

УДК: 504.4: 54

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕСИ ПРИ ДАМПИНГЕ ГРУНТА НА МОРСКОЙ ПОДВОДНЫЙ ОТВАЛ

Юрасов С.Н., к.техн.н.,
Горун В.В.,
Берлинский Н.А., д.геогр.н.

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, urasen54@gmail.com*

В статье рассмотрены различные конечно-разностные схемы при моделировании распространения взвеси после сброса грунта на подводный отвал в плоской и пространственной постановке задачи. Выполнено сопоставление результатов численных экспериментов с расчетами по фундаментальным формулам и с данными натурных наблюдений. В выводах приводятся рекомендации для выполнения инженерных расчетов.

Ключевые слова: дампинг грунта, взвесь, математическая модель.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для поддержания навигационных глубин на подходных каналах к морским и речным портам на украинской части шельфа Черного моря ежегодно изымаются сотни тысяч кубических метров грунта. Существенное уменьшение объемов дноуглубительных работ или их приостановка невозможны, поскольку углубление дна является жизненной необходимостью функционирования портов. В данной ситуации, когда, с одной стороны – при отсутствии альтернативы необходимо складировать грунты на подводные отвалы, а с другой – наносится ущерб водным экологическим системам, актуальной становится задача оптимизации дампинга.

Для решения этой задачи необходима надёжная оценка параметров (прежде всего максимальной концентрации загрязняющих веществ и размеров) облака взвеси, образовавшегося после сброса грунта и перенесённого на некоторое контрольное расстояние от точки сброса.

Критический анализ существующих методик расчета распространения взвеси и других загрязняющих веществ в водной среде Г.Я. Шкудовой (1975), А.А. Гончарова (1986), С.В. Афанасьева (1986), О.Д. Молдовановой (1987), С.Л. Беленко (1988), Л.Я. Трукшане (1992), С.А. Лониной (1994), А.А. Прозорова (2000), Р.И. Демченко и М.И. Железняк (2006), Д.В. Алексеева (2008), И.О. Бровченко и В.С. Мадерича (2008), С.В. Кирильчика (2010), Ю.С. Юрезаньской и В.М. Котерова (2010), Gils J. (2014) показал, что в специализированных моделях распространения взвеси после сброса грунтов задача рассматривается в плоской постановке. Более универсальные трехмерные модели, совмещенные с моделями гидродинамики, позволяют исследовать разнообразный спектр задач, связанных с размывом, переносом

и оседанием многофракционных наносов, однако они слишком сложны для осуществления на практике оперативных расчетов при инженерных изысканиях.

К основным недостаткам двумерных моделей следует отнести: существенную погрешность оценки максимального значения концентрации взвесей со скоростью оседания более 0,1 см/с на небольшом удалении от точки сброса грунта; невозможность смоделировать процесс распространения взвеси при значительной неравномерности её содержания по вертикали в точке сброса грунта.

Учитывая упомянутые недостатки авторами [1] была предложена модель распространения взвеси в пространственной постановке задачи, методом конечных разностей получено её решение и разработан модуль «Дампинг-взвесь» для выполнения инженерных расчётов. Использование модуля для решения практических задач возможно, если установлена истинность результатов, полученных с его помощью.

Верификация результатов численных экспериментов и калибровка модели являются важными этапами математического моделирования. Выполнение этих этапов, как правило, связано с определёнными трудностями.

В имеющихся аналитических решениях часто рассматривается более простой случай, а данные натурных наблюдений ограничены и обладают существенной погрешностью. Однако при отсутствии данных физического моделирования результаты расчетов по фундаментальным решениям и натурные наблюдения являются единственным источником установления корректности численных экспериментов.

В настоящей статье выполнено сопоставление результатов моделирования с расчетами по фундаментальным решениям и с натурными наблюдениями.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель турбулентной диффузии взвеси в полярной системе координат с начальными и граничными условиями можно записать в виде [1]:

$$\partial C/\partial t = D_r(\partial^2 C/\partial r^2) + D_r(\partial C/\partial r)/r - u(C/H), \quad (1)$$

$$C(t,r) = C_0, \text{ при } r \leq r_0 \text{ и } t = 0,$$

$$C(t,r) = 0, \text{ при } r > r_0 \text{ и } t = 0,$$

$$uC(t,r) - D_B(\partial C/\partial z) = 0, \text{ при } z = 0, t > 0,$$

$$\partial C/\partial z = 0 \text{ и } q_B = uC(t,r), \text{ при } z = H, t > 0,$$

где C – концентрация взвеси, $\text{г}/\text{м}^3$; t – время, отсчитываемое после сброса грунта, с; D_r и D_B – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радиус, расстояние от центра системы координат в горизонтальной плоскости до рассматриваемой точки, м; u – гидравлическая крупность частиц, м/с; H – глубина акватории, м; C_0 – значение концентрации взвеси в облаке в начальный момент времени, $\text{г}/\text{м}^3$; r_0 – начальный радиус пятна, м; q_B – вертикальный поток оседающей взвеси, $\text{г}/(\text{м}^2\text{с})$.

В этой модели пятно взвеси представлено в виде круга. Начало полярной системы координат постоянно находится в центре пятна и перемещается вместе с ним.

Решение модели (1) методом конечных разностей по разным схемам представлено в [1]. Эти решения имеют следующий вид:

явная схема при $(a+f) \leq 0,5$ и $n \geq 2$ –

$$C_{k+1,n} = (1-2a-2f)C_{k,n} + a(b_n C_{k,n+1} + d_n C_{k,n-1}), \quad (2)$$

при $n = 1$

$$C_{k+1,1} = (1-2a-2f)C_{k,1} + 2aC_{k,2}, \quad (3)$$

где $a = D_r \Delta t / \Delta r^2$; $f = u \Delta t / (2H)$; $b_n = 2n / (2n-1)$; $d_n = (2n-2) / (2n-1)$; k – нумерация временных срезов; n – нумерация колец в пятне загрязнения от центра; условие проверки расчетов –

$$\sum_{n=1}^N (2n-1)C_{k,n} = C_0 N_0^2 (1-2f)^k, \quad (4)$$

где $N = N_0 + k$; N_0 и C_0 – количество колец и значение концентрации взвеси в пятне на нулевом (начальном) временном срезе соответственно;

неявная схема –

$$\alpha^* C_{k+1,n} = \beta_n C_{k+1,n+1} + \gamma_n C_{k+1,n-1} + \delta_n, \quad (5)$$

при $n \geq 2$ – $\alpha^* = (1+2a+2f)$; $\beta_n = ab_n$; $\gamma_n = ad_n$; $\delta_n = C_{k,n}$;

при $n = 1$ – $\alpha^* = (1+2a+2f)$; $\beta_1 = 2a$; $\gamma_1 = 0$; $\delta_1 = C_{k,1}$;

условие проверки расчетов –

$$\sum_{n=1}^N (2n-1)C_{k,n} = C_0 N_0^2 (1+2f)^{-k}. \quad (6)$$

смешанная схема (Кранка-Николсона) –

$$\alpha^{(1)} C_{k+1,n} = \beta_n^{(1)} C_{k+1,n+1} + \gamma_n^{(1)} C_{k+1,n-1} + \delta_n^{(1)}, \quad (7)$$

при $n \geq 2$ – $\alpha^{(1)} = (1+a+f)$; $\beta_n^{(1)} = ab_n/2$; $\gamma_n^{(1)} = ad_n/2$;
 $\delta_n^{(1)} = C_{k,n}(1-a-f) + \beta_n^{(1)} C_{k,n+1} + \gamma_n^{(1)} C_{k,n-1}$;

при $n = 1$ – $\alpha^{(1)} = (1+a+f)$; $\beta_1^{(1)} = a$; $\gamma_1^{(1)} = 0$;
 $\delta_1^{(1)} = C_{k,1}(1-a-f) + aC_{k,2}$;

условие проверки расчетов –

$$\sum_{n=1}^N (2n-1)C_{k,n} = C_0 N_0^2 (1-f)^k (1+f)^{-k}. \quad (8)$$

Преимущество явной схемы состоит в том, что значения сеточной функции на $(k+1)$ -м временном срезе рассчитываются по её значениям на предыдущем k -м временном срезе.

Недостаток явной схемы заключается в её неустойчивости при $(a+f) > 0,5$. Неявная и Кранка-Николсона схемы абсолютно устойчивы. Однако, поиск значений сеточной функции на $(k+1)$ -м временном срезе осуществляется методом прогонки.

На небольших интервалах времени явная схема является более предпочтительной.

Рассмотрим теперь пространственную постановку задачи. В цилиндрической системе координат модель турбулентной диффузии взвеси будет иметь вид [2]:

$$\partial C/\partial t = D_r[(\partial^2 C/\partial r^2) + (\partial C/\partial r)/r] + D_B(\partial^2 C/\partial z^2) - u(\partial C/\partial z), \quad (9)$$

$$C(t,r,z) = C_0, \text{ при } r \leq r_0 \text{ и } t = 0,$$

$$C(t,r,z) = 0, \text{ при } r > r_0 \text{ и } t = 0,$$

$$uC(t,r,z) - D_B(\partial C/\partial z) = 0, \text{ при } z = 0, t > 0,$$

$$\partial C/\partial z = 0 \text{ и } q_B = uC(t,r,z), \text{ при } z = H, t > 0,$$

Решение этой модели методом конечных разностей по явной схеме имеет вид:

при $1 < m < M$ –

$$C_{k+1,n,m} = (1-2a_1-2a_2)C_{k,n,m} + a_1(b_n C_{k,n+1,m} + d_n C_{k,n-1,m}) + (a_2-f)C_{k,n,m+1} + (a_2+f)C_{k,n,m-1}, \quad (10)$$

при $m = 1$ –

$$C_{k+1,n,1} = (1-2a_1-a_2-f)C_{k,n,1} + a_1(b_n C_{k,n+1,1} + d_n C_{k,n-1,1}) + (a_2-f)C_{k,n,2}. \quad (11)$$

при $m = M$ –

$$C_{k+1,n,M} = (1-2a_1-a_2-f)C_{k,n,M} + a_1(b_n C_{k,n+1,M} +$$

$$+d_n C_{k,n-1,M}) + (a_2 + f) C_{k,n,M-1}, \quad (12)$$

где $a_1 = D_{\Gamma} \Delta t / \Delta r^2$; $a_2 = D_B \Delta t / \Delta z^2$; $f = u \Delta t / (2 \Delta z)$; k – нумерация временных срезов; n – нумерация колец в пятне загрязнения от центра; m – нумерация слоёв в толще воды от поверхности; M – количество слоёв по глубине;

условие проверки расчетов –

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_k} (2n-1) C_{k,n,m} = C_0 M_0 N_0^2 - 2f \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{n=1}^{N_{k-1}} (2n-1) C_{i,n,M}, \quad (13)$$

где $N_k = N_0 + k$; M_0 – количество слоёв в пятне загрязнения в начальный момент времени.

Решение устойчиво при $(a_1 + a_2) < 0,5$ и $f < a_2$.

На основе решения в трёхмерном пространстве разработан расчётный модуль «Дампинг-взвесь», позволяющий исследовать распространение полидисперсной взвеси и определить характеристики облака повышенной мутности на контрольном удалении от точки сброса грунта.

Достоверность результатов численного моделирования представляется возможным установить путём их сопоставления с расчетами по фундаментальным аналитическим решениям, а также с данными натуральных наблюдений.

Модели в прямоугольной системе координат для примеси с нейтральной плавучестью аналогичные (1) и (9) имеют фундаментальные решения [3]:

в плоской постановке –

$$C(x, y, t) = Q / (4\pi D_{\Gamma} t) \exp[-(x^2 + y^2) / (4D_{\Gamma} t)], \quad (14)$$

при трёхмерном неограниченном пространстве –

$$C(x, y, z, t) = Q / [8(\pi D_B t)^{3/2}] \exp[-(x^2 + y^2 + z^2) / (4D_B t)], \quad (15)$$

где Q – мощность точечного источника; t – время.

Данные натуральных наблюдений дампинга грунтов дноуглубления в районе о. Экви в Финском заливе и на Северо-западном шельфе Черного моря содержатся в литературных источниках [4, 5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

3.1 Сопоставление с фундаментальными решениями

а) *Двумерная диффузия.* По формуле (14) видно, что максимальное значение концентрации примеси убывает пропорционально времени, $C(0, 0, t) \sim t^{-1}$

$$C(0, 0, t) = Q / (4\pi D_{\Gamma} t). \quad (16)$$

При сравнении результатов численного моделирования учтено, что начальный момент времени $t=0$ по формуле (14) не совпадает с начальным моментом

времени $k=0$ по конечно-разностной схеме, поскольку при $t \rightarrow 0$ значение $C(0, 0, t) \rightarrow \infty$.

Для сопоставимости результатов необходим сдвиг по времени t_0 . Примем его равным шагу $\Delta t = r_0^2 / (4D_{\Gamma})$ в конечно-разностной схеме, что соответствует $a=0,25$.

Если теперь задаться значением $C(0, 0, t_0)$, то обратным расчетом по (16) можно найти соответствующую ему мощность точечного источника $Q = 4\pi D_{\Gamma} \Delta t C(0, 0, t_0)$. Далее, используя полученную Q , для моментов времени k по формуле (16) представляется возможным рассчитать значения максимальной концентрации. Время для расчета по формуле (16), соответствующее моменту k в конечно-разностной схеме, будет равно $t = (k+1)\Delta t$.

В табл. 1 и на рис. 1 представлены результаты расчета при мощности источника 10000 условных единиц и параметрах модели – $N_0 = 1$; $u = 0$ м/с; $r_0 = 5,64$ м; $\Delta t = 416$ с; $D_{\Gamma} = 0,0191$ м²/с; $H = 20$ м; $C_0 = 100$. Видно, что результаты моделирования по явной схеме совпадают с расчетами по аналитической формуле. Расчеты по неявной и Кранка-Николсона схемам дают удовлетворительные результаты после 15 – 20 шагов по времени.

Сдвиг по времени используется также автором [6] в формуле расчета распространения взвеси в морской среде после сброса грунта, который он определяет как «поправку к реальному времени», учитывающую эффект динамического расширения пятна взвеси при точечной аппроксимации источника.

б) *Трёхмерная диффузия.* По (15) видно, что максимальное значение концентрации примеси уменьшается пропорционально времени в степени «3/2»

$$C(0, 0, 0, t) = Q / [8(\pi D_B t)^{3/2}]. \quad (17)$$

В этом случае по тем же причинам, что и в плоской постановке задачи, при сопоставлении расчетов необходим сдвиг по времени t_0 . Наилучшая сходимость результатов расчетов наблюдается при: $t_0 = r_0 r_C / (4D_B)$, здесь r_C – радиус полушария с объёмом, равным объёму цилиндра, у которого радиус основания r_0 равен его высоте Δz ; $\Delta t = r_0^2 / (8D_B)$, что соответствует $a_1 = a_2 = 0,125$.

Для фундаментальной формулы время, соответствующее моменту k в конечно-разностной схеме, будет равно $t = t_0 + k\Delta t$.

В табл. 2 и на рис. 2 помещены результаты сопоставительных расчетов при мощности источника 85182 условных единицы и параметрах модели – $N_0 = 1$; $M_0 = 1$; $u = 0$; $r_0 = 5,0$ м; $\Delta z = 5,0$ м; $r_C = 5,72$ м; $t_0 = 337,6$ с; $\Delta t = 147,5$ с; $D_B = 0,0212$ м²/с; $H = 300$ м; $C_0 = 100$. Из табл. 2 и рис. 2 видно, что отклонение результатов расчетов и эксперимента при использовании явной схемы отличаются в допустимых пределах – не более 10%.

3.2 Сопоставление с натурными данными

а) Экспедиционные исследования, проведенные в районе свалки грунта у о. Экви в Финском заливе в сентябре 1983 г. [4].

Наблюдения проводились на отвале с глубиной 90 м. Толща воды была стратифицирована, глубина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) составляла примерно 25 м.

Таблица 1– Значения C_{MAX} в различные моменты времени (в двумерной задаче)

k	t, c	C_{MAX}				Отклонение от аналитического решения, %		
		Фундаментальное решение	Явная схема	Кранка-Николсона	Неявная схема	Явная схема	Кранка-Николсона	Неявная схема
0	416	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00
2	1249	33,33	33,33	42,20	49,82	0,00	26,6	49,4
4	2082	20,00	20,00	23,85	28,83	0,00	19,2	44,1
8	3747	11,11	11,11	12,07	13,72	0,00	8,64	23,5
10	4580	9,091	9,091	9,622	10,64	0,00	5,84	17,0
20	8744	4,762	4,762	4,743	4,902	0,00	-0,40	2,94
40	17071	2,439	2,439	2,345	2,338	0,00	-3,87	-4,13
60	25398	1,639	1,639	1,556	1,533	0,00	-5,08	-6,47
80	33726	1,235	1,235	1,164	1,140	0,00	-5,70	-7,64
100	42053	0,9901	0,9901	0,9300	0,9075	0,00	-6,07	-8,34

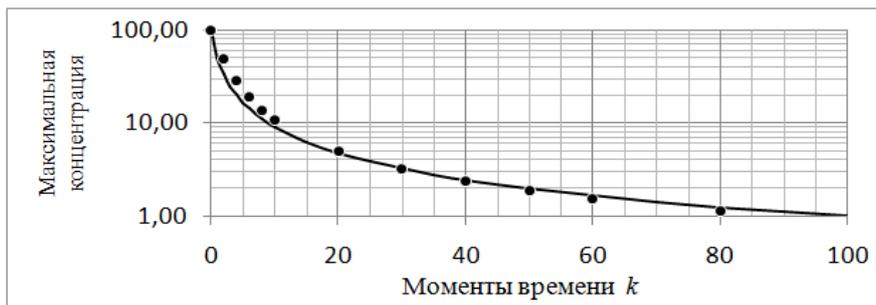


Рис. 1– Изменение максимальной концентрации примеси во времени (двумерная задача): сплошная линия – расчет по аналитической формуле и результаты эксперимента по явной схеме; маркер круг – численный эксперимент по неявной схеме

Таблица 2– Значения C_{MAX} в различные моменты времени (в трехмерной задаче)

k	t, c	C_{MAX}		Погрешность, %
		Фундаментальное решение	Явная схема	
0	337,6	100,0	100,0	0,00
2	632,6	38,99	42,71	9,53
4	927,6	21,962	23,662	7,74
8	1517,5	10,496	10,752	2,44
10	1812,5	8,041	8,098	0,71
20	3287,3	3,292	3,184	-3,29
30	4762,1	1,8880	1,7983	-4,75
40	6236,9	1,2596	1,1903	-5,51
50	7711,7	0,9162	0,8615	-5,97
60	9186,5	0,7046	0,6604	-6,28
80	12136,1	0,4641	0,4331	-6,67
100	15085,7	0,3348	0,3117	-6,90

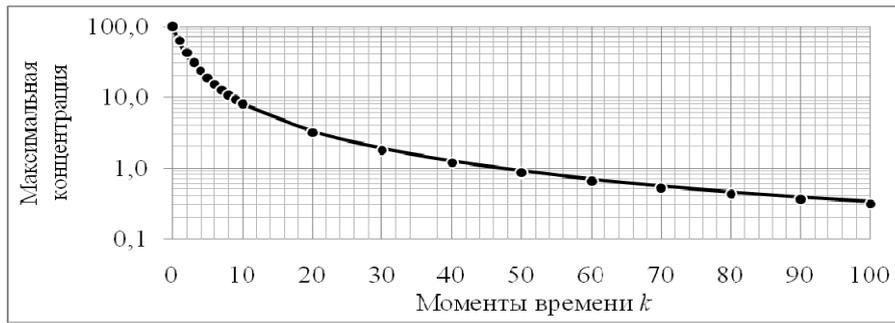


Рис. 2– Изменение максимальной концентрации примеси во времени (трехмерная задача): сплошная линия – расчет по аналитической формуле; маркер круг – численный эксперимент по явной схеме.

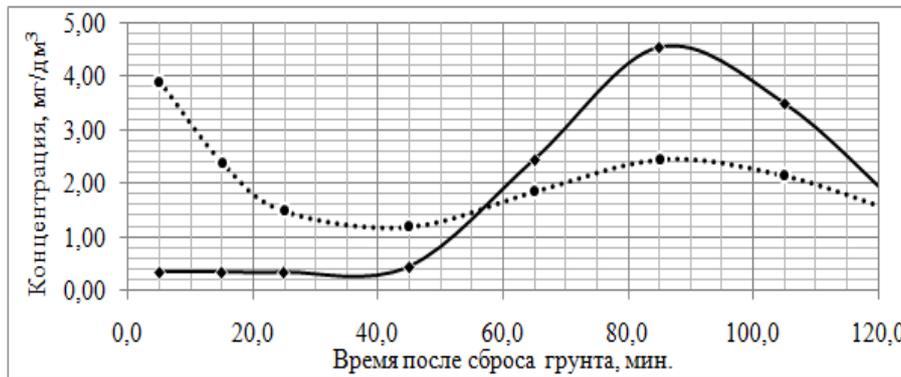


Рис. 3– Изменение концентрации фракций взвеси А (0,025-0,05 мм – сплошная линия) и В (0,05-0,1 мм – точечная линия) во времени на горизонте 10 м по результатам наблюдений [4].

Таблица 3– Распределение фракции взвеси ($u=0,32$ см/с) в облаке загрязнения на горизонте 10 м в различные моменты времени после сброса

Время после сброса, мин.	Концентрация фракции взвеси В (мг/дм ³) на различном удалении (м) от центра облака взвеси									
	1,0	9,0	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0	23,0	25,0	27,0
0,0	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,3	5,00	5,00	4,93	4,67	4,02	2,95	1,74	0,77	0,24	0,05
16,7	5,01	4,96	4,63	4,20	3,54	2,72	1,85	1,10	0,56	0,24
25,0	5,09	4,92	4,42	3,95	3,33	2,63	1,91	1,27	0,76	0,41
33,3	5,22	4,91	4,30	3,82	3,24	2,61	1,98	1,40	0,92	0,56
41,7	5,33	4,89	4,22	3,75	3,20	2,61	2,03	1,50	1,04	0,68
50,0	5,39	4,86	4,16	3,69	3,17	2,62	2,08	1,58	1,15	0,79
58,3	5,40	4,80	4,09	3,64	3,14	2,63	2,12	1,65	1,23	0,88
66,7	5,36	4,73	4,02	3,58	3,11	2,63	2,15	1,70	1,30	0,95
75,0	5,29	4,64	3,95	3,53	3,08	2,62	2,16	1,74	1,35	1,02
83,3	5,19	4,55	3,87	3,46	3,04	2,60	2,17	1,76	1,40	1,07
91,7	5,08	4,44	3,78	3,40	2,99	2,58	2,17	1,78	1,43	1,12
100,0	4,95	4,33	3,70	3,33	2,95	2,55	2,16	1,80	1,46	1,15
108,3	4,82	4,22	3,62	3,27	2,90	2,52	2,16	1,80	1,48	1,18
116,7	4,69	4,11	3,53	3,20	2,85	2,49	2,14	1,80	1,49	1,21
125,0	4,55	4,00	3,45	3,13	2,80	2,46	2,12	1,80	1,50	1,23

Сброс выполнялся самоотвозным землесосом. Пробы на взвесь отбирались в центре дрейфующего пятна мутности в средней части ВКС (горизонт 10 м). Полученные в результате эксперимента данные о концентрации некоторых фракций взвеси представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что на горизонте 10 м заметен

вторичный пик содержания фракций взвеси А и В. Это привело к увеличению общего содержания взвеси в верхнем слое. Данное явление, по мнению авторов [4], может быть связано: во-первых, с разрушением нестабильных агрегатов, состоящих из мелких частиц (в основном фракции А), такие агрегаты могли образоваться в процессе консолидирования донных отло-

жений; во-вторых, с процессами выноса взвешенного вещества вверх из нижних несущих слоев.

Предлагаемая методика позволяет смоделировать возникновение вторичных пиков содержания взвеси в верхних слоях за счет её турбулентной диффузии из нижних слоёв.

В табл. 3 приведены значения концентрации фракции взвеси B (0,05-0,10 мм) с гидравлической крупностью $u=0,32$ см/с на горизонте 10 м в различные моменты времени на различном расстоянии от центра облака (скорость течения – 0,1 м/с, коэффициент Шези – $50 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$).

Вторичный пик представилось возможным смоделировать при условии, что сразу после сброса концентрация рассматриваемой фракции взвеси в нижних слоях значительно больше ($20 \text{ мг}/\text{дм}^3$), чем в верхних ($5 \text{ мг}/\text{дм}^3$).

На рис. 4, построенном по табл. 3, видно, что на глубине 10 м вторичный пик наблюдается в центре облака взвеси. При этом временной ход значений концентрации взвеси не соответствует ходу, зафиксированному при отборах проб (рис. 3).

При попытке сопоставления натуральных данных с расчетом необходимо учитывать, что дрейф облака взвеси и судна, с которого выполняются наблюдения, чаще всего не совпадает (судно в большей степени дрейфует под воздействием ветра, тогда как облако взвеси движется строго по течению). Кроме того, положение судна относительно облака оценивается визуально. Оба фактора приводят к тому, что при натурном эксперименте отбор проб в облаке взвеси осуществляется на различном расстоянии от его центра.

Принимая во внимание сказанное, можно составить множество вариантов «отбора проб» в табл. 3. На рис. 5 представлен один из возможных вариантов (в табл. 3 значения, использованные при построении графика, выделены полужирным шрифтом), где видно, что хронологический ход рассчитанных значений концентрации фракции взвеси удовлетворительно совпадает с натурными данными (отклонение не более 15%).

На рис. 6 представлена зависимость максимального значения концентрации взвеси во вторичном пике в центре облака повышенной мутности от гидравлической крупности частиц. По рисунку видно, что для мелких фракций взвеси пиковое значение их концентрации может в два и более раза превышать начальное значение.

Кратность превышения в значительной степени зависит от гидравлической крупности частиц и от того, во сколько раз концентрация фракции в нижних слоях больше, чем в верхних.

При постановке численных экспериментов предполагалось, что вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии равны. Их расчет выполнен при коэффициентах Шези, равных 50-60 $\text{м}^{0,5}/\text{с}$, по известной формуле [7], рекомендуемой автором для акваторий со слабым ветровым волнением,

$$D_{\Gamma} = D_B = gHv/(MC), \quad (18)$$

где g – ускорение свободного падения; H – глубина акватории (толщина слоя); v – скорость течения; $M=48$ при $C \geq 60$; $M=0,7C+6$ при $C < 60$; C – коэффициент Шези.

б) Наблюдения на Северо-Западном шельфе Чёрного моря в районе отвала грунтов глубоководного судового хода (ГСХ) Дунай – Черное море весной 1998 г. [5].

Во время специальных инструментальных наблюдений были определены фоновые концентрации взвешенного вещества в море, затем произведены замеры во время процесса сброса грунта и через 20 минут после сброса. Во время наблюдений течения в поверхностном и придонном слоях были разнонаправленными. Скорость течения на поверхности моря в слое 5 м составляла 11 см/с, направление 230° . Толща воды стратифицирована. До сброса фоновая концентрация взвешенного вещества на поверхности моря была $5,6 \text{ мг}/\text{дм}^3$, волнение – штиль. Сброс грунта производился в течение 10-15 минут на циркуляции землесоса «Черное море» вокруг буя со скоростью 2 узла ($5,7 \text{ км}/\text{час}$). С учетом безопасности мореплавания, были выполнены измерения в «момент сброса» грунта в кильватерной струе судна. Концентрация взвешенного вещества на поверхности повысилась до $11,1 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Через двадцать минут после прекращения сброса произведены дополнительные замеры в 1 кабельтовом от места сброса, с учетом преобладающего вектора скорости течения. При этом, на поверхности моря концентрация взвешенного вещества стала равной $8,0 \text{ мг}/\text{дм}^3$, т.е. снизилась в 1,4 раза. Исходная концентрация, сбрасываемой из трюмов пульпы, составляла примерно $543 \text{ г}/\text{дм}^3$.

Площадь пятна взвеси за 15 минут сброса, учитывая площадь днищевой двери – 150 м^2 , составила примерно $12,2 \times 5,7 \times 1000/60/60 \times 15 \times 60 = 17390 \text{ м}^2$

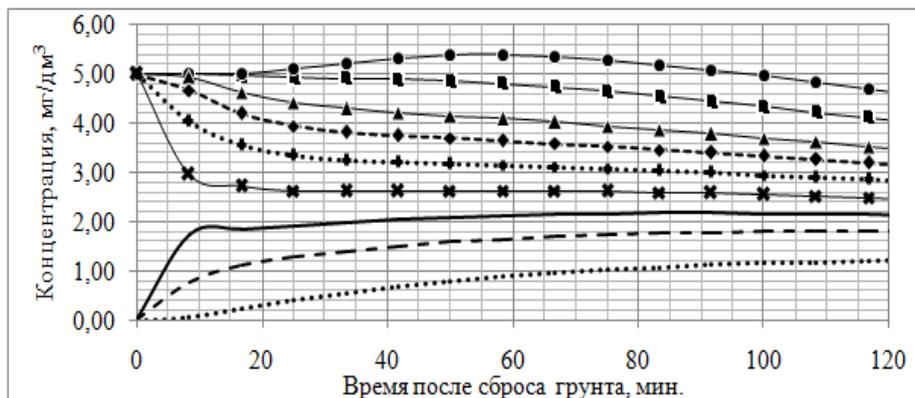


Рис. 4– Значения концентрации фракции взвеси ($u=0,32$ см/с) на глубине 10 м в различные моменты времени на различном удалении от центра облака взвеси: маркер круг – в центре; квадрат – 9 м от центра; треугольник – 13 м; ромб – 15 м; плюс – 17 м; крестик – 19 м; сплошная линия без маркера – 21 м; пунктирная – 23 м; точечная – 27 м

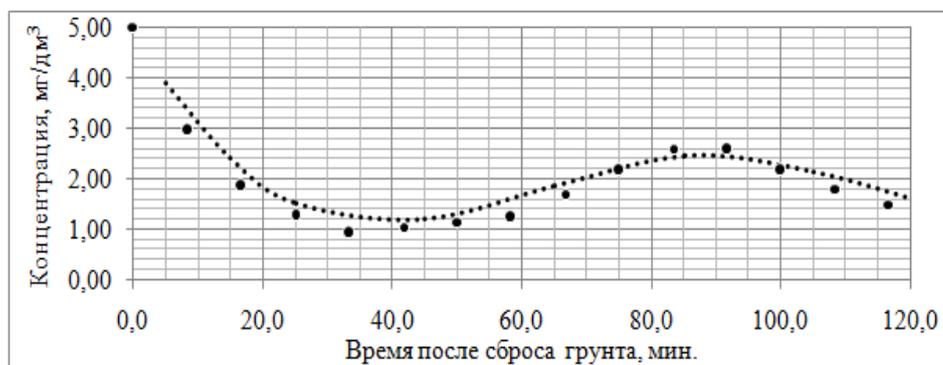


Рис. 5– Вариант изменения концентрации фракций взвеси на глубине 10 м при «отборе проб» на различном удалении от центра облака взвеси: точечная линия – результаты наблюдений; маркер круг – численный эксперимент на пространственной модели

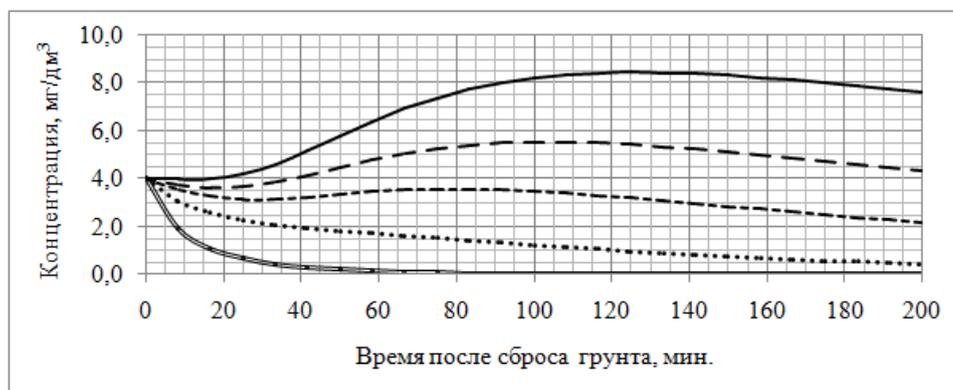


Рис. 6– Изменение максимальной концентрации взвеси в поверхностном слое в зависимости от ее гидравлической крупности: сплошная верхняя линия – $u=0,005$ см/с; мелкий пунктир – $u=0,05$ см/с; пунктир – $u=0,10$ см/с; точечная – $u=0,20$ см/с; двойная нижняя – $u=0,50$ см/с.

Радиус эквивалентного круга равен 74,4 м. Осадка судна в грузу – 6,2 м. Таким образом, сброс выполнен за пределами верхнего слоя моря (ниже корпуса судна). В пределах верхнего слоя моря превышение концентрации взвеси над фоном в облаке повышенной мутности составило $5,5$ мг/дм³. Гранулометрический состав грунтов представлен в табл. 4.

Остальные исходные данные и промежуточные расчеты: коэффициент Шези – 50 м^{0,5}/с; контрольное

расстояние – 185 м; начальное количество колец в пятне – 10; шаг во времени – 20 с; шаг по вертикали – 0,36 м; толщина облака взвеси в пределах верхнего слоя моря 5 м (количество слоёв по толщине облака – 14); количество интервалов времени до контрольного расстояния – 84. При введении этих данных в модуль «Дампинг-взвесь» (в модуле реализован принцип суперпозиции: исследуется распространение каждой фракции взвеси отдельно, с последующим суммиро-

ванием их концентрации на контрольном удалении от точки сброса) максимальное значение концентрации полидисперсной взвеси (превышение над фоном) на расстоянии 1 кабельтов (185 м) от места сброса составило 2,9 мг/дм³. С учетом фона значение концен-

трации взвеси будет равно – 2,9+5,6 = 8,5 мг/дм³. Измеренное значение составляет 8,0 мг/дм³. Отклонение расчетного значения от измеренного – 6,3%.

Таблица 4– Гранулометрический состав грунтов дноуглубления ГСХ [6]

№ пробы	Содержание фракций грунта, %							Плотность, т/м ³
	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,10 мм	0,10-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	< 0,005 мм	
Сред.	1,23	22,31	16,17	9,33	17,03	15,49	16,98	1,41
и, см/с	9,59	4,42	1,38	0,32	0,05	0,003	0,0003	-

Таблица 5– Изменение максимальной концентрации полидисперсной взвеси в облаке повышенной мутности в зависимости от расстояния

k	Расстояние, м	C _{МАХ} , мг/дм ³	k	Расстояние, м	C _{МАХ} , мг/дм ³
0	0	5,50	50	110	3,10
10	22	4,17	60	132	3,03
20	44	3,40	70	154	2,95
30	66	3,23	80	176	2,88
40	88	3,17	90	198	2,82

Таблица 6– Изменение C_{МАХ} полидисперсной взвеси по глубине на расстоянии 185 м от точки сброса в пределах верхнего квазиоднородного слоя

t	Глубина, м	C _{МАХ} , мг/дм ³	t	Глубина, м	C _{МАХ} , мг/дм ³
1	0,2	2,4	8	2,7	2,7
2	0,5	2,4	9	3,0	2,7
3	0,9	2,5	10	3,4	2,8
4	1,3	2,5	11	3,8	2,8
5	1,6	2,6	12	4,1	2,8
6	2,0	2,6	13	4,5	2,8
7	2,3	2,7	14	4,8	2,9



Рис. 7– Распределение концентрации взвеси в пятне на поверхности моря на расстоянии 185 м от точки сброса грунта.

Изменение значения C_{МАХ} по мере удаления от точки сброса грунта представлено в табл. 5. Кроме того, разработанная модель позволяет оценить изменение C_{МАХ} по глубине (табл. 6) и распределение концентрации взвеси в пятне (рис. 7).

4. ВЫВОДЫ

1. Разработанная математическая модель и ее решение корректно отображают реальный процесс

распространения полидисперсной взвеси после сброса грунта на морской подводный отвал и могут быть использованы при его исследовании в плоской и пространственной постановке задачи.

2. Сопоставление численных экспериментов по разработанной методике с результатами расчетов по фундаментальным решениям дает удовлетворительный результат при введении сдвига по времени t_0 : в плоской постановке – $t_0 = \Delta t = r_0^2 / (4D_T)$; в трёхмерной задаче – $t_0 = r_0 r_c / (4D_B)$ и $\Delta t = r_0^2 / (8D_B)$.

3. Отклонение результатов численного эксперимента с использованием разработанной методики от данных натурных наблюдений находится в допустимых пределах (не более 15%) при исследовании распространения взвеси на небольшом удалении от точки сброса грунта, при слабом ветровом волнении и при малой скорости течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрасов С.Н. Применение конечно-разностных схем при моделировании неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водном потоке / Юрасов С.Н., Горун В.В. // Украинский гидрометеорологический журнал: Науковий журнал / Голов. ред. С.М.Степаненко. – Одеса: “ТЭС”, 2014. – № 14 – с. 182–194.
2. Юрасов С.Н. Математическая модель неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водном потоке // Метеорологія, кліматологія та гідрологія: Межвід. наук. збірник України / [Юрасов С.Н., Горун В.В.]; голов. ред. С.М.Степаненко. – Одеса: Вид. «ТЕС», 2010. – Вип. 51. – С. 189–199.
3. Практикум по динамике океана. / [Ивченко В.О., Клепиков А.В., Козлов В.Ф. и др.]; под ред. д-ра геогр. наук Некрасова А.В., д-ра физ.-мат. наук Пелиновского Е.Н. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1992. – 320 с.
4. Ватерс К. Экспериментальное сравнение способов удаления грунта самоотвозным землесосным снарядом / К. Ватерс, М. Торн // Технология гидромеханизированных земляных работ. – М.: Транспорт, 1980. – С. 233–250.
5. Берлинский Н.А. Динамика техногенного воздействия на природные комплексы устьевой области Дуная: [монография] / Н.А. Берлинский. – Одесса: Астропринт, 2012. – 252 с.
6. Гончаров А.А. Исследование и моделирование процесса распространения взвеси в морской среде при сбросе грунта: автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. геогр. наук : спец. 11.00.08 «Океанология» / А. А. Гончаров / ГОИН. – М., 1986. – 24 с.
7. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод /

Под ред. проф. Караушева А.В. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 285 с.

REFERENCES

1. Yurasov S.N., Gorun V.V. Primenenie konechno-raznostnyh shem pri modelirovanii neustanovivsheysya turbulentnoy diffuzii vzvesi v vodnom potoke [Application of finite difference schemes for modeling of unsteady turbulent diffusion of particulate matter in the water flow]. *Ukr. gidrometeorol. ž. – Ukrainian hydrometeorological journal*, 2014, no.14, pp.182–194.
2. Yurasov S.N., Gorun V.V. Matematicheskaya model neustanovivsheysya turbulentnoi diffuzii vzvesi v vodnom potoke [A mathematical model of unsteady turbulent diffusion of particulate matter in the water flow]. *Meteorologiya klimatologiya ta gidrologiya. - Meteorology, climatology and hydrology*, 2010, Issue 51, pp. 189–199.
3. Ivchenko V.O., Klepikov A.V., Kozlov V.F. et al. *Praktikum po dinamike okeana* [Practical work on Ocean Dynamics]. Sankt-Peterburg, Gidrometeoizdat, 1992, 320 p. (Eds: Nekrasov A.V., Pelinovskiy E.N.)
4. Vaters K., Torn M. Eksperimentalnoe sravnenie sposobov udaleniya grunta samootvoznim zemlesosnim snaryadom [Experimental comparison of methods for removing soil samootvoznym suction dredger]. *Tehnologiya gidromehanizirovannih zemlyanah rabot - Technology of the gidromekhanized earthmovings*, 1980, pp.233–250.
5. Berlinskiy N.A. *Dinamika tehnogenogo vozdei stviya na prirodnie kompleksi ustevoi oblasti Dunaya* [Dynamics of anthropogenic impact on natural systems mouth area of the Danube]. Odessa, Astroprint, 2012, 252 p.
6. Goncharov A.A. Issledovanie i modelirovanie processa rasprostraneniya vzvesi v morskoi srede pri sbrose grunta. Avtoref. diss. kand. geogr. nauk. [Research and modeling of the spread of suspended matter in the marine environment at the disposal site. Autoabstract of the diss. cand. geogr. sci]. Moscow, 1986, 24 p.
7. Karashev A.V. *Metodicheskie osnovi ochenki i reglamentirovaniya antropogenogo vliyaniya na kachestvo poverhnostnih vod* [Methodical bases of assessment and regulation of anthropogenic impact on surface water quality]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 285 p.

VERIFICATION OF NUMERICAL SIMULATION OF SUSPENDED MATTER DISTRIBUTION UNDER MARINE DUMPING PROCESS

Jurasov S.M. cand. of techn. sciences,
Gorun V.V.,
Berlinsky N.A. dr of geogr. sciences

*Odessa State Environmental University, 15,
Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine*

The several of finite-difference schemes in flat and spatial statement of the dumping processes have been observed. Verification of numerical experiments and model's calibration is the important phases of mathematical simulation. The results of calculation by fundamental solution are the single corrected source for numerical simulation without data in situ. The several of finite-difference schemes in flat and spatial statement of equation for unsteady turbulent diffusion have been proposed.

The comparison of numerical simulation with calculations based on the fundamental formulas and also with data in situ was done. It was established that the explicit finite-difference scheme is more preferably for the short time intervals.

The results of numerical simulation by this scheme correspond with calculation by fundamental formula

for the flat statement if coefficient Courant = 0, 25 and using comparison of calculations with time shift equal the step of the finite-difference schemes.

The deviation of numerical experiment result from the direct investigations is not more then 10 – 15% under condition of small current velocity and small windy waves for the short distances from the dumping place. It was established that for these conditions are possible to calculate the horizontal coefficient of turbulent diffusion by Karaushev's formula.

Keywords: numerical simulation, data in situ, dumping, suspended matter

ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАВИСІ ПРИ ДАМПІНГУ ҐРУНТУ НА МОРСЬКОЇ ПІДВОДНИЙ ВІДВАЛ

Юрасов С.Н., к.техн.н.,

Горун В.В.,

Берлинский М.А., д.геогр.н.

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016 Одеса, Україна,*

У статті розглянуті різні кінцево-різницеві схеми при моделюванні розповсюдження зависі після скиду ґрунту на підводний відвал в плоскій і просторовій постановці завдання. Виконано порівняння результатів чисельних експериментів з розрахунками за фундаментальними рішеннями і з даними натурних спостережень. У висновках приводяться рекомендації для виконання інженерних розрахунків.

Ключові слова: математична модель, чисельний експеримент, дампінг, завись

*Дата першого представлення: 16.06.2015
Дата поступлення окончательной верси : 13.10.2015
Дата опублікування статті: 26.11.2015*