

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН СО СКВОЗНЫМИ СТЕНАМИ



Макаров К. Н.,

д. т. н., профессор, зав. каф. строительства
Сочинского государственного
университета



Тлявлиная Г. В.,

к. т. н., зав. лаб. защиты берегов НИЦ
«Морские берега» — филиала АО ЦНИИС



Тлявлин Р. М.,

к. т. н., директор НИЦ «Морские берега» —
филиала АО ЦНИИС



Шелушин Ю. А.,

аспирант каф. строительства Сочинского
государственного университета

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования взаимодействия волн со сквозными стенами различной сквозности, как при отсутствии, так и при наличии волновой камеры. В экспериментах варьировались сквозность стены и основные элементы исходных волн — высота, длина, период. По результатам исследований предложены зависимости для определения коэффициентов отражения и прохождения волн для стен различной сквозности. Это позволяет рассчитать величину максимального заплеска волны на стену, высоту прошедшей волны, высоту заплеска на береговую границу при наличии волновой камеры. Предложена расчетная схема для определения горизонтальной волновой нагрузки на сквозную стену, а также соответствующие аналитические зависимости. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных волновых нагрузок на стены, которое показало, что предложенные расчетные формулы обеспечивают запас по нагрузке, составляющий порядка 10–20%.

Ключевые слова: морские гидротехнические сооружения, сквозные стены, гидравлическое моделирование, волновое воздействие, коэффициент отражения волн, высота заплеска, волновая нагрузка.

Наиболее важными качествами морских гидротехнических сооружений (оградительных, причальных и берегозащитных), с точки зрения взаимодействия с волнами, являются их волногасящая и волноотражающая способности.

По характеру взаимодействия с волнением гидротехнические сооружения, в зависимости от типа их конструкции, могут полностью отражать волны (сплошные стены вертикального или криволинейного профиля) или полностью их гасить (свободный пляж или пологий откос).

Особое место занимают сооружения проницаемой для волн конструкции, которые их частично гасят, частично отражают и частично пропускают. Математически указанные свойства сооружений характеризуются коэффициентами отражения, прохождения и гашения волновой энергии.

Волногасящая (волновая) камера представляет собой свободное про-

странство между морской и береговой стенами сооружения. Она может быть сверху перекрыта для устройства причала или набережной. Береговая стена таких сооружений может быть как сплошной, так и проницаемой.

В качестве примера на рис. 1 представлена конструкция оградительного сооружения в виде двух рядов свай и сплошной береговой стены, разработанная компанией «Морстройтехнология». Сооружение предназначено для защиты внутренней акватории порта от воздействия волн большой высоты и может быть эффективно использовано на больших естественных глубинах. Волногасящая способность сооружения была проверена на гидравлической модели [1].

Гашение волн сооружениями сквозной конструкции происходит за счет перераспределения волновой энергии сквозными частями сооружения в результате частичного отражения и частичного прохождения волн через них.

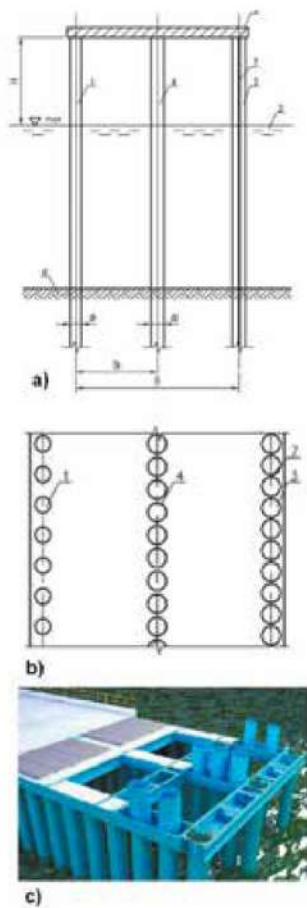


Рис. 1. а) профиль; б) план; в) макет конструкции оградительного сооружения со сквозными стенами; 1 — первый ряд свай со сквозностью 0,4; 2 — анкватория порта; 3 — сплошной ряд свай; 4 — промежуточный ряд свай со сквозностью 0,2; 5 — перекрытие (ростверк); 6 — дно; 7 — шпунтовые замки

Основными конструктивными характеристиками сквозных стен являются:

- сквозность (отношение площади отверстий к общей площади стены);
- коэффициенты отражения от морской и береговой стен;
- ширина волновой камеры на горизонте расчетного уровня моря;
- возвышение верха стены и низа перекрытий над расчетным уровнем моря.

Форма отверстий в элементах сооружений сквозной конструкции частично влияет на их волногасящие свойства.

При проектировании оградительных, причальных и берегозащитных сооружений в виде сквозных стен возникают следующие основные задачи:

- определение высоты подъема уровня воды перед стеной;
- определение высоты волны, прошедшей через стену;

- расчет горизонтальной волновой нагрузки на стену.

Исследования взаимодействия волн с пропускаемыми сооружениями ведутся как для волноломов (в том числе плавучих), так и для сквозных стен. В работе [2] предложена модель для расчета вертикальных волновых нагрузок на перекрытия сквозных сооружений с волновой камерой.

Разработки, выполненные в [3–6], нашли отражение в российском нормативном документе [7] (Приложение Е).

Однако по результатам экспериментальных исследований, выполненных в [8], было установлено, что результаты математического и гидравлического моделирования в ряде случаев существенно различаются.

С целью калибровки зависимостей для коэффициентов отражения и прохождения волн для сквозных сооружений, приведенных в [7], были выполнены исследования на гидравлической модели в волновом лотке.

Исследования проводились на экспериментальной базе НИЦ «Морские берега» в г. Сочи. Экспериментальная база позволяет моделировать процессы взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями, проводить измерения и регистрацию элементов волн, волновых нагрузок и скоростей течений. Измерения осуществляются современными специально разработанными датчиками с записью информации на магнитный носитель, а также с помощью видео- и фотокамер.

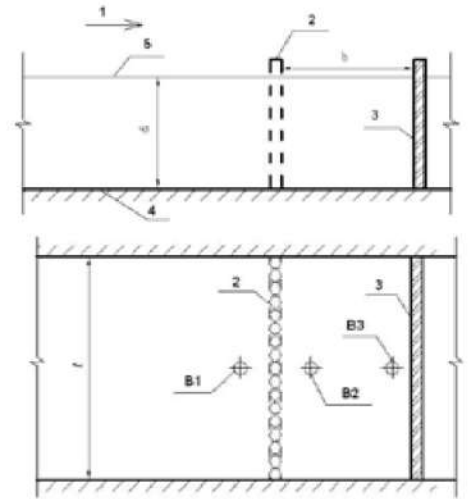


Рис. 2. Профиль и план модели в волновом лотке: 1 — направление волнения; 2 — сквозная стена; 3 — сплошная стена; 4 — дно лотка; 5 — уровень воды; В1, В2, В3 — волнографы; d — глубина; b — ширина волновой камеры; l — ширина модели

Экспериментальные исследования взаимодействия волн со сквозными стенами проводились в два основных этапа:

- определение коэффициентов отражения и волногашения сооружений;
- определение волновых нагрузок на сооружения.

В процессе экспериментов на первом и втором этапах варьировались как волновые параметры, так и конструктивные особенности сооружений.

На рис. 2 приведена схема экспериментальной модели, а на рис. 3 — ее вид в лотке.

Эксперименты выполнены в следующих диапазонах параметров волн и сооружения: $d = 0,3$ м, $b = 0,0-0,3$ м,



Рис. 3. Вид модели в волновом лотке

$n = 0,1-0,4, h/d = 0,32-0,39; d/\lambda = 3,0-10,0; h/\lambda = 0,05-0,08, b/\lambda = 0,10-0,33$, где d — глубина, b — ширина волновой камеры, n — сквозность стены, h — высота исходной волны, λ — длина волны.

Для оценки волноотражающей способности исследуемых конструкций во всех опытах определялся коэффициент отражения по формуле:

$$k_{ref} = \frac{h_{int} - h}{h}, \quad (1)$$

где h_{int} — высота волны в пучности перед сооружением (сумма прямой и отраженной волн).

Коэффициент прохождения волны

$$k_{tr} = \frac{h_{tr}}{h}, \quad (2)$$

где h_{tr} — высота волны, прошедшей через сквозную стену.

Исходя из энергетической зависимости, дана оценка коэффициента волногашения k_{dis} , который определялся как [7]:

$$k_{dis} = \sqrt{1 - k_{ref}^2 - k_{tr}^2}. \quad (3)$$

С целью точного определения высот волн, прошедших через сквозную стену, в начале каждой серии экспериментов были проведены опыты без волновой камеры.

Оценка погрешностей измерений выполнена по результатам обработки многократно повторенных опытов при одинаковых условиях. Каждый опыт повторялся не менее трех раз, иногда кратность повторений составляла более десяти. Относительная погрешность измерения высоты волн находится в пределах 5–7% с доверительной вероятностью 95%. Относительная погрешность измерений периода волн — не более 1%.

Всего было выполнено пять серий экспериментов по восемь опытов в каждой серии для определения коэффициентов отражения и прохождения волн через сквозные стены и пять серий по два опыта — для определения волновых нагрузок на стены.

В табл. 1 для примера приведены результаты экспериментов по определению коэффициентов отражения, прохождения и гашения волн для стены со сквозностью $n = 0,2$.

Табл. 1. Результаты опытов 17–24

№ опыта	h , м	h_{int} , м	h_{tr} , м	k_{tr}	k_{ref}	k_{dis}
17	0,107	0,150	0,080	0,75	0,40	0,53
18	0,112	0,158	0,081	0,71	0,41	0,57
19	0,117	0,167	0,082	0,70	0,43	0,57
20	0,100	0,145	0,071	0,70	0,45	0,55
21	0,115	0,168	0,081	0,70	0,46	0,55
22	0,100	0,150	0,070	0,70	0,50	0,51
23	0,095	0,146	0,066	0,69	0,54	0,48
24	0,103	0,165	0,072	0,68	0,60	0,42

По результатам гидравлического моделирования предложены зависимости для определения коэффициентов отражения и прохождения волн через сквозные стены.

При отсутствии волновой камеры коэффициенты отражения и прохождения волн для сквозных стен предложено определять по формулам:

$$|k_{ref}| = \frac{\beta}{2 + \beta} + 0,14, \quad (4)$$

$$k_{tr} = \frac{2}{2 + \beta} + 0,16. \quad (5)$$

При наличии волновой камеры шириной b указанные коэффициенты предлагается определять по формулам:

$$|k_{ref}| = \left| \frac{\beta - (\beta - 2)k_b e^{-2jkb}}{2 + \beta - \beta k_b e^{-2jkb}} \right| - 0,16, \quad (6)$$

$$k_{tr} = \left| \frac{1 - k_{ref}}{e^{jkb} - k_b e^{-jkb}} \right| - 0,10, \quad (7)$$

где $\beta = \mu \sqrt{g/d}$ — безразмерный коэффициент; k_b — коэффициент отражения от береговой границы, ко-

торый должен быть задан. В случае сплошной вертикальной стены $k_b = 1$, а при наличии волногасителя $0 \leq k_b < 1$; j — мнимая единица; k — волновое число, определяемое по формуле

$$k = \frac{\omega}{\sqrt{gd}}, \quad (8)$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ — круговая частота волн, s^{-1} ; T — период волн, s ; m — линейризованный коэффициент сопротивления сквозной стены, определяемый по формуле:

$$\mu = \xi \frac{V}{2g}, \quad (9)$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления сквозной стены, V — средняя скорость жидкости перед стеной.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле:

$$\xi = k_{red} \beta_f \sin \theta \left(1 + \frac{0,707}{\sqrt{1-n}} \right)^2 (1/n - 1)^2, \quad (10)$$

где $k_{red} = 0,67$ при $n < 0,30$ и $k_{red} = 1,0$ при $n \geq 0,30$, θ — угол наклона стены к горизонту; β_f — коэффициент, определяемый в зависимости от формы элементов стены по табл. Е.1 из [7]. Зна-

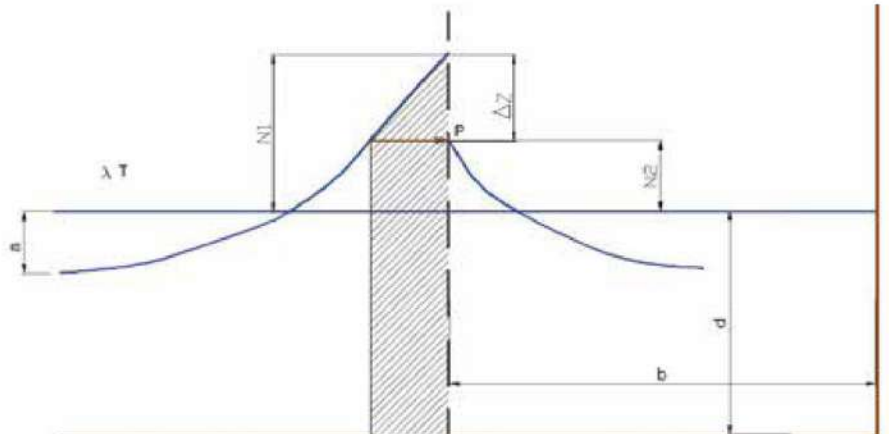


Рис. 4. Схема к определению горизонтальной волновой нагрузки на сквозную стену

Табл. 2. Коэффициенты отражения и прохождения волн в зависимости от сквозности стены при отсутствии волновой камеры

Сквозность стены	Коэффициент отражения волн	Коэффициент прохождения волн
0,1	0,60	0,59
0,2	0,47	0,68
0,3	0,28	0,83
0,4	0,19	0,91
0,5	0,18	0,92

чения коэффициента сопротивления μ для некоторых типов вертикальных сквозных стен, рассчитанные по формуле (9), приведены в табл. Е.2 [7].

Величины максимального заплеска на стену и скорости потока при максимальном заплеске определяются выражениями:

$$\eta_{max} = a(1 + k_{ref}), \quad (11)$$

$$V_{max} = a(g/d)^{0.5}(1 - k_{ref}), \quad (12)$$

где a — амплитуда исходной волны.

Высота прошедшей волны:

$$h_{tr} = hk_{tr}. \quad (13)$$

Максимальная амплитуда колебаний в волновой камере:

$$\eta_2 = k_{tr} a(1 + k_b \cos(kb)). \quad (14)$$

Из (14) следует, что минимальная амплитуда колебаний в волновой камере будет либо при $b = \lambda/4$, либо при $k_b = 0$. Следовательно, $b = \lambda/4$ — оптимальная ширина волновой камеры по волногашению, однако при этом нагрузки на сквозную стену будут максимальны.

Высота максимального заплеска на береговую границу:

$$\eta_3 = k_{tr} a(1 + k_b). \quad (15)$$

Зависимость осредненных коэффициентов отражения и прохождения волн от сквозности стены при $h/d = 0,33$ приведена в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при сквозности более $n > 0,3$ коэффициенты прохождения волн через стену приближаются к 1.

Табл. 3. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных горизонтальных волновых нагрузок на сквозные стены

n	Стена без волновой камеры			Стена с волновой камерой		
	Нагрузка расчетная, кН/м	Нагрузка модельная, кН/м	Расхождение, %	Нагрузка расчетная, кН/м	Нагрузка модельная, кН/м	Расхождение, %
0,1	0,173	0,141	-22,4	0,201	0,177	-13,8
0,2	0,111	0,094	-18,5	0,141	0,119	-18,3
0,3	0,061	0,057	-7,2	0,094	0,082	-14,3
0,4	0,039	0,033	-17,4	0,052	0,047	-9,8

Аналогично при наличии волновой камеры со сплошной береговой границей при сквозности более $n > 0,3$ имеет место отражение волн не от стены, а от всего сооружения в целом. При этом коэффициент отражения по своему значению приближается к 1.

По результатам моделирования и расчетов предлагается не рассматривать сквозные стены со сквозностью $n > 0,3$ как волногасящие сооружения.

Горизонтальную сдвигающую нагрузку на сквозную стену N_p Н/м, можно определить по схеме, показанной на рис. 4.

Линейная (N_p Н/м) волновая нагрузка на сквозную стену определится по формуле:

$$N_p = P(d + N2) + 0,5(P \times \Delta Z), \quad (16)$$

где $P = \rho g \Delta Z$ — избыточное волновое давление; $\Delta Z = N1 - N2$, $N1 = \eta_{max}$; $N2 = ak_{tr}$, ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Погонная нагрузка на береговую границу:

$$N_b = \rho g(d + \eta_3)^2 / 2. \quad (17)$$

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных горизонтальных волновых нагрузок на сквозные стены приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что предложенная методика расчета горизонтальных волновых нагрузок на сквозные стены дает несколько завышенные (до 20%)

результаты, по сравнению с экспериментальными данными. Однако можно считать, что это завышение будет представлять собой некоторый запас для устойчивости сооружений.

Выводы

По результатам гидравлического моделирования предложены зависимости для определения коэффициентов отражения и прохождения волн через сквозные стены (4)–(7).

По результатам моделирования и расчетов предлагается не рассматривать сквозные стены со сквозностью $n > 0,3$ как волногасящие сооружения.

Горизонтальную сдвигающую нагрузку на сквозную стену N_p и береговую границу при наличии волновой камеры N_b , Н/м, предложено определять по схеме, показанной на рис. 4 и формулам (16), (17).

Литература

1. Гарибин П. А., Субботин М. В. Экспериментальные исследования сквозного волнозащитного сооружения с камерой гашения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2015. Вып. 2. С. 61–68.
2. Лещенко С. В., Макаров К. Н. Гидродинамические нагрузки от морских волн на горизонтальные элементы причалов с волногасящими камерами // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 144–151.
3. Алешков Ю. З. Воздействие длинных волн на группу вертикальных цилиндров // Вестник ЛГУ. Сер.: Матем. и мех. 1987. № 1. С. 43–46.
4. Шахин В. М. Взаимодействие длинных волн с проницаемыми сооружениями // Транспортное строительство. 1990. № 1. С. 27–28.
5. Мищенко С. М. Гидравлика сооружений с улучшенными волногасящими свойствами // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. СПб., 1997. Т. 20.
6. Макаров К. Н., Пузанков В. И., Абакумов О. Л. Методика расчета сквозных волногасящих стен в прибрежной зоне моря // Гидротехническое строительство. 2004. № 11. С. 25–31.
7. СП 277.1325800.2016. Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования. М.: Минстрой РФ, 2016. 91 с.
8. Кириленко А. П. Взаимодействие волн с гидротехническими сооружениями с волновой камерой // Труды 3-й международной конференции «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акваториях водных объектов». Иркутск, 2013. С. 127–130.