

УДК 627.51

И.Н. Панова

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СКВОЗНОГО ТИПА

В настоящей статье изложены исследования волновой нагрузки на верхнее строение морских гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: вертикальная составляющая волновой нагрузки, верхнее строение, период, длина и высота волны.

У цій статті викладені дослідження хвильового навантаження на верхню будову морських гідротехнічних споруд.

Ключові слова: вертикальна складова хвильового навантаження, верхня будова, період, довжина і висота хвилі.

In this article real article presented the resuets of research wave loadis on the top part maritime hydraulic constructions by a graphicanalytical method.

Keywords: vertical component of the wave loads, top part, period, length, wave height .

Введение. Одним из мало изученных вопросов является вертикальная составляющая волновой нагрузки, действующая на верхнее строение морских гидротехнических сооружений сквозного типа. Рекомендации по ее определению отсутствуют в нормативных документах страны [1]. К гидротехническим сооружениям сквозного типа относятся причалы и нефтегазопромысловые сооружения на свайном основании, морские эстакады. Учет вертикальной составляющей искомой нагрузки позволит более обосновано принимать размеры надводных частей перечисленных сооружений и тем самым снизить их стоимость.

Постановка задачи. Целью исследований являлось получение расчетных зависимостей для определения вертикальной составляющей волновой нагрузки, действующей на верхнее строение гидротехнических сооружений сквозного типа, на основе анализа и сравнения с экспериментальными данными, полученными ранее [2; 3].

Изложение основного материала. Исследование природы вертикальной составляющей волновой нагрузки выполнялось по нескольким направлениям. Была рассмотрена теория гидравлического удара [4]. Вертикальное волновое давление рассматривалось как дополнительное давление Δp , кПа, возникающее при гидравлическом ударе, и определялось по следующей формуле:

$$\Delta p = \rho c_{y0} v_{cp}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, т/м³;

c_{y0} , м/с – скорость распространения упругих возмущений в жидкости в направлении, противоположном скорости основного течения, применительно к нашему случаю ее можно было определить из зависимости:

$$c_{y0} = 3\lambda / T, \quad (2)$$

где λ – длина волны, м;

T – период волны, с;

$v_{cp} = v_z$ – проекция скорости жидкости на вертикальную ось.

Полученные результаты расчета вертикальной составляющей волнового давления с помощью теории гидравлического удара дали очень большое расхождение с экспериментальными данными, что не позволили использовать данную теорию для дальнейших исследований.

Следующее направление в поиске объяснения природы вертикальной составляющей волновой нагрузки, действующей на верхнее строение гидротехнических сооружений, основывалось на предположении, что искомая нагрузка должна быть пропорциональна силе тяжести от веса воды в объеме гребня волны. В этом случае задача сводилась к определению площади профиля гребня с последующим вычислением объема гребня на 1 метр по фронту волны (рис. 1).

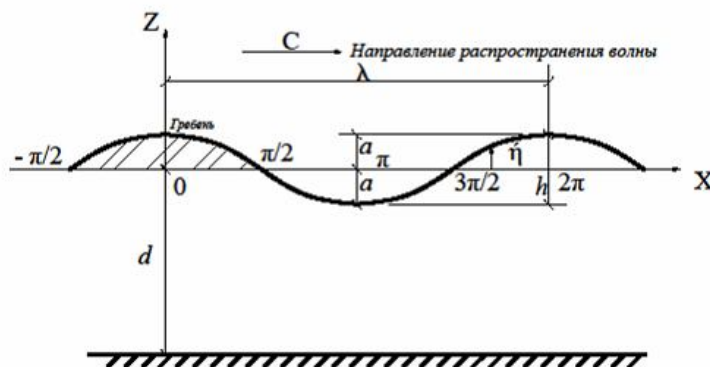


Рис. 1. Профиль синусоидальной прогрессивной волны

Согласно теории волн малой амплитуды [5; 6; 7] функция, описывающая свободную взволнованную поверхность регулярной двухмерной волны имеет следующий вид:

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) = \frac{h}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right), \quad (3)$$

где η – превышение водной поверхности относительно спокойного уровня воды, м;

a – амплитуда волны, м ($a = h/2$);

h – высота волны, м;
 ω – частота волны ($\omega=2\pi/T$);
 T – период волны, с;
 k – волновое число ($k=2\pi/\lambda$);
 λ – длина волны, м.

Выражение (3) отображает периодическую, синусоидальную, прогрессивную волну, которая перемещается в положительном x – направлении. Для волны, которая движется в отрицательном x – направлении знак «минус» заменяется на знак «плюс». В эксперименте волна распространялась в отрицательном x – направлении. Поэтому в формуле (3) знак «минус» менялся на знак «плюс». Площадь профиля гребня определялась интегрированием функции (3) по переменной x на промежутке, равном длине полуволны от $\pi/2$ до $-\pi/2$, что соответствовало промежутку времени $t = T/2$

$$S = a \int_{\frac{\pi}{2}}^{-\frac{\pi}{2}} \cos(kx + \omega t) dx = -a \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(kx + \omega t) dx = \frac{a}{k} \sin(kx + \omega t) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} =$$

$$-\frac{a}{k} \left[\sin\left(\frac{k\pi}{2} + \omega t\right) - \sin\left(-\frac{k\pi}{2} + \omega t\right) \right] = \tag{4}$$

$$= \frac{2a}{k} \sin \frac{k\pi}{2}.$$

Подставив в формулу (4) значение k , была получена следующая зависимость для определения площади профиля гребня волны S , м²:

$$S = \frac{a\lambda}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{a\lambda}{\pi} = \frac{h\lambda}{2\pi}. \tag{5}$$

Вес воды в объеме гребня шириной $b = 1$ метр по фронту волны с учетом формулы (5) составил

$$P_T = \frac{h\lambda}{2\pi} b \rho g = \frac{h\lambda}{2\pi} 1 \rho g, \tag{6}$$

ρ – плотность воды, т/м³.

Искомая вертикальная составляющая волновой нагрузки определялась на основе зависимости (6) с учетом корректирующего коэффициента k_p , полученного на основе сравнения величины веса воды в гребне и значения равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки, полученной экспериментально (табл.1)

$$P_z = \frac{h\lambda}{2\pi} 1 \rho g k_p \tag{7}$$

Таблиця 1

Значения коэффициента k_p

Δ/a	№ опыта	$P_{\text{эксперим.}}$	P_T	$k_p = P_{\text{эксперим.}}/P_T$
0,56	2	0,349	0,392	0,9
0,64	12	0,309	0,461	0,67
0,65	7	0,338	0,510	0,66
0,69	8	0,326	0,481	0,68
0,73	1	0,235	0,343	0,69
0,75	6	0,286	0,442	0,65
0,78	3	0,300	0,491	0,61
0,79	11	0,246	0,373	0,67
0,85	10	0,151	0,343	0,44
0,86	4	0,128	0,392	0,33
0,88	9	0,217	0,549	0,40
0,89	13	0,116	0,412	0,28

С помощью метода наименьших квадратов [8; 10] было получено уравнение кубической регрессии для определения коэффициента k_p (8)

$$k_p = -58,3693\left(\frac{\Delta}{a}\right)^3 + 123,9126\left(\frac{\Delta}{a}\right)^2 - 87,9252\frac{\Delta}{a} + 21,5155, \quad (8)$$

где Δ – клиренс верхнего строения над расчетным уровнем воды, м;
 a – амплитуда волны, м.

Подставив в формулу (7) значение числа π , значение ускорения свободного падения g и перейдя от длины модели (0,6 м) к длине верхнего строения l , была получена искомая расчетная зависимость (9) для определения равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки на верхнее строение морских гидротехнических сооружений

$$P_z = 2,6\lambda hl\rho k_p, \quad (9)$$

где λ , h , ρ – то же, что в формулах (3) и (6);

l – длина верхнего строения в направлении луча волны, м;

k_p – коэффициент, учитывающий клиренс верхнего строения, определяемый по формуле (8) либо по таблице 2, составленной на основе использования данной формулы.

Таблиця 2

Значение коэффициента k_p

Δ/a	k_p	Δ/a	k_p
0,56	0,8857	0,86	0,4194
0,64	0,6968	0,88	0,3221
0,65	0,6875	0,89	0,2646
0,69	0,6670	0,9	0,200
0,73	0,6564	0,91	0,130
0,75	0,6478	0,92	0,05
0,78	0,6229	0,928	0,030
0,79	0,6100	0,9285	0,000
0,85	0,4598		

Зависимость (9) справедлива, если длина верхнего строения в направлении луча волны меньше или равна длины полуволны $l \leq \lambda/2$. В противном случае следует применять формулы (10) и (11) и учитывать не фактическую длину верхнего строения, а приведенную l' :

$$\lambda/2 < l \leq \lambda, \quad P_z = 2,6\lambda h l' \rho k_p, \quad l' = \lambda/2; \quad (10)$$

$$l > \lambda, \quad P_z = 2,6\lambda h l' \rho k_p, \quad l' = l/2. \quad (11)$$

Как видно из таблицы 2, при отношении клиренса верхнего строения Δ к амплитуде волны a , равном 0,9285 значение коэффициента k_p становится равным нулю. Следовательно, если $\Delta/a > 0,9285$, вертикальная составляющая волновой нагрузки также будет равна нулю. Таким образом, в отличие от действующих рекомендаций [9], предложенная методика определения вертикальной составляющей волновой нагрузки позволит уменьшить клиренс верхнего строения нефтяных платформ, морских эстакад и рейдовых причалов на 7 % от величины амплитуды волны 1 %-й обеспеченности в системе расчетного шторма, не меняя конструкцию верхнего строения. Это существенно снизит стоимость опорных частей гидротехнических сооружений данного типа.

Вывод. Результаты выполненных исследований позволили получить расчетные зависимости для определения вертикальной составляющей волновой нагрузки, действующей на верхнее строение морских гидротехнических сооружений, которые могут быть предложены для включения в нормативные документы страны. Учитывая, что при отношении клиренса (Δ) к амплитуде волны 1 %-й обеспеченности (a), равном 0,9285 и более, коэффициент k_p равен нулю и соответственно вертикальная составляющая волновой нагрузки также равна нулю, минимальный клиренс верхнего строения гидротехнических сооружений сквозного типа рекомендуется принимать равным $0,93a$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): СНиП 2.06.04-82* - [Актуализированная редакция].* – М., 2012.
2. *Розачко С.И., Панова И.Н. Экспериментальные исследования волновых нагрузок // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – Харьков, 2016. – № 1. – С.10-16.
3. *Панова И.Н. Экспериментальные исследования волновой нагрузки на верхнее строение гидротехнических сооружений // Вісник ОДАБА.* – Одесса: Изд-во ОГАСА. – 2015. – № 56. – С.177-180.
4. *Федяевский К.К. Гидромеханика / Федяевский К.К., Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И.* – Л.: Судостроение, 1968. – С.567.
5. *Лаппо Д.Д. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения / Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.Н.* – Л.: Изд-во ЛВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1990. – С.432.
6. *Дорофеев В.С. Воздействие ветровых волн на гидротехнические сооружения / Дорофеев В.С., Розачко С.И.* – Одесса: ОГАСА, 2012. – С.15-17.
7. *Zeki Demirbik, Ph.D., Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL), Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi., C. Linwood Vincent, Ph.D., Office of Naval Research, Arlington, Virginia. Water Wave Mechanics.* – 2003.
8. *Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений/ Линник Ю.В.* – Государственное издательство Физико-математической литературы. – 1958. – С.336.
9. *Свод правил «Проектирование морских ледостойких платформ». Ч. I. Классификация, основные положения, требования к нагрузкам и воздействиям. Остойчивость. СП-33-10100.* – М., 2001.
10. *Сайт <https://search.ukr.net/?q>*

Стаття надійшла до редакції

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, директор Науково-дослідного інституту фундаментальних та прикладних досліджень Одеського національного морського університету **К.В. Єгупов**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри «Корабельна енергетика» Національного університету «Одеська морська академія» **П.І. Копейка**