УДК 62-986

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДАРНОГО ВОЛНОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

С.А. Шоларь, О.А. Иванова, В.Р. Душко, В.А. Крамарь

Севастопольский государственный университет
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: sa.sholar@mail.ru

В статье приведены основные характеристики, устройство и результаты эксплуатации разработанного в лаборатории "Океанотехники" мембранного пьезоэлектрического датчика применяемого в опытовом бассейне СевГУ для измерения ударного волнового давления. По результатам испытаний произведены оценки эксплуатационных показателей измерителя, перспективные пути его использования.

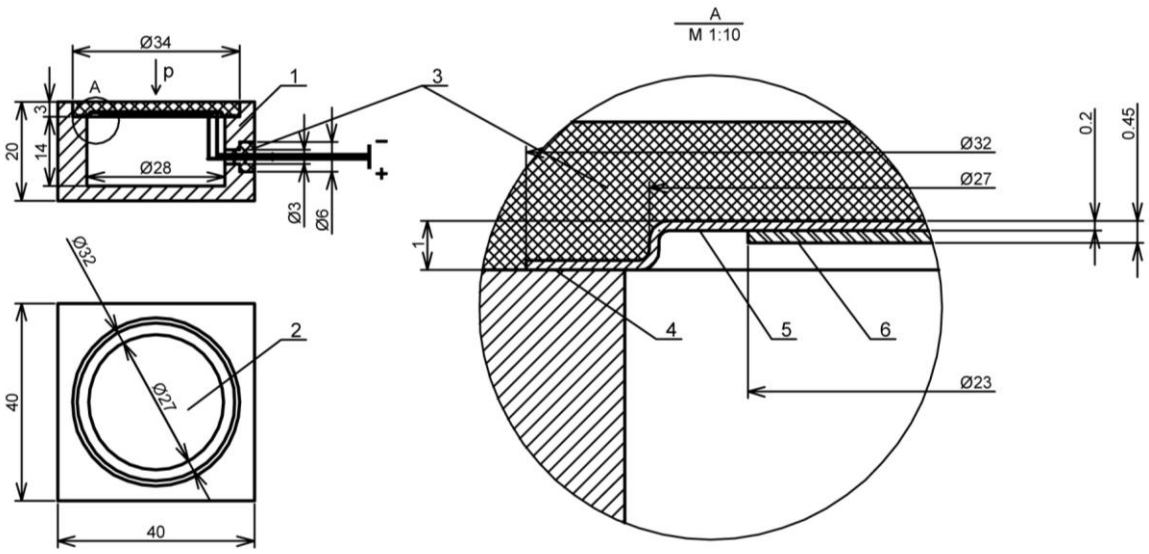
Введение. Для разработки природоохранных конструкций, надежной и долгосрочной эксплуатации различных гидротехнических и океанотехнических систем в прибрежной морской зоне необходимо располагать оценками ударных нагрузок, формирующихся при разрушении штормовых поверхностных волн в ближней прибрежной зоне, т.е. на глубинах от долей метра до нескольких первых метров. 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 таких 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, и ее анализ представлен во многих публикациях, например [3 – 6]. 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 было 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. Для измерения динамических нагрузок при разрушении волн на наклонном дне в опытовом бассейне СевГУ, лабораторией "Океанотехники" был разработан мембранный пьезоэлектрический датчик, реагирующий на переменное волновое давление.

Разновидности датчиков давления. Для измерения давления существует большое количество готовых датчиков [7], однако большая часть из них не предназначена для измерения ударного волнового давления жидкости. Датчики давления условно можно разделить: тензометрические, пьезорезистивные, емкостные, резонансные, индуктивные, ионизационные, пьезоэлектрические. Каждый из них обладает некоторым набором преимуществ и недостатков [8], а для условий эксперимента больше подходит пьезоэлектрический и тензометрический датчики. Тензометрический базируются

на принципе изменения сопротивления при деформации тензорезисторов, приклеенных к упругому элементу, который деформируется под действием давления. Для получения достоверных выходных данных необходимо учитывать много факторов, т.к. показания зависят от температуры, времени, микросхемы подключения, а также у них малый динамический диапазон. У пьезоэлектрических датчиков эти недостатки отсутствуют. Выходное напряжение от ударных нагрузок может достигать до 1 В, что исключает использование дорогостоящих микросхем усилителей. Согласно классификации [8] датчики этого типа можно использовать без защиты чувствительных элементов, либо с защитой силиконовым гелем, кроме этого, они имеют малую массу и габариты, высокую надежность и могут использоваться в жестких условиях эксплуатации.

Конструкция мембранного пьезоэлектрического датчика. Для измерения динамических нагрузок при разрушении волн на наклонном дне в опытовом бассейне СевГУ был разработан мембранный датчик, реагирующий на переменное давление. Устройство датчика приведено на рис. 1.



Р и с. 1. Конструкция мембранного датчика. 1 – корпус из прозрачного пластика; 2 – элемент ЗП-4; 3 – слой силикона; 4 – клей pasco super glue; 5 – металлическая пластина; 6 – слой пьезоэлектрической керамики. p – гидродинамическое давление

Мембранный датчик ударного давления состоит из цельного прямоугольного корпуса 40 × 40 × 20 мм, в верхней части которого имеются отверстия ∅34 мм на глубину 3 мм и ∅28 мм на глубину 17 мм. В отверстие глубиной 3 мм помещается элемент ЗП-4 (*2*). Он состоит из металлической пластины *5*, на которой установлена пьезоэлектрическая керамика *6* толщиной 0,25 мм, на внешней стороне которой нанесено токопроводящее напыление. Элемент ЗП-4 крепится к корпусу при помощи клея pasco super glue (*4*). Для надежной герметизации и исключения воздействия слабых токов на металлическую часть элемента ЗП-4 наносится слой силикона *3*, который заливается до верхней кромки отверстия ∅34 мм.

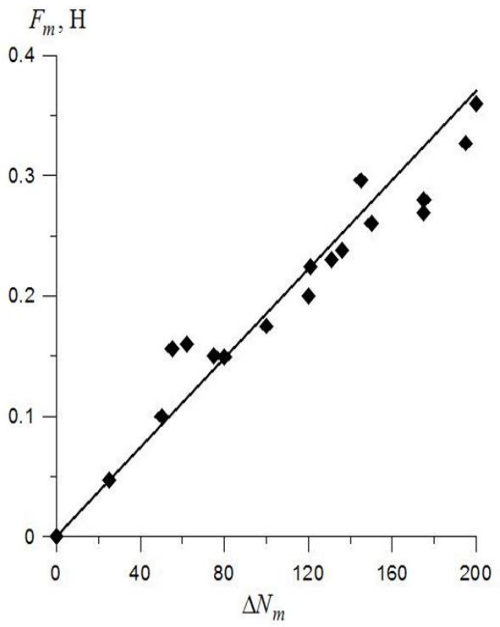
Металлические обкладки элемента ЗП-4 через активный фильтр подключены к входу аналого-цифрового преобра-

зователя NI USB-6008, который подключен к персональному компьютеру через USB-интерфейс. Полосовой фильтр рассчитан таким образом, что со стороны высоких частот ($f > 50$ Гц) он подавляет помехи, связанные с колебаниями напряжения в электрической сети и внешними акустическими шумами, а со стороны низких частот ослабляет колебания с частотой ниже 0,5 Гц. Анализ показал, что амплитудная характеристика мембранного датчика (отношение выходного сигнала к входному) в диапазоне частот f = 0,1–25 Гц определяется соотношением $\omega T_m/[1+(\omega T_m)^2]^{0,5}$, где T_m =1,5 с; ω – угловая частота возмущений [9].

Градуировка датчика. Градуировка мембранного датчика была выполнена при его установке на одной связке с эталонным прибором для измерения давления [10], причем плоскость пьезопластины ориентировалась параллельно измерительной трубке прибора. Систему датчиков опускали в воду на различную глубину Δh = 5 – 25 см за сравнительно короткое время 0,5–1,0 с, т.е. за время меньше T_m. Возникающее при этом изменение выходного кода мембранного датчика ΔN_m сопоставляется с перепадом гидростатического давления $\Delta p = \rho_в g \Delta h$, которое регистрирует датчик давления прибора принятого за эталон. Перепад давления Δp, отнесенный к площади пьезопластины мембранного датчика S_m, равен силе F_m, действующей на мембранный датчик. Градуировочная характеристика мембранного датчика

$$F_m = c_m \Delta N_m,$$

где c_m – коэффициент зависимости силы F_m от изменения выходного кода мембранного датчика ΔN_m, определялась методом наименьших квадратов и приведена на рис. 2 .



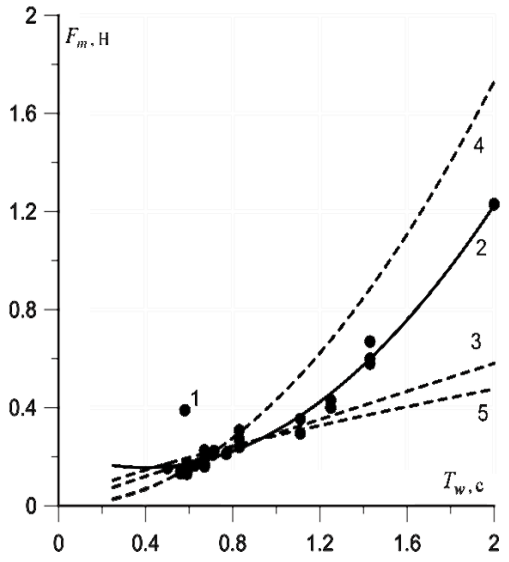
Р и с. 2. Градуировочная характеристика мембранного датчика F_m = 0,00185ΔN_m, достоверность аппроксимации R^2 = 0,945

Применение датчика. Данный датчик успешно применялся при исследовании ударных волновых воздействий на наклонное дно в опытовом бассейне СевГУ [10]. Результаты измерения динамических нагрузок при различном режиме работы волнопродуктора в зависимости от периода волновых возмущений приведены на рис. 3. Анализ данных измерений был выполнен с использованием трех моделей рассматриваемого явления [3].

Первая из них базируется на расчете гидростатической и гидродинамической составляющих динамической нагрузки при опрокидывании гребня волны:

$$F = \rho_в g(0.5H_{cr} + 0.25\pi H_{cr}^2 \lambda_{cr}^{-1})S_d \text{, Н} \quad (1)$$

где S_d – площадь поверхности мембранного датчика; H_{cr}, λ_{cr} – критическая высота и длина волны при опрокидывании гребня [6]. Оценка динамической нагрузки относится к уровню невозмущенной поверхности, где она максимальная.



Р и с. 3. Измеренные величины динамической нагрузки *1* (точки) и аппроксимация $F_m = 0.42T_w^2 - 0.33T_w + 0.22$, R^2=0.97 (сплошная линия *2*). Модельные зависимости (штриховые линии) рассчитаны по соотношениям: (1) – *3*; (2) – *4*; (3) – *5*

Вторая модель основана на эмпирическом соотношении

$$F = 900T_w^2 S_d \text{, Н} \qquad (2)$$

Третья модель основана на балансе энергии волнового движения. Оценка динамической нагрузки при опрокидывании гребня волны вычисляется по соотношению:

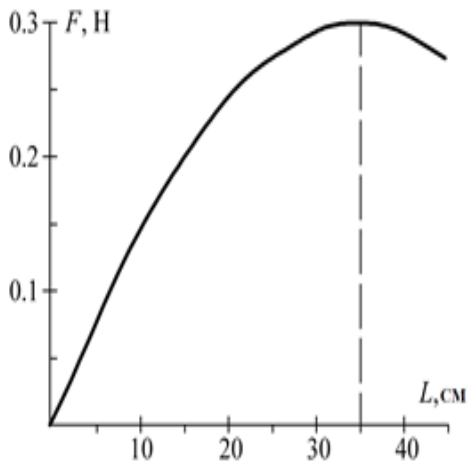
$$F = 0.2\rho_в g H_{cr}(1.5 + \pi H_{cr}/\lambda_{cr})S_d \text{, Н} \qquad (3)$$

Для расчетов по соотношениям (1) – (3) использованы синхронные измерения периодов T_w, длин λ и высот H волн.

По результатам этих измерений получены соотношения для указанных критических параметров разрушающихся волн. На рис. 3 приведено сопоставление указанных модельных зависимостей с результатами измерений.

Следует отметить, что в диапазоне периодов волн T_w от 0,5 до 1 с измеренные и модельные зависимости соответствуют друг другу. При больших периодах T_w > 1 с модельные зависимости $F_m(T_w)$, рассчитанные на основе гидростатической и гидродинамической составляющих динамической нагрузки и энергии волн, приводят к заниженным результатам, а эмпирическая зависимость, построенная на основе учета периодов волн, их завышает.

Измерения, выполненные при использовании предложенного оборудования, и анализ полученных результатов показали существенную зависимость динамических нагрузок разрушающихся волн от наклона дна, расстояния от уреза берега и периода (или длины волн). С целью получения указанных зависимостей подвижный блок мембранных датчиков сдвигался по наклонному дну от уреза воды в сторону увеличения глубины с интервалом 5 см. Зависимость динамических нагрузок от расстояния от уреза берега приведена на рис. 4.



Р и с. 4. Распределение нагрузки на наклонном дне, где F, Н – нагрузка; L, см – расстояние от уреза берега. Угол наклона дна 15^0, период волны T = 1 с

Заключение. Таким образом, разработанный в лаборатории “Океанотехники” СевГУ датчик, успешно используется для экспериментальных исследований, обеспечивает возможность получения достоверных результатов при оценке динамических нагрузок на поверхность наклонного дна при разрушении волн.

Выполненные в условиях волнового бассейна экспериментальные исследования динамических нагрузок при разрушении поверхностных морских волн на наклонном дне показали, что величины этих нагрузок зависят от многих факторов, связанных с параметрами разрушающихся волн и параметрами наклонного дна, где происходит их разрушение. Сопоставление результатов измерения динамических нагрузок с некоторыми из известных моделей этого явления показали, что в первом приближении при малых периодах волн Tw = 0.5– -1 с измеренные величины соответствуют расчетным значениям, которые в свою очередь были получены по результатам измерения параметров волн в бассейне.

Значительные относительные отклонения экспериментальных данных от оценок, выполненных по известным моделям разрушения волн на наклонном дне, указывают на то, что механизм возникновения разрушающих нагрузок ранее был изучен недостаточно полно. Об этом же свидетельствуют многочисленные случаи наблюдения разрушений прибрежных объектов. С одной стороны это связано со значительными трудностями математического моделирования разрывных и встречных течений, которые образуются при формировании и разрушении гребня волны, с другой – недостатком экспериментальных данных. Эти наблюдения демонстрируют необходимость продолжения экспериментальных и модельных исследований динамических нагрузок, формирующихся при разрушении морских волн в береговой зоне, а также изучения воздействия таких волн на конкретные океанотехнические установки. Созданные в СевГУ технические и методические средства планируется использовать для проведения дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кушнир В.М., Федоров С.В., Петренко Л.А.* Реакция Азово-Черноморского бассейна на интенсивный циклон 10–11 ноября 2007 г. по данным дистанционного зондирования // Морские испытания. – 2008. – № 1. – С. 62–81.
2. *Матишов Г.Г., Савицький Р.М., Ижебейкин Ю.И.* Условия и последствия аварий судов в Керченском проливе во время шторма 11 ноября 2007 г. // Вестник Южного научного центра РАН. – 2008. – Т. 4. – № 3. – С. 54–63.
3. *Шулейкин В.В.* Физика моря. – М.: Изд. АН СССР, 1953. – 989 с.
4. *Пелиновский Е.Н., Родин А.А.* Трансформация сильно нелинейной поверхностной волны в мелководном бассейне // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. –№ 3. – С. 383–390.
5. *Кушнир В.М., Душко В.Р.* Воздействие нелинейных поверхностных волн на морской терминал пирамидальной формы // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 9 (150). – С. 52–58.
6. *Кушнир В.М.* Трансформация, удары и разрушение морских волн в прибрежной зоне / В.М. Кушнир, О.А. Иванова, С.А. Шоларь. – Саарбрюккен: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 72 с.
7. URL: http://www.chipdip.ru/catalog-show/pressure-sensors/ (дата обращения: 10.10.15).
8. URL: https://goo.gl/kWc0sJ (дата обращения: 10.10.15).
9. *Нефедов В.И.* Основы радиоэлектроники. – М.: Высш. шк., 2000.
10. *Кушнир В.М., Шоларь С.А., Душко В.Р.* Комплекс для измерения ударных нагрузок при разрушении поверхностных гравитационных волн в прибрежной зоне моря // Вестник Севастопольского национального технического Университета. – 2014. – № 153. – С. 7–12.
11. *Кушнир В.М., Душко В.Р., Крамарь В.А.* Воздействие поверхностных гравитационных волн на прибрежные океанотехнические сооружения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 6. № 5. – С. 36.