

На правах рукописи



ШОЛАРЬ Станислав Александрович

**КОМПЛЕКС ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТРАНСФОРМАЦИИ, УДАРОВ И РАЗРУШЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ВОЛН НА НАКЛОННОМ ДНЕ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Севастополь - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет».

Научный руководитель: **Крамарь Вадим Александрович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Информатика и управление в технических системах»
ФГАОУ ВО «СевГУ»

Официальные оппоненты: **Истомин Евгений Петрович**
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Прикладная информатика»
ФГБОУ ВО «РГГУ», г. Санкт-Петербург.

Капустин Иван Александрович
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, заведующий лабораторией
информационно-измерительных систем отдела
радиофизических методов в гидрофизике
ФГБУН ФИЦ ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 21 декабря 2021 г. в 11:00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем» (ИПТС), Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (СевГУ) по адресу: **299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.**

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря ИПТС (или в библиотеке СевГУ) и на сайте www.иптс.рф. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте www.иптс.рф.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан "___" _____ 2021 г.

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета Д.999.231.02
кандидат физико-математических наук



В.П. Евстигнеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Выход на новый эффективный уровень экономической деятельности России непосредственно связан со строительством новых и реконструкцией существующих морских гидротехнических и океанотехнических сооружений (портовые сооружения, морские месторождения углеводородов на мелководных участках шельфа и др.). Современные конструкции морских гидротехнических сооружений должны обеспечивать круглогодичную безопасную и бесперебойную работу.

Успешное проектирование морских прибрежных сооружений зависит от точных и достоверных знаний о величине и характере нагрузок от ударов волн в предполагаемом месте их базирования. Соответственно эти знания являются основополагающим фактором для выбора строительных материалов и архитектурно-конструктивного типа сооружения (форма корпуса, способ размещения и крепления на побережье). От правильности выбора материалов и типа конструкции зависит безопасность сооружения, его долговечность, что, в свою очередь, приводит к оптимизации затрат на строительство с последующим их обслуживанием.

Учитывая экономическую и социальную значимость прочности прибрежных технических сооружений, новые методы контроля ударных нагрузок от разрушающихся в береговой зоне волн с верификацией основных результатов на основе лабораторных экспериментов не теряют своей актуальности и крайне необходимы для повышения качества проектирования таких систем. В частности важно разрабатывать новые высокоточные приборные комплексы для проведения таких исследований.

Степень разработанности. Общей теоретической базой для решения указанных задач могут служить работы отечественных и иностранных ученых в области гидродинамики и теории проектирования гидротехнических сооружений. Исследовательские работы отечественных и зарубежных ученых по проблемам трансформации, ударов и разрушений морских волн на мелководье охватывают

период с 40-х годов прошлого столетия. Работы, посвященные математическому моделированию, выполнены такими исследователями как Аббасов И.Б., Божич П.К., Диденкулова И.И., Доусон Т., Душко В. Р., Куркин А.А., Кушнир В.М., Пелиновский Е.Н., Шулейкин В.В., Song С. Обзорные работы и работы, посвященные проектированию гидротехнических сооружений, выполнены Ключковым Е.Ю., Красножоном Г.Ф., Халфиным И.Ш. Оборудование для проведения экспериментальных исследований разрушения морских волн на мелководье представлено в работах Катлине Коблева А.Х., Кантаржи И.Г.

В доступных для ознакомления литературных источниках были представлены различные модели и схемы контроля и расчета ударных волновых нагрузок, образующихся при выходе волны в береговую зону. При этом описанные модели и схемы расчетов волновых нагрузок во многих случаях дают значительно различающиеся результаты при одинаковых исходных данных, что свидетельствует о недостаточной изученности явлений, связанных с трансформацией поверхностной волны на наклонном дне и ее разрушения с образованием ударной нагрузки, и о целесообразности проведения дальнейших исследований в данной области. При этом вопросы разработки специализированного приборного комплекса для контроля параметров разрушающихся волн проработаны в недостаточной степени. В доступных литературных источниках акцент направлен преимущественно на математическое моделирование и теоретическое описание данных процессов.

Связь диссертации с научными программами, планами, темами: Цель и задачи работы соответствуют государственным программам: «Энергетическая стратегия России в период до 2035 года», «Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» и «Морская доктрина Российской Федерации».

Диссертационная работа включает в себя результаты исследований, полученных при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ (НИР) и грантов:

- «Экстремальные ветро-волновые нагрузки на океанотехнические системы, их взаимосвязь с рисками техногенных и экологических катастроф», номер государственной регистрации 115041610029, задание №2014/702 на выполнение государственных работ по проекту № 3864 в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России, где соискатель принимал участие как исполнитель.

- «Нелинейная динамика океанотехнических установок на шельфе Азово-Черноморского бассейна», номер государственной регистрации 0113U001254, шифр «Шельф», где соискатель принимал участие как исполнитель.

- «Фундаментальное исследование задач нелинейной динамики поверхностных волн и их воздействия на океанотехнические установки в прибрежной зоне Азово-Черноморского бассейна», грант РФФИ № 14-41-01556/14, где соискатель принимал участие как исполнитель.

Цель работы: разработка комплекса приборов для контроля и исследования волновых нагрузок, воздействующих на морские гидротехнические и океанотехнические сооружения, расположенные в зоне разрушения волны, дающего возможность одновременно измерять силу удара при разрушении волн, производить фото фиксацию и измерение параметров волны перед разрушением с последующей записью с частотой записи не менее 50 измерений в секунду.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи:**

1. Научное обоснование методов контроля наката волн на пологий откос.
2. Разработка технических средств для проведения исследований по накату волн на пологий откос и методики контроля ударных волновых нагрузок, образующихся при разрушении волн в береговой зоне.
3. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представления результатов в приборах и средствах контроля.
4. Проведение экспериментальных исследований по накату волн на пологий откос.

Научная новизна. В итоге проведенных в работе исследований был получен ряд новых научных результатов:

1. Впервые разработана методика оценки ударных нагрузок, образующихся при разрушении поверхностных волн в прибрежной зоне моря, отличающаяся от существующих методов тем, что учитывает профиль дна.

2. Впервые разработан метод контроля штормовых волн при их выходе на малые глубины и измерения ударных нагрузок при разрушении таких волн, отличающийся от аналогов тем, что данный метод дает возможность одновременно измерять силу удара при разрушении волны о берег, производить его фото фиксацию и измерение параметров волны перед разрушением.

3. Впервые разработан аппаратно-программный комплекс цифровой измерительной аппаратуры для проведения исследований воздействия ударных нагрузок при разрушении поверхностных волн, отличающийся от аналогов тем, что данный комплекс дает возможность одновременно измерять силу удара при разрушении волны о берег, производить его фото фиксацию и измерять параметры волны перед разрушением.

4. Разработан новый высокочувствительный малогабаритный пьезоэлектрический датчик давления, отличающийся простотой конструкции и надежностью.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в глубокой проработке и анализе существующих моделей трансформации поверхностных волн (изменение параметров волн под влиянием берега) в прибрежной зоне моря и формировании на их основе единой методики для расчета ударных нагрузок, образующихся при их разрушении в береговой зоне. Данную методику можно использовать при проектировании берегозащитных и гидротехнических сооружений, расположенных в зоне разрушения волн, для определения нагрузок на такие сооружения. От нагрузок, соответственно, зависит выбор материала корпуса и его архитектурно-конструктивный тип (форма корпуса, способ размещения и крепления на побережье).

Разработанный приборный комплекс для контроля и исследования трансформации, ударов и разрушений поверхностных волн на наклонном дне может быть использован для проведения натуральных и лабораторных экспериментов по оценке эффективности берегозащитных сооружений и проверки теоретических моделей.

Результаты практического внедрения положений диссертации используются в экспериментальных исследованиях, проводимых в опытовом бассейне ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». В частности, разработанный в ходе выполнения работы приборный комплекс был внедрен в опытовом бассейне и использован при проведении экспериментальных исследований эффективности сложной заякоренной системы, составленной из отдельных понтонов. Для волн, которые оказывали наибольшее ударное воздействие на берег, в случае применения системы из 32 понтонов, ударные усилия уменьшались на 55%, а в случае применения 16 понтонов – всего на 17%. Также было выявлено, что шестигранная форма понтонов гасит волны на 35% лучше, чем круглая.

Предложенная в работе методика оценки ударных нагрузок, образующихся при разрушении поверхностных волн в прибрежной зоне моря, была внедрена в АО «ЦКБ «Коралл» для предварительной оценки ударных волновых нагрузок в предполагаемом месте размещения прибрежных океанотехнических сооружений.

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертации задачи и проведенные исследования были решены с использованием нелинейных уравнений гидродинамики, при этом были использованы приближенные аналитические и численные методы. Для расчета и моделирования волновых процессов были использованы современные методы вычислительной математики, методы программирования и моделирования в среде *Matlab* и графический язык программирования «*LabView*».

Положения, выносимые на защиту: 1. Методика оценки ударных нагрузок, образующихся при разрушении поверхностных волн в прибрежной зоне моря, учитывающая профиль дна. 2. Метод контроля штормовых волн при их

выходе на малые глубины и измерения ударных нагрузок при разрушении таких волн, отличающийся от аналогов тем, что данный метод дает возможность одновременно измерять силу удара при разрушении волны о наклонное дно, производить его фото фиксацию и измерять параметры волны перед разрушением. 3. Комплекс цифровой измерительной аппаратуры для проведения исследований воздействия ударных нагрузок при разрушении поверхностных волн. 4. Алгоритм и программные средства для записи данных с комплекса измерительной аппаратуры на компьютер и их первичной обработки, позволяющие получать экспресс данные о характеристике волн (длина, высота, период) и силе их удара. 5. Конструкция пьезоэлектрического датчика давления для измерения силы удара волн при их разрушении в береговой зоне.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием действующих нормативных и рекомендательных документов, применением апробированных методов исследования, а также сопоставлением результатов, полученных расчетным путем, с экспериментальными данными, полученными в опытовом бассейне.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на следующих конференциях и семинарах: 27th DAAAM International Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education" 2016 (Мостар, Босния и Герцеговина 2016); IV Всероссийской научной конференции молодых ученых: Комплексные исследования Мирового океана (Севастополь, 2019 г.); XXV Международной научно-технической конференции: Информационные системы и технологии (Нижний Новгород, 2019 г.); XIV и XV Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (Москва, 2015 и 2017 гг.); XV Международной молодежной научно-техн. конф. «Будущее технической науки» (Нижний Новгород, 2016 г.); IV Международной научной конференции «Морская техника и технологии, безопасность морской индустрии» (Калининград, 2016 г.);

Региональной научно-практической конференции «Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений» (Севастополь, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды – 2016» (Севастополь, 2016 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2016» (Севастополь, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды – 2015» (Севастополь, 2015 г.); Межвузовской научно-технической конференции «Совершенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений - 2015» (Севастополь, 2015 г.); Межвузовской научно-технической конференции «Морские технологии - 2014» (Севастополь, 2014 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликована 21 печатная работа, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи - в журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science, 1 монография, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 120 наименований. Общий объем диссертации составляет 114 страниц машинописного текста, включая 44 иллюстрации и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, новизна и практическая ценность полученных результатов, а также методы, применяемые в процессе работы.

В первой главе рассмотрены общие сведения об участках мелководья, о выходе волн на побережье, представлены примеры разрушений берегозащитных и прибрежных гидротехнических и океанотехнических сооружений от таких волн.

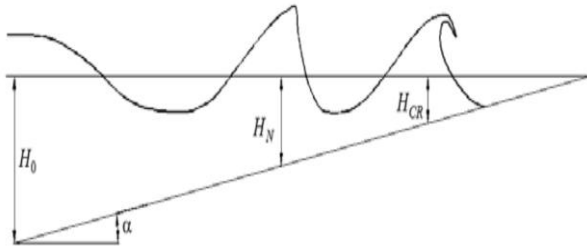


Рисунок 1 – Изменение профиля волны под влиянием берега

Определение параметров волны для реального участка дна возможно в спектральной волновой модели *SWAN*. Параметры определяются для ближайшего (по направлению нормали) к берегу узла расчетной сетки *SWAN*. Рельеф дна используется для определения угла наклона дна, координат узлов береговой линии и угла направления нормали к берегу. Глубина H_N , на которой начинает возникать неустойчивость, длина и высота гребня λ_N , h_N определялись из закона сохранения энергии (формула 1) и эмпирических соотношений (формула 2 и 3), учитывающих трансформацию профиля волны на пологом откосе.

$$h_0^2 \lambda_0 \cos \gamma_N = h_N^2 \lambda_N, \quad (1)$$

$$h_N = C_H h_0 (\lambda_0 / H_N)^{1/4}, \quad (2)$$

$$\lambda_N = C_\lambda h_0 (\lambda_0^2 \cdot H_N)^{1/3}, \quad (3)$$

где $\gamma_N(H_N)$ – угол между волновым вектором и нормалью к береговой линии; $C_H = (\lambda_0 / H_N)^{-1/4}$ и $C_\lambda = (\lambda_0 / H_N)^{1/3}$ – коэффициенты, определяемые из отношения длины волны к глубине.

Так как условие развития неустойчивости в волне наблюдается при соотношении $\lambda_N = 7 \cdot h_N$, то высота волны h_N может быть выражена из уравнения (1), а длина волны (λ_N) и глубина воды (H_N) – из уравнений (2) и (3), что отображено в формуле (4):

$$h_N = \left(\frac{h_0^2 \lambda_0 \cos \gamma_{0N}}{7} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

Полное разрушение волны происходит на глубине H_{CR} , определяемое по соотношению (5):

$$H_{CR} = 4,368 \cdot h_N^{1,714} \lambda_N^{-0,714}. \quad (5)$$

Для получения замкнутой системы уравнений добавим к уравнению (5) соотношения (2) и (3), заменив в них индексы, и получим уравнения (6) и (7):

$$h_{CR} = C_H h_N (\lambda_N / H_{CR})^{1/4}, \quad (6)$$

$$\lambda_{CR} = C_\lambda h_0 (\lambda_N^2 / H_{CR})^{1/3}. \quad (7)$$

Гребень волны перед разрушением, представленный в виде уединенной волны, может быть записан через решение уравнения Кортевега-де Фриза для солитонов:

$$\eta = \frac{H_{CR}}{2} \frac{1}{[\cosh(\frac{x}{2b})]^2}, \quad b = h_{CR} \sqrt{\frac{h_{CR} + 0,5H_{CR}}{1,5H_{CR}}}, \quad (8)$$

где горизонтальная координата x отсчитывается от центра гребня разрушающейся волны, т.е. на глубине h_{CR} .

Скорость гребня при разрушении v_η и расстояние l_0 , которое он проходит, равны соответственно:

$$v_\eta = \frac{H_{CR}}{2} \left(\frac{g}{h_{CR}}\right)^{0,5}, \quad l_0 = \frac{1}{3k} \sqrt{\frac{2}{1 - \sqrt{1 - (0,5H_{CR} / h_{CR})^2}}}, \quad (9)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, $k = 2\pi / \lambda$ - волновое число.

Удельная энергия на один метр фронта гребня равна:

$$W_g = \frac{1}{2} \rho g \int_0^\infty \eta^2(x) dx = \frac{1}{8} H_{CR}^2 \rho g \int_0^\infty \left[\frac{1}{\cosh(x/2b)}\right]^4 dx. \quad (10)$$

Интеграл в (10) равен: $\int_0^\infty \left[\frac{1}{\cosh(x/2b)}\right]^4 dx = \frac{4b}{3}$,

$$W_g = \frac{1}{6} H_{CR}^2 \rho g b, \text{ Дж/м.}$$

Так как ширина гребня равна $2b$, то удельная энергия, приходящаяся на м^2 , равна $\frac{1}{12} H_{CR}^2 \rho g$, Дж/м². Путь разрушения гребня равен l_0 , соответственно динамическое давление при опрокидывании гребня:

$$P = \frac{\rho g H_{CR}^2}{12l_0}, \text{ Н/м}^2. \quad (11)$$

Общая схема расчета ударных нагрузок, образующихся при разрушении поверхностных волн в прибрежной зоне моря, по предложенной методике представлена следующим образом:

- 1) входные данные: батиметрия и координаты береговой линии;
- 2) определение параметров волн и глубины моря в близлежащем узле расчетной сетки *SWAN*;
- 3) определение критической глубины;
- 4) расчет ударных нагрузок при опрокидывании гребня;
- 5) визуализация полученных результатов.

Для проверки правильности представленной методики расчета был разработан специализированный комплекс аппаратуры, который подробно описан во второй главе. В третьей главе представлен пример реализации предложенной методики в программном обеспечении. Результаты сопоставления расчетов по представленной методике и по экспериментальным данным отражены в четвертой главе.

Во второй главе описаны технические средства, входящие в приборный комплекс для контроля и исследования трансформации, ударов и разрушений поверхностных волн на наклонном дне. Приборный комплекс представлен на рисунке 2.

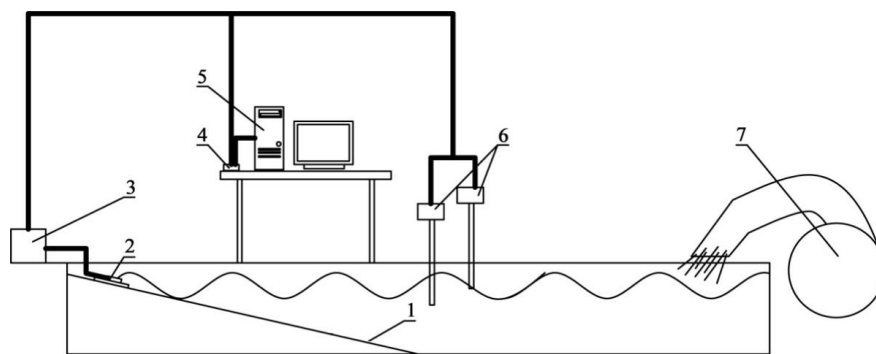


Рисунок 2 – Схема расположения приборного комплекса в случае его применения в опытовом бассейне

В состав приборного комплекса, в случае его применения в волновом (опытовом) бассейне, входят: волновой бассейн, содержащий волнопродуктор (7); наклонное дно (1); датчики давления (2) для измерения нагрузок от ударов волн,

расположенные перпендикулярно набегающей волне; фильтр сигналов от датчиков (3); АЦП (4); компьютер (5); волнографы (6); смотровое окно с установленной видеоаппаратурой для записи обрушения волны на наклонном дне. Вместо установки смотрового окна может быть использован прозрачный герметичный контейнер, жестко закрепленный на стенке бассейна.

На рисунке 2 волнографы расположены со смещением по вертикали и горизонтали. Чувствительный элемент первого волнографа находится на глубине 5 см, а второго – на глубине 10 см. Расстояние между волнографами 20 см. Фазовый сдвиг между их показаниями позволяет определить характеристики волны.

Приборный комплекс функционирует следующим образом: в волновом бассейне происходит генерация волны волнопродуктором (7). Волна генерируется с характеристиками, заданными производителем. Характеристики волны проверяются двумя волнографами (6). На наклонном дне (1) происходит обрушение волны, при этом измерение силы удара от обрушения волн осуществляется блоком датчиков (2). Предусмотрена возможность перемещения датчиков на наклонном дне и их жесткой фиксации для определения распределения нагрузок по всей поверхности. Сигналы от датчиков подаются в блок фильтров (3), где происходит их усиление и подавление посторонних шумов. Преобразованный в блоке фильтров (3) сигнал подается в аналого-цифровой преобразователь (к примеру, NI-USB 6008) (4). После АЦП сигналы передаются на персональный компьютер (5), где происходит их обработка с последующей записью. Обрушение волны фиксируется фото и видеоаппаратурой, расположенной на одной из стенок волнового бассейна. Все данные, получаемые с измерительной аппаратуры, – характеристики волны с волнографов (6), сила удара волн с датчиков (4) и форма гребня волны в момент обрушения, записанные с видеоаппаратуры, синхронизируются на компьютере.

Для измерения силы удара волн, образующихся при их разрушении в волновом бассейне, был разработан экспериментальный образец высокочувствительного (82 мВ/кПа), малогабаритного, пьезоэлектрического

датчика, отличающегося простотой конструкции и надежностью. Сборочный эскиз датчика представлен на рисунке 3, а его градуировочная характеристика на рисунке 4.

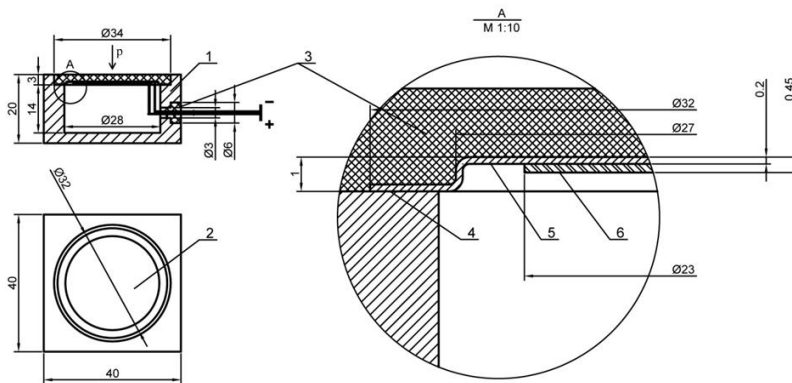


Рисунок 3 – Конструкция пьезоэлектрического датчика давления

На рисунке 3: 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 – давление гидродинамическое.

Стабильность показаний измерительной аппаратуры проверяли повторными градуировками не реже одного раза в месяц, при этом относительная нестабильность не превышала 1%. Для градуировки волнографов их опускали на заданную глубину z (от 0.05 до 0.5 м с шагом 0.05 м) при отсутствии возмущений свободной поверхности. Зависимость показаний (кодов) волнографа N_i от гидростатического давления p_i близка к линейной зависимости, чувствительность датчика на уровне 0.3 Па, что эквивалентно $3 \cdot 10^{-6}$ м водяного столба. Градуировка пьезоэлектрических датчиков была выполнена при установке их на одной связке с волнографом, причем плоскость пьезопластины ориентировалась вдоль трубки волнографа. Систему датчиков опускали в воду на различную глубину $\Delta h = 5\text{--}25$ см за сравнительно короткое время 0.5–1 с, т.е. за время, значительно меньшее T_m . Возникающее при этом изменение выходного кода пьезоэлектрического датчика ΔN_m сопоставляется с перепадом гидростатического давления $\Delta p = \rho_{\text{в}} g \Delta h$, которое регистрирует датчик давления волнографа. Перепад давления Δp , отнесенный к площади пьезопластины мембранного датчика S_m , равен силе $F_m = (\rho_{\text{в}} g \Delta h) / S_m$, действующей на пьезоэлектрический датчик давления. Градуировочная зависимость силы, действующей на мембрану от кода пьезоэлектрического датчика ΔN_m , представлена на рисунке 4. В результате калибровки аналого-цифровой

преобразователь регистрировал напряжение, выдаваемое датчиком до 200 мВ на глубине 0,25 м, где давление на пластину датчика соответствовало 2,453 кПа. Соответственно чувствительность датчика 82 мВ/кПа, что существенно превосходит чувствительность большинства современных аналогов, к примеру, таких датчиков, как 24РСЕ фирмы Honeywell (10 мВ/кПа), 113В28 фирмы РСВ (14,5 мВ/кПа), МРХV2010DP фирмы Nxp Semiconductors (2,5 мВ/кПа).

Разработанный новый комплекс специализированной аппаратуры для контроля и изучения трансформации, ударов и разрушений поверхностных волн на наклонном дне был запатентован и внедрен в опытовом бассейне СевГУ и используется для экспериментальных работ. Для записи исследуемых величин и их предварительной обработки было разработано программное обеспечение,

описанное в третьей главе.

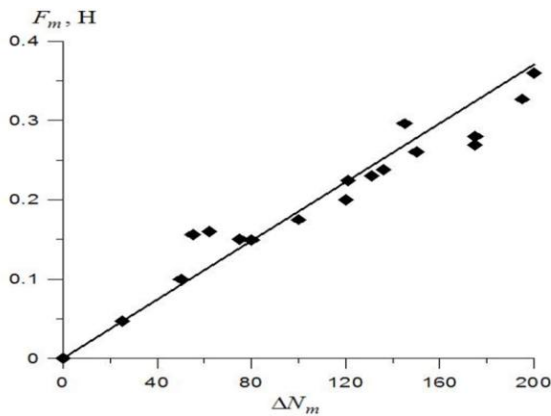
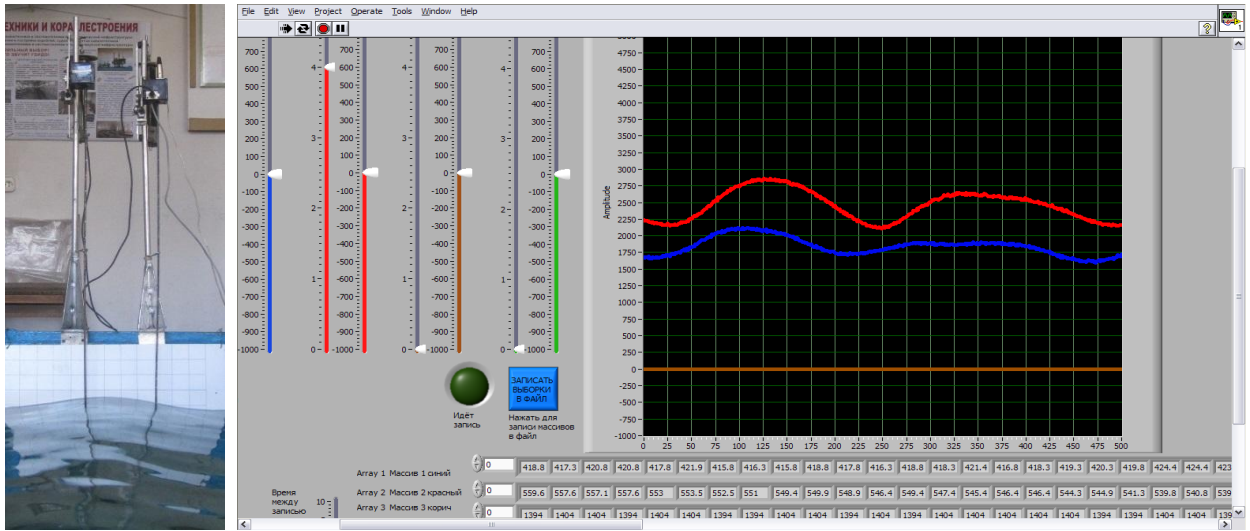


Рисунок 4 – Градуировочная характеристика пьезоэлектрического датчика давления

$$F_m = 0,00185\Delta N_m, R^2 = 0,945$$

В третьей главе представлено описание разработанного программного обеспечения. Для записи измеренных данных с пьезоэлектрических датчиков и волнографов, их предварительной обработки и визуализации была разработана программа на графическом языке программирования *LabView*. На рисунке 5 изображен процесс измерения и записи профиля волны на компьютер (в – скриншот интерфейса разработанной

программы). В среде *LabView* любая программа или подпрограмма имеет два окна: интерфейсную часть и область графического кода-диаграммы. На рисунке 6 представлен «дружественный» интерфейс главной программы.



а

б

Рисунок 5 – Процесс записи профиля волны на компьютер:
 а – 2 волнографа, закрепленного на стенке волнового бассейна;
 б – скриншот отображения профиля волны на компьютере

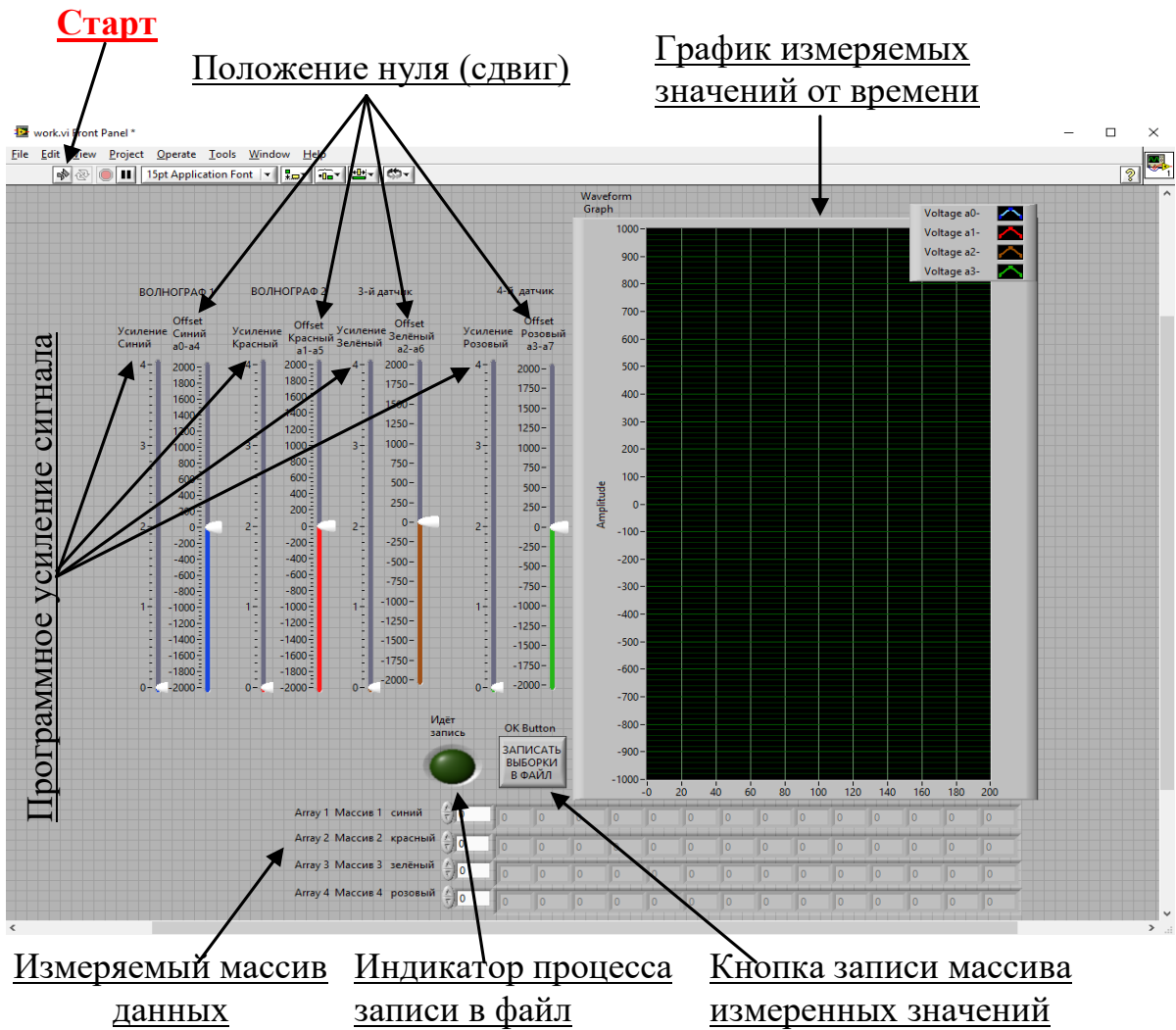


Рисунок 6 - Интерфейс главного модуля программы work.vi

Оператор вводит сопутствующую информацию и запускает программу. Сигнал можно усилить программно, а также добавить поправочный коэффициент, используя функцию – *offset*. В среде *LabView* установленные значения можно зафиксировать в качестве значений по умолчанию, и тогда при следующем вызове программы они установятся автоматически. Программа работает в автоматическом режиме до тех пор, пока пользователь не нажмет кнопку “Запись выборки в файл”. После записи в файл программа останавливается и готова к следующему запуску и измерению профиля волны и силы удара с датчиков ударного давления.

Основной фрагмент графического кода (*Block Diagram*) главного модуля программы представлен на рисунке 7. В этом меню можно указать имя файла и каталог для записи. В модуле DAQ Assistant производится настройка длины ряда и частоты опроса измерителей, где *Sample to Read* – длина ряда, а *Rate* – частота опроса измерителей. Для спектрального анализа достаточно 200 отсчетов с частотой опроса 50 Гц. Сигналы, поступающие с АЦП/ЦАП NI USB-6008, распознаются в модуле DAQ Assistant, после чего сигналы делятся на сигналы с волнографов и сигналы с датчиков давления. Сигналы усиливаются (путем умножения на поправочный коэффициент) и увеличиваются (прибавлением или вычитанием константы для правильного выставления «нуля») на величину поправочного коэффициента. Измеренные сигналы отображаются на экране пользовательского интерфейса и поступают в модуль Case Structure, где происходит их запись. В модуле Case Structure происходит настройка папки сохранения файла и расширения сохраняемого файла.

Разработанное программное обеспечение реализует алгоритм измерения аналоговых сигналов, поступающих с измерителей, визуализацию и регистрацию первичных данных, получаемых при измерениях профиля волны (волнографами) и силы удара (пьезоэлектрическими датчиками).

Данный программный продукт и приборный комплекс, для которого он разработан, позволили автоматизировать проведение экспериментальных

исследований в волновом бассейне СевГУ и существенно уменьшить (в 2 раза) время на регистрации данных и их предварительной обработке.

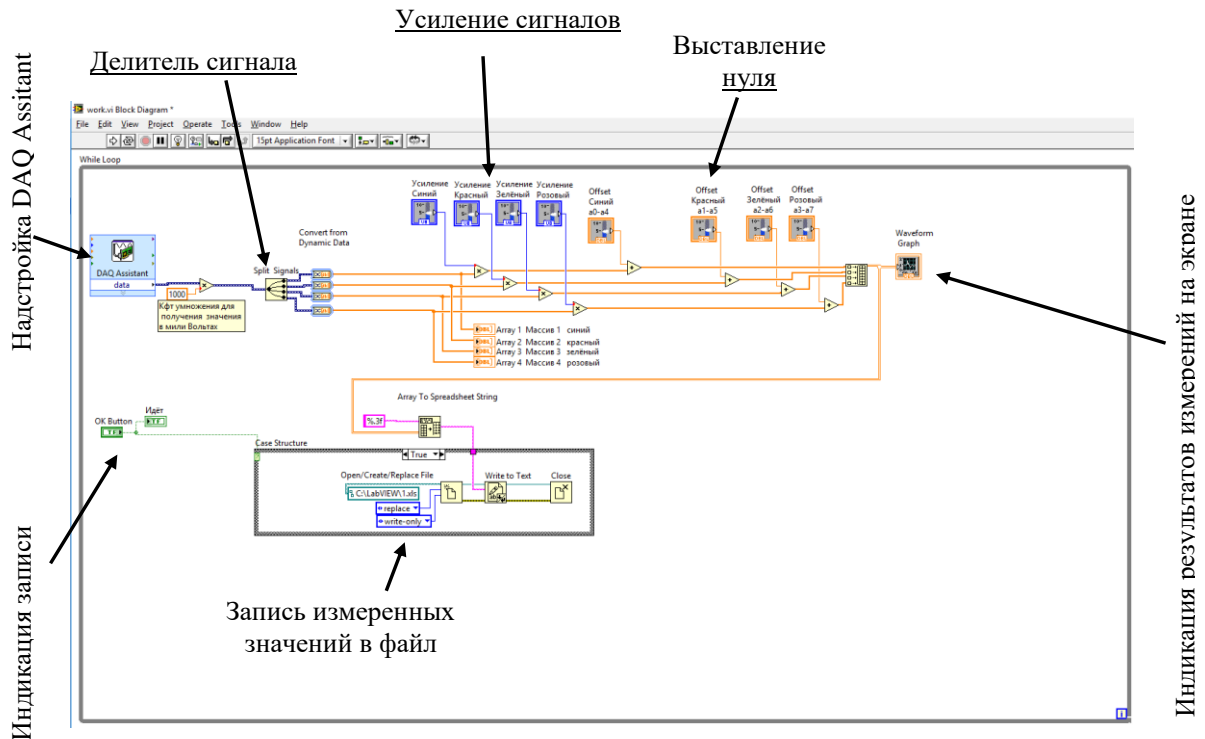


Рисунок 7 - Фрагмент графического кода главного модуля программы **work.vi**

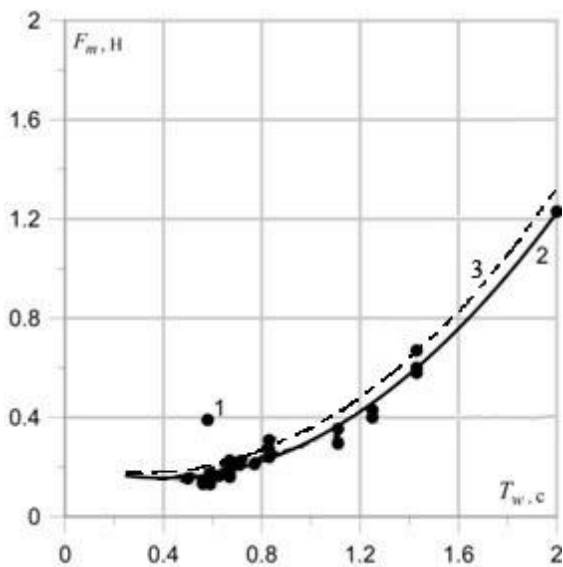


Рисунок 8 - Измеренные величины динамической нагрузки I и аппроксимация вида

$$F_m = 0.42T_w^2 - 0.33T_w + 0.22,$$

 $R^2 = 0,97 - 2.$ Результаты расчета по методике, представленной в первой главе – 3. F-критерий Фишера: $350 F_{\text{табл}}(1; 30) = 4.17$

В четвертой главе была выполнена проверка методики, описанной в первой главе. Результаты измерения динамических нагрузок при различных режимах работы волнопродуктора в зависимости от периода волновых возмущений и результаты расчета по предложенной в первой главе методике приведены на рисунке 8.

Как можно видеть, данные измерений и результаты расчетов по методике, представленной в первой главе, дают близкие значения.

Изменение угла наклона дна приводило к изменению характера

взаимодействия волны с берегом. На малых углах наклона дна ($5-10^0$) волна накатывалась, а при больших углах ($15-20^0$) волна имела характерный профиль с обрушением (рисунок 9). При удалении от уреза берега величина нагрузки на наклонное дно растёт и на определенном расстоянии начинает уменьшаться (рисунок 10). При этом при измерении динамических нагрузок на всех длинах

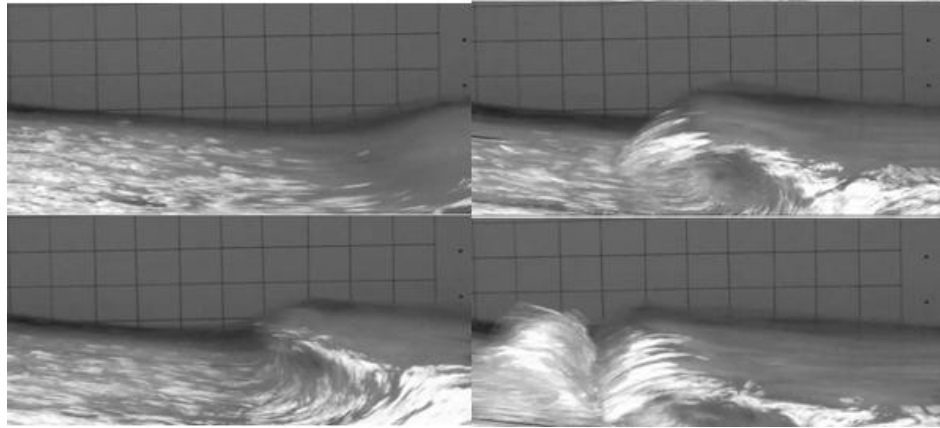


Рисунок 9 - Разрушения гребня волны при его обрушении на наклонном дне на фоне координатной сетки с размером ячейки $50*50$ мм.

волн абсолютный максимум величины нагрузки на заданном угле наклона, как правило, находится на одном и том же расстоянии от уреза берега и практически не зависит от периода, высоты и длины волны. Так при угле наклона дна 5^0 , абсолютный максимум нагрузки находился на расстоянии 75 см от уреза берега в 66% случаев (использовались 5 различных режимов работы волнопродуктора); при 10^0 – 55 см в 80%; при 15^0 – 35 см в 66%; при 20^0 - 20 см в 80%. Таким образом, на относительно малых углах наклона дна ($5-20^0$), расстояние, на котором наблюдается максимальная величина нагрузки, линейно зависит от угла наклона дна (рисунок 11).

Разработанный комплекс аппаратуры был использован при проведении экспериментальных исследований по оценке эффективности защиты берега от волн сложной заякоренной системой, составленной из отдельных плавучих элементов (понтон). Сотовая конструкция из связанных моделей понтонов в опытовом бассейне представлена на рисунке 12.

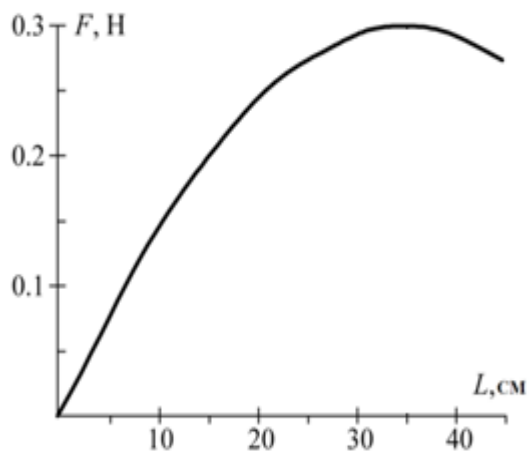


Рисунок 10 - Распределение нагрузки на наклонном дне, где F , Н – величина нагрузки, L , см – расстояние от уреза берега. Угол наклона дна 15° , период волны $T = 1$ с

20

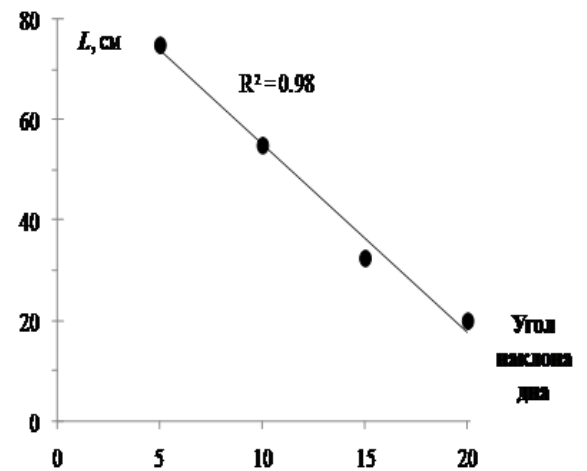


Рисунок 11 - Зависимость расстояния, на котором зафиксирована максимальная величина нагрузки, от угла наклона дна



Рисунок 12 - Сотовая конструкция из связанных моделей понтонов в опытном бассейне СевГУ

Для волн, которые оказывали наибольшее ударное воздействие на берег, в случае применения системы из 32 понтонов, ударные усилия уменьшались на 55%, а в случае применения 16 понтонов – всего на 17%. Также было выявлено, что

шестигранная форма понтонов гасит волны на 35% лучше, чем круглая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложено новое решение актуальной научно-технической задачи контроля и исследования трансформации, ударов и разрушений поверхностных волн на наклонном дне. **Основные результаты** диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Проведенный анализ существующих математических моделей трансформации волн при их подходе к береговой зоне и образующихся ударных нагрузок при разрушении таких волн выявил недостаточность изученности этих

явлений и целесообразность проведения экспериментальных исследований в данной области с разработкой специализированного оборудования для их выполнения.

2. Впервые разработана новая методика оценки ударных нагрузок, образующихся при разрушении поверхностных волн в прибрежной зоне моря, учитывающая профиль дна.

3. Впервые разработан и внедрен в приборный комплекс новый высокочувствительный, малогабаритный, пьезоэлектрический датчик давления, отличающийся высокой чувствительностью, простотой конструкции и надежностью.

4. Впервые разработан и запатентован новый комплекс в составе специализированной аппаратуры для контроля и изучения трансформации, ударов и разрушений поверхностных волн на наклонном дне, который внедрен в опытовом бассейне и используется для исследований.

5. Впервые разработано и внедрено программное обеспечение для записи данных с комплекса измерительной аппаратуры на компьютер и первичной их обработки.

6. Впервые в результате проведения экспериментальных исследований выявлено, что на малых углах наклона дна в условиях опытового бассейна, расстояние от берега, на котором наблюдается максимальная величина нагрузки, линейно зависит от угла наклона дна.

7. Комплекс специализированной аппаратуры был успешно использован в экспериментальных исследованиях в опытовом бассейне СевГУ инновационного берегозащитного сооружения, состоящего из системы связанных и заякоренных понтонов, что позволило выявить наиболее эффективную конструкцию в виде соты из 32 понтонов шестигранной формы.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием гидротехнических и океанотехнических сооружений, расположенных в зоне разрушения волны при определении нагрузок от ударов волн в предполагаемом

месте размещения сооружения. Знания о величинах волновых нагрузок являются основополагающим фактором для выбора строительных материалов и архитектурно-конструктивного типа сооружения (форма корпуса, способ размещения и крепления на побережье). От правильности выбора материалов и типа конструкции зависит безопасность сооружения, его долговечность, от чего в свою очередь зависит стоимость постройки и затраты на эксплуатацию.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Апробация разработанного технического решения, реализованного в приборном комплексе, в натуральных условиях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК

1. **Шоларь С.А.** Сравнительный анализ применимости пьезоэлектрических и пьезорезистивных датчиков для измерения ударных волновых нагрузок / **С.А. Шоларь** // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – № 7 (27) . – С. 19–23. (Вклад соискателя 100%).

2. **Шоларь С.А.** Датчик для измерения ударного волнового давления на базе пьезоэлектрического элемента / **С.А. Шоларь**, О.А. Иванова, В.Р. Душко [и др.] // Системы контроля окружающей среды. – 2016. – № 3 (23). – С. 33–37. (Вклад соискателя 70%).

3. Кушнир В.М. Комплекс для измерения ударных нагрузок при разрушении поверхностных гравитационных волн в прибрежной зоне моря / В.М. Кушнир, **С.А. Шоларь**, В.Р. Душко // Вестник СевНТУ. Серия: Механика, энергетика, экология. – 2014. – № 153. – С. 7–12. (Вклад соискателя 70%).

Публикации, индексируемые в Web of Science/Scopus

4. **Sholar S.A.** Experimental researches in the wave basin using national instruments technology / **S.A. Sholar**, О.А. Ivanova, V.R. Dushko [et. al] // Proc. of the 27th DAAAM International Symposium (Mostar, 26 – 29 October 2016). – Vienna: DAAAM Internationa, 2016. – P. 417–422. (Вклад соискателя 70%).

5. Kushnir V.M. Experimental research of dynamic loads formed upon breaking of a gravitational wave on a sloping bottom / V.M. Kushnir, **S.A. Sholar**, V.R. Dushko // Instruments and experimental techniques. – 2016. – Vol. 59, № 3. - P. 451–457. (Вклад соискателя 70%).

Патенты и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

6. Патент № 2648297 С2 Российская Федерация, МПК G01M 10/00, G01M 10/00. Комплекс оборудования для измерения ударных волновых нагрузок на наклонное дно в опытовом бассейне / **С.А. Шоларь**, В.Р. Душко, В.А. Крамарь. Заявитель Севастопольский государственный университет. — № 2016128655; заявл. 13.07.2016; опубл. 23.03.18. Бюл. № 2. — 8 с. (Вклад соискателя 70%).

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612973 Российская Федерация. Программа для сбора данных, индикации и обработки результатов измерений с комплекса оборудования для измерения ударных волновых нагрузок на наклонное дно в опытовом бассейне / В.А. Крамарь, **С.А. Шоларь**, В.Р. Душко. Заявитель Севастопольский государственный университет. — № 2020611858; заявл. 25.02.2020; опубл. 06.03.20. (Вклад соискателя 65%).

Иные публикации: по теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 12 в сборниках докладов на всероссийских и международных конференциях.