

16. Бондаренко, І. О. Формування оціночних умов життєвого циклу деформативної роботи залізничної колії [Текст] / І. О. Бондаренко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2015. – Вип. 3 (57). – С. 107–117.
17. Альбрехт, В. Г. Бесстыковой путь и длинные рельсы [Текст] / В. Г. Альбрехт, В. Н. Лященко, С. П. Першин, В. Я. Шульга. – М.: Транспорт, 1963. – 214 с.
18. Вериго, М. Ф. Установление ном боковых динамических нагрузок подвижного состава по условию устойчивости пути поперечном сдвигу [Текст] / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский // Труды ЦНИИИ МПС. – 1962. – № 248. – С. 210–302.

Наведені методика та результати експериментальних досліджень хвильового навантаження на моделі верхньої будівлі морських гідротехнічних споруд. Отримана розрахункова залежність для визначення рівнодіючої вертикальної складової хвильового навантаження на верхню будівлю наскрізного типу у діапазоні крутизни хвилі, дослідженої у експерименті. Наведені приклади розрахунку навантаження, що досліджувалося

Ключові слова: гідротехнічні споруди наскрізного типу; верхня будівля; вертикальна складова хвильового навантаження

Изложены методика и результаты экспериментальных исследований волновой нагрузки на модели верхнего строения морских гидротехнических сооружений. Получена расчетная зависимость для определения равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки на верхнее строение сооружений сквозного типа в диапазоне крутизны волны, исследованной в эксперименте. Приведены примеры расчета искомой нагрузки

Ключевые слова: гидротехническое сооружение сквозного типа; верхнее строение; вертикальная составляющая волновой нагрузки

УДК 627.51

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59889

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

С. И. Рогачко

Доктор технических наук, профессор
Кафедра морских и речных портов,
шельфовых сооружений, водных
путей и их технической эксплуатации

Одесский национальный морской университет
ул. Мечникова, 42, г. Одесса, Украина, 65029

E-mail: rostasice@ukr.net

И. Н. Панова

Кафедра энергетического
и водохозяйственного строительства

Одесская государственная
академия строительства и архитектуры
ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, Украина, 65029

E-mail: panirina@meta.ua

1. Введение

Одним из направлений развития Украины, как свободного европейского государства, является достижение энергетической независимости. В связи с этим освоение новых месторождений нефти и газа и, соответственно, строительство морских гидротехнических сооружений на континентальном шельфе, является приоритетным направлением в экономике страны. Кроме того, европейская интеграция нашего государства, предполагающая расширение международных и внешнеэкономических связей, требует усовершенствования и реконструкции существующих портов, а также строительства глубоководных и рейдовых причалов для обслуживания крупнотоннажных судов. Находясь на незащищенных акваториях, такие сооружения в полной мере испытывают силовое воздействие волновых нагрузок. Существенным внешним фактором, влияющим на верхнее строение перечисленных гидротехни-

ческих сооружений, является вертикальная составляющая волновой нагрузки, которая в настоящее время изучена недостаточно.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В действующих нормативных документах по определению нагрузок на гидротехнические сооружения [1] отсутствуют рекомендации по определению волновой нагрузки на верхнее строение морских гидротехнических сооружений сквозного типа, к которым относятся причалы эстакадного типа, морские нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения (МНГС) (рис. 1) и морские эстакады. Ввиду недостаточной изученности воздействия волн на верхнее строение перечисленных сооружений, отметка линии кордона рейдовых причалов назначается конструктивно, а отметка нижней ча-

сти палубы МНГС и конструкций пролетных строений морских эстакад принимается с большим запасом, что экономически не целесообразно [2].

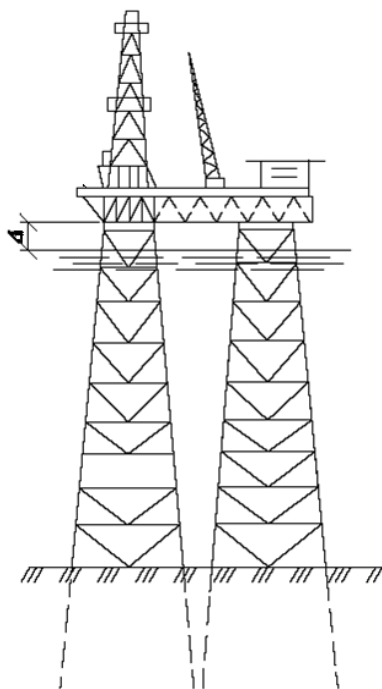


Рис. 1. Морское нефтегазопромывловое гидротехническое сооружение сквозного типа

В ведомственном нормативном документе [3] указывается, что при наивысшем годовом уровне моря 1 %-ной обеспеченности в районе будущего строительства максимальное возвышение гребня волны 0,1 %-ной обеспеченности в системе расчетного шторма с конструктивным зазором 0,1 h не должно касаться низа палубы проектируемого сооружения [4]. В районе строительства, находящегося в открытом море на значительном удалении от материков и островов, колебания уровня моря и штормы являются чаще всего независимыми событиями. В этом случае назначение расчетного уровня один раз в 100 лет и расчетного шторма один раз 100 лет приведет к определению отметки низа верхнего строения обеспеченностью один раз в 10 000 лет (0,01 %). Таким образом, использование рекомендаций [3, 4] ведет к неоправданному завышению отметки верхнего строения МНГС (рис. 1) и морских эстакад.

Известны работы, в которых рассматривались задачи о силовом воздействии ветровых волн на сооружения континентального шельфа различных конструкций [5, 6]. Однако в них не рассматривалась волновая нагрузка на верхнее строение (палубу) таких сооружений.

Интересными представляются математические модели и расчетные методики определения вертикальных гидродинамических волновых нагрузок на горизонтальные элементы морских гидротехнических сооружений, изложенные в работе ученых Сочинского государственного университета [7].

Авторы работы [7] рассматривали гидродинамическое воздействие на плиту верхнего строения гидро-

технического сооружения аналогично удару водяной струи в сплошную твердую неподвижную поверхность. Ими была получена расчетная зависимость для определения линейной нагрузки от удара гребня волны в плиту верхнего строения P_r :

$$P_r = \rho l_r w_r^2, \tag{1}$$

где ρ – плотность воды, т/м³; l_r – ширина части гребня, воздействующей на плиту, м; w_r – вертикальная скорость в этой части гребня, м/с.

Авторами было предложено с помощью зависимости (1), более обосновано назначать высотные отметки плит верхнего строения. Однако данная методика базировалась на результатах математического моделирования. Как показали результаты экспериментальных исследований, изложенные в настоящей статье, величина нагрузки от удара гребня в конструкцию верхнего строения, рассчитанная с помощью зависимости (1) оказалась весьма заниженной.

3. Цели и задачи исследования

Целью экспериментальных исследований являлось получение эмпирической зависимости для расчета вертикальной составляющей волновой нагрузки, действующей на верхнее строение морских гидротехнических сооружений сквозного типа. Это позволило более обоснованно назначать оптимальные размеры и отметки низа надводных частей проектируемых сооружений для эксплуатации их в условиях открытого моря.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать методику экспериментальных исследований вертикальной составляющей волновой нагрузки;
- разработать и создать экспериментальную установку, а также измерительную систему для проведения исследований волновой нагрузки на модель верхнего строения;
- провести методические опыты и основную серию испытаний;
- обработать и проанализировать результаты опытов;
- получить на основе анализа экспериментальных данных расчетную зависимость для определения равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки в рамках исследованных параметров волн.

4. Материалы и методы исследования вертикальной составляющей волновой нагрузки на модели верхнего строения гидротехнического сооружения сквозного типа

Экспериментальные исследования волновой нагрузки проводились на специально разработанной установке (рис. 2), защищенной патентами Украины на полезную модель и изобретение [8]. Главным конструктивным элементом установки являлась модель верхнего строения в виде горизонтальной жесткой пластины, которая с помощью вертикальных стоек соединялась с опорной рамой. Рама закреплялась на ферме над поверхностью воды в

бассейне. Вертикальные стойки были снабжены юстировочным приспособлением, позволяющим устанавливать необходимый клиренс.

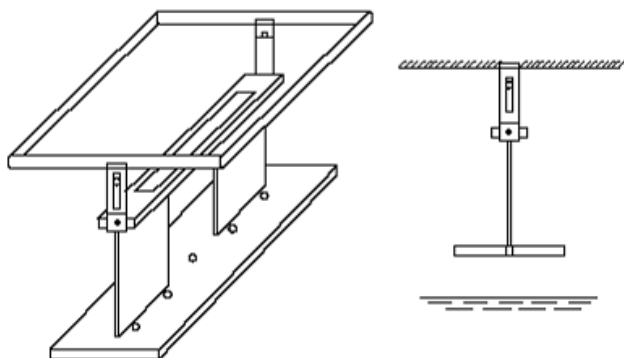


Рис. 2. Экспериментальная установка

На модели были установлены датчики динамического давления (рис. 3), показания с которых с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) LCAD L 14–140 и компьютерной программы L Graph 2 записывались в файл на диске ПЭВМ во времени в виде процесса.

Программа экспериментальных исследований предусматривала проведение методических опытов с целью отладки измерительной аппаратуры и основной серии испытаний с различными параметрами регулярных волн и значениями клиренса (Δ , м) – расстояния от спокойного уровня воды до низа конструкции модели верхнего строения.

В июне – августе 2014 года в исследовательском бассейне Одесского национального морского университета (рис. 4) были проведены методические опыты, а в апреле 2015 года – основная серия испытаний [9].

Методика исследования заключалась в следующем: в бассейне (рис. 5) с помощью волнопродуктора 2 задавался необходимый волновой режим – длина, высота и период волны. Модель 4 закреплялась над поверхностью воды на заданном клиренсе. Рядом с волнопродуктором и в створе модели устанавливались волнографы 5, 6.

Перед опытами измерительная аппаратура прогревалась и тарировалась. Затем одновременно включались волнопродуктор с пульта управления и режим «Запись» на компьютере. При прохождении гребня волны под моделью верхнего строения (рис. 6) датчики давления точно регистрировали волновое давление во времени, а волнографы – высоту волны.

Показания датчиков не только записывались, но и обрабатывались с помощью компьютерной программы L Graph 2. Данная программа была использована для сбора, визуализации, регистрации и экспорта аналоговых сигналов в том числе, в текстовые документы, что обеспечило точность обработки результатов эксперимента. Полученные реализации датчиков давления и волнографов отображались на мониторе компьютера (рис. 7).

После каждого опыта выдерживалась пауза для того, что в бассейне установилась спокойная вода.

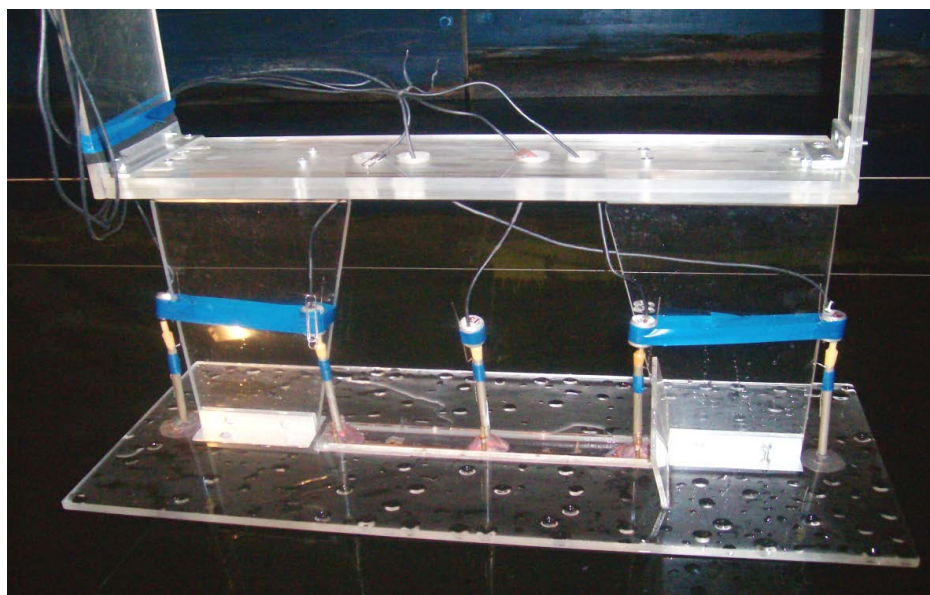


Рис. 3. Экспериментальная установка с датчиками давления



Рис. 4. Общий вид исследовательского бассейна Одесского национального морского университета (Украина)

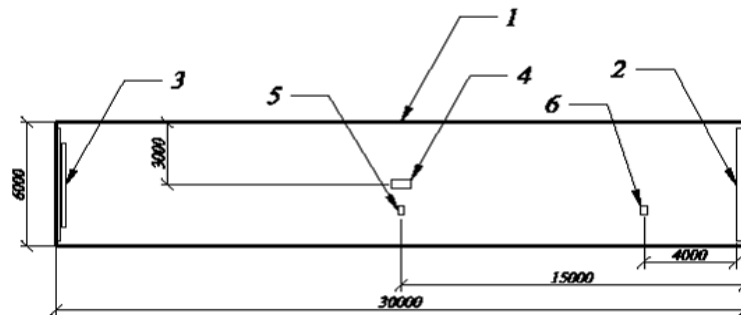


Рис. 5. Схема расположения волнографов: 1 – бассейн, 2 – щит волнопродуктора, 3 – волногаситель, 4 – модель верхнего строения, 5 – первый волнограф в створе модели, 6 – второй волнограф

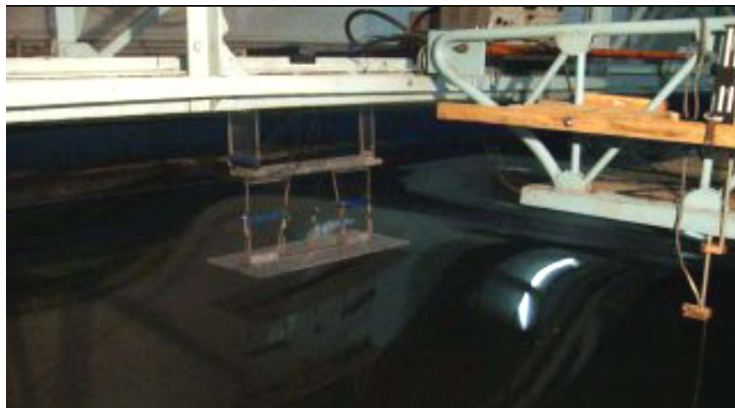


Рис. 6. Гребень волны подходит к модели верхнего строения

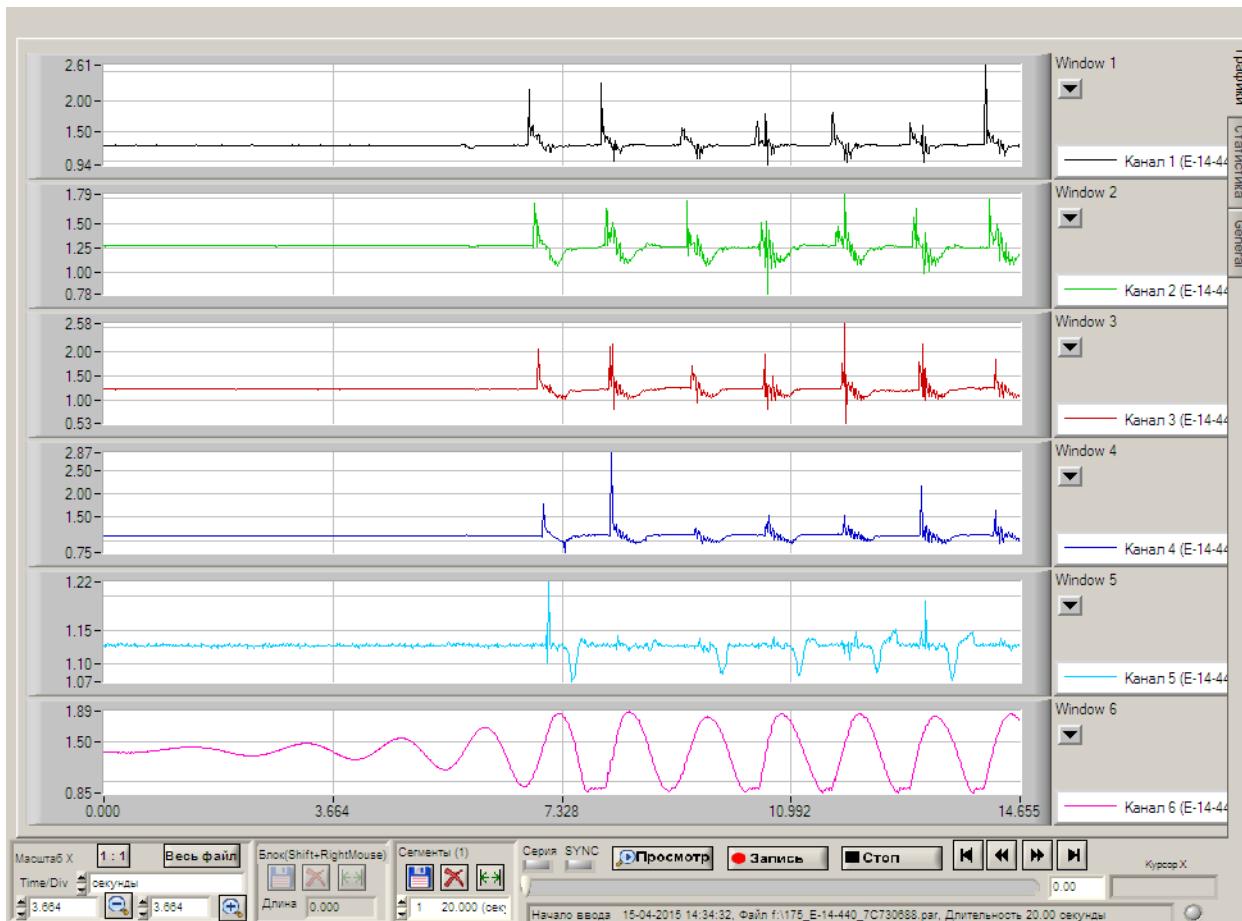


Рис. 7. Вид «рабочего стола» программы L Graph 2 с реализациями датчиков давления (окна 1–5) и волнографа в створе модели (окно 6)

Согласно программе экспериментальных исследований было проведено 60 методических опытов при разных длинах волн – от 2,3 до 4 м, различных клиренсах – от 40 до 70 мм, при высотах волн – от 65 до 170 мм. Основная серия испытаний включала 13 опытов при длинах волн – 2,36 м; 2,64 м; 3,1 м и высотах волн – от 80 мм до 130 мм.

5. Результаты исследований вертикальной составляющей волновой нагрузки на верхнее строение гидротехнических сооружений

На основании полученных экспериментальных данных были построены эпюры волнового давления, действующего на модель верхнего строения при различных волновых режимах (рис. 8). Также были определены равнодействующие вертикальной составляющей волновой нагрузки P, численно равные площади эпюры давления.

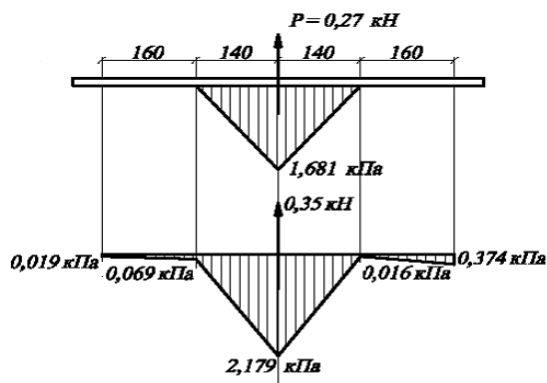


Рис. 8. Примеры эпюр вертикального волнового давления

С помощью метода наименьших квадратов (МНК) [13] были получены расчетные зависимости: линейная зависимость между равнодействующей волновой нагрузки и относительной амплитудой волны (1), гиперболическая – между равнодействующей и превышением амплитуды волны над клиренсом (2):

$$\begin{aligned}
 T &= 1,23c, \\
 y &= 0,75 - 0,69x, \\
 T &= 1,3c, \\
 y &= 0,98 - 0,97x,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $y = P$ – равнодействующая вертикальной составляющей волновой нагрузки, (кН); $x = \Delta / a$; Δ – клиренс, (м); $a = h/2$ – амплитуда волны, (м); T – период волны, (с).

$$y = 0,4129 - \frac{1,7249}{x},
 \tag{2}$$

где $y = P$ – равнодействующая вертикальной составляющей волновой нагрузки, (кН); $x = \Delta - a$.

Графическая интерпретация полученных уравнений изображена на рис. 9, 10.

На основании анализа результатов эксперимента была получена расчетная зависимость между безразмерными величинами, зависящими от параметров волны и клиренса (табл. 1).

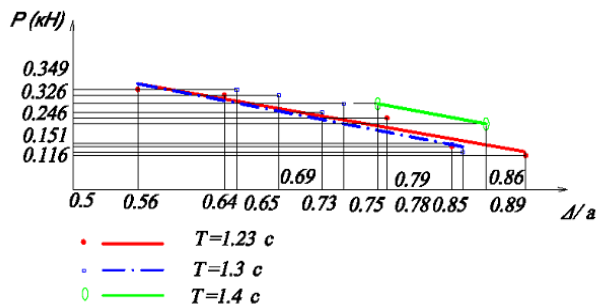


Рис. 9. Графики зависимости максимальной равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки (P, кН) от относительной амплитуды волны

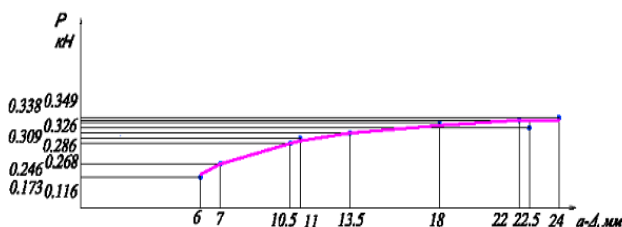


Рис. 10. График зависимости вертикальной составляющей волновой нагрузки (P, кН) от превышения амплитуды волны над клиренсом

Таблица 1

Результаты расчета квадратичной регрессии методом наименьших квадратов

№ точки	$x = \Delta / \lambda$	$Y = \left(\frac{P}{\rho g a l^2} \right)_{\text{ср.}}$, кН	$Y_{\text{расчетное}}$, кН	Погрешность s_x , %
1	0,011	1,622	1,7045	4,8
2	0,013	1,747	1,5423	11,7
3	0,015	1,283	1,3485	4,9
4	0,016	1,077	1,2399	13,1
5	0,017	1,222	1,1233	8,1
6	0,021	0,586	0,5785	1,3

Средняя ошибка аппроксимации $A=7,73$ %.

Искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$y = -3933,6892x^2 + 13,2775x + 2,0344,
 \tag{3}$$

где $y = \frac{P}{\rho g a l^2}$; $x = \Delta / \lambda$.

Графическая интерпретация зависимости (3) представлена на рис. 11. Исходя из уравнения (3), была получена эмпирическая зависимость (4) для определения вертикальной составляющей волновой нагрузки в пределах параметров волн, исследованных в экспериментах

$$P = \rho g a l^2 \left(13,2775 \frac{\Delta}{\lambda} - 3933,6892 \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right)^2 + 2,0344 \right),
 \tag{4}$$

где a – амплитуда волны, м; l – длина модели, м; Δ – клиренс, м; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; ρ – плотность воды, t/m^3 .

Кроме того, в настоящей работе была проанализирована зависимость безразмерной величины $\frac{P}{\rho g a l^2}$

от l/λ , где l – длина исследуемой модели верхнего строения, м.

Используя онлайн расчет с помощью метода наименьших квадратов [13] (табл. 2) были получены другие расчетные зависимости (5), (6), их графическая интерпретация представлена на рис. 12.

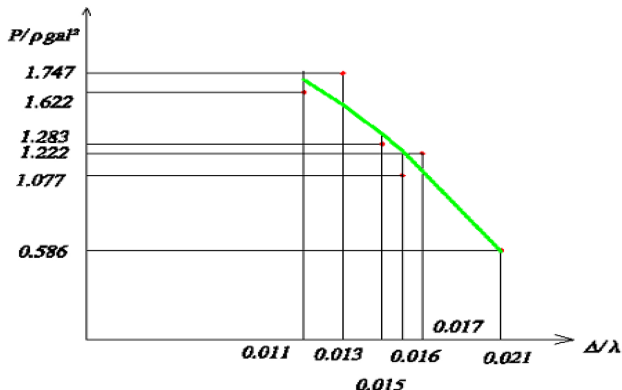


Рис. 11. График зависимости между безразмерными величинами

Таблица 2
Результаты расчета квадратичной регрессии методом наименьших квадратов

№ точки	$x=l/\lambda$	$y = P_{cp}$, кН	$Y_{расчетное}$, кН	Погрешность s_x , %
1	0,194	0,371	0,371	0
2	0,227	0,339	0,339	0
3	0,254	0,216	0,216	0

Средняя ошибка аппроксимации $A=0\%$.

Искомое уравнение квадратичной регрессии имеет вид:

$$y = -59,7643x^2 + 24,1911x - 1,0728, \quad (5)$$

где

$$y = \frac{P}{\rho gal^2}; \quad x = l/\lambda;$$

$$P = \rho gal^2 \left(-59,7643 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 + 24,1911 \frac{l}{\lambda} - 1,0728 \right), \quad (6)$$

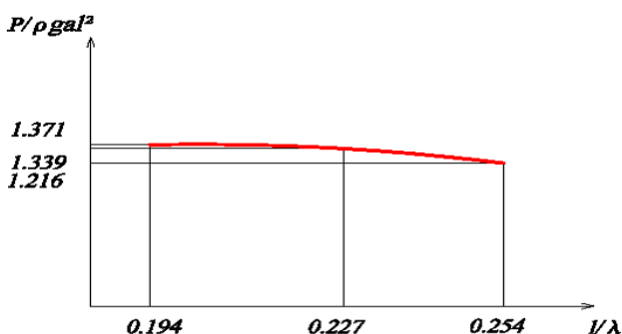


Рис. 12. График зависимости между безразмерными величинами

Анализ показал, что более точными по сравнению с экспериментальными данными являются результаты расчета равнодействующей с помощью эмпирической зависимости (4).

Примеры расчета равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки на верхнее строение гидротехнических сооружений сквозного типа

Пример № 1

В данном примере были рассмотрены условия, при которых линейные размеры волны в 100 раз превышали модельные в опыте № 1, а период волны в десять раз.

Дано:

- Высота волны $h=8,2$ м;
- Длина волны $\lambda=264$ м;
- Длина верхнего строения 60 м;
- Амплитуда волны $a=4,1$ м;
- Плотность воды $\rho=1$ м/г³;
- Клиренс верхнего строения $\Delta=3$ м;
- Крутизна волны $h/\lambda=1/32$.

Расчет

1. Определение равнодействующей волновой нагрузки с помощью расчетной зависимости (4):

$$P = \rho gal^2 \left(13,2775 \frac{\Delta}{\lambda} - 3933,6892 \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right)^2 + 2,0344 \right) = 1 \cdot 9,81 \cdot 4,1 \cdot 60^2 \cdot 1,7045 = 0,247 \cdot 100^3 \text{ кН},$$

что в $1,1 \cdot 100^3$ раз более, чем в опыте № 1.

Вывод: с учетом масштаба увеличения линейных размеров в 100 раз, равнодействующая превысила экспериментальную в $1,1 \cdot 100^3$ раз, что соответствовало правилам моделирования по критерию Фруда [10].

Пример № 2

Были рассмотрены условия, при которых линейные размеры волны в 50 раз превышали модельные в опыте № 4.

Дано

- $\rho=1$ т/м³;
- $h=0,093 \times 50=4,65$ м;
- $\lambda=2,64 \times 50=132$ м;
- $a=0,0465 \times 50=2,325$ м;
- $l=0,6 \times 50=30$ м;
- $\Delta=0,04 \times 50=2$ м;
- $T=1,7$ с;
- $x = \Delta/\lambda = 0,015$;
- $h/\lambda=1/22$.

Расчет:

1.Определение равнодействующей волновой нагрузки с помощью расчетной зависимости (4)

$$P = \rho gal^2 \left(13,2775 \frac{\Delta}{\lambda} - 3933,6892 \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right)^2 + 2,0344 \right) = 1 \cdot 9,81 \cdot 2,325 \cdot 30^2 \cdot 1,3485 = 27681 = 0,22 \cdot 50^3 \text{ кН},$$

что $1,2 \cdot 50^3$ раз более, чем в опыте № 4.

Вывод: с учетом масштаба увеличения линейных размеров в 50 раз, равнодействующая вертикальной составляющей волновой нагрузки превысила экспериментальную в $1,2 \cdot 50^3$ раз, что также соответствовало правилам моделирования по критерию Фруда [10].

6. Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований:

- была разработана методика и программа экспериментальных исследований вертикальной составляющей волновой нагрузки; её суть состояла в определении волнового давления на модели верхнего строения гидротехнического сооружения при различных волновых режимах и клиренсе;

- разработана и создана экспериментальная установка, защищенная патентом Украины на изобретение, измерительная система для проведения исследований волновой нагрузки на модели верхнего строения гидротехнических сооружений; её характерной особенностью являлась возможность одновременно регистрировать волновое давление и высоту волны, действующие на модель верхнего строения, а также менять положение модели над уровнем воды;

- полученные на основе экспериментальных данных уравнения регрессии, представляющие собой квадратичную зависимость равнодействующей волновой нагрузки от безразмерных величин (отношение клиренса к длине волны и отношение длины модели к длине волны), при сравнении с опытными данными показали, что наиболее удовлетворительное совпа-

дение с экспериментом демонстрирует зависимость равнодействующей от отношения клиренса к длине волны;

- из полученной зависимости равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки от параметров волн и размеров верхнего строения следует, что величина вертикальной составляющей волновой нагрузки, действующей на верхние строения гидротехнических сооружений, прямо пропорциональна амплитуде волны и длине верхнего строения по направлению луча волны, а также находится в квадратичной зависимости от отношения клиренса верхнего строения к длине волны;

- результаты экспериментальных исследований, изложенные в статье, в дальнейшем могут быть использованы для разработки рекомендаций по расчету волновых нагрузок на верхнее строение глубоководных рейдовых причалов сквозного типа, морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений и морских эстакад в диапазоне параметров волн, исследованных в эксперименте;

- величина клиренса может уменьшаться при обледенении сооружений. Это неблагоприятное явление, наблюдаемое в процессе штормовой деятельности моря при отрицательных температурах воздуха [11, 12], следует учитывать в процессе проектирования.

Литература

1. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция [Текст]. – М, 2012.
2. Рогачко, С. И. Определение отметки низа верхнего строения морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений [Текст] / С. И. Рогачко // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 7. – С. 15.
3. Свод правил. Проектирование морских ледостойких платформ. Часть I. Классификация, основные положения, требования к нагрузкам и воздействиям. Остойчивость [Текст]. – СП – 33 – 10100. – М., 2001.
4. Носков, Б. Д. Сооружения континентального шельфа [Текст] / Б. Д. Носков, Ю. П. Правдивец. – Москва: АСВ, 2004. – С. 162, 194.
5. Chacrabarti, S. K. Hydrodynamics of Offshore Structures [Text] / S. K. Chacrabarti. – WIT Press (UK), 1994. – 464 p.
6. Turgut, S. S. Wave Forcer on Offshore Structures [Text] / S. S. Turgut. – Cambridge University Press New York, 2014. – 338 p.
7. Лещенко, С. В. Методика расчета вертикальных гидродинамических волновых нагрузок на горизонтальные элементы морских гидротехнических сооружений [Текст] / С. В. Лещенко, К. Н. Макаров // Гидротехника. – 2013. – № 2 (31). – С. 20–25.
8. Патент на изобретение №108448. Экспериментальная установка для измерения вертикальной составляющей волновой нагрузки и волнового давления на модели верхнего строения гидротехнических сооружений [Текст] / Рогачко С. И., Панова И. Н. – Киев, 2015.
9. Панова, И. Н. Экспериментальные исследования волновой нагрузки на верхнее строение гидротехнических сооружений [Текст] / И. Н. Панова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 56. – С. 260.
10. Павленко, Г. К. Сопроотивление воды движению судна [Текст] / Г. К. Павленко. – М.: Морской транспорт, 1956. – 507 с.
11. ДБН В.1.2 – Нагрузки и воздействия Минстрой Украины [Текст]. – К., 2006.
12. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия. Госстрой СССР [Текст]. – М., 1985.
13. МНК и регрессионный анализ Онлайн + графики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mathhelplanet.com/static.php?p=onlayn-mnk-i-regressionny-analiz>