ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ УДЕЛЬНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ ЭНЕРГИИ ВОЛН И РАСХОДА НАНОСОВ В МЕЛКОВОДНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

А.Г.Марченко
Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
homicky@ukr.net

Настоящая работа направлена на поиск коррелятивных связей характеристик транспорта наносов в шельфовых морских зонах с параметрами ветровых волн. В качестве основы для оценки динамики наносов в прибрежной зоне моря использованы результаты работ А.Е. Михинова, полученных путем аналитических и численных исследований и подтвержденных многочисленными лабораторными и натурными данными. В результате предложенной автором оригинальной параметризации транспорта наносов получены обобщающие зависимости удельных расходов взвешенных наносов от удельной энергии волн. Даны расчетные формулы, предельно сокращающих трудоемкость вычислений.

This research work is aimed to find out the correlative connections that characterize the drift traffic in shelf seashore, including the affect wind waves. The acquisition of drift dynamics on the seashore zone is based on the result of the work A.E Mikhinov confirmed by numerous lab and natural data. The author propose the original method of the parameterization for the drift traffic that generazied the interconnections between the specific flow rate of the suspended drift and the specific wave power. The suggested formulas shorter the time for calculations significantly. The accuracy of calculations by the method suggested and by recommendations (see work A.E Mikhinov) .

Введение

В современных условиях интенсивного развития различных областей науки и техники значительно расширился и круг задач, связанных с масштабным и разноцелевым освоением береговых территорий и прибрежных акваторий морей и крупных водохранилищ. В этой связи повышается актуальность исследования гидродинамических процессов в мелководных зонах естественных и искусственных водоемов. О неослабевающем интересе к решению этих проблем свидетельствуют регулярно проводимые международные береговые конференции.

Одной из задач гидравлики мелководного штормового моря является изучение процессов миграции наносов под воздействием ветрового волнения. Динамика наносов в мелководных акваториях обусловлена различными видами волновых и квазистационарных движений водных масс. Для адекватного отображения этих сложных гидродинамических процессов необходимо учитывать влияние нестационарности турбулентных потоков и формирующихся в этих условиях придонных тангенциальных напряжений, возникающих на деформируемом (рифельном) дне под действием влекущего напряжения ветра на свободной поверхности и вызванного им волнения [2,6,11…15].

В настоящее время существует большое количество расчетных методик для определения транспорта наносов, в которых, к сожалению, не учитывается в достаточной мере влияния указанных выше факторов на формирование потока наносов. Особое место в ряду исследований динамики наносов в прибрежной и шельфовой зонах морей занимают работы А.Е.Михинова [1,4,5,10]. Результаты этих исследований представляются достаточно убедительными в теоретическом плане, подтверждены лабораторными и натурными данными, охватывают широкий диапазон изменения гидравлических условий. Разработанная на их основе методика прогноза динамики наносов в прибрежных и шельфовых зонах моря [5] имеет солидное научное обоснование, результаты расчетов по которой вполне могут быть отнесены к разряду наиболее достоверных. Но наряду с отмеченными достоинствами данной методики нельзя не обратить внимание на большую трудоемкость вычислений при определении удельных расходов наносов. Эти обстоятельства послужили побудительным мотивом для использования названной методики для анализа параметризации транспорта наносов в прибрежных и шельфовых морских зонах под воздействием ветровых волн.

Анализ взаимосвязи гидравлического параметров в прибрежной зоне моря

Шторм как на бесприливных, так и на приливных морях является решающим, наиболее общим фактором, определяющим характер динамических процессов на побережье. Особенно опасны длительные, застойные шторма, когда скорость ветра в приземном слое достигает 40 м/с и более. Из этого следует необходимость предъявления жестких требований при проектировании, производстве строительных работ и эксплуатации любых инженерных сооружений в зоне воздействия штормовых волн.

Ветровое волнение, порождаемые им течения и движение наносов, переформирование отмели, т.е. все абразионно-аккумулятивные процессы взаимосвязаны непосредственно. Поэтому при исследовании динамики наносов необходимо учитывать, что это явление представляет обобщенный результат штормового взаимодействия водных и грунтовых масс, обусловленного большим числом связей между многочисленными характеристиками и параметрами гидро- и литосферы. Здесь первостепенное значение приобретают такие характеристики волновых явлений как основные параметры ветровых волн и их трансформация на береговом склоне, величина и компоненты скорости волнового потока в плоскости дна, свойства грунтов склона.

Согласно линейной теории волн малой амплитуды максимальная составляющая орбитальной скорости в плоскости дна мелководного моря определяется формулой:

$$V_g = \frac{h}{\sqrt{\frac{\lambda}{\pi g} sh \frac{4\pi H}{\lambda}}}; \qquad (1)$$

где: h, λ - высота и длина волны соответственно; H – глубина воды на береговом склоне; g- ускорение свободного падения.

В контексте решения задачи о динамике наносов, как будет показано ниже, представляет интерес непосредственное определение глубин, соответствующих заданным величинам придонных скоростей V_g. Тогда из формулы (1) следует:

$$H = \frac{\lambda}{4\pi} arsh \frac{\pi g h^2}{\lambda V g^2} \qquad (2)$$

Из соображений удобства использования формулы (2) в последующих выкладках целесообразно привести ее к логарифмическому виду. Используя известное соотношение

$$arsh x = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1}),$$

а также введя обозначения

$$\lambda = \lambda_0 h; \quad \varphi = \frac{gh}{\lambda_0 V g^2}, \qquad (3)$$

формула (2) с учетом перестановок запишется так:

$$\frac{H}{h\lambda_0} = 0{,}183 \lg\left[\pi\varphi + \sqrt{(\pi\varphi)^2 + 1}\right]$$

При $\varphi \geq 1$, что характерно для условий прибрежной зоны моря, единицей под корнем допустимо пренебречь. С учетом всех преобразований формула (2) приобретает вид:

$$\frac{H}{h\lambda_0} = 0{,}183 \lg\varphi + 0{,}146 \qquad (4)$$

Зависимость (4) может быть использована для определения придонных скоростей V_g по заданным параметрам h, λ_0 и H. По (4) легко находится величина комплексного параметра φ, а из его определения (3) следует:

$$V_g = \sqrt{\frac{gh}{\lambda_0\varphi}}; \qquad (5)$$

что значительно упрощает расчет по сравнению с формулой (1).

Формирование рельефа побережья связано с процессом размыва дна моря. В связи с этим необходимы знания о величине размывающих скоростей $V_p = f\ (d)$ и глубинных границ размывающего действия волн. Эти вопросы рассмотрены в [2,3,7].Вводятся понятия предельного и массового размыва дна. В первом случае реализуются условия, обусловливающие подвижки отдельных частиц грунтов дна, а во втором случае отражается ситуация, когда приходит в движение весь слой размытых грунтов.

В [7] проведен сравнительный анализ различных зависимостей для определения скоростей размыва V_p и их соответствия опытным данным. В итоге предложена простая расчетная формула:

$$V_p = 2{,}8\sqrt{gh} + 0{,}1, \qquad (6)$$

где все размеры даны в метрической системе.

Для оценки скоростей массового размыва рекомендуется использовать такое соотношение: $V_{рм}=1,57\ V_р$, что следует из анализа опытных данных [2,7].

Для определения предельных глубин размыва дна может быть использована формула (4). Если исходить из того, что величина размывающей скорости на некоторой вертикали оказалась равной максимальной донной скорости, то есть вероятность реализации мгновенной ситуации предельного равновесия размываемых частиц дна. Тогда из условия равенства $V_р=V_g$ легко определить предельную размыва дна $H_р$. Однако для инженерной практики больший интерес представляют глубины, на которых идет массовый размыв $H_{рм}$. Эти глубины целесообразно представить в зависимости от размывающей скорости, учитывая соотношение $V_{рм}=1,57\ V_р$. Формула (4) в этом случае приводится к виду:

$$\frac{H_{рм}}{h\lambda_0} = 0{,}183\lg\varphi_р + 0{,}075, \qquad (7)$$

где

$$\varphi_р = \frac{gh}{\lambda_0 V_р^2}$$

Графики зависимостей (4) и (7) представлены на рис.1.

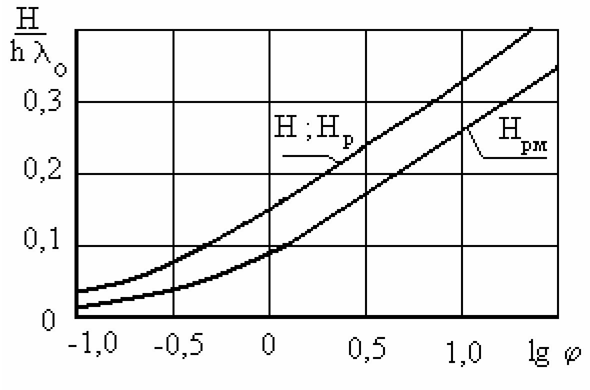

Рис.1. Унифицированная зависимость относительных глубин от параметра *φ*.

Параметризация транспорта наносов в мелководных акваториях

Как уже отмечалось, в качестве эталона для количественной оценки величин удельных расходов наносов при заданных параметрах ветрового волнения в морских мелководных зонах выбрана методика [5]. В работах автора [8,9] приведены результаты расчетов и их анализ. Установлена закономерность изменения величины удельных расходов наносов q в зависимости от параметра h^2/H и предложена, описывающая эту зависимость расчетная формула:

$$q = 0{,}117\frac{1}{(h\lambda_0)^{0,5}}\left(1-\frac{h}{H}\right)^{0,5}\left(\frac{h^2}{H}\right)^3, \qquad (8)$$

где q – удельный расход наносов на единицу длины фронта волны, $^3/с\times м$.

Формула (8) выведена на основе анализа данных о транспорте наносов со средней крупностью частиц *d=0,1мм*. Позволительно предположить, что установленная закономерность будет справедлива и в случаях перемещения наносов с произвольной крупностью частиц несвязных грунтов при условии учета влияния размывающих скоростей $V_p=f(d)$ на процессы взаимодействия волнения и грунтов дна береговой отмели. С этой целью производится ряд преобразований формулы (8). Умножив и разделив соотношение параметров (8) на $H^{0,5}$ получим:

$$q = 0{,}117\left(\frac{H}{h\lambda_0}\right)^{0,5}\frac{(H-h)^{0,5}}{H}\left(\frac{h^2}{H}\right)^3,$$

Второй множитель определяется формулой (4), в которой комплексный параметр φ предлагается дополнить множителем $\alpha = V_{01}^2/V_d^2$, где V_{01}/V_d - скорости размыва для частиц грунта крупностью 0,1мм и произвольного размера d соответственно. Тогда согласно определению (3) имеем:

$$\alpha\varphi = \frac{gh}{\lambda V_g^2}\left(\frac{V_{01}}{V_d}\right)^2$$

После указанных подстановок обобщенная зависимость для удельных расходов наносов с произвольной крупностью зерен песка приобретает вид:

$$q = 0{,}05(\lg\alpha\varphi + 0{,}8)^{0,5}\frac{(H-h)^{0,5}}{H}\left(\frac{h^2}{H}\right)^3, \qquad (9)$$

Расчеты по формулам(8) и (9) дают идентичные результаты для наносов с зернами *d=0,1мм*, что подтверждает правомерность выполненных преобразований и подстановок и достоверность принятых соотношений гидравлических параметров. Результаты расчетов по обобщенной зависимости (9) представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты расчетов по обобщенной зависимости для удельных расходов наносов с произвольной крупностью зерен песка.

h/H	h^2/H	$q^*_{01}\cdot 10^3$	$q_{0,1}\cdot 10^3$	$q_{0,25}\cdot 10^3$	$q_{0,5}\cdot 10^3$	$q_1\cdot 10^3$	$q_{0,25}/q_{0,1}$	$q_{0,5}/q_{0,1}$	$q_1/q_{0,1}$
0,350	0,1225	0,089	0,084	0,077	0,070	0,061	0,916	0,831	0,726
0,125	0,125	0,052	0,062	0,060	0,058	0,0567	0,968	0,942	0,915
0,200	0,200	0,354	0,241	0,23	0,219	0,206	0,953	0,909	0,855
0,500	0,250	0,570	0,527	0,463	0,397	0,214	0,879	0,753	0,406
0,333	0,333	1,326	1,020	0,939	0,860	0,762	0,921	0,843	0,747
0,250	0,500	2,500	2,580	2,428	2,83	2,109	0,941	0,885	0,818
0,500	0,500	2,480	2,830	2,486	2,132	1,646	0,878	0,754	0,582
0,500	0,750	8,200	8,230	7,231	6,200	3,795	0,878	0,754	0,461
0,400	0,800	10,69	9,320	8,424	7,531	6,361	0,904	0,808	0,682
0,375	1,125	21,77	21,95	19,973	18,02	15,552	0,901	0,821	0,709

0,667	1,333	36,51	32,70	27,248	21,23	11,107	0,833	0,649	0,340
0,600	1,800	70,81	71,88	61,243	49,83	32,565	0,852	0,693	0,453
0,500	2,000	110,00	95,52	83,924	71,97	55,580	0,879	0,754	0,582
0,800	3,200	240,70	247,40	196,97	136,59	0	0,796	0,552	0
Средние значения							0,88	0,80	0,70

* - расчет по рекомендациям [5]

Графическая интерпретация зависимости (9) дана на рис.2.

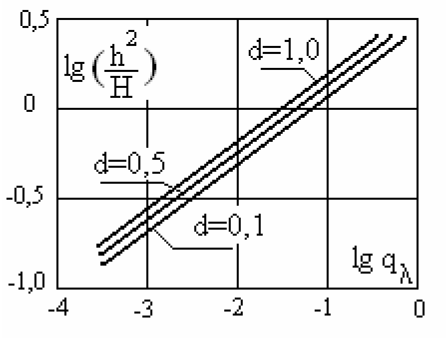

Рис.2 График обобщенной зависимости удельных расходов наносов от удельной энергии волн.

Использование системы логарифмических координат позволило привести эту зависимость к линейному виду. На оси абсцисс обозначены величины $q_\lambda = q\sqrt{\lambda_0}$, что позволяет избежать сепарации распределения q по признаку λ_0.

Данные таблицы показывают, что при изменении параметра h^2/H в довольно широких пределах, который может трактоваться как характеристика удельной энергии волн, отношение удельных расходов наносов q_d/q_{01} остается приблизительно постоянным для определенной крупности частиц d (см. нижнюю строку табл.). В этой связи небезынтересным стало рассмотрение аналогичных соотношений и других параметров, используемых при расчетах расходов наносов, в итоге чего получено:

$$\frac{q_d}{q_{01}} = \left(\frac{d_{01}}{d}\right)^{1/7} = \left(\frac{V_{01}}{V_d}\right)^{1/2} = \alpha^{1/4} \qquad (10)$$

Эти соотношения могут быть полезными для предварительной оценки (экспресс-анализе) динамики наносов на исследуемом участке мелководной акватории.

В заключение позволительно высказать следующее. Использованные в настоящей работе зависимости, к какой бы области исследования они не относились, имеют определенные связи между собой. Подтверждение одной из них опытом распространяется на остальные, и наоборот – несогласованность с опытными данными какой-либо формулы распространяется на все остальные зависимости, поскольку цепь логических следствий будет нарушена. В этом состоит важнейшее качество приводимых здесь рекомендаций по расчету элементов динамики прибрежной зоны моря. Последнее, разумеется, не исключает возможности их корректировки при наличии дополнительной информации о результатах натурных исследований.

Выводы

1.Настоящие разработки базируются на анализе результатов расчета динамики наносов по методике прогноза наносов в прибрежной и шельфовой зонах моря [5], которая в настоящее время представляется одной из наиболее обоснованных в научном плане и подтверждена опытными данными.

2.Предложены оригинальные зависимости удельных расходов наносов от удельной энергии волн для широкого диапазона гидравлических условий. Расчеты по новым зависимостям и по методике [5] дают удовлетворительную сходимость результатов.

3. В процессе разработки темы получены новые удобные формулы для определения придонных скоростей волновых движений водных масс в мелководных акваториях, обоснованы формулы для скоростей размыва несвязных грунтов дна для различной крупности, предложены расчетные формулы для определения глубин предельного и массового размыва дна.

4. Благодаря удачной параметризации гидравлических характеристик введены в рассмотрение комплексные параметры h^2/H и φ, которым отводится решающая роль в универсализации обсуждаемых зависимостей.

5. Предложенная методика прогноза наносов в мелководной зоне моря позволяет значительно сократить трудоемкость расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклановская В.Ф., Михинов А.Е., Чечель М.И. Численное моделирование гидродинамики морской прибрежной зоны с учетом литодинамических процессов. //Моделирование гидродинамических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях.- М.: Наука. 1989,- с.117-132.
2. Башкиров Г.С. Задачи гидравлики мелководного штормового моря. М., «Реклам бюро ММФ», 1971,48с.
3. Билеуш А.И., Марченко А.Г., Середяк Я.И., Штекель А.С. Инженерная подготовка территорий в сложных условиях.-Киев:»Будівельник».-1981.-208с.
4. Дебольский В.К., Анциферов С.М., Акавис Т.М. Задачи прогноза распределения наносов, взвешенных в русловых и приливных потоках //Водные проблемы на рубеже веков.- М.: Наука.-1999.-С.107-124.
5. В.И. Иванов, А.Е. Михинов. Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов)– Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 1991.- 51с.
6. 6. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов.- М.: ГЕОС, 2001.-193с.
7. Марченко А.Г. О взаимодействии волнового потока с размываемым дном // Гидромеханика.- 1976.- 33.-С.12-15.

8. Марченко А.Г, Терещенко Л.Н. Анализ динамики движения наносов под воздействием ветрового волнения. // Вісник Донецького Університету.- 2007.- 2.- С.99-103.
9. Марченко А.Г. Исследование факторов динамики наносов в морских шельфовых зонах с целью оптимизации инженерных расчетов.// Прикладна гідромеханіка.-2008.Том 10,№2.-С.75-79.
10. Михинов А.Е. Транспортирующая и эрозионно-аккумулятивная способность волновых потоков в береговой зоне открытых водоемов.// Управление водными ресурсами вод суши: теория и практика.- М.: Наука 1989.- с.111-132.
11. 11. Никишов В.И. От гидравлики открытых потоков – к гидромеханике речных систем.// Прикладна гідромеханіка.-2007.т.9,№2-3.-с.103-121.
12. Rubin D.M., Chezar H., Harney J.N., Topping D.J., Melis T.S., Sherwood C.R. Underwater microscope for measuring spatial and temporal changes in bed – sediment grain size // Sedimentary geology.-2006.- № 5.- P.27-32.
13. 13. Trincardi H.C., Mimisini D., Verdicchio G., Asioli A., Piva A. Dating mass- transport deposits along continental margins affected by bottom currents // Geophysical Research Abstracts.- 2007.- 9, № 09057.- P. 177-186.
14. Wang S.S.Y., Wu W. River sedimentation and morphology modeling – the state of the art and future development // Proceedings of the 9-th International Symposium on River Sedimentation, October 18-21.- 2004.- Yichang, China.- P. 71-94.
15. Wu W. Depth-average two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels // J. Hydraulic Engineering. 2004.- vol.130.- P.1013-1024.