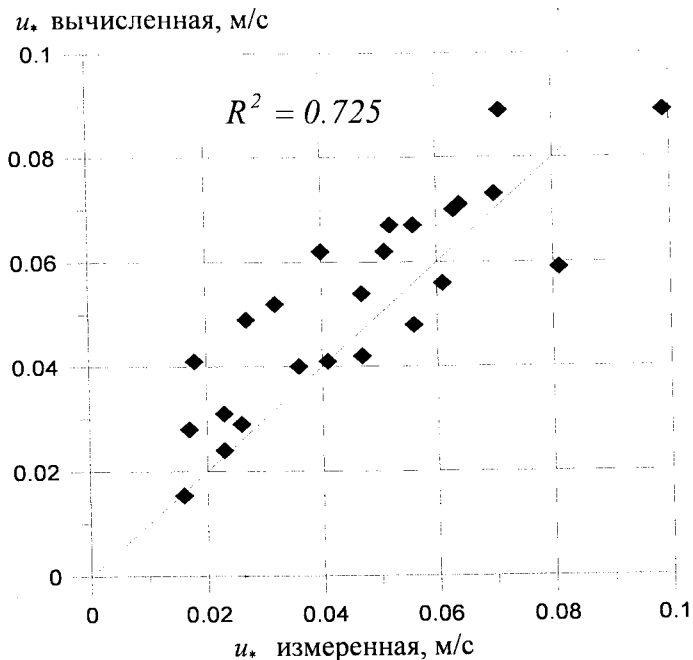
Результаты сопоставления измеренных и вычисленных величин скорости трения представлены на рис. 6.

Несмотря на отклонение некоторого количества точек от линии равных значений, в основном они ей соответствуют, о чем свидетельствует значимая корреляция между u_* выч. и u_* измер. ($R = 0,851$).

Параметры ВПШС по данным измерений и полученным соотношениям

Глубина, м	Период, T , с	U_{mo} , м/с	a , м	k_s , м	l_p , м	V_t , см ² /с	δ , м	u , измеренная, м/с	u , вычисленная, м/с
3,80	6,0	0,23	0,22	0,018	0,0051	3,75	0,102	0,026	0,029
3,24	5,8	0,31	0,29	0,008	0,0034	2,35	0,091	0,017	0,028
3,26	5,5	0,60	0,52	0,020	0,0074	12,00	0,184	0,051	0,062
3,45	5,1	0,80	0,65	0,027	0,0096	22,00	0,220	0,071	0,082
3,18	5,5	0,65	0,57	0,026	0,0089	16,80	0,206	0,070	0,083
2,57	5,7	0,40	0,36	0,033	0,0086	11,50	0,170	0,032	0,052
1,98	6,0	0,25	0,24	0,058	0,0100	10,30	0,150	0,018	0,032
3,66	6,2	0,85	0,84	0,008	0,0051	9,40	0,180	0,056	0,067
3,16	6,3	0,38	0,38	0,018	0,0063	6,98	0,150	0,047	0,042
3,16	6,4	0,50	0,51	0,013	0,0056	7,30	0,156	0,056	0,048
3,75	6,4	0,48	0,49	0,074	0,0157	28,00	0,274	0,063	0,070
3,24	6,3	0,45	0,45	0,067	0,0141	24,00	0,242	0,052	0,067
3,05	6,3	0,38	0,38	0,090	0,0160	24,90	0,245	0,040	0,062
2,50	6,3	0,24	0,24	0,160	0,0190	22,50	0,220	0,027	0,049
1,63	6,2	0,17	0,17	0,022	0,0050	3,08	0,090	0,023	0,024
3,31	6,2	0,15	0,15	0,005	0,0019	0,78	0,049	0,016	0,015
2,93	6,2	0,30	0,30	0,011	0,0041	3,46	0,103	0,023	0,031
2,98	6,1	0,40	0,39	0,012	0,0048	5,22	0,126	0,036	0,040
3,54	6,1	0,45	0,44	0,042	0,0107	16,30	0,209	0,081	0,059
3,51	6,1	0,45	0,44	0,033	0,0093	13,60	0,193	0,061	0,056
2,99	6,1	0,35	0,34	0,063	0,0120	16,30	0,197	0,047	0,054
2,74	6,1	0,28	0,27	0,110	0,0160	20,30	0,210	0,032	0,052
32,0	7,0	0,35	0,39	0,200	0,0260	46,00	0,320	0,064	0,071
32,0	10,0	0,20	0,32	0,180	0,0230	24,00	0,285	0,041	0,041
20,0	8,0	1,00	1,27	0,027	0,0126	31,70	0,400	0,099	0,089

Примечание. T — средний период поверхностных волн, U_{mo} — скорость волнового течения на верхней границе пограничного слоя, a — амплитуда волновых смещений, k_s — размер неровностей дна, l_p — путь перемешивания, V_t — коэффициент турбулентной диффузии, δ — толщина пограничного слоя, u , измеренная — скорость течения по данным измерений, u , вычисленная — скорость течения по данным расчетов



Р и с. 6. Сопоставление измеренных и вычисленных величин скорости трения в ВППС

Выводы

1. Для условий ровного дна или в случае, когда амплитуда волновых смещений a вблизи его поверхности во много раз превышает характерные размеры неровностей k_s , известным модельным зависимостям соответствуют близкие значения величин $u_* / U_{mo} = f(a/k_s)$. Однако в тех случаях, когда неровности дна соизмеримы или превышают горизонтальные волновые смещения a , различные модели ВППС дают величины u_* / U_{mo} , которые могут различаться на порядок и больше. Это свидетельствует о недостаточной изученности придонных пограничных слоев над неровным дном, которое реально существует во многих прибрежных зонах. Лабораторное моделирование волнового обтекания крупных объектов показало, что при этом формируется сложная вихревая структура поля скорости [36, 55, 56]. Эта структура вихревых течений может оказывать существенное влияние на формирование вертикальных потоков биогенных элементов и кислорода, которые в значительной степени определяют параметры первичных продукционных характеристик морской среды.

2. Оценки толщины ВППС (δ) и коэффициента вертикальной диффузии импульса (ν_i) выполнены на основе соотношений $k - \varepsilon$ -теории. Эти параметры определяются периодом поверхностных волн и амплитудой волновой скорости течения на верхней границе ВППС, а также характерной величиной неровностей дна. Выполненные оценки δ и ν_i для глубины 30 м при раз-

личной скорости ветра (10, 20, 30 и 40 м/с) показали, что при ровном дне ($k_s = 0,1 - 1$ см) толщина пограничного слоя изменяется от 2 до 10 см, коэффициент вертикальной диффузии -- от 0,5 до 20 см²/с. Эти величины достаточно хорошо соответствуют независимым оценкам толщины пограничного слоя [4, 18, 37] и данным немногочисленных измерений [35, 54], а также известным оценкам коэффициента вертикальной диффузии [2]. Если характерный размер неровностей дна составляет 1 м, толщина пограничного слоя увеличивается до 0,3 - 1 м, а коэффициент вертикальной диффузии -- до 100 - 1000 см²/с.

3. Обоснованность оценок δ и ν_t проверена путем сопоставления измеренных и вычисленных величин скорости трения. Это сопоставление (табл. 2 и рис. 6) показало достаточно хорошее совпадение оценок (коэффициент корреляции равен 0,851). Несмотря на это, представленные оценки δ и ν_t следует трактовать как приближенные и рассматривать как ориентировочные и предварительные данные. Более точные оценки этих величин могут быть получены путем решения краевых задач волнового обтекания конкретных неровностей дна.

Работа выполнена при поддержке *Collaborative Linkade Grant EST. NUKR. CLG 980992* научной программы НАТО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res. --- 1979. --- 84, № С 4. --- P. 1797 - 1808.
2. Набатов В.Н., Озмидов Р.В. Исследования турбулентных пограничных слоев в океане // Океанология. --- 1987. --- 27, № 1. --- С. 5 - 11.
3. Andreopoulos J., Agui J. Wall vorticity flux dynamics in a two-dimensional turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. --- 1996. --- 309. --- P. 45 - 84.
4. Batchelor G. K. An Introduction to Fluid Dynamics // Cambridge Univ. Press. --- 1967. --- 615 p.
5. Phillips O. M. The scattering of gravity waves by turbulence // J. Fluid Mech. --- 1959. --- 5. --- P. 177 - 192.
6. Miles J.W. Surface-wave damping in closed basins // Proc. Roy. Soc. --- 1967. --- A 297. --- P. 459 - 475.
7. Flack K.A. Near-wall structure of three-dimensional turbulent boundary layers // Exp. --- Fluids. --- 1997. --- 23, № 4. --- P. 335 - 340.
8. Lee-Sing-Kwan, Cheung-Kwok-Fai. Laminar and turbulent bottom boundary layer induced by nonlinear water waves // J. Hydraul. Eng. --- 1999. --- 125, № 6. --- P. 631 - 645.
9. Hsu T - W, Lin H - Y. Application of a k-ε model to instantaneous sediment concentration and turbulent boundary layers of wave-induced shelf flow // Flow Modeling and Turbulent Measurements VII. --- Tainan, Taiwan, October 5 - 8. --- 1998. --- P. 27 - 37.
10. Chowdhury S.A ; Sato M., Ueno A. Numerical model of the turbulent wave boundary layer induced by finite amplitude water waves // Appl Ocean Res. --- 1997. --- 19, № 3 - 4. --- P. 201 - 209.
11. Петчев В. Определение коэффициентов турбулентной диффузии в волновом потоке // Труды Болгарского института океанологии. --- 1998. --- 2. --- С. 12 - 19.
12. Hsu T - W, Lin H - Y. A simple eddy viscosity model of rough turbulent wave boundary layer // China Ocean Eng. --- 1996 --- 10, № 3. --- P.281 - 294.
13. Дворянинов Г.С. Эффекты волн в пограничных слоях атмосферы и океана. --- Киев: Наук. думка, 1982. --- 176 с.

14. *Brevik I.* Oscillatory rough turbulent boundary layers // *J. Water. Part Coast. Ocean Dyn., Am Soc. Civ. Eng.* — 1981. — 107. — P. 175 - 188.
15. *Sleath J. F. A.* Turbulent oscillatory flow over rough beds // *J. Fluid Mech.* — 1987. — 182. — P. 369 - 409.
16. *Sleath J. F. A.* Scabed boundary layers // *The Sea. Ocean Eng. Sci. / Ed. B. Le. — Mchaut. Hanes. New York. J. Wiley.* — 1990. — P. 693 - 728.
17. *Lonquet-Higgins M. S.* Mass transport in water waves // *Philos. Trans. Roy. Soc.* — 1953. — A. 245 — P. 535 - 581.
18. *Collins J. I.* Inception of turbulence at the bed under periodic gravity waves // *J. Geophys. Res.* — 1963. — 68, № 21. — P. 6007 - 6014.
19. *Stuart J. T.* Double boundary layer in oscillatory viscous flow // *J. Fluid. Mech.* — 1966. — 24 — P. 673 - 689.
20. *Grang Yi. W.* On high-frequency oscillatory viscous flows // *Ibid.* — 1968. — 32. — P. 55 - 68.
21. *Davis R.E.* On the turbulent flow over a wave boundary // *Ibid.* — 1970. — 42. — P. 721 - 731.
22. *Stewart R.W.* Laboratory studies of the velocity field over deep-water waves // *Ibid.* — 1970. — 42. — P. 733 - 754.
23. *Kushnir V. M.* Turbulent diffusion in the near-bottom boundary layer of the Black Sea shelf zone // *J. Mar. Syst.* — 1999. — 21. — P. 243 - 253.
24. *Xu Z., Bowen A. J.* Wave-and wind-driven flow in water of finite depth // *J. Phys. Oceanogr.* — 1994. — 24. — P. 1850 - 1866.
25. *Gimenez Curto L. A., Lera M.A.C.* Oscilating turbulent flow over very rough surfaces // *J. Geophys. Res.* — 1996. — 101, № C9. — P. 20745 - 20758.
26. *Craig P. D.* Velocity profiles and surface roughness under breaking waves // *Ibid.* — № C1. — P. 1265 - 1277.
27. *Faria A. F.; Thornton E.B.; Stanton T.P. et al.* Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness // *Ibid.* — 1998. — 103, № C2. — P. 3217 - 3232.
28. *Cheng R. T., Ling C.H., Garnet J. W., Wang P. E.* Estimates of bottom roughness length and bottom shear in South San-Francisco Bay, California // *Ibid.* — 1999. — 104, № C4. — P. 7715 - 7728.
29. *Fredsoe J., Andersen K. H., Sumer B. M.* Wave plus current over a ripple-covered bed // *Coast. Eng.* — 1999. — 38, № 4. — P. 177 - 221.
30. *Marin F.* Velocity and turbulence distributions in combined wave-current flows over a rippled bed // *J. Hydraul. Res.* — 1999. — 37, № 4. — P. 501 - 518.
31. *Mathisen P., Madsen O. S.* Waves and current over a fixed rippled bed. 1. Bottom roughness experienced by waves in the presence and absence of a current // *J. Geophys. Res.* — 1996. — 101, № C7. — P. 16533 - 16542.
32. *Mathisen P., Madsen O. S.* Bottom and apparent roughness experienced by currents in the presents a waves // *Ibid.* — P. 16543 - 16550.
33. *Mathisen P., Madsen O. S.* Bottom and apparent roughness for spectral waves and currents // *Ibid.* — 1999. — 104, № C8. — P. 18447 - 18461.
34. *Rankin K. L., Hires R. I.* Laboratory measurement of bottom shear stress on a movable bed // *Ibid.* — 2000. — 105, № C7. — P. 17011 - 17019.
35. *Trowbrige J. H., Agrawal Y. C.* Glimpses of a wave boundary layer // *Ibid.* — 1995. — 100, № C10. — P. 20729 - 20743.
36. *Samad M. A., Tanaka H.* Numerical experiment on broken wave bottom boundary layer // *Flow Modeling and turbulent Measurements VII* — 1998. Tainan, Taiwan, October 5 - 8. — P. 39 - 46.
37. *Jensen B. L., Sumer B. M., Fredsøe J.* Turbulent oscillatory boundary layer at high Reynolds numbers // *J. Fluid Mech.* — 1989. — 206. — P. 265 - 297.
38. *Drake D. E., Cacchione D. A., Grant W. D.* Shear-stress and bed roughness estimates for combined wave and current flows over a rippled bed // *J. Geophys. Res.* — 1992. — 97, № C2. — P. 2319 - 2326.
39. *Davies A. G., Villaret C.* Eulerian drift induced by progressive waves above rippled and very rough beds // *Ibid.* — 1999. — 104, № C1. — P. 1465 - 1488.

40. *Barrantes A. I., Madsen O. S.* Near-bottom and flow resistance for currents obliquely incident to two-dimensional roughness elements // *Ibid.* — 2000. — 105, № С 11. — P. 26253 – 26264.
41. *Weber N.* Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth - limited situations // *J. Phys. Oceanogr.* — 1991. — 21. — P. 149 – 172.
42. *Tolman H. L.* Wind waves and moveble-bed bottom friction // *Ibid.* — 1994. — 24. — P. 994 – 1009.
43. *Huang N. E.* Mass transport induced by wave motion // *J. Mar. Res.* — 1970. — 28. — P. 35 – 50.
44. *Johns B.* On the mass transport induced by oscillatory flow in a turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* — 1970. — 43. — P. 177 – 185.
45. *Van Rajn L.C.* Sediment transport. Part 1. Bedload transport // *J. Hydraul. Eng.* — 1984. — 110, № 10. — P. 1431 – 1456.
46. *Van Rajn L.C.* Sediment transport. Part 3. Saspended load transport // *Ibid.* — № 1. — P. 1631. – 1641.
47. *Михинов А. Е.* Баланс энергии возмущенного движения в русловых потоках//Метеорология и гидрология. — 1987. — №9. — С. 86 – 95.
48. *Иванов В. А., Михинов А. Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежных зонах моря (практические рекомендации и примеры). — Севастополь, 1991. — 52 с. — (Препринт/НАН Украины. МГИ).
49. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1970. — 904 с.
50. *Bijker E. W.* Longshore current computation // *Proc. ASCE. Waterway, Harbors and Coastal Engineering Division.* — 1971. – 54 p.
51. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. — М.: Иностранная литература, 1949. –520 с.
52. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969. — 742 с.
53. *Кудрявая К. И., Серяков Е. И., Скриптунова Л. И.* Морские гидрометеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 310 с.
54. *Nagatun K., Eidsvik K. J.* Oscillating turbulent boundary layer with suspended sediments // *J. Geophys. Res.* --- 1986. — 91, ; С 11. — P. 13045 – 13055.
55. *Hwang R. R., Sue Y. C.* Numerical simulation on non-linear interaction of water waves with submerged obstacles // *Proc. of the 7th Int. Sympos. of Flow Model. and Turbul. Measur. Taiwan.* Oct. 5. – 8. — 1998. — P. 545 – 554.
56. *Ochiai M., Endo S., Wada A.* Flow characteristics near the submerged breakwater in the wave induced current // *Ibid.* — P. 529 – 536.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 26.08.04
После доработки 03.11.04

ABSTRACT Comparison of six known models of the wave near-bottom boundary layer (WNBBL) shows their identity for a smooth bed and significant distinction for other conditions. WNBBL thickness and the coefficient of vertical diffusion are estimated based on the $k - \varepsilon$ -theory ratio. Validity of these estimations is tested by comparison of the measured and calculated values of friction velocity. The comparison shows rather good concurrence characterized by the correlation coefficient 0.851.