doi: 10.5862/MCE.55.8

Волнозащитные наброски в корневых частях портовых молов

*Д.т.н., заведующий кафедрой К.Н. Макаров,
аспирант А.Г. Чеботарев,
Сочинский государственный университет*

Аннотация. По данным лабораторного моделирования установлено, что защитные наброски из фасонных блоков в корневых частях портовых молов при косом подходе волн и отсутствии пляжа подвергаются значительным волновым воздействиям и теряют устойчивость. При этом масса блоков, необходимая для устойчивости сооружения, оказывается существенно большей, чем расчетная по нормативным документам.

Это объясняется интерференцией прямых и отраженных волн. При полном отражении волн от молв высота волны, воздействующей на наброску, оказывается в 2 раза больше исходной. При неполном отражении высота интерферирующей волны зависит от угла подхода волны и конструкции мола.

Даются теоретическое обоснование и методика расчета. Приводятся результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: портовые молы; защитная наброска; волновые воздействия; устойчивость фасонных блоков

Введение

Для защиты корневых частей портовых молв от разрушения штормовым воздействием применяются волногасящие наброски из камня, обыкновенных или фасонных блоков (тетраподов, гексабитов и других).

Масса предельного равновесия m или m_z элементов волногасящих набросков в зависимости от высоты h и длины λ расчетной волны определяется согласно [1]:

- при расположении камня или блока на участке откоса от верха сооружения на глубине $z \leq 0.7h$ по формуле:

$$m = \frac{3.16k_{fr}\rho_m h^3}{\left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1\right)^3 \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^3 \varphi}} \sqrt{\frac{\lambda}{h}}, \quad (1)$$

- при $z > 0.7h$ по формуле:

$$m_z = m e^{\frac{7.5z^2}{h\lambda}}, \quad (2)$$

где k_{fr} – коэффициент, принимаемый по таблице 1; ρ_m – плотность камня или материала блока; ρ – плотность воды; φ – угол наклона откоса наброски к горизонту.

Таблица 1. Значения коэффициента k_{fr} для камня, обыкновенных бетонных и фасонных блоков

Элементы крепления	Коэффициент k_{fr}	
	При наброске	При укладке
Камень	0,025	-
Обыкновенные бетонные блоки	0,021	-
Тетраподы и другие фасонные блоки	0,008	0,006

В документах [2, 3] приводится несколько иная формула для определения массы равновесия камня или блока. Кроме того, в них рекомендуется при косом подходе волн к сооружению уменьшать расчетную массу блоков путем ее умножения на коэффициент $K_\beta = (0.4 + 0.6 \cos \beta)$, где β – угол между лучом волны и нормалью к оси сооружения.

Здесь следует отметить, что в документе [1] рекомендуется при особых условиях уточнять коэффициент k_{fr} по данным лабораторных исследований. Таким образом, в нормативном Макаров К.Н., Чеботарев А.Г. Волнозащитные наброски в корневых частях портовых молв

документе не исключается возможность появления ситуаций, когда расчеты по формулам (1), (2) могут не соответствовать результатам экспериментов.

Поскольку волногасящие наброски корневых частей молов располагаются, как правило, в прибойной зоне, на них следует распространять рекомендации [2, 5] об увеличении в этой зоне расчетной массы элементов набросок на 15 %. При этом элементы наброски с максимальной расчетной массой следует располагать по всей длине защищаемого откоса от гребня сооружения до его основания.

Заложения морских откосов набросок рекомендуется принимать для камня в пределах 1:1.5...1:3 [4], для бетонных массивов или фасонных блоков – в пределах 1:1...1:2 [2]. Ширину гребня набросных сооружений согласно [6] следует принимать равной $b_r = 0.06\lambda$, где λ – длина расчетной волны на подходе к сооружению.

Приведенные рекомендации российских нормативных документов в целом соответствуют аналогичным требованиям, принятым за рубежом [7–13].

В то же время как в России, так и в других странах продолжают теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия волн с набросными конструкциями. При этом, с одной стороны, исследуется влияние формы массивов и их пористости, уклонов наброски и ширины ее гребня на устойчивость блоков и волногасящие свойства сооружений [14–19]. С другой стороны, анализируется влияние конструкций набросных сооружений, углов подхода волн к ним и характера волнения на устойчивость сооружений в целом и изменение кинематической, групповой и энергетической структуры волн [20–30]. Следует отметить, что исследования, особенно численные, ведутся в основном для фронтального подхода волн к сооружению (одномерная задача), который ошибочно считается наиболее опасным с точки зрения устойчивости набросок.

Ниже приводятся результаты исследований взаимодействия волн с набросными конструкциями на плоской и пространственной гидравлических моделях. Дается их теоретическое обоснование с использованием двумерной линейной модели, основанной на теории волн малой амплитуды.

Результаты лабораторных исследований

Как показали экспериментальные исследования, соблюдение всех приведенных выше рекомендаций нормативных документов не всегда обеспечивает устойчивость волнозащитных набросок в корневых частях портовых молов.

Так, при проектировании гидротехнических сооружений транспортно-перегрузочного комплекса на мысе Ая в районе порта Ванино, Хабаровский край, одной из задач было обоснование конструкции укрепления корневой части сплошного мола-причала (рис. 1).

По результатам математического моделирования волновой обстановки в районе причала были определены расчетные элементы волн 1 % обеспеченности в системе расчетного шторма повторяемостью 1 раз за 50 лет от ССВ направления по линии первого обрушения, воздействующих на корневую его часть со стороны открытого моря. Эти элементы следующие: критическая глубина $d_{cr} = 7.7$ м, высота волны при обрушении $h_{cr1\%} = 6.5$ м, средняя длина $\lambda_{cp} = 92$ м, средний период $T_{cp} = 9.7$ с.

По результатам расчетов устойчивости фасонных блоков с учетом их расположения в прибойной зоне для укрепления корневой части мола со стороны открытого моря была рекомендована наброска фасонных блоков (тетраподов или гексабитов) массой 13 т с уклоном 1:2 и шириной по верху 9.2 м.

Для проверки предложенных решений было выполнено гидравлическое моделирование в волновом лотке и в бассейне Научно-исследовательского центра «Морские берега» (филиал ОАО ЦНИИС), г. Сочи.

Рисунок 1. Схема гидротехнических сооружений транспортно-перехваточного комплекса на мысе Ая в районе порта Ванино

Экспериментальный лоток имеет длину 20 м, ширину 0,6 м, высоту стенок 1,0 м. Волны генерировались щитовым волнопродуктором, установленным в прямке у одной из торцевых стенок. Геометрический масштаб модели с учетом размеров волнового лотка и моделируемых сооружений принят равным $M = 1:44$. Измерения параметров волн проводились с использованием емкостных волнографов типа ДУЕ-1. Обработка результатов выполнялась с помощью измерительной системы, состоящей из персональной ЭВМ с программой для обработки данных, соединенной с аналого-цифровым преобразователем. Уровень наполнения лотка водой соответствовал расчетному уровню моря 5 % обеспеченности из наивысших годовых, который равнялся $-0,32$ м в Балтийской системе высот. Параметры волн задавались по данным математического моделирования.

По результатам исследований в волновом лотке было установлено, что тетраподы массой 13 т оказались не устойчивы. Таким образом, результаты опытов, на первый взгляд, противоречили теоретическим представлениям и нормативным документам [1–3, 5].

Однако, как было сказано выше, в [1] указано на необходимость при сложном рельефе дна уточнять коэффициент устойчивости фасонных блоков $K_{ф}$ по данным опытов.

Поскольку рельеф с морской (северной) стороны проектируемого причала весьма сложный, дно имеет переменный уклон и резкий перепад глубин вблизи основания откосного укрепления, окончательное проектное решение должно было быть принято по данным экспериментальных исследований на гидравлических моделях.

Пространственное моделирование выполнялось в глубоководном волновом бассейне. Бассейн в плане имеет форму равнобокой трапеции с основаниями 41 и 25 м и расстоянием между ними 31,5 м. Высота стенок бассейна 1,7 м. Бассейн оснащен передвижными волнопродукторами, которые представляют собой группу однотипных установок, обеспечивающих возвратно-поступательное движение щитов. Привод волнопродуктора включает электродвигатель постоянного тока мощностью 17 кВт и механическую трансмиссию, с помощью которой можно регулировать частоту и амплитуду колебаний щита. С целью исключения отражения волн от задней стенки бассейна отсыпалась волногасящая берма. С учетом размеров бассейна и моделируемого участка берега геометрический масштаб модели был принят $m_r = 1:60$. Тогда в соответствии с критерием Фруда масштаб массы элементов волногасящей наброски $m_m = 1:60^3$. Измерения параметров волн выполнялись той же измерительной системой, что и в лотке.

По результатам исследований на плоской модели при моделировании в волновом бассейне масса тетраподов в откосном укреплении была увеличена до 20 т.

Кроме того, поскольку головная часть укрепления выходит на глубины до 24 м (рис. 2), было решено на модели воспроизвести наиболее жесткие условия подхода неразрушенной волны высотой 7,7 м, длиной 121 м с периодом 9,7 с.

Рисунок 2. Фрагмент плана гидравлической модели в волновом бассейне

При таких волновых параметрах теоретически (по формуле (1) с учетом увеличения массы на 15 % в прибойной зоне) фасонные блоки должны быть устойчивы в наброске с уклоном 1:2 при массе 20 т.

Профили гидравлической модели при первом опыте с головной частью наброски из тетраподов массой 20 т приведены на рисунке 3.

В первом опыте при воздействии волн на откосное сооружение наблюдались интерференция прямой и отраженной волн и потеря устойчивости внешних тетраподов массой 20 т, а затем и внутренних тетраподов массой 13 т. Откосное сооружение во время опыта было разрушено.

Рисунок 3. Профили А-А и Б-Б на гидравлической модели в первом опыте с тетраподами массой 20 т в головной части защитной наброски

Далее с целью определения оптимального конструктивного решения, при котором откосное сооружение было бы устойчиво к воздействию расчетных волн, были проведены 20 опытов. В них варьировались следующие параметры конструкции:

- уклоны откосов (1:2, 1:3) на разных участках сооружения;
- типы элементов крепления откосов (тетраподы, гексабиты);
- масса элементов крепления откосов;
- количество и толщина слоев элементов наброски (укладки);
- ширина полки откосного сооружения;
- упорный пояс на разных участках сооружения.

По результатам экспериментов было установлено, что даже при наличии в головной части наброски гексабитов массой 40 т с уклоном 1:2 сооружение разрушается под воздействием расчетного волнения (рис. 4).

Во всех опытах причиной разрушения конструкции оказывалась потеря устойчивости нижних рядов фасонных массивов в головной части сооружения, подвергающихся воздействию интерферирующей волны. Поэтому в последующих экспериментах, во-первых, сократили длину наброски вдоль мола, во-вторых, в головной части перед сооружением установили упорный свайный ряд. На рисунках 5, 6 показаны волновое воздействие на сооружение во время опыта и его вид после окончания опыта.

Рисунок 4. Вид сооружения по окончании опыта с наброской гексабитов в головной части массой 40 т

Рисунок 5. Волновое воздействие на сооружение во время опыта с упорным рядом свай

Макаров К.Н., Чеботарев А.Г. Волнозащитные наброски в корневых частях портовых молов

Рисунок 6. Вид сооружения с упорным рядом свай в конце опыта

По результатам выполненных экспериментальных исследований для дальнейшего проектирования была рекомендована конструкция укрепления корневой части мола в виде защитной наброски из гексабитов массой 40 т в головной ее части со свайным упорным рядом (рис. 7).

Рисунок 7. Конструкция головной части сооружения с упорным рядом свай

При гидравлическом моделировании мола-причала (рис. 5) отмечалось образование ударной струи интерферируемых волн, которая и вызывала разрушения сооружений.

Таким образом, данные экспериментальных исследований показали, что при значительных глубинах перед откосными укреплениями в корневых частях портовых молв и косом подходе волн к ним имеют место значительные волновые воздействия на эти участки. При этом для обеспечения устойчивости элементов волногасящих набросок необходимо существенно увеличивать их массу по сравнению с расчетной по нормативным документам.

Следует отметить, что ранее ни в отечественных, ни в зарубежных источниках [17–30] указанный эффект снижения устойчивости фасонных блоков в набросках корневых частей молв не отмечался.

Теоретическое обоснование экспериментальных данных и примеры расчетов

Для теоретического обоснования результатов экспериментальных исследований рассмотрим косое отражение волн от мола, корневая часть которого подлежит защите (рис. 8) [31–33].

Если ось y направить вдоль мола, ось x – перпендикулярно к ней, то при условии равенства угла падения углу отражения выражения для уровня свободной поверхности падающей и отраженной волн при полном отражении (рис. 8а) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}\eta_n &= (A_n) \cos[mt - k(x \cos \alpha) + y \sin \alpha], \\ \eta_{от} &= (A_{от}) \cos[mt - k(-x \cos \alpha) + y \sin \alpha],\end{aligned}\quad (3)$$

где α – угол между осью x и лучом падающей волны; $A_n = A_{от} = h/2$ – амплитуды прямой и отраженной волн при полном отражении; h – высота волны; $m = 2\pi/T$; T – период волны; $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны. Угол пересечения рассматриваемых волн друг с другом $\delta = 180^\circ - 2\alpha$.

Уровень свободной поверхности η , являющийся результатом интерференции падающей и отраженной волн, выразится в виде:

$$\eta = \eta_n + \eta_{от} = h \cos k' x \cos(mt - k'' y), \quad (4)$$

где $k' = k \cos \alpha$, $k'' = k \sin \alpha$.

Суммарное колебание уровня можно представить себе как прогрессивную волну длиной

$$\lambda'' = \lambda \sin \alpha, \quad (5)$$

движущуюся вдоль оси y , с амплитудой, косинусоидально изменяющейся вдоль оси x .

Максимальные значения амплитуды имеет при $x = -n\pi/k'$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$), в то время как при $x = -(2n+1)\pi/2k'$ уровень будет неизменно оставаться в среднем положении. Водная поверхность покрыта поднятиями и впадинами в шахматном порядке, и вся эта система перемещается вдоль мола со скоростью $c'' = c_0 \sin \alpha = c_0 \cos(\delta/2)$, где $c_0 = (gd)^{0.5}$ – скорость каждой из первоначальных падающей и отраженной волн, d – глубина.

На рисунке 8а схематично показан результат интерференции для момента $t = 0$ при $h = 20$ и $\alpha = 30^\circ$ (т.е. $\delta = 120^\circ$). Полученная картина рельефа поверхности симметрична относительно линии $x = -n\pi/k'$. Как видно из рисунка 8а, при полном отражении волн ($k_{ref} = 1$), подходящих к молу под углом $\alpha = 30^\circ$, на наброску будет воздействовать волна с высотой, в 2 раза превышающей исходную.

Рисунок 8. Полное (а) и неполное (б) косое отражение волн от оградительного мола: 1 – мол; 2 – защитная наброска, 3 – интерферирующая волна, воздействующая на головную часть наброски

Если мол имеет волногасящую конструкцию (откос, защита наброской на всем протяжении, свайная стена малой сквозности), то отражение волн от него будет неполным, $k_{ref} < 1$. Тогда амплитуда отраженной волны будет меньше амплитуды исходной волны: $A_{от} = k_{ref} A_{п}$.

В этом случае волновое поле в окрестности мола будет иметь вид, показанный на рисунке 8б. Выражение для уровня свободной поверхности [31]:

$$\eta = (A_{п} + A_{от}) \cos k'x \cos(mt - k'y) + (A_{п} - A_{от}) \sin k'x \sin(mt - k'y). \quad (6)$$

На рисунке 8б показан результат косой интерференции волн при прежних значениях h и α и $k_{ref} = 0.5$. Неравенство амплитуд интерферирующих волн приводит к некоторому «размытию» рельефа свободной поверхности. Поднятия и впадины сливаются в длинные гребни и ложбины, вытянутые в общем случае вдоль гребней падающей, то есть большей волны. Вся картина по-прежнему смещается вдоль оси y со скоростью $c'' = c_0 \sin \alpha$.

Из приведенных теоретических положений следует, что при расчете массы предельного равновесия элементов оголовка волногасящей наброски корневой части мола при косом подходе волн к молу в качестве расчетных следует принимать высоту и длину интерферирующей волны, определяемые по формулам (4)–(6).

В расчете можно выделить 3 варианта подхода волны к сооружению (рис. 9).

1. Луч волны идет перпендикулярно к оси мола, $\alpha = 0^\circ$. Тогда наибольшие нагрузки испытывает боковая часть наброски. Расчетной является прямая волна с элементами $h_{пр}$, λ .
2. Луч волны идет параллельно оси мола. Наибольшие нагрузки испытывает головная часть наброски $\alpha = 90^\circ$. Расчетной является прямая волна с элементами $h_{пр}$, λ .
3. Луч волны идет под углом к оси мола $0 < \alpha < 90^\circ$. Наибольшие нагрузки испытывает головная часть наброски. Расчетной является интерферирующая волна с элементами $h_{инт} = h_{пр} + h_{отр}$, λ'' , определяемыми по формулам (4)–(6).

Рисунок 9. Варианты подхода луча волны к оси мола:
1 – мол, 2 – защитная наброска, 3 – луч волны

При изменении угла α от 0° до 90° расчетная масса наброски вначале увеличивается до некоторой максимальной величины, а затем уменьшается.

Коэффициент отражения волн от мола k_{ref} рассмотрим для трех случаев.

1. Мол имеет сплошную конструкцию. Тогда коэффициент отражения волн от него может быть определен по формуле [1]:

$$k_{ref} = k_r k_p k_{ref,i} \sqrt{\cos \theta_r}, \quad (7)$$

где k_r , k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости поверхности ограждающего сооружения, определяемые по специальной таблице из [1]; $k_{ref,i}$ – коэффициент отражения, также принимаемый по таблице из [1] в зависимости от угла наклона отражающей поверхности к горизонту, при этом для отражающей поверхности, наклоненной к горизонту на угол более 45° , $k_{ref,i} = 1$; θ_r – угол между фронтом волны и отражающей поверхностью, $\theta_r = \alpha$.

Из (7) следует, что при косом подходе волн к оси мола ($\theta_r > 0^\circ$) коэффициент отражения волн всегда меньше 1.

Макаров К.Н., Чеботарев А.Г. Волнозащитные наброски в корневых частях портовых молов

2. Мол имеет набросную конструкцию или защиту из наброски по всей длине. Тогда коэффициент отражения волн определяется по формуле [2]:

$$k_{\text{ref}} = 0.0383 \sqrt{\frac{\lambda}{h}} \left(\frac{100\%}{\Pi} \right)^{3/2} \frac{1}{\text{ctg}^2 \varphi} \sqrt{\cos \theta_r}, \quad (8)$$

где Π – пористость наброски (для камня $\Pi = 20$ –25, для обыкновенных бетонных массивов $\Pi = 42$ –44, для тетраподов и гексабитов $\Pi = 47$ –50); φ – угол наклона откоса боковой части мола к горизонту.

3. Мол имеет конструкцию из рядов свай малой сквозности со сплошной тыловой стеной (проницаемая стена с волновой камерой). В этом случае коэффициент отражения [4]:

$$k_{\text{ref}} = \frac{\beta - (\beta - 2)e^{-2ikb}}{2 + \beta - \beta e^{-2ikb}} \sqrt{\cos \theta_r}, \quad (9)$$

где $\beta = (g/d)^{0.5} - \mu$ – безразмерный параметр; $\mu = \xi V_{\text{ср}}/2g$ – линеаризованный коэффициент гидравлического сопротивления [34]; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость жидкости у проницаемой стены, $V_{\text{ср}} = 0.35h(g/d)^{0.5}$; b – ширина волновой камеры.

Приведенная методика расчета массы предельного равновесия элементов защитных набросок в корневых частях молов реализована в виде компьютерной программы. На рисунках 10, 11 приведены некоторые результаты расчетов.

Рисунок 10. Зависимость массы предельного равновесия тетраподов от высоты волны и угла ее подхода к молу сплошной конструкции при уклоне наброски 1:2

Рисунок 11. Зависимость массы предельного равновесия тетраподов от высоты волны и коэффициента ее отражения от мола при угле подхода $\alpha = 45^\circ$ и уклоне наброски 1:2

Из рисунка 10 следует, что при увеличении угла подхода волны к сооружению от 0° до 56° расчетная масса фасонных блоков наброски в его корневой части плавно увеличивается. При дальнейшем увеличении угла подхода волны расчетная масса блоков быстро уменьшается.

Рисунок 11 показывает существенную зависимость расчетной массы фасонных блоков в защитной наброске от коэффициента отражения волн, то есть от конструкции мола.

Изложенная методика была использована при проектировании ремонта защитной наброски корневой части Южного мола порта г. Сочи.

Выводы

1. Выполнены экспериментальные исследования устойчивости фасонных блоков в защитной наброске корневой части портового мола сплошной конструкции. В результате установлено, что масса предельного равновесия блоков при косом подходе волн к молу оказывается существенно большей, чем рассчитанная по рекомендациям нормативного документа [1].

2. Дано теоретическое обоснование экспериментальным данным, которое заключается в необходимости учета интерференции волн при их отражении от мола. Предложена методика расчета массы предельного равновесия элементов набросок с учетом интерференции волн.

3. Разработана компьютерная программа и выполнены численные эксперименты для определения зависимости расчетной массы фигурных блоков от угла подхода волн и коэффициента их отражения от сооружения.

Статья подготовлена в рамках госбюджетной НИР № 2614 «Разработка математических моделей взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями» Сочинского государственного университета.

Литература

1. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Минрегионразвития РФ, 2012. 112 с.
2. ВСП 33-03-07. Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов. М.: МО РФ, 2008. 90 с.
3. Р 31.3.07-01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. М.: Минтрансстрой РФ, 2001. 37 с.
4. СП 32-103-97. Проектирование морских берегозащитных сооружений. М.: Трансстрой, 1998. 166 с.
5. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1990. 432 с.
6. РД 31.31.86-85. Рекомендации по проектированию и технологии строительства оградительных сооружений из наброски с жестким экраном. Ленинград: ММФ СССР, 1986. 77 с.
7. Coastal Engineering Manual, CEM: Overview and Coastal Hydrodynamics. USACE (U.S. Army Corps of Engineers), Engineer Manual, 2010. EM 1110-21100.
8. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. Port and Harbours Bureau. Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2009. 306 p.
9. Ferry Developments and Their Consequences for Ports: Recommendations for the Design and Operation of Port Facilities. Permanent International Association of Navigation Congresses, 2014. 118 p.
10. Yokota H. Revision of Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan // Steel Constructions Today & Tomorrow. 2006. No.16. Pp. 1-4.
11. An Environmental Management System Primer for Ports: Advancing Port Sustainability. U.S. Environmental Protection Agency, 2007. 106 p.
12. Port Works Design Manual. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. 2004. 89 p.
13. Maritime Structures. British Standards Institution. London, 2000. 320 p.
14. Van Rijn L.C. Harbour siltation and control measures 2012 [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: www.leovanrijn-sediment.com. (дата обращения: 07.03.2015)

15. Van der Meer J.W. Conceptual design of rubble mound breakwaters. Proceedings of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures. Venice. Italy. 1-3 October 1992. Pp. 221–315.
16. Kobayashi N., Pietropaolo J.A. Melby J.A. Wave transformation and runup on dikes and gentle slopes // Journal of coastal research. 2012. Vol. 29(3). Pp. 615–623.
17. Yuliasuti D.I., Hashim A.M. Wave Transmission on Submerged Rubble Mound Breakwater Using L-Blocks. 2011 // 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. Vol. 6. Pp. VI-243–VI-248.
18. Araki S., Kotake Y., Kanazawa T., Matsumura A., Deguchi I. Development of numerical simulation method for predicting deformation of rubble mound seawall // Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering. ASCE. 2008. Pp. 1485–1497.
19. Tamrin, Pallu S., Parung H., Thaha A. Experimental Study of Perforated Concrete Block Breakwater // International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS. 2014. Vol.14. Pp. 6–10.
20. Макаров К.Н., Макаров Н.К. Моделирование оградительных сооружений порта Мзымтинского в Адлерском районе г. Сочи // Вестник МГСУ. 2010. Спецвыпуск. №1. С. 50–54.
21. Макаров К.Н., Дроботько С.Ю. Математическое моделирование гидротехнических сооружений оздоровительного комплекса «Государственная резиденция Российской Федерации в г. Пионерске Калининградской области» // European researcher. 2010. №1. С. 12–16.
22. Long G.T., Kantardgi I.G. Wave Load and Stability of the Port Mole Wall in the Period of Construction // International Journal of Environmental Protection. 2011. Vol. 1. Pp. 40–42.
23. Brown C.T., Dentale F. Variable distribution of armour on seawalls and breakwaters // Proceedings of a conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters. London, 2013. Pp. 1–10.
24. Cavallaro L., Dentale F., Donnarumma G., Foti E., Musumeci R.E., Pugliese Carratelli E. Rubble mound breakwater overtopping estimation of the reliability of a 3D numerical simulation // 33rd International Conference on Coastal Engineering. 1-6 July 2012. Santander, Spain, 2012. Pp. 1–9.
25. Wang K.H., Dai Z., Lee H.S. Modeling wave run-up along a sloping or a moving wall boundary // Journal of coastal research. 2011. No. (6). Pp. 1159–1169.
26. Hiraishi T., Mase H., Kawata T., Yukimoto T., Tokunaga S., Matsushita H. Experimental Study on Counter-weight Blocks for Breakwater Stability // Proceedings 21th International Conference of Offshore and Polar Engineering. 2011. Vol. 3. Pp. 673–681.
27. Xiang J., Latham J.P., Virel A., Anastasakil E., Painl C., Milthaler, F. Simulation tools for numerical breakwater models including coupled fluidity 3d waves // 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE). 1-6 July 2012. Santander, Spain, 2012. Pp.1–9.
28. Zanuttigh B., Van der Meer J.W. Wave reflection from coastal structures. XXX International Conference on Coastal Engineering. 3–8 September 2006. San Diego, U.S.A, 2006. Pp. 4337–4349.
29. Dentale F., Donnarumma G, Carratelli E.P. Numerical wave interaction with tetrapods breakwater // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2014. Vol. 6, Issue 4. Pp. 800–812.
30. Chopakatla S.C., Lippmann T.C., Richardson, J.E. Field verification of a computational fluid dynamics model for wave transformation and breaking in the surf zone // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 2008. No. 134(2). Pp. 71–81.
31. Некрасов А.В. Приливные волны в окраинных морях. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 247 с.
32. Шарова В.В. Исследование размыва у лицевой стенки оградительного сооружения от воздействия косоподходящих волн // Вестник МГСУ. 2014. №2. С. 179–186.
33. Sharova V., Kantarzi I. Experimental study of the scour in the breakwater front from oblique waves // Proceedings of 5th International Conference on The Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection "Coastlab'14". Varna, Bulgaria, 2014.
34. Леонова А.Н. Методика определения коэффициентов гидравлического сопротивления проницаемых волногасящих гидротехнических сооружений. Дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. 176 с.

*Константин Николаевич Макаров, г. Сочи, Россия
Тел. моб.: +7(988)2358262; эл. почта: ktk99@mail.ru*

*Артём Геннадьевич Чеботарев, г. Сочи, Россия
Тел. раб.: +7(8622)531266; эл. почта: chebotarev-artem@mail.ru*

© Макаров К.Н., Чеботарев А.Г., 2015

Breakwater placement at the root of a seawall

K.N. Makarov

Sochi State University, Sochi, Russia
+79882358262; e-mail: ktk99@mail.ru

A.G. Chebotarev

Sochi State University, Sochi, Russia
+78622531266; e-mail: chebotarev-artem@mail.ru

Key words

port seawalls, protective breakwater, wave impacts, stability of shaped blocks

Abstract

The laboratory simulation established that the oblique wave approach and the absence of a beach expose the breakwaters made of shaped blocks at the root of seawalls to significant wave impacts, which results in their loss of stability. The mass of blocks required to maintain the stability of the structures is significantly greater than the one calculated in regulatory documents.

This can be explained by the interference of direct and reflected waves. For a wave fully reflected from a seawall, the standing wave affecting the breakwaters will reach a height twice as great as the original. For a partially reflected wave, the height of the interfered wave depends on the angle of wave approach and the design of the seawall.

The paper presents a theoretical rationale and a calculation methodology and introduces the results of numerical experiments.

References

1. SP 38.13330.2012. *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov)* [Set of rules 38.13330.2012. Load and impact on hydraulic structures (wave, ice and vessels)]. Moscow: Minregionrazvitiya RF, 2012. 112 p. (rus).
2. VSP 33-03-07. *Instruktsiya po proektirovaniyu otkosnykh i skvoznykh ograditelnykh sooruzheniy i spetsialnykh podvodnykh stendov* [Departmental codes of rules 33-03-07. Instructions for the design slope and cross-cutting protective structures and special underwater stands]. Moscow: Russian Federation Ministry of Army, 2008. 90 p. (rus).
3. R 31.3.07-01. *Ukazaniya po raschetu nagruzok i vozdeystviy ot voln, sudov i lda na morskije gidrotehnicheskie sooruzheniya* [Instructions for calculation of loads and impacts from waves, ships and ice on marine hydraulic structures]. Moscow: Ministry of transport construction of the Russian Federation, 2001. 37 p. (rus).
4. SP 32-103-97. *Proektirovanie morskikh beregozaschitnykh sooruzheniy* [Code of rules 32-103-97. Design of coast protection structures]. Moscow: Transstroy, 1998. 166 p. (rus).
5. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zavyalov V.K. *Nagruzki i vozdeystviya vetrovykh voln na gidrotehnicheskie sooruzheniya* [Load and the influence of wind waves on the waterworks]. Saint-Petersburg: VNIIG im. B.E.Vedeneeva, 1990. 432 p. (rus).
6. RD 31.31.86-85. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i tehnologii stroitelstva ograditelnykh sooruzheniy iz nabroski s zhestkim ekranom* [Recommendations for design and construction of protective structures of sketches with a hard screen]. Leningrad: Ministry of marine fleet of the USSR, 1986. 77 (rus).
7. *Coastal Engineering Manual, CEM: Overview and Coastal Hydrodynamics*. USACE (U.S. Army Corps of Engineers), Engineer Manual, 2010. EM 1110-21100.
8. *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. Port and Harbours Bureau*. Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2009. 306 p.
9. *Ferry Developments and Their Consequences for Ports: Recommendations for the Design and Operation of Port Facilities*. Permanent International Association of Navigation Congresses, 2014. 118 p.
10. Yokota H. Revision of Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan. *Steel Constructions Today & Tomorrow*. 2006. No.16. Pp. 1–4.
11. *An Environmental Management System Primer for Ports: Advancing Port Sustainability*. U.S. Environmental Protection Agency, 2007. 106 p.
12. *Port Works Design Manual*. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. 2004. 89 p.

13. *Maritime Structures*. British Standards Institution. London, 2000. 320 p.
14. Van Rijn L.C. *Harbour siltation and control measures 2012* [Online resource]. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: www.leovanrijn-sediment.com. (accessed: March 7, 2015)
15. Van der Meer J.W. Conceptual design of rubble mound breakwaters. *Proceedings of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures*. Venice. Italy. 1-3 October 1992. Pp. 221–315.
16. Kobayashi N., Pietropaolo J.A., Melby J.A. Wave transformation and runup on dikes and gentle slopes. *Journal of coastal research*. 2012. Vol. 29(3). Pp. 615–623.
17. Yuliyastuti D.I., Hashim A.M. Wave Transmission on Submerged Rubble Mound Breakwater Using LBlocks. 2011. *2nd International Conference on Environmental Science and Technology*. Vol. 6. Pp. VI-243–VI-248.
18. Araki S., Kotake Y., Kanazawa T., Matsumura A., Deguchi I. Development of numerical simulation method for predicting deformation of rubble mound seawall. *Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE. 2008. Pp. 1485–1497.
19. Tamrin, Pallu S., Parung H., Thaha A. Experimental Study of Perforated Concrete Block Breakwater. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014. Vol.14. Pp. 6–10.
20. Makarov K.N., Makarov N.K. *Modelirovanie ograditelnykh sooruzheniy porta Mzymtinskogo v Adlerskom rayone g. Sochi* [Modeling of protective structures of port Mzymtinskiy in the Adler district, of Sochi]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2010. No. 1. Pp. 50–54 (rus).
21. Makarov K.N., Drobotko S.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie gidrotehnicheskikh sooruzheniy ozdorovitel'nogo kompleksa «Gosudarstvennaya rezidentsiya Rossiyskoy Federatsii v g. Pionerske Kaliningradskoy oblasti»* [Mathematical modeling waterworks recreation complex "State residence of the Russian Federation in Pioneersk city of the Kaliningrad region"]. *European researcher*. 2010. No. 1. Pp. 12–16 (rus).
22. Long G.T., Kantardgi I.G. Wave Load and Stability of the Port Mole Wall in the Period of Construction. *International Journal of Environmental Protection*. 2011. Vol. 1. Pp. 40–42.
23. Brown C.T., Dentale F. Variable distribution of armour on seawalls and breakwaters. *Proceedings of a conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters*. London, 2013. Pp. 1–10.
24. Cavallaro L., Dentale F., Donnarumma G., Foti E., Musumeci R.E., Pugliese Carratelli E. Rubble mound breakwater overtopping estimation of the reliability of a 3D numerical simulation. *33rd International Conference on Coastal Engineering*. 1-6 July 2012. Santander, Spain, 2012. Pp. 1–9.
25. Wang K.H., Dai Z., Lee H.S. Modeling wave run-up along a sloping or a moving wall boundary. *Journal of coastal research*. 2011. No. (6). Pp. 1159–1169.
26. Hiraishi T., Mase H., Kawata T., Yukimoto T., Tokunaga S., Matsushita H. Experimental Study on Counter-weight Blocks for Breakwater Stability. *Proceedings 21th International Conference of Offshore and Polar Engineering*. 2011. Vol. 3. Pp. 673–681.
27. Xiang J., Latham J.P., Virel A., Anastasakil E., Painl C., Milthaler, F. Simulation tools for numerical breakwater models including coupled fluidity 3d waves. *33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*. 1-6 July 2012. Santander, Spain, 2012. Pp.1–9.
28. Zanuttigh B., Van der Meer J.W. Wave reflection from coastal structures. *XXX International Conference on Coastal Engineering*. 3–8 September 2006. San Diego, U.S.A, 2006. Pp. 4337–4349.
29. Dentale F., Donnarumma G, Carratelli E.P. Numerical wave interaction with tetrapods breakwater. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014. Vol. 6, Issue 4. Pp. 800–812.
30. Chopakatla S.C., Lippmann T.C., Richardson, J.E. Field verification of a computational fluid dynamics model for wave transformation and breaking in the surf zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 2008. No. 134(2). Pp. 71–81.
31. Nekrasov A.V. *Prilivnyye volny v okrainnykh moryakh* [Tidal waves in the outskirts seas]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 247 p. (rus)
32. Sharova V.V. *Issledovaniye razmyva u litsevoy stenki ograditel'nogo sooruzheniya ot vozdeystviya kosopodkhodyashchikh voln* [Scour study in front of the breakwater caused by the oblique waves influence]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2014. No. 2. Pp. 179–186. (rus)
33. Sharova V., Kantarzhil I. Experimental study of the scour in the breakwater front from oblique waves. *Proceedings of 5th International Conference on The Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection "Coastlab'14"*. Varna, Bulgaria, 2014.
34. Leonova A.N. *Metodika opredeleniya koeffitsiyentov gidravlicheskogo soprotivleniya pronitsayemykh volnogasyashchikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Methods of determining the coefficients of hydraulic resistance permeable wave breaking hydraulic structures]. PhD thesis. Saint-Petersburg: VNIIG im. B.Y. Vedeneeva, 2006. 176 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 67–78