УДК 627.51

© Р. В. Синица, инженер

© В. С. Осадчий, доцент

(Одесская государственная академия строительства
и архитектуры)

E-mail: sinitsa_roma@ukr.net, ovs-55@bk.ru

© Л. С. Столяров, инженер

© А. В. Чернецкий, инженер

(Одесский национальный морской университет)

E-mail: chern.od@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-1-43-55

© R. V. Sinitsa, engineer

© V. S. Osadchiy, Assistant Professor

(Odessa State Academy of Civil Engineering
and Architecture)

E-mail: sinitsa_roma@ukr.net, ovs-55@bk.ru

© L. S. Stolyarov, engineer

© A. V. Chernetskiy, engineer

(Odessa National Maritime University)

E-mail: chern.od@gmail.com

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАШЕНИЯ ВОЛН ОГРАДИТЕЛЬНЫМИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ НЕПОЛНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

ANALYSIS OF THE EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF WAVE DAMPING WITH ENCLOSURE HYDRAULIC STRUCTURES OF INCOMPLETE VERTICAL PROFILE

Рассмотрены существующие методики определения параметров трансформации волн оградительными гидротехническими сооружениями неполного вертикального профиля. Проведено сравнение результатов расчета по опубликованным методикам с полученными экспериментальными данными.

Ключевые слова: параметры волн, трансформация волн.

The article considers the existing methods for determining the parameters of wave transformation with enclosure hydrotechnical structures of incomplete vertical profile. A comparison analysis of the calculation results obtained by published methods and the data received as result of experiments has been carried out.

Keywords: wave parameters, wave transformation.

Способы защиты морских акваторий сооружениями неполного профиля представляют собой особый интерес для инженерной практики защиты территорий морских портов и элементов городской инфраструктуры.

В практике строительства оградительных гидротехнических сооружений (ОГТС) иногда применяются сооружения неполного вертикального профиля (рис. 1), через верхнее строение которых допускается перелив воды с дальнейшей трансформацией волн (изменением их основных параметров). Такие сооружения в зависимости от условий их применения могут подвергаться воздействию как стоячих, так и разбивающихся волн. В нормативных документах¹ отсутству-

ют практические рекомендации, позволяющие определять значения коэффициентов трансформации волн сооружениями данного типа.

Высоту волны обеспеченностью 5 % в системе штормов, установленную для выполнения швартовных операций, рекомендуется принимать $\leq 1,2$ м, а для обеспечения стоянки судов значение высот волн следует определять в соответствии

с действующим кодексом установившейся практики ТКП 45-3.04-170-2009. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов). Введ. 30 декабря 2009 г. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. 77 с.; СНиП РК 3.04-40-2006. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Введ. 01 июня 2007 г. Астана: Министерство индустрии и торговли Республики Казахстан, 2006. 86 с.; Руководство П 58-76 ВНИИГ по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Введ. в 1977 г. Л.: ВНИИ гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 1977. 313 с.; ВСН 33-03-2007. Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов. Введ. 03 марта 2007 г. М.: Научно-исследовательский центр 26 ЦНИИ Минобороны РФ, 2008. 95 с.

¹ СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Введ. 1 января 1986 г. М.: Госстрой СССР, 1986. 85 с.; СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Введ. 01 января 2013 г. М.: Минрегионразвития, 2012. 116 с.; Техничес-

Рис. 1. Поперечный разрез конструкции волнолома неполного вертикального профиля (оригинального): 1 — бетонный массив; 2 — берменный массив (щелевая плита); 3 — каменная постель; 4 — естественное морское дно

с нормами², в зависимости от направления действия волнения и водоизмещения судна.

Допустимые параметры волн, ожидаемые на защищенной акватории, регламентируются также параметрами сохранения морских берегов и пляжного материала, а также недопущением затопления прибрежных территорий вследствие волнового воздействия.

В качестве примера рассмотрен проект расчетного обоснования и проектирования конструкций гидротехнических сооружений для защиты от затопления морскими волнами территории завода по адресу: г. Одесса, ул. Черноморского Казачества, 72. В данном проекте рассматривалось создание ОГТС неполного вертикального профиля, расположенного на расстоянии 200 м от береговой линии. Предусматривалось расположить конструкцию оградительного сооружения при глубинах $d = 4,0$ м, на которых при ветровом нагоне глубина воды у ОГТС может достигать величины $d = 5,0$ м. Построив лучи рефракции, были установлены значения основных волновых параметров 1 %-ной обеспеченности, в соответствии с нормами³, в месте расположения проектируемого сооружения. Высота волны при глубине $d = 4,0$ м составит $h = 2,4$ м с длиной $\lambda = 24,5$ м. При волновом нагоне высота вол-

ны будет составлять $h = 2,55$ м, а длина волны $\lambda = 30,0$ м. В соответствии с проведенными расчетами была установлена величина максимальной высоты волны 1 %-ной обеспеченности на защищаемой акватории, которая не должна превышать величины $h = 1,5$ м во избежание процессов затопления защищаемой территории завода.

В отечественной литературе⁴, а также нормативных документах РФ [1] наиболее приближенной методикой трансформации волн ОГТС неполного профиля является определение коэффициента трансформации волн сооружениями, возводимыми из однородной наброски крупного камня, бетонных массивов или фасонных блоков (рис. 2).

Значение величины трансформированных волн, прошедшей через тело оградительного сооружения неполного профиля (см. рис. 2), следует определять в соответствии с формулой⁵ [1]:

$$h_{t,p} = K_{t,p} \cdot h_{1\%}, \quad (1)$$

где $K_{t,p}$ — коэффициент проницаемости,

В соответствии с проведенными по формуле (1) расчетами были рассмотрены три расчетных случая:

1) 1%-ный волновой нагон и расположение отметки гребня ОГТС на уровне воды;

2) 2%-ный волновой нагон и возвышение гребня сооружения на 0,5 м относительно спокойного уровня моря;

² РД 31.33.10–87. Рекомендации по учету гидрометеорологического режима при проектировании недостаточно защищенных от волнения причалов. Введ. 01 января 1988 г. М.: Одесский филиал гос. проектно-изыскательского и научно-исследовательского института морского транспорта (СоюзморНИИпроект) «ЧерноморНИИпроект», 1987. 56 с.

³ СНиП 2.06.04-82*, СП 38.13330.2012, ТКП 45-3.04-170-2009, СНиП РК 3.04-40-2006.

⁴ ВСН 33-03-2007. Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов.

⁵ Там же.

Рис. 2. Расчетная схема конструкции оградительного сооружения неполного профиля: 1 — набросное сооружение неполного профиля с ядром из несортированного камня; 2 — естественное морское дно

3) спокойный уровень моря и возвышение гребня на 1,0 м относительно спокойного уровня.

Некоторые результаты решения вопросов трансформации волн вертикальной преградой были опубликованы Г. С. Башкировым [2]. Среди вопросов, относящихся к расчету гашения волн сквозными волноломами типа понтонов, решеток и экранов (рис. 3), приводится формула, предназначенная для расчета коэффициентов гашения волн «подводными порогами». Представленная формула имеет вид

$$K_P = \frac{h}{h_0} = \sqrt{\frac{\operatorname{sh} 4\pi \frac{H}{\lambda} - \operatorname{sh} 4\pi \frac{H - (H - P_b)}{\lambda} + 4\pi \frac{H - P_b}{\lambda}}{\operatorname{sh} 4\pi \frac{H}{\lambda} + 4\pi \frac{H}{\lambda}}} = \sqrt{\frac{\operatorname{sh} 4\pi \frac{H}{\lambda} - \operatorname{sh} 4\pi \frac{H - a}{\lambda} + 4\pi \frac{a}{\lambda}}{\operatorname{sh} 4\pi \frac{H}{\lambda} + 4\pi \frac{H}{\lambda}}}, \quad (2)$$

где h_0 — высота исходной волны, м; h — высота остаточной волны между волноломом и берегом, м; λ — длина исходной волны, м; H — глубина воды в месте установки волнолома, м; P_b — высота волнолома (от дна до гребня); $H - P_b = a$ — заглубление гребня волнолома от спокойного уровня моря, м.

Анализируя формулу (2), ее автор указывал на то, что «донные пороги более эффективны при малых значениях H/λ и при весьма малых значениях a/H » [2].

Предлагаемая Г. С. Башкировым формула для определения величины гашения волнения подводным волноломом неполного вертикального профиля позволяет учитывать лишь одну характеристику самого сооружения — величину затопления его гребня, но не учитывает форму передней и задней граней, а также ширину самого сооружения.

Рис. 3. Расчетная схема конструкции оградительного сооружения неполного профиля: 1 — вертикальная преграда; 2 — естественное морское дно

Также в 1959 г. В. В. Хаперский в [3] среди вопросов, относящихся к расчету гашения волн ОГТС неполного вертикального профиля, приводит формулу для определения коэффициентов гашения волн сооружениями данного типа:

$$k_{\text{ВГ}} = \sqrt{\frac{\text{sh } 4\pi \frac{h}{\lambda} - \text{sh } 4\pi \frac{h}{\lambda} (1 - \frac{\Delta H}{h}) + 4\pi \frac{h}{\lambda} \frac{\Delta H}{h}}{\text{sh } 4\pi \frac{h}{\lambda} + \text{sh } 4\pi \frac{h}{\lambda}}}, \quad (3)$$

где ΔH — положение верха сооружения по отношению к горизонту покоя, м; остальные обозначения соответствуют представленным ранее.

Основным недостатком предложенной методики расчета является то, что при расположении верха сооружения на спокойном уровне воды, при различных параметрах волн в соответствии с формулой (3) получаются одинаковые коэффициенты гашения, что, по словам самого автора, не отражает действительность [3].

В диссертационной работе И. А. Лызлова [4] была предложена формула, предназначенная для определения коэффициентов гашения параметров волн подводным волноломом:

$$\psi = (1 - \frac{h}{h_0}) \cdot 100 \% = \frac{2S \cdot 10^c}{(H-a)^{3/2} \lambda^c} + \frac{10 \frac{\alpha}{\pi} + 10 \frac{\beta}{\pi}}{(H-a)^{1/2} 2^c} / (\sqrt{l} \sin \varphi), \quad (4)$$

где ψ — величина гашения высоты волн подводными волноломами, %; h_0 — высота исходной волны, м; S — площадь поперечного сечения волнолома, м²; a — абсолютная величина затопления гребня оградительного сооружения от спокойного уровня, м; H — глубина в месте установки оградительного сооружения, м; λ — длина волны, м; l — расстояние от сооружения до берега, м; α и β — углы в градусах между линией дна и передней, задней гранями волнолома, отсчитываются против хода часовой стрелки; φ — угол в градусах между лучом направления волн и трассой оградительного сооружения, рассмотрен самый неблагоприятный случай 90 градусов; c — коэффициент

$$c = \frac{3a}{2h_0}. \quad (5)$$

Экспериментальные данные лабораторных исследований при фронтальном подходе волн были анализированы в дискуссии О. Ю. Бирской [5].

Для определения коэффициентов гашения волн была рекомендована к применению формула

$$k_{\text{ВГ}} = \frac{h-h_0}{h} = \sqrt{\frac{h}{\lambda}} (0,23 \frac{B}{h} + 2,3 \frac{\Delta H}{h} + 1,6), \quad (6)$$

где h — высота исходной волны, м; h_0 — высота остаточной волны между волноломом и берегом, м; λ — длина исходной волны, м; ΔH — возвышение верха сооружения относительно расчетного уровня воды, м; B — ширина гребня сооружения, м.

Проанализировав результаты экспериментальных исследований воздействия волн на оградительные гидротехнические сооружения, опубликованных различными зарубежными авторами, в 1996 году К. d'Angremond и другими авторами была предложена формула [6, 7], предназначенная для определения параметров трансформации волн сооружением неполного вертикального профиля:

$$k_t = 0,4 \frac{h_s}{H_i} + (\frac{B}{H_i})^{-0,31} a (1 - e^{-0,5\zeta}), \quad (7)$$

где h_s — возвышение верха сооружения относительно расчетного уровня воды, м; H_i — высота исходной волны, м; a — коэффициент, принимаемый равным 0,64 и 0,8 соответственно для проницаемых и непроницаемых поверхностей; B — ширина гребня сооружения, м;

$$\zeta = \frac{\text{tg } \alpha}{\sqrt{H_i / L_0}}. \quad (8)$$

Собрав экспериментальные данные волновых воздействий на ОГТС неполного вертикального профиля, J. W. van der Meer предложил в 2001 г. новую формулу, предназначенную для определения коэффициента трансформации волн сооружениями неполного профиля, учитывающую значение коэффициента ширины гребня:

$$k_t = 0,35 \frac{h_s}{H_i} + 0,51 (\frac{B}{H_i})^{-0,65} \cdot (1 - e^{-0,41\zeta}), \quad (9)$$

где h_s — возвышение верха сооружения относительно расчетного уровня воды, м; H_i — высота исходной волны, м; B — ширина гребня сооружения, м.

В соответствии с представленными формулами (1), (4), (6), (7) и (9) были проведены расчеты по определению параметров трансформированных волн, прошедших через тело ОГТС неполного вертикального профиля, результаты которых представлены в табл. 1.

В таблице представлены три расчетных случая, описанных ранее, отличающихся между собой высотами волн и расположением гребня по отношению к спокойному горизонту, а также его шириной в пределах от 4,0 до 8,0 м. Проанализировав результаты расчетов по приведенным методикам, можно заметить существенные различия в полученных результатах.

В настоящее время большинство вопросов, посвященных воздействию волн на гидротехнические сооружения, разрешаются путем проведения лабораторных экспериментальных исследований, что позволяет решать поставленные за-

дачи с достаточной высокой степенью точности. Однако в литературных источниках недостаточно освещена методика проведения подобных исследований и тем более методика обработки осциллограмм с записью параметров волн. Это приводит к тому, что при определении волнового воздействия на гидротехнические сооружения (ГС) почти каждая специализированная лаборатория пользуется своей личной методикой исследования, применяя измерительную аппаратуру собственного изготовления.

Авторами статьи проводились экспериментальные исследования в гидроволновой лабо-

Таблица 1

Результаты расчета параметров волн

№	Высота волны перед сооружением, м	Ширина верхнего строения ОГТС, м	Высота волны за сооружением, м				
			Формула (1)	Формула (4)	Формула (6)	Формула (7)	Формула (9)
При 1%-ном нагоне воды и отметке гребня сооружения, равной 0							
1	2,55 (А)	8,0	0,97	1,82	0,82	1,37	0,58
		7,5	1,02	1,89	0,86	1,40	0,61
		7,0	1,07	1,94	0,89	1,43	0,63
		6,5	1,10	1,99	0,93	1,47	0,67
		6,0	1,12	2,04	0,96	1,50	0,70
		5,5	1,15	2,09	0,99	1,54	0,74
		5,0	1,17	2,13	1,03	1,59	0,79
		4,5	1,20	2,18	1,06	1,64	0,85
		4,0	1,28	2,22	1,09	1,70	0,91
При 2%-ном нагоне воды и отметке гребня сооружения, равной +0,5 м относительно спокойного уровня моря							
2	2,50 (В)	8,0	0,40	1,44	0,43	1,14	0,74
		7,5	0,45	1,52	0,47	1,17	0,76
		7,0	0,48	1,60	0,50	1,20	0,79
		6,5	0,50	1,68	0,53	1,23	0,82
		6,0	0,53	1,75	0,57	1,26	0,85
		5,5	0,55	1,83	0,60	1,30	0,89
		5,0	0,58	1,90	0,64	1,35	0,94
		4,5	0,60	1,97	0,68	1,40	0,99
		4,0	0,65	2,04	0,70	1,46	1,06
При сгоне и возвышении гребня сооружения на +1,0 м относительно спокойного уровня моря							
3	2,40 (С)	8,0	0,19	1,25	0,00	0,87	0,88
		7,5	0,22	1,34	0,00	0,90	0,90
		7,0	0,24	1,43	0,00	0,92	0,92
		6,5	0,26	1,51	0,04	0,95	0,95
		6,0	0,29	1,59	0,07	0,99	0,98
		5,5	0,34	1,67	0,11	1,03	1,02
		5,0	0,38	1,74	0,14	1,07	1,06
		4,5	0,43	1,82	0,18	1,12	1,11
		4,0	0,48	1,89	0,21	1,17	1,18

ратории кафедры гидротехнического строительства Одесской государственной академии строительства и архитектуры. С целью проведения исследований в гидроволновом лотке была создана экспериментальная физическая модель в геометрическом масштабе 1:15.

Проводимые исследования были связаны с определением параметров гашения волн ограждающим гидротехническим сооружениями неполного вертикального профиля (см. рис. 1).

Лабораторный путь исследования волнового воздействия на модели ОГТС характеризуется в основном тем, что изучаемый объект моделируется в опытном лотке или бассейне и подвергается испытанию в гидродинамических условиях, аналогичным условиям натуре.

На рис. 4 представлена модель ОГТС неполного вертикального профиля, которая была подвержена масштабным воздействиям расчетных параметров волн, описанным ранее, при трех различных расчетных отметках уровней спокойной воды. Для наиболее точной и достоверной методики оценки работы ОГТС неполного вертикального профиля, а также возможности сравнения полученных экспериментальных результатов с результатами опытных исследований,

проводимых ранее, геометрические параметры сооружения (см. рис. 1) были приняты подобными размерам сооружения, описанного в [5].

Как видно на рис. 4, лоток представляет собой короб прямоугольного сечения длиной 15,0 м и шириной 1,0 м. Высота борта в лотке составляет 1,0 м. Для удобства работы с моделью лоток приподнят над полом помещения на высоту 1,0 м, волновой лоток оборудован стеклянными боковыми стенками.

В одном конце лотка помещен волнопродуктор щитового типа, предназначенный для формирования волн, а с противоположной стороны лотка располагается волногаситель. Волногаситель предназначен для гашения волн, отраженных от задней стенки лотка.

Задача исследования заключалась в определении параметров волн перед ОГТС неполного вертикального профиля на расстоянии двух длин волн (датчик 1), измерении параметров волн, формирующихся над каменной постелью непосредственно перед вертикальной стенкой ОГТС (датчик 2), сразу за вертикальной преградой телом гидротехнического сооружения (датчик 3), а также на самой защищаемой аквато-

Рис. 4. Модель ОГТС неполного вертикального профиля в волновом лотке при расчетном случае уровня воды А (красная линия)

рии (датчик 4). Расположение датчиков в гидроволновом лотке представлено на рис. 4.

К сооружениям неполного вертикального профиля относятся те ОГТС, верх которого находится ниже образующихся у них волн, расположенные на глубине, на которой не происходит разрушение волн, то есть на глубине, превышающей величину критической.

При образовании поверхностных волн и их взаимодействии с преградой наиболее важным фактором в протекающих при этом процессах являются гравитационные силы — силы тяжести, поэтому данные волны и называются гравитационными. Влияние сил трения, капиллярности и упругости на протекающие в данных условиях процессы практически незаметно. Так, например, в соответствии с [8, 9] влияние поверхностного натяжения на образование гравитационных волн при скорости распространения формы волны $C > 50$ см/с может быть оценено ориентировочно величиной менее 1 % от действия сил тяжести, что дает право при исследовании на моделях явлений взаимодействия гравитационных волн с оградительным сооружением производить пересчет полученных опытных результатов в натуру в соответствии с законом механического подобия и, в частности, по закону гравитационного подобия [10, 11].

Закон гравитационного подобия выражается формулой

$$\frac{V_n^2}{g_n L_n} = Fr \frac{V_m^2}{g_m L_m}, \quad (10)$$

где Fr — число Фруда; L_n, L_m — линейные размеры системы, индекс «н» относится к натуре, а «м» — к модели; V_n, V_m — характеристика скорости; g_n, g_m — ускорение свободного падения.

Принимая g в натуре и в лаборатории практически одинаковым, получаем необходимые соотношения для пересчета результатов эксперимента в натуре:

$$1) \text{ для линейных размеров } \frac{L_n}{L_m} = C_e;$$

$$2) \text{ для скорости } \frac{V_n}{V_m} = \sqrt{C_e};$$

$$3) \text{ для периодов } \frac{T_n}{T_m} = \sqrt{C_e},$$

где C_e — модуль геометрического подобия.

Изучение кинетической картины позволит судить о сущности физических явлений, на-

блюдаемых у сооружения и за ним (защищаемая акватория). Всё вышеуказанное явилось определяющим при выборе режимов волн и количества испытываемых моделей, а также при разработке экспериментов.

С целью записи элементов волн в опытах по волногашению использовались четыре датчика с записью волнограмм, позволяющих производить наблюдения с записью одного процесса в четырех различных местах гидроволнового лотка одновременно. Запись исследуемых процессов осуществлялась с частотой 1 кГц, что позволяет с высокой точностью оценить параметры волн. Подробное описание и устройство применяемой измерительной аппаратуры описано в статье Л. С. Столярова [12]. Измерительная система работает в диапазоне от 0 до +1,2 В, что позволяет избежать распада молекул воды на атомы водорода и кислорода, данный распад может повлечь за собой появление ошибки в измерениях параметров волн. Датчики были подключены к АЦП E-14-140M (1T189948) и далее к компьютеру, в котором при помощи программы LGraph 2 (версия 2.34.60) аналоговый сигнал преобразовывался в цифровой. Схема устройства измерительной системы представлена на рис. 5.

Перед началом и по окончании проведения каждого эксперимента проводилась тарировка измерительных датчиков с целью получения достоверных результатов опытных исследований. Тарировка датчиков последовательно осуществлялась через каждые 10 мм, в диапазоне от +100 до –100 мм. Результаты тарировки датчиков представлены в табл. 2.

В соответствии с результатами полученных тарировочных данных четырех датчиков, представленными в табл. 2, были построены тарировочные зависимости (рис. 6).

Представленные тарировочные зависимости были использованы для обработки результатов экспериментальных исследований, связанных с определением параметров гашения волн конструкцией оградительного гидротехнического сооружения неполного вертикального профиля. Для этого была написана компьютерная программа на языке программирования Python 3 в программном комплексе Jupyter Notebook, которая позволяла расшифровывать текстовые файлы с АЦП с графическим построением кри-

Рис. 5. Схема устройства измерительной системы

вых волновых зависимостей по четырем экспериментальным датчикам.

В табл. 3 и на рис. 7 представлены экспериментальные исследования волнового воздействия на моде ОГТС неполного вертикального профиля.

Таблица 2

Результаты тарировки датчиков

Отметка, мм	Датчик № 1	Датчик № 2	Датчик № 3	Датчик № 4
100,00	0,103	0,095	0,074	0,075
90,00	0,100	0,092	0,072	0,073
80,00	0,097	0,089	0,070	0,071
70,00	0,094	0,086	0,068	0,069
60,00	0,091	0,083	0,066	0,067
50,00	0,088	0,080	0,064	0,065
40,00	0,085	0,077	0,062	0,063
30,00	0,082	0,074	0,060	0,061
20,00	0,079	0,071	0,058	0,059
10,00	0,076	0,068	0,056	0,057
0,00	0,073	0,065	0,054	0,055
-10,00	0,070	0,062	0,052	0,053
-20,00	0,067	0,059	0,050	0,051
-30,00	0,064	0,056	0,048	0,049
-40,00	0,061	0,053	0,046	0,047
-50,00	0,058	0,050	0,044	0,045
-60,00	0,055	0,047	0,042	0,043
-70,00	0,052	0,044	0,040	0,041
-80,00	0,049	0,041	0,038	0,039
-90,00	0,046	0,038	0,036	0,037
-100,00	0,043	0,035	0,034	0,035

представленной на рис. 4, при расчетном случае «Серия А».

В табл. 4 и на рис. 8 представлены экспериментальные исследования волнового воздействия на моде ОГТС неполного вертикального профиля, представленной на рис. 4, при расчетном случае «Серия В».

В табл. 5 и на рис. 9 представлены экспериментальные исследования волнового воздействия на моде ОГТС неполного вертикального профиля, представленной на рис. 4, при расчетном случае «Серия С».

Также можно отметить, что ни одна из представленных формул ((1), (4), (6) и (7)) не позволяет учитывать гидравлические потери волновой энергии над выступающей в сторону моря частью каменной постели. Причиной потерь энергии волной является инфильтрация воды в тело каменной постели и турбулентность в прилегающем слое воды, исходя из результатов экспериментальных исследований (см. табл. 3–5).

Трансформированные параметры волны, которая образуется перед вертикальной преградой над высокой каменной постелью, рекомендуется определять в соответствии с формулой [8]

$$h_f = h(1 - K_{пр}) \cdot (1 - K_c), \quad (9)$$

где h — высота исходной волны, м; $K_{пр}$ — коэффициент, характеризующий долю волновой энергии, отраженной от переднего откоса постели; K_c — коэффициент, характеризующий гидравлические потери энергии волны на пути.

Анализ методик определения изменения основных волновых параметров над высокой каменной постелью является перспективой дальнейших исследований авторов публикации. Про-

Рис. 6. Тарировочная зависимость работы датчиков

анализировав результаты проведенных опытных исследований, представленные в табл. 3–5, можно установить существенное влияние высокой каменной постели.

Также в экспериментальных исследованиях было установлено существенное влияние волны, отраженной от вертикальной грани ОГТС неполного вертикального профиля. Отраженная волна существенно изменяет параметры последующей набегающей волны, уменьшая ее основные параметры.

Выводы

В соответствии с проведенным анализом при сравнении результатов расчета по имеющимся методикам гашения волн оградительными гидротехническими сооружениями неполного вертикального профиля с результатами проведенного физического эксперимента можно установить:

- представленные методики недостоверны при определении величины гашения параметров волн ОГТС, расположенными на высокой каменной постели;
- вышеприведенные методики не позволяют учитывать все факторы, влияющие на величину гашения волн.

Занижение отметки надводной части оградительных сооружений приведет к тому, что в период расчетного шторма будет происходить перелив гребней высот волн однопроцентной обеспеченности через сооружение на защищаемую акваторию порта. Это обстоятельство никоим образом не создаст аварийной ситуации, снижение отметки верхнего строения ОГТС позволит уменьшить финансовые затраты при строительстве на 10–15 %.

Библиографический список

1. Лаппо Д. Д., Стрекалов С. З., Завьялов В. К. и др. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. Л.: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. 433 с.
2. Башкиров Г. И. Расчет гашения волн в сквозных волноломах типа экранов и решеток // Морской флот. 1959. № 6. С. 19–20.
3. Хаперский В. В. Исследование воздействия волн на оградительные сооружения неполного вертикального профиля // Труды высшего инж.-техн. Краснознаменного училища ВМФ. Вып. 56. Л., 1959.
4. Лызов И. А. Исследование эффективности работы подводных волноломов различных типов: дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1963.

Таблица 3

Результаты экспериментов, расчетный случай «Серия А»

№	Датчик № 1, м	Датчик № 2, м	Датчик № 3, м	Датчик № 4, м	K, %	Длина волны перед сооружением, м	Длина волны за сооружением, м	Формула (6)	Формула (7)	Формула (9)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3,09	2,07	1,94	1,12	63,75	35,5	27,6	1,22	0,68	0,37
2	2,74	2,13	1,52	1,14	58,39	31,5	25,3	1,04	0,66	0,34
3	2,69	2,18	1,65	1,14	57,62	30,9	25,0	1,02	0,65	0,34
4	2,58	1,81	1,09	0,96	62,79	29,7	23,2	0,96	0,65	0,33
5	2,39	2,00	1,63	1,06	55,65	27,5	22,4	0,87	0,63	0,31
6	2,15	1,84	1,22	0,93	56,74	24,7	20,1	0,75	0,61	0,29
7	2,11	1,93	1,45	0,72	65,88	24,3	18,5	0,73	0,61	0,29
8	2,10	1,65	1,36	1,01	51,90	24,2	20,1	0,72	0,61	0,29
9	2,00	1,60	1,06	0,69	65,50	23,0	17,6	0,67	0,60	0,28
10	1,94	1,62	1,33	0,64	67,01	22,3	16,9	0,64	0,59	0,27
11	1,92	1,78	1,36	0,69	64,06	22,1	17,1	0,63	0,59	0,27
12	1,86	1,73	1,22	0,82	55,91	21,4	17,4	0,61	0,58	0,27
13	1,76	1,40	0,80	0,67	61,93	20,2	15,9	0,55	0,57	0,26
14	1,73	1,62	1,09	0,69	60,12	19,9	15,8	0,54	0,57	0,25
15	1,52	1,41	1,36	0,61	59,87	17,5	13,9	0,43	0,55	0,23
16	1,49	1,22	1,09	0,61	59,06	17,1	13,7	0,42	0,54	0,23
17	1,46	1,25	0,93	0,61	58,22	16,8	13,5	0,40	0,54	0,23
18	1,41	1,28	0,93	0,56	60,28	16,2	12,9	0,38	0,54	0,22
19	1,33	1,25	0,72	0,48	63,91	15,3	11,9	0,34	0,53	0,21
20	1,25	1,09	0,67	0,45	64,00	14,4	11,1	0,30	0,52	0,21
21	1,06	0,98	0,67	0,43	59,43	12,2	9,7	0,21	0,49	0,18
22	0,98	0,59	0,53	0,29	70,41	11,3	8,3	0,17	0,48	0,18
23	0,93	0,85	0,53	0,40	56,99	10,7	8,7	0,14	0,47	0,17

Рис. 7. Результаты экспериментов «Серия А»

Таблица 4

Результаты экспериментов, расчетный случай «Серия В»

№	Датчик № 1, м	Датчик № 2, м	Датчик № 3, м	Датчик № 4, м	K, %	Длина волны перед сооружением, м	Длина волны за сооружением, м	Формула (6)	Формула (7)	Формула (9)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3,33	1,12	0,85	0,69	79,28	38,3	25,8	0,98	0,76	0,44
2	2,82	1,22	–	0,74	73,76	32,4	23,2	0,72	0,73	0,41
3	2,79	2,45	1,36	0,67	75,99	32,1	22,5	0,71	0,73	0,41
4	2,66	2,07	1,22	0,61	77,07	30,6	21,2	0,64	0,73	0,40
5	2,61	1,20	0,40	0,88	66,28	30,0	22,9	0,62	0,72	0,40
6	2,50	1,01	1,22	0,61	75,60	28,8	20,2	0,56	0,72	0,39
7	2,45	1,68	0,82	0,67	72,65	28,2	20,4	0,54	0,72	0,39
8	2,34	1,09	–	0,59	74,79	26,9	19,1	0,48	0,71	0,38
9	2,29	0,72	–	0,45	80,35	26,3	17,5	0,46	0,71	0,38
10	2,21	1,65	0,74	0,48	78,28	25,4	17,4	0,42	0,71	0,38
11	2,13	1,04	0,24	0,45	78,87	24,5	16,6	0,38	0,70	0,37
12	2,00	0,93	0,67	0,40	80,00	23,0	15,4	0,31	0,70	0,37
13	1,20	0,67	0,53	0,32	73,33	13,8	9,9	–0,09	0,68	0,35
14	1,14	0,61	0,67	0,13	88,64	13,2	7,6	–0,11	0,68	0,35
15	1,09	0,67	0,61	0,19	82,57	12,5	8,1	–0,14	0,68	0,35
16	1,06	0,56	0,51	0,29	72,64	12,2	8,8	–0,16	0,68	0,35
17	0,98	0,64	0,13	0,13	86,73	11,3	6,8	–0,20	0,68	0,35
18	0,80	0,74	0,56	0,13	83,75	9,2	5,8	–0,28	0,70	0,37
19	0,72	0,56	0,69	0,16	77,78	8,3	5,7	–0,32	0,71	0,39
20	0,69	0,37	0,13	0,08	88,41	7,9	4,6	–0,34	0,72	0,39
21	0,56	0,35	0,13	0,13	76,79	6,4	4,5	–0,40	0,76	0,43
22	0,43	0,35	0,13	0,11	74,42	4,9	3,5	–0,47	0,84	0,51
23	0,40	0,29	0,13	0,08	80,00	4,6	3,1	–0,48	0,86	0,54

Рис. 8. Результаты экспериментов «Серия В»

Таблица 5

Результаты экспериментов, расчетный случай «Серия С»

№	Датчик № 1, м	Датчик № 2, м	Датчик № 3, м	Датчик № 4, м	K, %	Длина волны перед сооружением, м	Длина волны за сооружением, м	Формула (6)	Формула (7)	Формула (9)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,98	1,89	0,40	0,43	85,57	34,3	20,7	0,80	0,81	0,48
2	2,90	1,62	0,82	0,37	87,24	33,4	24,3	0,76	0,81	0,48
3	2,87	2,23	0,13	0,45	84,32	33,0	15,2	0,75	0,81	0,48
4	2,85	1,68	1,09	0,43	84,91	32,8	25,8	0,74	0,81	0,47
5	2,71	2,13	0,96	0,40	85,24	31,2	24,0	0,67	0,80	0,47
6	2,47	1,52	0,40	0,35	85,83	28,4	18,0	0,55	0,80	0,46
7	2,34	1,89	0,96	0,29	87,61	26,9	21,5	0,48	0,80	0,46
8	2,05	1,60	0,56	0,27	86,83	23,6	17,0	0,34	0,80	0,45
9	1,94	1,49	0,40	0,27	86,08	22,3	15,0	0,28	0,80	0,45
10	1,86	1,25	1,09	0,29	84,41	21,4	18,7	0,25	0,80	0,45
11	1,62	1,33	0,53	0,21	87,04	18,6	14,1	0,13	0,81	0,46
12	1,54	0,98	0,32	0,24	84,42	17,7	12,0	0,08	0,81	0,46
13	1,52	1,46	0,27	0,21	86,18	17,5	11,3	0,07	0,81	0,46
14	1,17	0,88	0,27	0,19	83,76	13,5	9,3	-0,10	0,85	0,50
15	1,12	0,67	0,53	0,19	83,04	12,9	10,7	-0,13	0,86	0,50
16	1,09	0,69	0,40	0,16	85,32	12,5	9,8	-0,14	0,86	0,51
17	0,88	0,85	0,40	0,13	85,23	10,1	8,3	-0,24	0,92	0,56
18	0,74	0,59	0,13	0,11	85,14	8,5	5,5	-0,31	0,98	0,62
19	0,67	0,45	0,27	0,11	83,58	7,7	6,1	-0,35	1,02	0,66
20	0,59	0,53	0,27	0,11	81,36	6,8	5,6	-0,39	1,09	0,72

Рис. 9. Результаты экспериментов «Серия С»

5. Бирская О. Ю., Натальчишин Г. Д. Исследование воздействия разбивающихся волн на сооружения неполного вертикального профиля // Гидротехническое строительство. 1982. № 6.

6. d'Angremond K., van der Meer J. W., de Jong R. J. Wave Transmission at Low-crested Structures // Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Orlando, Florida. 1996. Pp. 2418–2426.

7. Koohestani A. CRM-Change Management: The Role of Training In Successful CRM Implementation: Masters thesis. Multimedia University, 2006.

8. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Энергия, 1972. 312 с.

9. Макаров В. А., Мензин А. Б. Моделирование океанологических процессов (гидравлическое и аналоговое). Л.: Лен. политехн. ин-т им. М. И. Калинина, 1979. 116 с.

10. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.

11. Любченко Е. А., Чуднова О. А. Планирование и организация эксперимента. Ч. 1. Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. 156 с.

12. Столяров Л. С., Чернецкий А. В., Синица Р. В. Определение параметров волн в лабораторных условиях при помощи современной измерительной аппаратуры // Вестник ОГАСА. 2018. Вып. 73. С. 127–134.

References

1. Lappo D. D., et al. *Nagruzki i vozdeystviya vetrovykh voln na gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Teoriya. Inzhenernye metody. Raschety* [Loads and impact of wind waves on hydraulic structures. Theory. Engineering methods. Calculations]. Leningrad, VNIIG imeni B. E. Vedeneeva Publ., 1990, 433 p.

2. Bashkirov G. I. *Raschet gasheniya voln v skvoznykh volnolomakh tipa ehkranov i reshetok* [Calculation of the wave damping in slotted breakwaters of screen and grill type]. *Morskoy flot – Maritime fleet*, 1959, no. 6, pp. 19–20.

3. Khaperskiy V. V. *Issledovanie vozdeystviya voln na ograditel'nye sooruzheniya nepolnogo vertikal'nogo profilya* [Investigation of the wave impact on the protection structures of incomplete vertical profile]. *Trudy Vyshego*

inzh.-tekhn. Krasnoznamennogo uchilishcha VMF [Proc. of the Higher Engineering and Technical Red Banner School of the NAVY], iss. 56. Leningrad, 1959.

4. Lyzlov I. A. *Issledovanie ehffektivnosti raboty podvodnykh volnolomov razlichnykh tipov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Study of the efficiency of underwater breakwaters of different types. PhD in Sci. Tech. diss.]. Odessa, 1963.

5. Birskaia O. Yu., Natal'chishin G. D. *Issledovanie vozdeystviya razbivayushchikhsya voln na sooruzheniya nepolnogo vertikal'nogo profilya* [Investigation of the effect of breaking waves on enclosure structures of incomplete vertical profile]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*, 1982, no. 6.

6. d'Angremond K., van der Meer J. W., de Jong R. J. *Wave Transmission at Low-crested Structures. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*. Orlando, Florida, 1996, pp. 2418–2426.

7. Koohestani A. CRM-change management: the role of training in successful CRM implementation: Master's thesis. Multimedia University, 2006.

8. Kiselev P. G. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Reference book of hydraulic calculations]. Moscow, Ehnergiya Publ., 1972, 312 p.

9. Makarov V. A., Menzin A. B. *Modelirovanie okeanologicheskikh protsessov (gidravlichesкое i analogovoe)* [Modeling of oceanographic processes (hydraulic and analogous ones)]. Leningrad, Leningrad Polytechnic Institute named after M. I. Kalinin Publ., 1979, 116 p.

10. Sedov L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Methods of similarity and dimension in mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 440 p.

11. Lyubchenko E. A., Chudnova O. A. *Planirovanie i organizatsiya ehksperimenta. Ch. 1* [Planning and organization of the experiment. Pt. 1]. Vladivostok, TGEhU Publ., 2010, 156 p.

12. Stolyarov L. S., Chernetskiy A. V., Sinitsa R. V. *Opreделение parametrov voln v laboratornykh usloviyakh pri pomoshchi sovremennoy izmeritel'noy apparatury* [Determination of the wave parameters in the laboratory with modern measuring equipment]. *Vestnik OGASA – Bulletin of OGASA*, 2018, iss. 73. Pp. 127–134.