

УДК 551.462.32

В.М. Кушнир, д-р техн. наук, профессор,

С.А. Шоларь, аспирант,

В.Р. Душко, канд. техн. наук, доцент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053

E-mail: sa.sholar@mail.ru

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Рассмотрены основные положения теории трансформации и разрушения поверхностных гравитационных волн на наклонном дне вблизи береговой линии. Приведены данные лабораторных исследований, выполненных в опытовом (волновом) бассейне СевНТУ, по оценкам нагрузок при разрушении волн на наклонном дне.

Ключевые слова: Разрушения поверхностных гравитационных волн, наклонное дно, береговая линия, опытовый (волновой) бассейн.

Постановка проблемы. Для разработки природоохранных проектов, надежной и долгосрочной эксплуатации различных гидротехнических и океанотехнических систем в прибрежной морской зоне необходимо располагать оценками ударных нагрузок, формирующихся при разрушении штормовых поверхностных волн в ближней прибрежной зоне, т.е. на глубинах от долей метра до нескольких первых метров. Здесь поверхностные волны, пришедшие из открытого моря, теряют свою устойчивость, образуются гребни и происходит их разрушение. Это сопровождается значительными ударными нагрузками. Известны примеры, когда под действием этих нагрузок ломались массивные железобетонные волноломы, на берега выбрасывало большие валуны, разрушались покрытия набережных [1, 2].

Проблема трансформации и разрушения гравитационных морских волн вблизи береговой черты не является новой, её анализ выполнен во многих публикациях, например [3-12].

В отличие от перечисленных работ авторы поставили перед собой задачу выполнить экспериментальные исследования ударных нагрузок, которые формируются при разрушении поверхностных гравитационных волн на наклонном дне волнового бассейна и проверить соответствие полученных данных различным теоретическим моделям. Это необходимо для того, чтобы определить в рамках единой методики основной комплекс расчетов, связанных с трансформацией поверхностных волн при их выходе на малые глубины и формированием ударных нагрузок при разрушении таких волн. Прикладное значение этой работы определяется необходимостью расчетов нагрузок на берега, гидротехнические сооружения, различные океанотехнические установки.

Цель работы – экспериментальная оценка характеристик трансформации и разрушения поверхностных гравитационных волн при их распространении на наклонном дне вблизи береговой черты, а также сопоставительный анализ полученных оценок с известными моделями аналогичных явлений.

Изложение основного материала.

Технические средства и методы выполнения экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились в опытовом (волновом) бассейне СевНТУ, длина которого равна $L=10$ м, ширина $B=3$ м и глубина $d=1,5$ м. Генерация волн производится путем создания узкой зоны переменного давления в одном конце бассейна, причем период T таких возмущений может изменяться от 0,71 до 1,67 с, что соответствует изменению длины волны от 0,8 до 4,34 м. На противоположном конце бассейна установлено наклонное дно, угол отклонения которого от горизонтальной плоскости может изменяться от 5 до 20 градусов. Условная схема расположения оборудования изображена на рисунке 1.

При выполнении экспериментов использованы два однотипных волнографа на основе дифференциальных датчиков давления фирмы «Motorola» типа MPX2010DP с динамическим диапазоном 10 кПа и чувствительностью 2,5 мВ/кПа. Прямые входы датчиков присоединены к жестким измерительным трубкам длиной 1 м. Выходы датчиков через операционные усилители типа INA-116P подключены к коммутатору аналого-цифрового преобразователя NI-USB6008 и далее – к USB порту ПК. Запись значений производится при помощи программного обеспечения LabView 8.5, разработанного фирмой National Instrument. Дифференциальный вход датчика воспринимает атмосферное давление, прямые входы датчиков подсоединены к измерительным трубкам, концы которых опускаются на заданную глубину и воспринимают гидростатическое и волновое давление воды. Волнографы этого типа созданы д.т.н. Грековым Н.А.

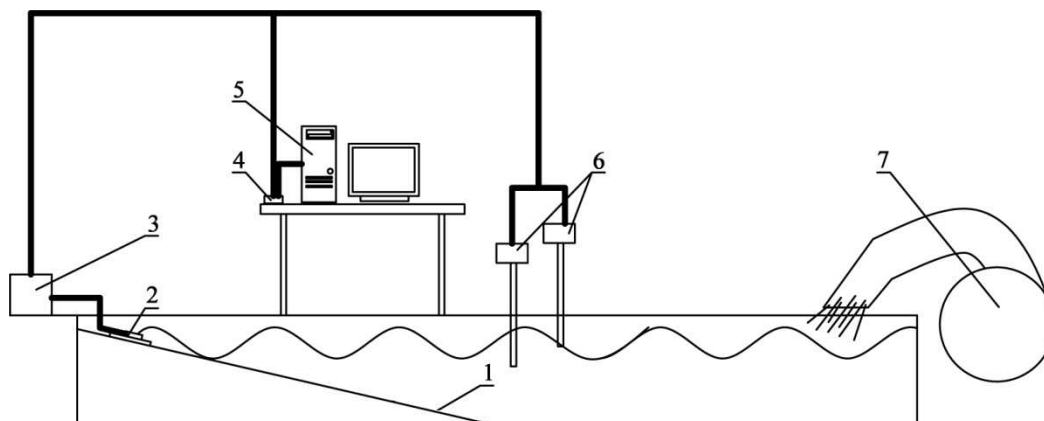


Рисунок 1 – Схема расположения оборудования в опытном бассейне СевНТУ:
1 – наклонное дно, 2 – блок мембранных датчиков, 3 – блок активных фильтров, 4 – коммутатор NI-USB6008, 5 – ПК с установленной LabView 8.5, 6 – волнографы, 7 – волнопродуктор

Градуировка волнографов выполнена путем опускания приемного конца трубки датчика давления на различную контролируемую глубину h_i (от 50 до 500 мм через 50 мм) с одновременным считыванием соответствующего выходного кода N_i . Гидростатическое давление $p_i = \rho g h_i$ на каждой глубине сравнивалось с выходным кодом, затем методом наименьших квадратов вычислялась градуировочная характеристика следующего вида $p = \alpha(N - N_0)$, где α, N_0 – коэффициент чувствительности и начальный код измерителя. Зависимость кодов волнографа N_i от гидростатического давления p_i изображена на рисунке 2. Цифровые волнографы имеют высокую чувствительность 0,3 Па, что эквивалентно 0,03 мм водяного столба. Стабильность метрологических характеристик этих измерителей была проверена повторными градуировками через интервалы времени, равные один месяц и при этом относительная нестабильность не превышала 1 %, что эквивалентно суммарной погрешности измерений в пределах 2 мм водяного столба [13].

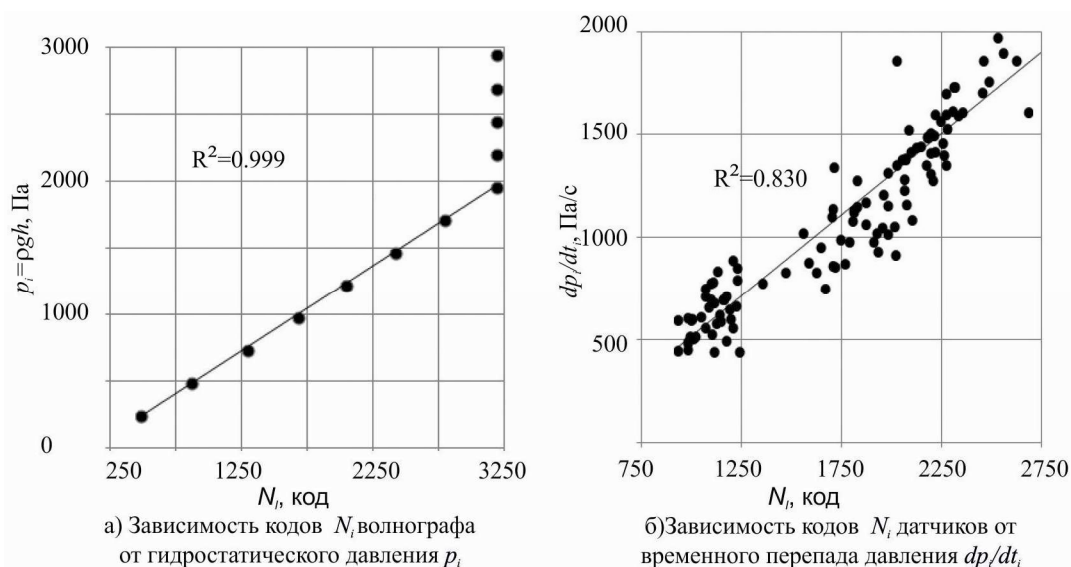


Рисунок 2 – Калибровка оборудования

На рисунке 3 приведены вертикальные распределения по глубине амплитуд волнового давления для линейных волн, где заметно проявляется эффект более быстрого затухания с глубиной коротких волн по сравнению с волнами большей длины.

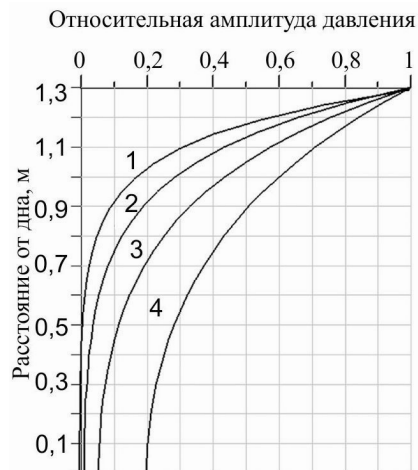


Рисунок 3 –Зміна відносної амплітуди хвильових коливань тиску по глибині басейну для лінійних хвиль малої амплітуди при різних довжинах хвиль: 1 – 1,05 м, 2 – 1,5 м, 3 – 2,25 м, 4 – 3,55 м.

При експериментах також були використані диференціальні мембранні датчики, реагуючі на змінне тиску. Датчики цього типу розроблені інженерами СевНТУ. Схема конструкції датчика приведена на рисунку 4. Основним чутливим елементом в даному датчику є п'єзозв'язок вітчизняного виробництва ЗП-4. В зв'язі з тим, що даний елемент має високу чутливість, перед непрямою записом сигнал проходить обробку активним фільтром. Фільтр дозволяє позбавитися від зовнішніх шумів, а також нормувати рівень вихідного сигналу з датчиків. Активний фільтр розраховувався в програмній середі Filter Solutions 8.0. Градуїровка датчиків виконана при установці їх в непрямої близькості від хвилювача. Вихідний код мембранного датчика пропорційний часовому перепаду тиску на відповідній глибині, т.е. величині $\omega a_p \sin(\omega t + \phi)$, де ω – кутова частота хвиль, a_p – амплітуда хвильового тиску, ϕ – зсув фази між показанням хвилювача і мембранного датчика. По даним спектральної обробки порівнюваних датчиком цей кут близький до 90 градусів, що підтверджує можливість використання мембранних датчиків для реєстрації перепадів тиску. Залежність кодів N_i від часового перепаду тиску dp_i/dt_i на відповідній глибині зображена на рисунку 2.

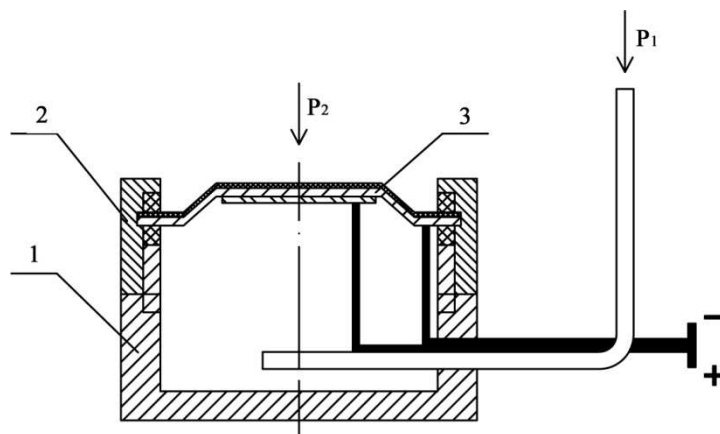


Рисунок 4 – Схема конструкції мембранного датчика: 1 – герметичний бокс, 2 – кришка герметичного бокса, 3 – п'єзозв'язок ЗП-4 з герметичним покриттям, P_1 – атмосферне тиску, P_2 – гідродинамічне тиску

Вказані технічні засоби були доповнені фотозйомкою процесу руйнування гребня хвилі на нахилному дні на фоні координатної сітки, що зображено на рисунку 5. Це дозволило визначити відстань від точки початку руйнування гребня до лінії урізу води при різних режимах роботи хвилювача і нахилах дна.

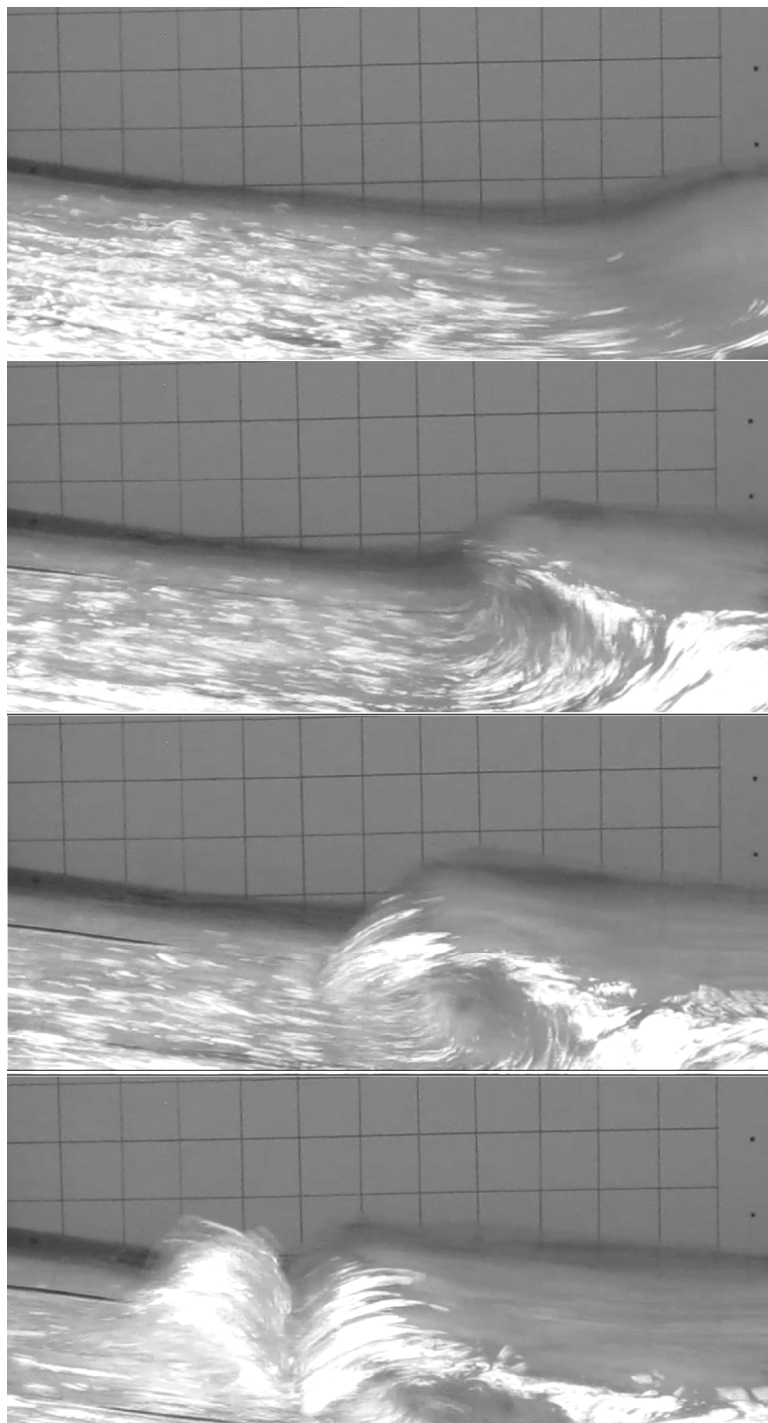


Рисунок 5 – Разрушения гребня волны на наклонном дне. Размер сетки – 50 мм

Предварительные результаты

Рассмотрен режим работы волнопродуктора с периодичностью $T_W = 1$ с, при котором длина волны равна $\lambda = 1,56$ м. При выполнении измерений наклон дна равен 10° , глубина бассейна 1,3 м, диаметр мембранного датчика – 0,026 м.

Синхронные измерения волнографа и мембранного датчика показали, что вдали от зоны разрушения амплитуда давления на глубине $z = -0,1$ м равна $a_p = 195$ Па, что соответствует амплитуде кода мембранного датчика $a_m = 620$ ед.

Уменьшение амплитуды колебаний давления на глубине $z = -0,1$ м равно $C_z = \frac{ch[k(h+z)]}{ch(kh)}$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $C_z = 0,67$. Амплитуда давления на поверхности бассейна $a_p(z=0) = a_p(z)/0,67 \cong 290$ Па; амплитуда вертикальных волновых смещений определяется из условия $a_p = \rho g a_w$ и в данном случае $a_w = 290/(1000 \cdot 9,82) = 0,0295$ м, что соответствует визуальным наблюдениям.

Энергия волнового поля равна $E_w = 0,5 \rho g a_w^2 \lambda$ (Дж/м) и в рассматриваемом случае $E_w = 6,66$ Дж/м или доля энергии, приходящаяся на мембранный датчик, составляет 0,17 Дж.

Критическая глубина h_{cr} , на которой происходит разрушение волны, равна $h_{cr} = 4,368 \cdot (2a_w)^{1,714} \cdot \lambda^{-0,714} = 0,025$ м, что соответствует расстоянию от средней границы воды в бассейне, равном 0,142 м. Поскольку 1 Дж = 1 Н·м, то на мембранный датчик действует сила разрушения волны, равная 1,197 Н.

Так как изменение волнового давления в бассейне близко к гармоническому, т.е. $p_w = a_p \sin \omega t$, то амплитуды показаний мембранного датчика пропорциональны величине $\omega a_p = 195 \cdot 6,28 = 1225$, а по фазе его показания отличаются от показаний волнографа на 90 град., что подтверждается результатами взаимного спектрального анализа. Синхронные измерения волнографа и мембранного датчика показали, что код, соответствующий амплитуде колебаний мембранного датчика линейно изменяется при изменении амплитуды волнографа, измеряющего давление. Амплитуда волнового давления (равная 195 Па) соответствует амплитуде кода мембранного датчика, равной 620 ед. В зоне разрушения волны амплитуда мембранного датчика увеличивается до 1272 ед. Таким образом в пересчете на давление в зоне разрушения волны получаем следующую оценку $1272/(620) = 2,05 \cdot 195 \cdot 6,28$ Па или с учетом площади мембраны ($0,25\pi d^2 = 0,00053$ м²), сила равна 1,32 Н.

Фазовая скорость волны и, следовательно, движения гребня, равна $c_f = \lambda/T_w = 1,56$ м/с. Динамическое давление в зоне разрушения волны равно $p_d = \rho c_f^2$, Па. Учитывая площадь мембраны, сила разрушения волны равна $1000 \cdot 1,56^2 \cdot 0,0005 = 1,217$ Н.

Выводы

В результате анализа рассматриваемого частного случая получены три независимые, относительно близкие оценки сил удара при разрушении волны: 1,197, 1,32 и 1,217 Н. Естественно, эти данные нуждаются в уточнении и в проверке возможности их распространения для других режимов работы волнопродуктора и наклона дна. Представленные результаты должны быть также дополнены расчетами изменяющегося профиля возвышения волны при ее движении по наклонному дну и соответствующими снимками.

Обобщенный анализ результатов для всех диапазонов наклона дна и периодов (длин) волновых возмущений позволит определить возможность использования одной из известных или новой модели ударных нагрузок, а также создать программное обеспечение для выполнения соответствующих инженерных расчетов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта 14-41-01556 «р_юг_а».

Библиографический список использованной литературы

1. Кушнир В.М. Реакция Азово-Черноморского бассейна на интенсивный циклон 10–11 ноября 2007 г. по спутниковым данным / В.М. Кушнир, С.В. Федоров, Л.А. Петренко // Морские испытания. — Севастополь, 2008. — Вып. 1. — С. 62–71.
2. Матишов Г.Г. Условия и последствия аварий судов в Керченском проливе во время шторма 11 ноября 2007 г. / Матишов Г.Г., Савицкий Р.М., Ижебейкин Ю.И. // Вестник Южного научного центра РАН. — 2008. — № 3. — С. 54–63.
3. Шулейкин В.В. Физика моря / В.В. Шулейкин. — М.: Изд. АН СССР, 1953. — 989 с.
4. Смирнов А.А. Изменение высоты и длины волны на пологих откосах / А.А. Смирнов // Волновые исследования. — М.: Госстройиздат, 1962. — С. 37–60.
5. Смирнов А.А. Глубина обрушения волны на пологих откосах / А.А. Смирнов // Волновые исследования. — М.: Госстройиздат, 1962. — С. 177–184.

6. Skjelbreia L. Fifth order gravity wave theory / L. Skjelbreia, A. Hendrickson // Proc. VII Conference on Coastal Engineering. — 1961. — P. 184–196.
7. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа / Т. Доусон. — Ленинград: Судостроение, 1986. — 286 с.
8. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод / К. Боуден. — М.: Мир, 1988. — 324 с.
9. Пелиновский Е.Н. Трансформация сильно нелинейной поверхностной волны в мелководном бассейне / Е.Н. Родин, А.А. Родин // Известия РАН Физика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 383–390.
10. Кушнир В.М. Воздействие нелинейных поверхностных волн на морской терминал пирамидальной формы / В.М. Кушнир, В.Р. Душко // Мехатроника, автоматизация, управление, Управление и информатика в авиакосмических и морских системах. — 2013. — № 9 (150). — С. 52–58.
11. Нелинейные особенности штормовых волн в Азовском море / В.М. Кушнир, С.В. Бердников, Н.А. Яицкая, А.Г. Киселева // Экология, экономика, информатика: матер. междунар. конф., Абрау-Дюрсо 08-13 сентября 2013 г. — Ростов на Дону, 2013. — Том 2. — С. 26–30.
12. Крутизна и спектр нелинейно деформируемой волны на мелководье / И.И. Диденкулова, Н. Заибо, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 839–842.
13. Цифровая система для исследований океанотехнических систем в волновых бассейнах / В.М. Кушнир, В.Р. Душко, И.Н. Морева, О.А. Иванова, С.В. Федоров // Вестник Одесского национального морского университета: сб. науч. тр. — Одесса, 2012. — Вып. 34. — С. 50–65.

Поступила в редакцию 17.10.2014 г.

Кушнір В.М., Шоларь С.О., Душко В.Р. Комплекс для вимірювання ударних навантажень при руйнації поверхових гравітаційних хвиль у прибережній зоні моря

Розглянуто основні положення теорії трансформації та зруйнування поверхневих гравітаційних хвиль на похилому дні поблизу берегової лінії. Наведено дані лабораторних досліджень, виконаних у дослідному (хвильовому) басейні СевНТУ, за оцінками навантажень при руйнуванні хвиль на похилому дні.

Ключові слова: руйнування поверхневих гравітаційних хвиль, похиле дно, берегова лінія, дослідний (хвильовий) басейн.

Kushnir V.M., Sholar S.A., Dushko V.R. System for measuring impact pressure on destruction of the surface gravity waves in the near-shore

This article presents the basic theory tenets of transformation and destruction of surface gravity waves on a sloping bottom near the shoreline. The data of laboratory researches estimated load at waves destruction on a sloping bottom made in the wave basin of SevNTU.

Keywords: destruction of surface gravity waves, sloping bottom, shoreline, wave basin.