



Тематический выпуск

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| К читателям (<i>обращение главного редактора</i>)..... | 4 |
| Статьи | |
| <i>Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б.</i> Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях | 5 |
| <i>Кантаржи И.Г.</i> Воздействия на водную среду при строительстве морских портов и сооружений на шельфе | 17 |
| <i>Пелиновский Е.Н., Шургалина Е.Г.</i> Аномальное усиление волны вблизи вертикальной преграды | 29 |
| <i>Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С., Семёнов К.К., Хакимзянов Г.С.</i> Исследование взаимодействия уединенной волны с частично погруженным сооружением | 39 |
| <i>Диденкулова И.И., Сергеева А.В., Пелиновский Е.Н., Гурбатов С.Н.</i> Статистические оценки характеристик наката длинных волн на берег | 55 |
| <i>Хабахпашева Т.И., Коробкин А.А.</i> Импульсивное воздействие обрушающихся волн на упругие береговые сооружения | 64 |
| <i>Леонтьев И.О.</i> Динамика профиля песчаного берега на различных масштабах времени | 78 |
| <i>Соомере Т., Зайцева-Пярнасте И., Рямяет А., Куренной Д.</i> О пространственно-временной изменчивости полей волнения Финского залива | 90 |
| <i>Гагошидзе Ш.Н.</i> К оценке воздействия вдольбереговых волн на береговые откосы открытых морских и речных каналов | 102 |
| Рецензия на книгу | |
| Холодова С.Е., Перегудин С.И. Моделирование и анализ течений и волн в жидких и сыпучих средах | 114 |
| Конференции | |
| Информация о предстоящих (международных) конференциях по гидрофизике в 2011 г. | 115 |
| Поздравляем! | 117 |
| Хроника | 120 |
| Тематический указатель 2008–2010 гг. | 122 |
| Авторский указатель за 2008–2010 гг. | 126 |
| Правила представления материалов в редакцию..... | 127 |

CONTENTS

Articles

- Divinsky B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.B.* Parameters of Wind Waves on the Protected Water Areas 5

In the paper some aspects of mathematical modeling of wave and hydrodynamic regime at protected water areas are considered, examples of the dangerous hydrodynamic phenomena research (broken water, harbor seiche, resonant characteristics of harbor) are given. Recommendations of various wave and hydrodynamic models applicability for the decision of assigned tasks are given.

Key words: mathematical simulation, protected areas, wave climat, harbor seiche.

- Kantarzhi I.G.* Impacts onto the Water Environment of the Sea Ports and Continental Shelf Structures Construction 17

The experience of development and environmental expert review of the sea hydro technical projects has been generalized. Construction and operation of the sea ports, as well as continental shelf structures may cause the significant impact onto sea water environment. The modern method of coastal processes modeling and the modern construction technologies can help in assessment of the environmental effects and to minimize these effects. The separation of the global project into stages may be applied if the environmental impact assessment is possible, only.

Key words: sea ports, continental shelf structures, construction and operation, design, environmental impact, impact assessment, expert review.

- Pelinovsky E.N., Shurgalina E.G.* Abnormal Intensification of a Wave near a Vertical Barrier 29

One of the possible mechanisms of freak-waves emergence near a vertical barrier, based on the dispersive focusing of unidirectional wave packets is analyzed. This mechanism is associated with the frequency dispersion of water waves and manifested in the interference of many spectral components, moving with different group velocities. Formation of a single freak wave in a random wind wave field is considered in the frame of linear theory. The characteristic lifetime of an abnormal wave in the framework of this mechanism for typical conditions is approximately two minutes, thus such a rapid effect is difficult to predict and prepare for. A rogue wave quickly changes its shape from a high ridge to a deep depression.

Key words: water waves, wind waves, freak waves, dispersive focusing.

- Kamynin E.Yu., Maximov V.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Khakimzyanov G.S.* Study of Interaction of the Solitary Wave with a Partially Submerged Stationary Construction 39

The results of laboratory experiments and numerical modeling of the interaction of a solitary wave and a fixed partially submerged body of rectangular shape, located on a flat slope are presented. Carried out research allowed to determine the magnitude run-up on the body and the wave pressure on it, depending on the oncoming wave amplitude, the body length and its immersion, the angle of the slope.

Key words: solitary wave; partially submerged structure; run-up; pressure; laboratory experiment; numerical simulation; results.

- Didenkulova I.I., Sergeeva A.V., Pelinovsky E.N., Gurbatov S.N.* Statistical Estimates of Characteristics of Long Wave Run-up on a Beach 55

The run-up of irregular long sea waves on a beach of a constant slope is studied in the framework of nonlinear shallow water theory. It is shown that the problem nonlinearity does not influence on statistical moments of the velocity of the moving shoreline, but affects statistical moments of the displacement. In particular, for weak-amplitude waves it is demonstrated that the wave run-up process has a longer duration as compared to the duration of the wave run-down process, even if the incident wave field represents Gaussian stationary

process with a zero mean. The probability of wave breaking during the process of wave run-up is calculated and conditions of the model validity are discussed.

Key words: long waves, run-up, statistical moments, probability distributions.

Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A. Impulsive Interaction of Breaking Waves with Flexible Coastal Structures 64

The problem of impact of a water wave with flat front onto an elastic vertical plate which models the surface of a coastal structure is studied. The liquid is assumed weakly-compressible; the liquid flow is described within acoustic approximation. The deflection of the plate and its vibrations caused by impact are described by a linear theory of thin isotropic plates without accounting for shear stresses. The hydrodynamic and structural parts of the problem are coupled by both dynamic and kinematic conditions imposed on the wetted part of the structure. The problem is solved by the normal mode method. By using integral transforms the problem is reduced to a system of differential and integral equations which are numerically solved. Phenomena caused by the structural damping and liquid compressibility are investigated. It is shown that the structural damping affects the global evolution of the plate behavior; however, maximum deflection and maximum bending stress can be determined without account for structural damping. New combined model of violent wave impact is proposed. Within this model only the early stage of impact is described with taking the liquid compressibility into account, the later stage is simulated by using the model of incompressible liquid.

Key words: breaking wave, elastic plate, wave impact, compressible liquid, structural damping, bending stresses, combined model.

Leont'yev I.O. Shoreface profile dynamics in different time scales 78

Dynamics of the sea coast is characterized by both the short-term changes and the long-term trends manifested in the time scales of decades, centuries and milleniums. When modeling the short-term storm-induced deformations the process-based models turn out to be most successful as those simulate the suite of primary mechanisms responsible for sediment transport and bed deformations. Presented model CROSS-P is applicable to calculate the storm-induced deformations on sandy coasts of the seas, large lakes and water stores. To analyse the long-term coastal evolution the model SPELT is suggested determining the position and form of the profile depending on changes in sea level and imbalance of sediment budget.

Key words: coastal profile modeling, erosion, accumulation, storm-induced deformations, erosion, coastal evolution, sediment budget.

Soomere T., Zaitseva-Pärnaste I., Räämet A., Kurennoy D. Spatio-temporal variations of wave fields in the Gulf of Finland 90

We analyse the main properties of wave fields in the Gulf of Finland and their spatial and long-term variations based on visual wave observations performed since 1954 at two locations on the southern coast of the gulf and high-resolution simulations of wave fields for the entire Baltic Sea for 1970-2007. Shown is that both long-term average and maximum wave heights in the gulf are about a half for those in the Baltic Proper. The average wave heights have insignificantly changed in the gulf since the 1970s whereas the extreme wave heights have considerably increased in the northern and in the northeastern sections of the gulf. A probable reason for the changes is the enhancement of south-western winds over the last 40 years.

Key words: wind waves, wave measurements, wave modelling, wave climate, Baltic Sea, Gulf of Finland.

Gagoshidze Sh.N. To the Estimation of the Action of Longitudinal Waves on the Bank Slopes of the Open Sea and River Channels 102

One of the most characteristic properties of longitudinal waves is the growth of their height near the bank line. This property is especially observed in short longitudinal, the mathematical description of which in terms of mathematical approximation was for the first time given by Stokes. In the present paper, Stokes' solution generalized to the case of a stationary longitudinal flow is used to estimate the static stability and deformation of the sea shore slope or of the deep sea and river channel slopes. The stability of shore slopes of a shallow sea or trapezoidal or triangular channels, which have cross-section dimension commensurable with the longitudinal wave length is estimated on the basis of an approximate solution of three-dimensional wave equations by the Galerkin-Kantorovich method. This solution, while preserving the three-dimensional structure of waves over the bank slope, leads to the results which can be easily used in engineering design.

Key words: longitudinal waves, flow, channel depth, bank deformation.

УДК 532.59+539.3+519.63

© Е.Ю. Камынин¹, В.В. Максимов¹, И.С. Нуднер¹, К.К. Семенов¹, Г.С. Хакимзянов²¹Филиал ОАО «26-й Центральный научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург²Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

kam-012@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНЫ С ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЕННЫМ НЕПОДВИЖНЫМ СООРУЖЕНИЕМ

Представлены результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования процесса взаимодействия уединенной волны с неподвижным частично затопленным телом прямоугольной формы, расположенным над плоским откосом. Проведенные исследования позволили определить величины заплесков на тело и волнового давления на него в зависимости от амплитуды набегающей волны, протяженности тела и его осадки, угла наклона откоса.

Ключевые слова: уединенная волна, частично погруженное сооружение, заплеск, давление, лабораторный эксперимент, численное моделирование, результаты.

При проектировании в цунамиопасных районах морских гидротехнических сооружений (плавучих причалов, доков, платформ, понтонов и т.п.) одной из важнейших задач является определение воздействия на них длинных волн. В настоящее время в Российской Федерации разработана и реализуется программа обеспечения энергией (электрической и тепловой) удаленных регионов с помощью плавучих атомных теплоэнергетических станций (ПАТЭС). Реакторы этих станций размещаются в несамоходных сточных судах – так называемых плавучих энергоблоках (ПЭБ). Длина блока 144 м, ширина 36 м, высота по борту 10 м, осадка 5.5 м, водоизмещение 21.5 тыс.т. Мощность двух ядерных реакторов КЛТ-40С составляет 75 МВт, тепловая мощность 146 Гкал/ч. Первая из таких станций, получившая название «Академик Ломоносов», спущенная на воду 1 июля 2010 г. со стапелей Балтийского завода, в конце 2012 г. встанет на многолетнюю стоянку в районе г. Вилючинска, расположенного на берегах бухты Крашенинникова Камчатского края (рис. 1).

Известно, что берега Камчатки подвержены воздействию цунами. Поэтому возникает задача предотвращения возможного ущерба, который могли бы нанести подобные волны потенциально опасным объектам. Для решения задачи требуется знание величин заплесков и нагрузок, кото-



Рис. 1. Планируемое размещение плавучего энергоблока «Академик Ломоносов».

рые может создать волна цунами на объект и защищающие его сооружения.

В 2009 г. в гидроволновом бассейне Филиала ОАО «26-й Центральный научно-исследовательский институт» были проведены лабораторные исследования по воздействию волн цунами на модель плавучего энергоблока. Для этого была построена модель участка акватории бухты Крашенинникова, учитывающая реальную батиметрию и геометрические размеры ПЭБ и защитных сооружений в масштабе 1:100 (рис. 2).



Рис. 2. Модель ПАТЭС в масштабе 1:100.

Для оценки эффективности проектируемых защитных сооружений был проведен ряд экспериментов при разных высотах приходящей волны. Изменение высоты волны фиксировалось в заданных точках акватории волномерами. На рис. 3 представлены отдельные характерные моменты подхода модельной волны цунами к защищаемому энергоблоку. Наблюдается изменение формы фронта волны при уменьшении глубины акватории, рост высоты, появление отраженных волн и сложные интерференционные явления.

Проведенные лабораторные исследования показали высокие волнозащитные свойства предлагаемых сооружений. Вместе с тем возникает естественная задача минимизации стоимости защитных сооружений с сохранением необходимой степени волнозащиты. Решение этой задачи требует проведения значительного объема лабораторных и теоретических исследований.

При изучении взаимодействия поверхностных волн с частично погруженными сооружениями решающую роль играют лабораторные исследования [1], позволяющие оценить волновые нагрузки в широком диапазоне таких определяющих параметров, как размеры тела, его осадка, амплитуда волны и др. Вычислительный эксперимент также представляет практический интерес, так как с его помощью можно достаточно точно воспроизводить картину взаимодействия волн с сооружением, находясь в области применимости используемых математических моделей [2–5].

Для уменьшения волновой нагрузки на сооружение применяют различные защитные экраны. Это могут быть непроницаемые вертикальные экраны, не достигающие до дна и частично пропускающие набегающую волну снизу, или пористые экраны, пропускающие через себя ослабленную волну той или иной интенсивности в зависимости от заданной пористости экрана. Воздействие уединенной волны на конструкции, состоящие из защищаемого сооружения и защитного экрана, изучено недостаточно полно как численными методами, так и с помощью лабораторных экспериментов, особенно в случае пористых преград [6, 7]. Настоящая статья посвящена экспериментальному и численному исследованию заплесков на полупогруженное тело и силового воздействия на него при различных значениях амплитуды набегающей волны, пористости экрана, зазора между дном и не-

проницаемым вертикальным экраном и содержит краткое описание экспериментальной установки и методики проведения численных расчетов для самого общего случая.



Рис. 3. Модельные испытания ПАТЭС на волну высотой 5.8 м: подход волны; взаимодействие с защитными сооружениями; отражение набегающей волны; остаточные интерференционные явления.

Методика экспериментальных исследований. Эксперименты проводились с целью определения возвышения свободной поверхности перед и за преградой, а также давления в фиксированных ее точках. Испытательная установка гидроволновой лаборатории представляет собой лоток (рис. 4) с установленным в нем стационарным вакуумным волнопродуктором, при помощи которого создается уединенная волна [8]. Параметры этого лотка таковы: длина 45.0 м, ширина 1.0 м, высота 1.2 м, минимальный (максимальный) рабочий уровень воды 25 см (90 см), высота генерируемой волны до 40 см.

На рис. 5 приведена схема лабораторной установки и указаны места расположения датчиков давления.

В ходе экспериментов использовалась специальная измерительная информационная система (ИИС) (рис. 7), управляемая оператором посредством диалоговой программы. С помощью программного модуля осуществляется управление запуском измерений, получение и цифровая обработка результатов, в частности, при помощи цифрового фильтра Баттерворта производится фильтрация высокочастотных помех. ИИС поддерживает синхронное измерение давления и уровня воды при использовании до 30 датчиков давления и 8 волномеров.

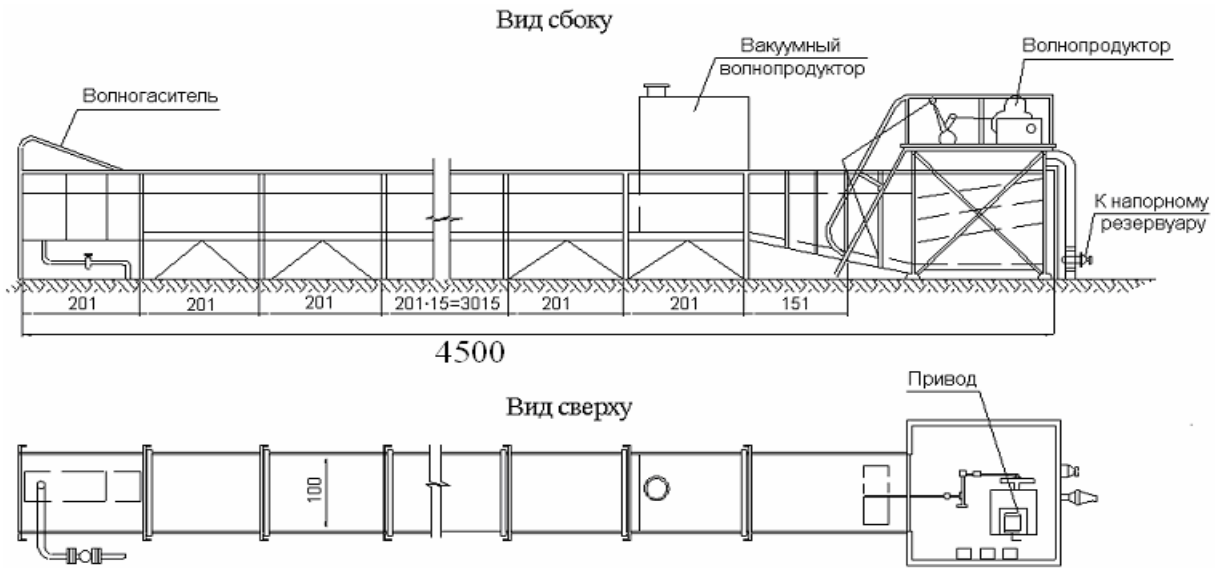


Рис. 4. Вид лотка гидроволновой лаборатории с нанесенными основными геометрическими размерами.

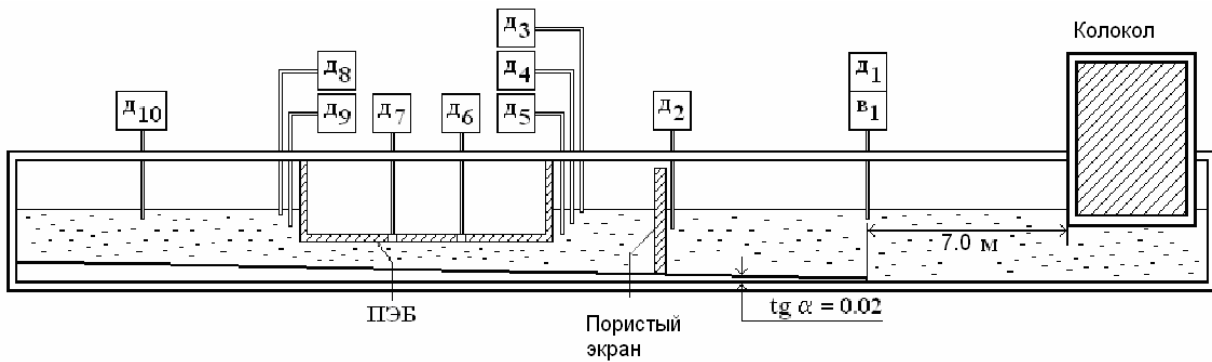


Рис. 5. Размещение измерительных устройств: в – волномер (емкостный); д – датчик давления (мембранный); ПЭБ – модель плавучего энергоблока.

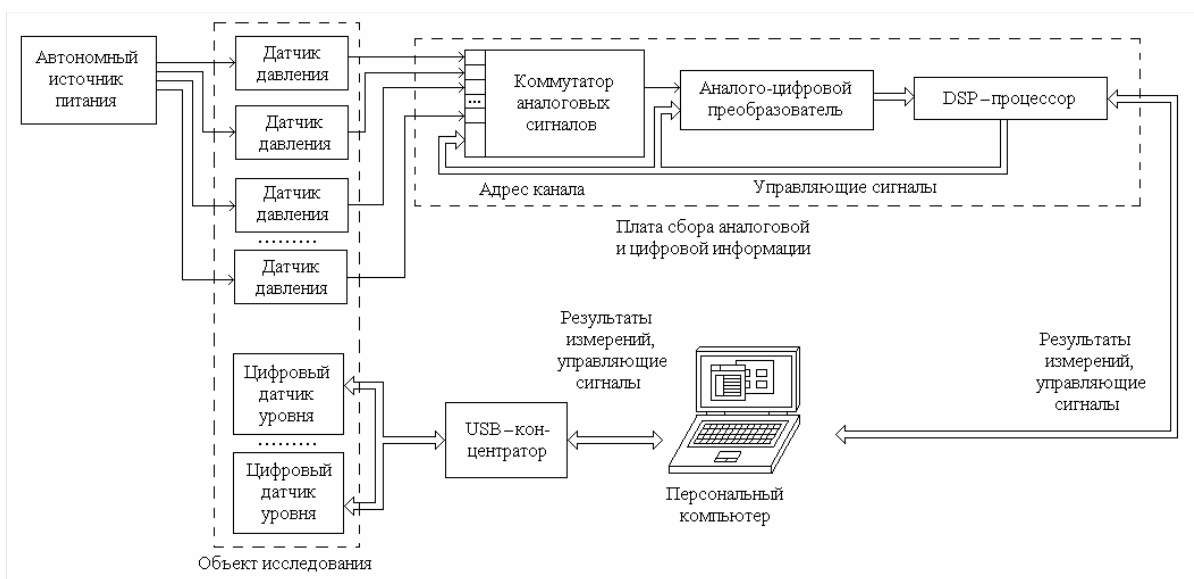


Рис. 6. Структура ИИС гидроволновой лаборатории.

Датчик давления. Структурно датчик давления представляет собой мембранный преобразователь абсолютного давления в приращение электрического сопротивления, которое, в свою очередь, преобразовывается к унифицированному сигналу электрического напряжения, подаваемому на вход аналого-цифрового преобразователя (рис. 7).

Физически датчик давления представляет собой мембрану с интегральным образом нанесенными на нее четырьмя тензорезисторами, которые соединены в мостовую схему (рис. 8). Датчики калибруются перед проведением очередного эксперимента.

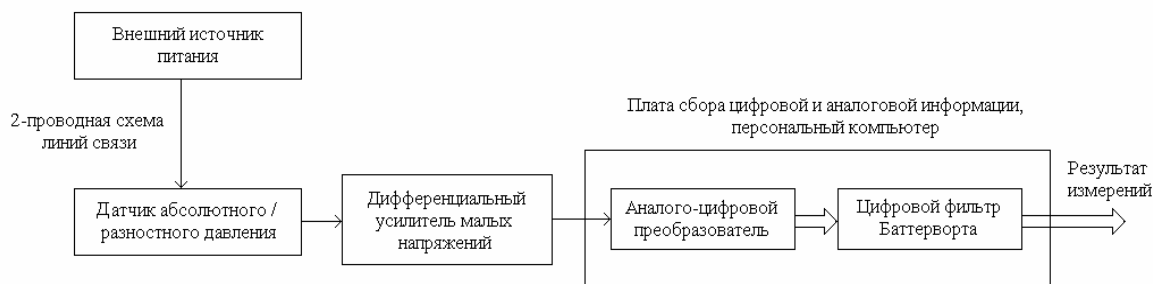


Рис. 7. Структурная схема системы измерения давления.

Инструментальная погрешность датчика при измерениях приращения давления имеет преимущественно мультипликативный характер. Погрешность определения калибровочного коэффициента является систематической и создает значимую составляющую в погрешности результата измерений. Наличие аналоговых линий связи между выходом дифференциального усилителя и входом аналого-цифрового преобразователя обуславливает наличие шумов и помех в составе измеряемого сигнала. Учитывая то обстоятельство, что полоса частот полезного сигнала является достаточно узкой и расположена в области низких частот

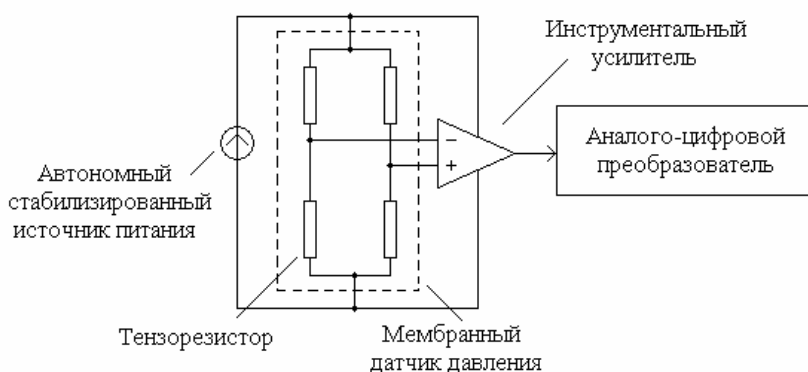


Рис. 8. Схема датчика давления.

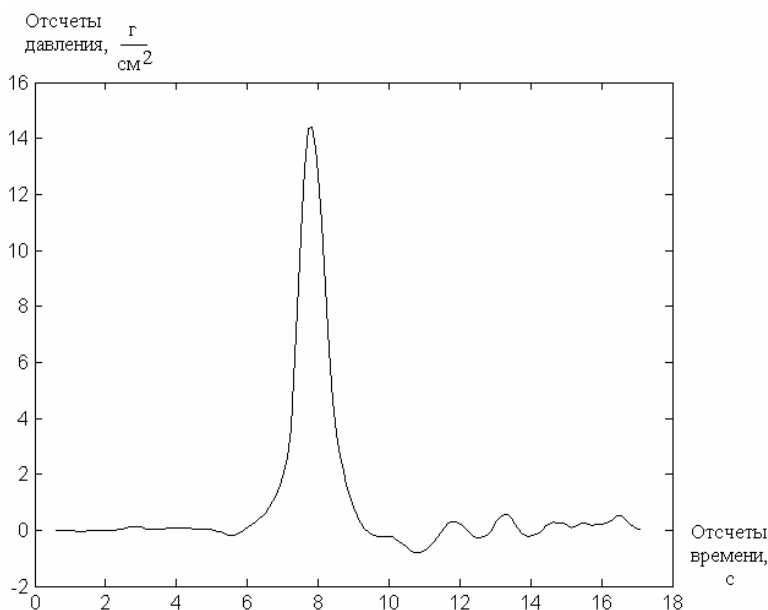


Рис. 9. Пример колебаний давления, полученных ИИС.

(до 10 Гц), шум может быть эффективно подавлен. Фильтрация осуществляется цифровым фильтром Баттерворта, что является залогом того, что форма полезного сигнала в результате фильтрации не искажается. Относительная погрешность датчика давления в составе ИИС не превосходит 5%. При этом предел чувствительности составляет не меньше 1 мг/см².

На рис. 9 представлен пример записи колебаний давления, зафиксированных мембранным датчиком давления в составе ИИС.

Емкостный уровнемер (волномер). В перечень измерительных устройств лаборатории входит цифровой уровнемер. Измерительный преобразователь (ИП) уровня в его составе основан на емкостном принципе действия и осуществляет физическое преобразование «уровень волны → электрическая емкость». Используется релаксационный принцип измерения электрической емкости. Во время циклов заряда/разряда емкости через заданное электрическое сопротивление определяется значение постоянной времени τ данного процесса, прямо пропорциональное емкости (рис. 10). Цифровая часть устройства содержит интерфейсный выход USB, через который осуществляется также электрическое питание уровнемера.

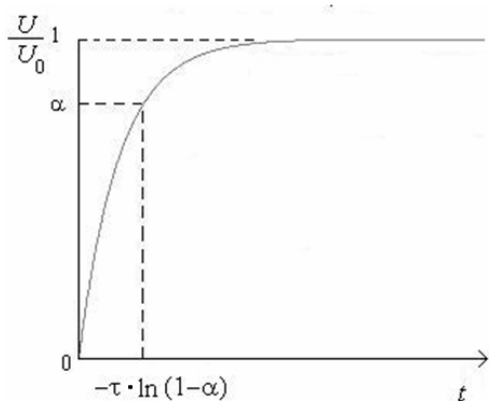


Рис. 10. Переходный процесс заряда емкости конденсатора.

Переходный процесс заряда емкости конденсатора описывается формулой $U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$, где U_0 – максимальное напряжение, до которого заряжается емкость конденсатора; $U(t)$ – текущее значение напряжения между обкладками конденсатора; τ – значение постоянной времени заряда емкости:

$$\tau = -\frac{t}{\ln(1-\alpha)} = -\frac{t}{\ln\left(1 - \frac{U(t)}{U_0}\right)}$$

Контроль заряда/разряда электрической емкости, образованной измерительным преобразователем и водой, осуществляется периферийным компаратором микроконтроллера семейства AVR, дребезг срабатывания которого устраняется аппаратной цифровой фильтрацией значения на выходе компаратора (рис. 11).

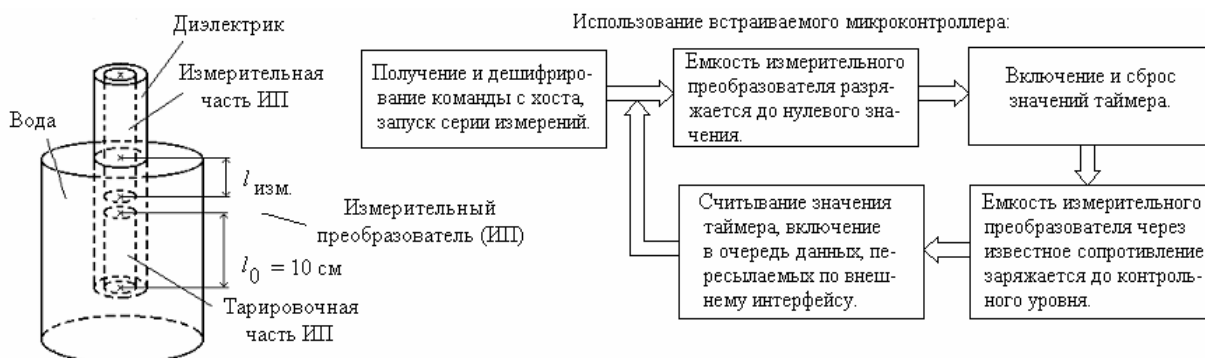


Рис. 11. Схема работы цифрового уровнемера.

Для обеспечения процесса заряда/разряда измеряемой емкости используются аппаратные возможности портов ввода/вывода микроконтроллера семейства AVR.

Основным недостатком при эксплуатации устройства является смачиваемость поверхности измерительного преобразователя. Остающаяся на его поверхности водяная пленка, сохраняющая электрический контакт с основной массой воды, создает паразитную емкость, выделить которую в составе результата измерения не представляется возможным.

Инструментальная погрешность устройства носит смешанный мультипликативно-аддитивный характер. Погрешность определения калибровочного коэффициента является систематической и создает значимую мультипликативную составляющую в погрешности прибора. Смачиваемость поверхности ИП также является систематическим эффектом и создает значимую аддитивную составляющую погрешности уровнемера. Собственные шумы используемых электронных устройств и внешние помехи являются источниками случайной составляющей погрешности, которая незначительна по сравнению с систематической погрешностью и отдельно не нормируется.

Пример волнового процесса, зарегистрированного при помощи цифрового уровнемера, представлен на рис. 12.

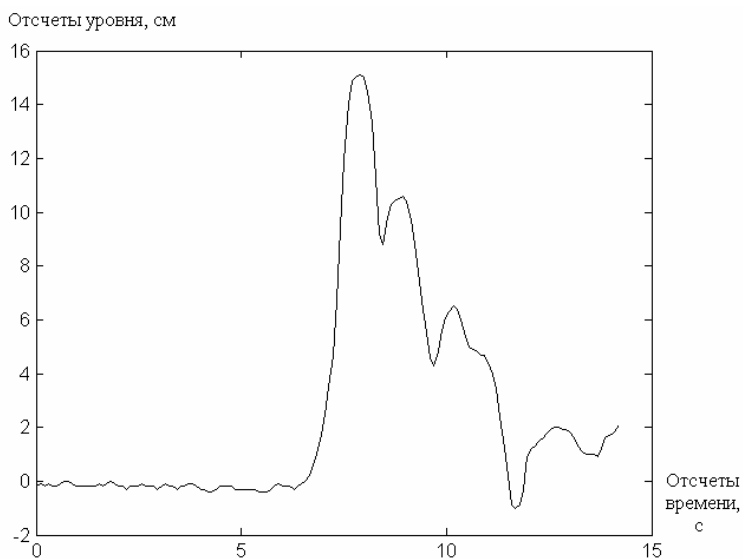


Рис. 12. Пример волнового процесса, записанного цифровым волномером.

Предел чувствительности уровнемера составляет не меньше 2.5 мм. Диапазон измеряемого уровня 0–40 см. Поскольку значимы и аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности, инструментальная погрешность уровнемера нормируется установлением пределов допускаемых значений относительной погрешности при помощи коэффициентов двучленной формулы: 6%/5%.

Обработка результатов измерений. Получаемые от датчиков давления результаты измерений подвергаются цифровой фильтрации. Для этой цели используется цифровой фильтр Баттерворта 5-го порядка, контролируется его устойчивость. Амплитудно-частотная характеристика фильтра имеет вид, представленный на рис. 13, где $f_{\text{среза}}$ — частота среза (значение частоты, при которой амплитудно-частотная характеристика принимает значение $\frac{1}{\sqrt{2}}$); $f_{\text{дискр.}}$ — частота дискретизации сигнала измерительной информации

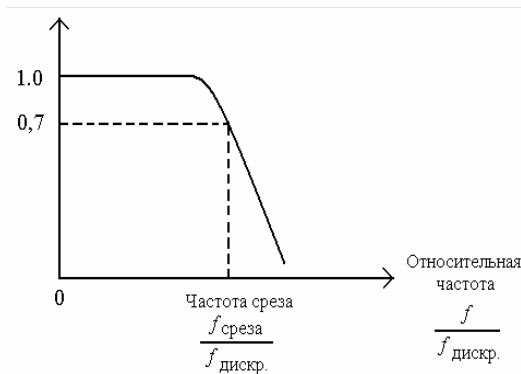


Рис. 13. Амплитудно-частотная характеристика используемого фильтра.

измерительной информации (частота опроса датчиков). В частности, при частотах $f_{\text{дискр.}} = 1\text{--}5$ кГц частота $f_{\text{среза}}$ выбирается равной 30–40 Гц, так как полезный сигнал является низкочастотным.

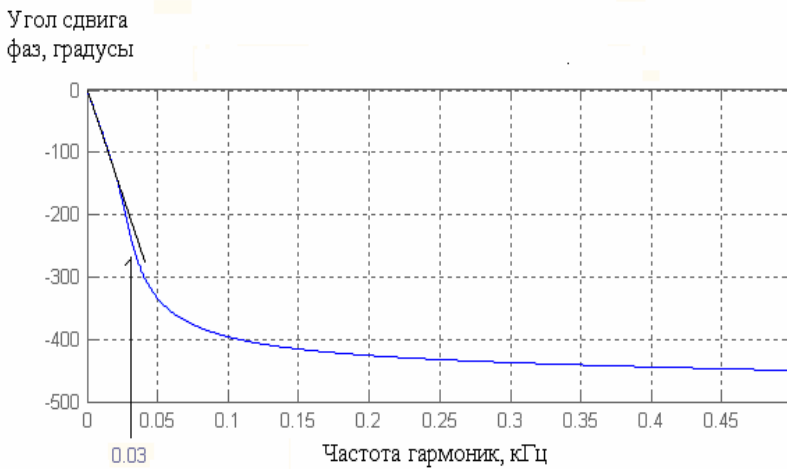


Рис. 14. Фазочастотная характеристика используемого фильтра.

Фазочастотная характеристика фильтра (рис. 14) в области полезных частот является линейной, что гарантирует сохранение формы полезного сигнала при фильтрации.

Примеры фильтрации сигналов измерительной информации представлены на рис. 15, где по оси абсцисс отложено время получения отсчета, по оси ординат – величина напряжения, поступающего на вход АЦП.

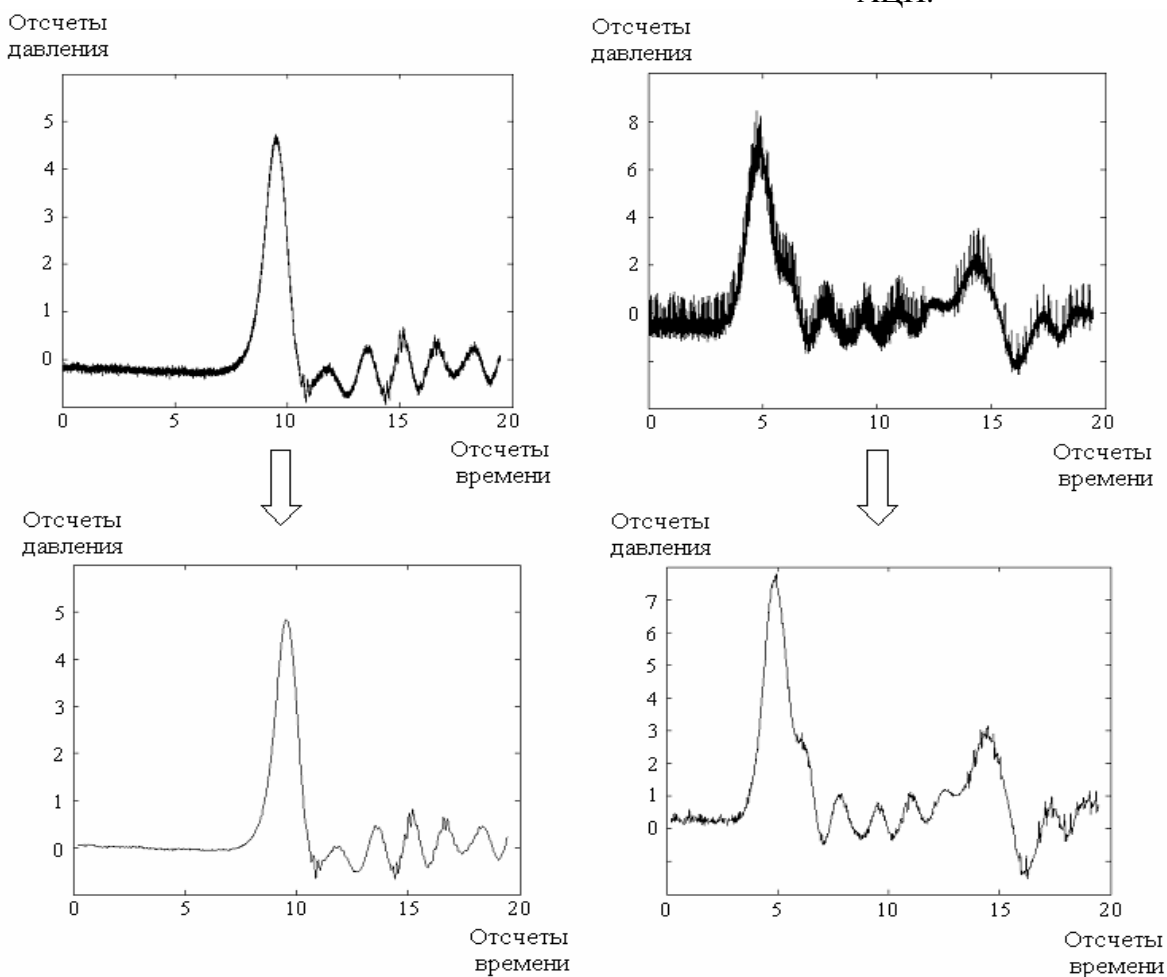


Рис. 15. Некоторые примеры результатов фильтрации реальных измеренных сигналов.

При многократных повторениях одного и того же эксперимента по полученному семейству записей возможные значения сигнала ограничивались сверху и снизу максимальными и минимальными значениями этого семейства (рис. 16).

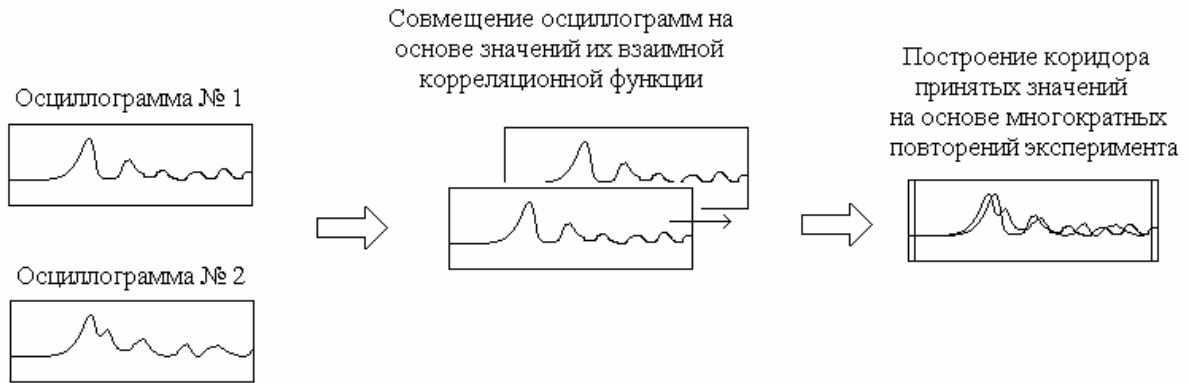


Рис. 16. Построение диапазона принятых значений.

Если обозначить запись осциллограммы № 1 как $\{a(i)\}$, где i – индекс отсчета в записи, а запись осциллограммы № 2 – как $\{b(i)\}$, то процесс совмещения может быть охарактеризован как поиск такого сдвига Δi одной осциллограммы относительно другой, при котором достигается $\max_{\Delta i} \sum_{i=1}^{\min(m,n)} a(i) \cdot b(i + \Delta i)$, где n – число отсчетов в осциллограмме $\{a(i)\}$, m – число отсчетов в осциллограмме $\{b(i)\}$. При этом предполагается, что соответствующие $\{a(i)\}$ и $\{b(i)\}$ осциллограммы имеют одну и ту же частоту дискретизации.

Некоторые обобщенные данные по датчикам давления, расположенным с тыльной (d_8 и d_9) и лицевой (d_4 и d_3) граней модели ПЭБ, из одной серии проведенных экспериментов при отсутствии защитного экрана представлены в таблице, где приведены максимальные размахи давления $p_{разм.}$, максимальные размахи уровня $h_{изм.}$, относительный отсчет времени t_{max} , соответствующий максимуму на осциллограмме.

Таблица

Размах показаний датчиков, расположенных на лицевой и тыльной гранях ПЭБ
(защитный экран отсутствует)

| № | Исходная высота волны | | | Д ₉ | | Д ₈ | | Д ₄ | | Д ₃ | |
|-----|---------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|
| | Уровень в колоколе $h_{кол.}$, см | $h_{изм.}$, см | Фото-съемка, см | $p_{разм.}$, г/см ² | t_{max} , с | $p_{разм.}$, г/см ² | t_{max} , с | $p_{разм.}$, г/см ² | t_{max} , с | $p_{разм.}$, г/см ² | t_{max} , с |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1.1 | 5 см | 6.8 | 6.6 | 6.2 | 0.0 | 24.0 | 4.5 | 8.9 | 4.6 | 7.7 | 5.9 |
| 1.2 | 5 см | 6.8 | | 6.2 | 0.0 | 23.8 | 4.6 | 9.0 | 4.7 | 7.5 | 5.9 |
| 1.3 | 5 см | 6.7 | | 6.2 | 0.0 | 23.9 | 4.6 | 9.0 | 4.6 | 7.2 | 5.9 |
| 1.4 | 5 см | 6.8 | | 6.3 | 0.0 | 23.3 | 4.6 | 8.9 | 4.7 | 7.2 | 6.0 |
| 1.5 | 5 см | 6.8 | | 6.4 | 0.0 | 23.8 | 4.6 | 9.0 | 4.7 | 7.3 | 5.8 |
| 2.1 | 10 см | 8.0 | 8.2 | 7.9 | 0.0 | 33.9 | 4.5 | 12.6 | 4.6 | 9.0 | 5.8 |
| 2.2 | 10 см | 8.6 | | 7.7 | 0.0 | 33.5 | 4.5 | 12.1 | 4.6 | 8.6 | 5.6 |
| 2.3 | 10 см | 8.0 | | 7.8 | 0.0 | 34.1 | 4.6 | 12.5 | 4.6 | 8.7 | 5.7 |
| 2.4 | 10 см | 8.3 | | 7.6 | 0.0 | 32.4 | 4.6 | 11.9 | 4.6 | 8.6 | 5.6 |
| 2.5 | 10 см | 8.0 | | 7.8 | 0.0 | 33.5 | 4.5 | 12.2 | 4.5 | 8.8 | 5.6 |
| 3.1 | 15 см | 10.8 | 10.2 | 9.1 | 0.0 | 42.3 | 4.4 | 15.1 | 4.5 | 10.6 | 5.5 |
| 3.2 | 15 см | 10.4 | | 9.2 | 0.0 | 41.8 | 4.4 | 15.1 | 4.5 | 10.5 | 5.5 |
| 3.3 | 15 см | 10.6 | | 9.1 | 0.0 | 42.7 | 4.3 | 15.3 | 4.4 | 10.9 | 5.4 |
| 3.4 | 15 см | 10.6 | | 9.3 | 0.0 | 42.8 | 4.5 | 15.3 | 4.5 | 11.0 | 5.5 |
| 3.5 | 15 см | 10.9 | | 9.3 | 0.0 | 42.8 | 4.4 | 15.3 | 4.4 | 10.9 | 5.4 |

Продолжение таблицы

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----|-------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 4.1 | 20 см | 12.3 | 12.2 | 10.7 | 0.0 | 50.3 | 4.4 | 18.3 | 4.4 | 12.0 | 5.4 |
| 4.2 | 20 см | 12.2 | | 10.7 | 0.0 | 49.5 | 4.3 | 18.1 | 4.4 | 12.2 | 5.4 |
| 4.3 | 20 см | 11.4 | | 10.8 | 0.0 | 50.4 | 4.3 | 18.3 | 4.3 | 12.4 | 5.3 |
| 4.4 | 20 см | 11.5 | | 11.0 | 0.0 | 50.5 | 4.3 | 18.5 | 4.4 | 12.4 | 5.4 |
| 4.5 | 20 см | 11.8 | | 10.9 | 0.0 | 49.8 | 4.3 | 18.5 | 4.3 | 12.6 | 5.3 |
| 5.1 | 30 см | 15.5 | 15.5 | 13.1 | 0.0 | 64.3 | 4.2 | 24.9 | 4.2 | 15.7 | 5.2 |
| 5.2 | 30 см | 15.3 | | 12.6 | 0.0 | 62.4 | 4.2 | 24.5 | 4.2 | 14.8 | 5.3 |
| 5.3 | 30 см | 15.3 | | 13.0 | 0.0 | 62.4 | 4.2 | 24.3 | 4.3 | 14.4 | 5.3 |
| 5.4 | 30 см | 15.5 | | 13.3 | 0.0 | 62.8 | 4.2 | 24.7 | 4.3 | 15.0 | 5.2 |
| 5.5 | 30 см | 16.0 | | 13.3 | 0.0 | 62.8 | 4.1 | 24.6 | 4.2 | 14.9 | 5.2 |
| 6.1 | 35 см | 17.6 | 17.5 | 14.0 | 0.0 | 68.2 | 4.1 | 27.4 | 4.2 | 16.3 | 5.2 |
| 6.2 | 35 см | 17.9 | | 13.9 | 0.0 | 67.5 | 4.2 | 27.2 | 4.2 | 16.3 | 5.2 |
| 6.3 | 35 см | 17.8 | | 13.9 | 0.0 | 67.2 | 4.2 | 27.3 | 4.3 | 16.2 | 5.2 |
| 6.4 | 35 см | 17.4 | | 14.1 | 0.0 | 66.3 | 4.2 | 27.1 | 4.2 | 16.0 | 5.2 |
| 6.5 | 35 см | 17.7 | | 14.0 | 0.0 | 67.4 | 4.1 | 27.1 | 4.2 | 15.4 | 5.2 |

Характер давлений, измеренных датчиками на тыльной и лицевой гранях модели ПЭБ при отсутствии защитного экрана, приведены на графиках (рис. 17).

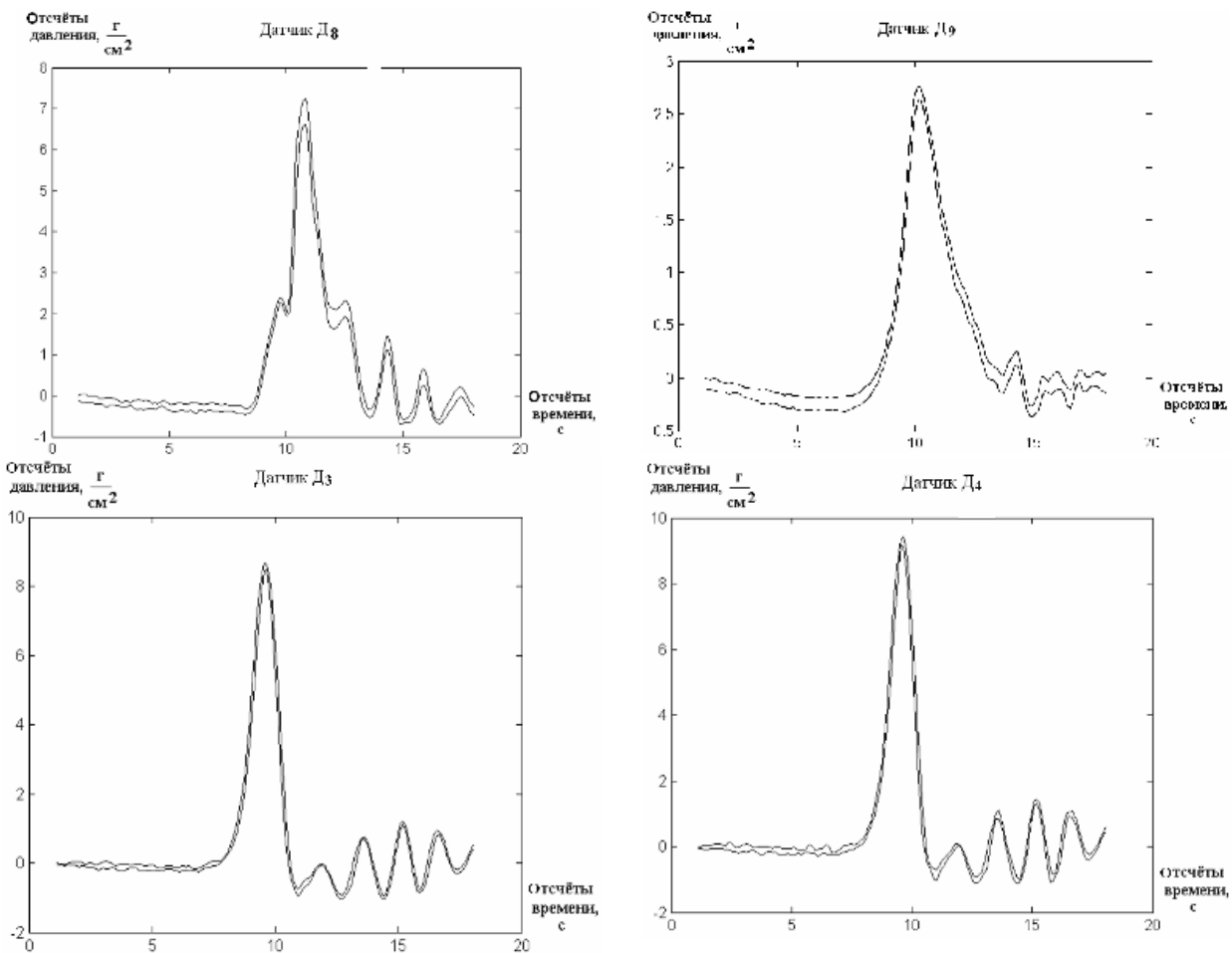


Рис. 17. Диапазон значений давлений, измеренных датчиками на тыльной (Д₈, Д₉) и лицевой (Д₃ и Д₄) гранях модели ПЭБ.

Полученные экспериментальные данные далее были использованы для верификации теоретической модели взаимодействия уединенной волны с полузатопленным прямоугольным контуром.

Методика численного моделирования. Для численного исследования процесса взаимодействия уединенной волны с конструкцией, состоящей из вертикального экрана и полузатопленного контура, использовалась нелинейная модель плоских потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости. Математическая постановка задачи заключается в определении функции $y = \eta(x, t)$, описывающей свободную границу жидкости, и потенциала скорости $\varphi(x, y, t)$, удовлетворяющего в области $\Omega(t)$, занятой жидкостью, уравнению Лапласа: $\Delta\varphi = 0$, $(x, y) \in \Omega(t)$. Здесь t – время, ось y декартовой системы координат направлена вертикально вверх, а ось x совпадает с невозмущенной свободной границей, на рисунке эта ось смещена вниз (рис. 18).

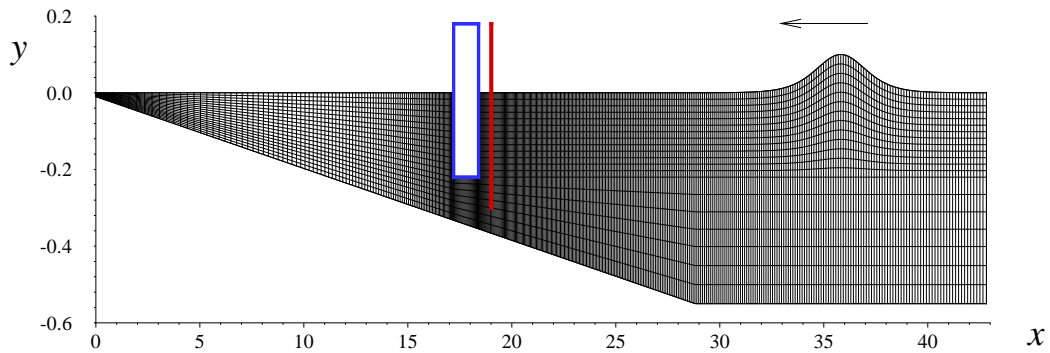


Рис. 18. Обозначения, расчетная сетка и положение волны в начальный момент времени.

На дне $y = -h(x)$, состоящем из плоского откоса и сопрягающегося с ним горизонтального участка, а также на вертикальных стенках и горизонтальной кромке контура ставилось условие непротекания: $\frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0$.

Это же условие ставилось на непроницаемом, не доходящем до дна экране, который представлялся бесконечно тонким разрезом с различными значениями потенциала $\varphi_-(x_w, y, t)$, $\varphi_+(x_w, y, t)$ и уровня воды $\eta_-(x_w, t)$, $\eta_+(x_w, t)$ на левой $(-d_w \leq y \leq \eta_-(x_w, t))$ и правой $(-d_w \leq y \leq \eta_+(x_w, t))$ гранях экрана. Здесь $x = x_w$ – положение экрана (расстояние в горизонтальном направлении от начала координат до экрана), $y = -d_w$ – заглубление экрана ($d_w < h(x_w)$). На пористом экране краевые условия задавались согласно работе [9].

На свободной границе ставились кинематическое и динамическое условия:

$$\eta_t + \varphi_x \eta_x - \varphi_y = 0, \quad \varphi_t + \frac{1}{2}(\varphi_x^2 + \varphi_y^2) + g\eta = 0, \quad y = \eta(x, t),$$

при этом свободная граница могла иметь разрыв на непроницаемом экране, а на пористом была непрерывной. Для вычисления давления использовался интеграл Лагранжа–Коши:

$$\varphi_t + \frac{1}{2}(\varphi_x^2 + \varphi_y^2) + gy + p = 0, \quad (x, y) \in \bar{\Omega}(t),$$

причем давление на свободной границе принималось равным нулю.

Форма свободной границы $\eta_0(x) = \eta(x, 0)$ при $t = 0$ и компоненты $u_0(x, y) = u(x, y, 0)$, $v_0(x, y) = v(x, y, 0)$ вектора скорости жидкости задавались по формулам Овсянникова Л.В. [10], описывающим уединенную волну, распространяющуюся влево:

$$\eta_0(x) = a \operatorname{sech}^2 X, \quad X = \sqrt{3a/4(a+1)}(x - x_0),$$

$$u_0(x, y) = -\sqrt{1+a} \frac{\eta_0}{\eta_0+1} + \left[\frac{1}{4} - \frac{3}{4} \left(\frac{y+1}{\eta_0+1} \right)^2 \right] \frac{a^2}{\sqrt{1+a}} \times \left\{ 2 \frac{\eta_0-1}{\eta_0+1} \operatorname{sech}^2 X + \frac{3-\eta_0}{\eta_0+1} \operatorname{sech}^4 X \right\},$$

$$v_0(x, y) = -\sqrt{3a^3} \frac{(1+y) \cosh X \sinh X}{(a + \cosh^2 X)^2},$$

где a и x_0 – относительные высота и абсцисса вершины уединенной волны, при этом обезразмеривание всех линейных величин производилось делением их на глубину воды в той части лотка, где дно является горизонтальным.

Проведенные ранее численные эксперименты [5] показали, что использование указанных начальных данных позволяет вполне приемлемо описывать накат волны на вертикальную стенку с хорошим соответствием имеющимся экспериментальным данным по величинам максимального заплеска, а также по форме отраженной волны.

Скажем несколько слов об используемом численном алгоритме. Область течения $\Omega(t)$ меняется со временем, поэтому при проведении расчетов использовались подвижные сетки, подстраивающиеся под подвижную свободную границу и имеющие сильное сгущение в окрестности исследуемых объектов (см.рис. 18). Конечно-разностная схема получалась путем аппроксимации на этой сетке уравнений и краевых условий, записанных в подвижной криволинейной системе координат. В расчетах использовался пошаговый численный алгоритм, в котором на каждом временном промежутке сначала, на основе динамического условия, вычислялись новые значения потенциала φ^{n+1} на свободной границе η^n , которые использовались затем в качестве граничного условия Дирихле для расчета потенциала φ^{n+1} , удовлетворяющего 9-точечному конечно-разностному аналогу уравнения Лапласа, записанного в криволинейной системе координат. С использованием полученных значений потенциала находилось новое положение η^{n+1} свободной границы. В последнюю очередь строилась сетка для следующего временного слоя.

Отметим, что использованная численная методика иногда не позволяла получить результат, например, при частичном осушении нижней кромки (днища) контура при набегании на него уединенной волны большой амплитуды.

Некоторые результаты исследования взаимодействия волн с контуром, защищенным экраном. Воздействие волн на контур, защищенный экраном, было исследовано с помощью вычислительного эксперимента, результаты которого представлены на рис. 19, где в качестве примера слева показана динамика свободной поверхности при заглублении непроницаемого экрана до отметки $y = -30$ см и высоте набегающей волны 10 см. Видно, что наличие сильно заглубленного экрана приводит к появлению системы отраженных от него волн, однако наблюдается и прошедшая за контур волна значительной амплитуды, хотя зазор между дном и нижним концом экрана составлял всего лишь около 20 % от глубины в месте установки экрана. Справа показан фрагмент области течения в окрестности исследуемой конструкции в момент времени, предшествующий моменту максимального заплеска волны на экран. Видно, что течение расслаивается: верхний слой уходит вдоль экрана вверх, а нижний, огибая экран снизу, раздваивается

на поток под контуром и поток в зазоре между экраном и лицевой гранью контура. В этом зазоре наблюдаются затухающие колебания уровня (рис. 20), при этом величина максимального заплеска на контур получается всего лишь на 20 % меньше, чем при отсутствии экрана. Таким образом, непроницаемый экран, даже с сильным заглублением, является плохой защитой объектов от воздействия длинных волн. Как показали выполненные исследования, лучшими защитными характеристиками обладают пористые экраны, способствующие существенному уменьшению величин заплесков и силового воздействия.

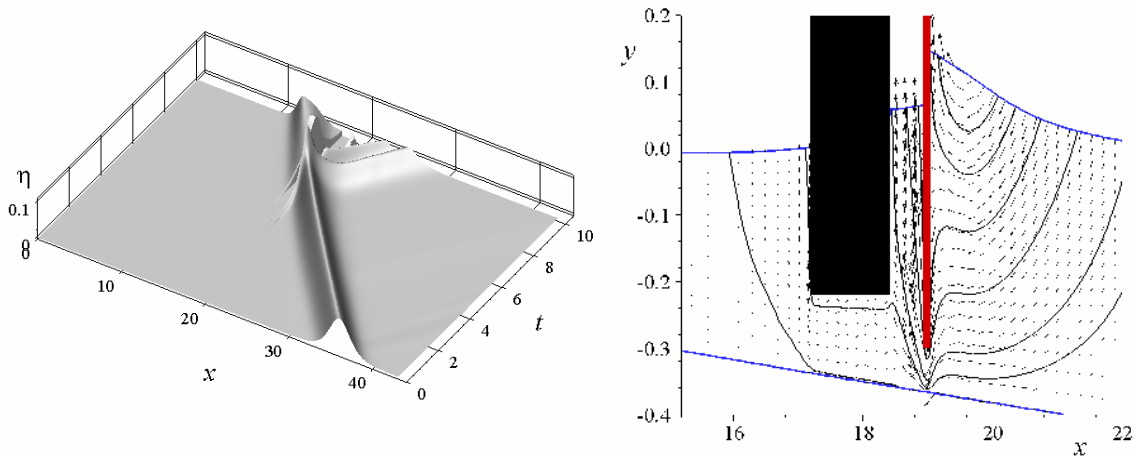


Рис. 19. Взаимодействие уединенной волны с непроницаемым экраном и контуром: динамика свободной границы (слева); поле вектора скорости и треки частиц жидкости (справа).

Ввиду сложной картины взаимодействия волн с составной конструкцией, многопараметричности задачи и связанных с этим трудностей при интерпретации результатов была проведена серия экспериментов по исследованию воздействия волн на отдельно взятые объекты, такие как незащищенный неподвижный контур, тонкий непроницаемый экран, не касающийся дна, пористый экран, доходящий до дна. Получение ясной картины возникающих волновых режимов для этих обособленных объектов дало основание для обоснованной оценки защитных свойств экранов, применяемых для защиты морских сооружений. Далее приводятся результаты по определению взаимодействия уединенной волны с неподвижным телом, расположенным над плоским откосом.

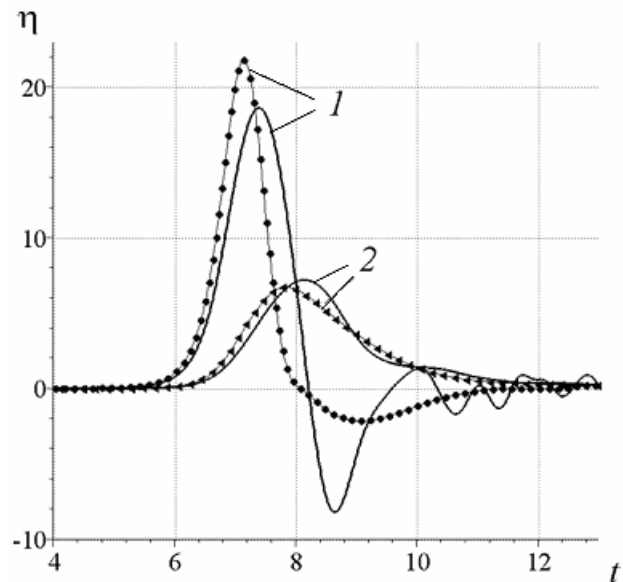


Рис. 20. Зависимость от времени t (с) уровня воды η (см) на лицевой (1) и тыльной (2) гранях контура при наличии экрана (линии без маркеров) и при его отсутствии (линии с маркерами).

Накат уединенной волны на тело прямоугольного сечения. Используемые в настоящей работе экспериментальные и численные методики взаимно дополняли друг друга, позволяя получать обоснованное описание явления в широком диапазоне определяющих параметров. Рассчитанные зависимости давления от времени для двух датчиков, расположенных на лицевой (d_5) и тыльной (d_9) гранях контура при набегании волны с амплитудой 5 см (рис. 21) показывают, что имеет место достаточно хорошее согласование результатов по максимальным значениям давления. При этом заглубление тела было равно $d = 22$ см, а заглубление датчиков соответственно $d_5 = 21$ и $d_9 = 12.2$ см.

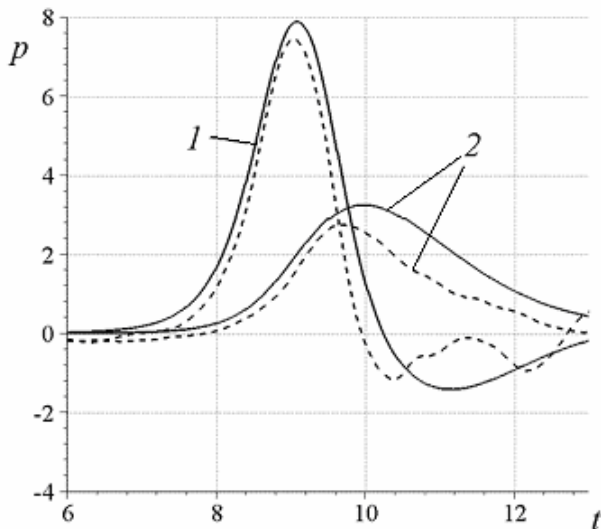


Рис. 21. Зависимость от времени t (с) давления p (г/см²) на датчиках лицевой (1) и тыльной (2) граней контура в эксперименте (штрих) и при расчете (сплошная линия).

Рассчитанные изменения со временем уровня воды на лицевой и на тыльной гранях тела при различных значениях амплитуды a набегающей волны (рис. 22), как и следовало ожидать, показывают, что увеличение амплитуды набегающей волны ведет и к увеличению амплитуды отраженной волны, на лицевой грани заплеск значительно больше, чем на тыльной, при этом и та и другая величины возрастают при увеличении a . Справа показаны мареограммы, рассчитанные над точкой сопряжения горизонтального и наклонного участков дна.

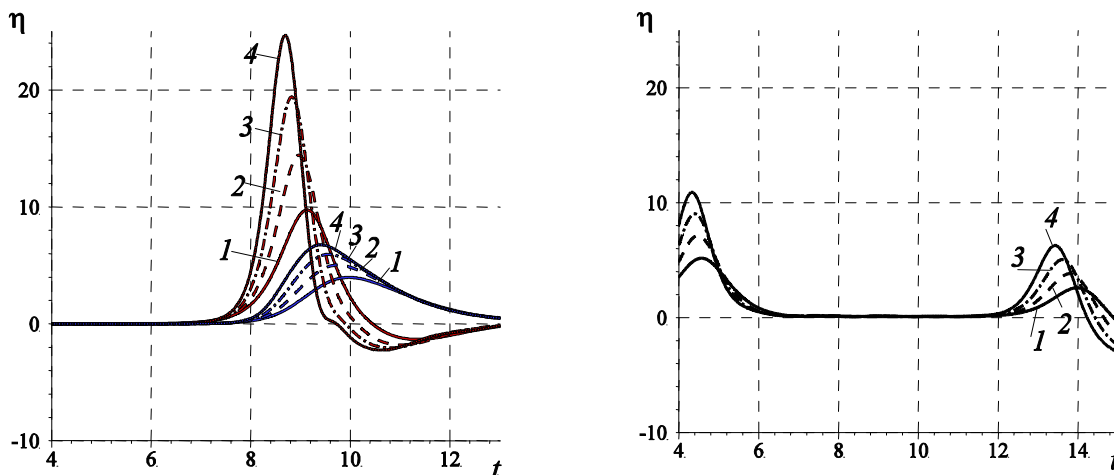


Рис. 22. Изменение со временем уровня воды на лицевой и тыльной гранях тела (слева) и в точке сопряжения наклонного участка с горизонтальным (справа): $a = 5$ см (1); 7 см (2); 9 см (3); 11 см (4). По вертикальной оси откладывается возвышение в сантиметрах, а по горизонтальной – время в секундах.

Рис. 23, 24 иллюстрируют влияние амплитуды a набегающей волны, протяженности тела l , его заглубления d , угла наклона плоского откоса θ на максимальные значе-

ния заплесков на лицевую и тыльную грани тела и волнового давления на него, измеренного датчиками d_5 и d_9 . В экспериментах только один из этих параметров варьировался, а значения всех остальных оставались неизменными и равными $a = 10$ см, $l = 120$ см, $d = 22$ см, $\theta = 1^\circ$. Неизменным было также расстояние $r = 10.42$ м от лицевой грани тела до точки сопряжения горизонтального участка дна и плоского откоса.

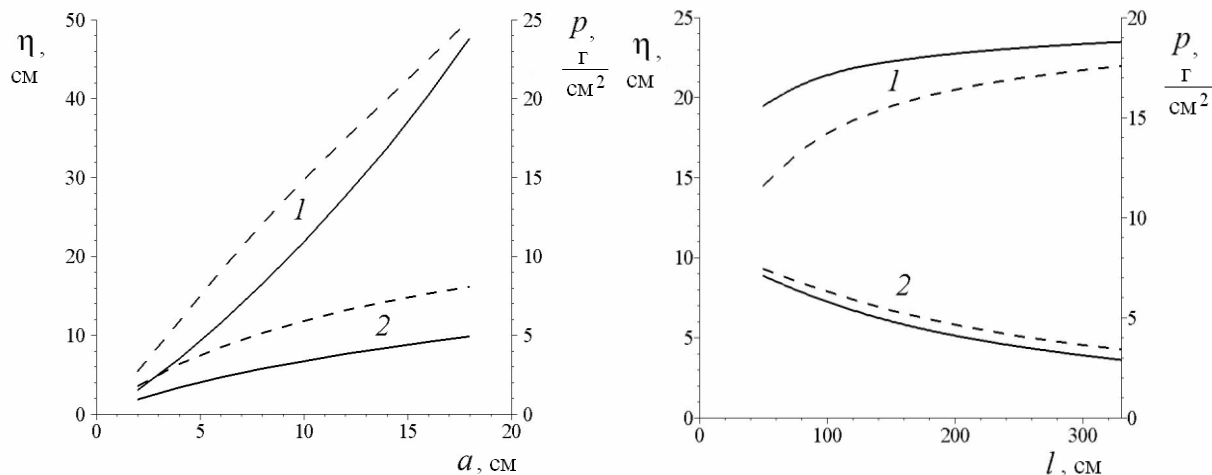


Рис. 23. Влияние амплитуды a набегающей волны (слева) и протяженности тела l (справа) на максимальные значения заплесков η (сплошные линии) и волнового давления p (штрих) на лицевой (1) и тыльной (2) гранях тела.

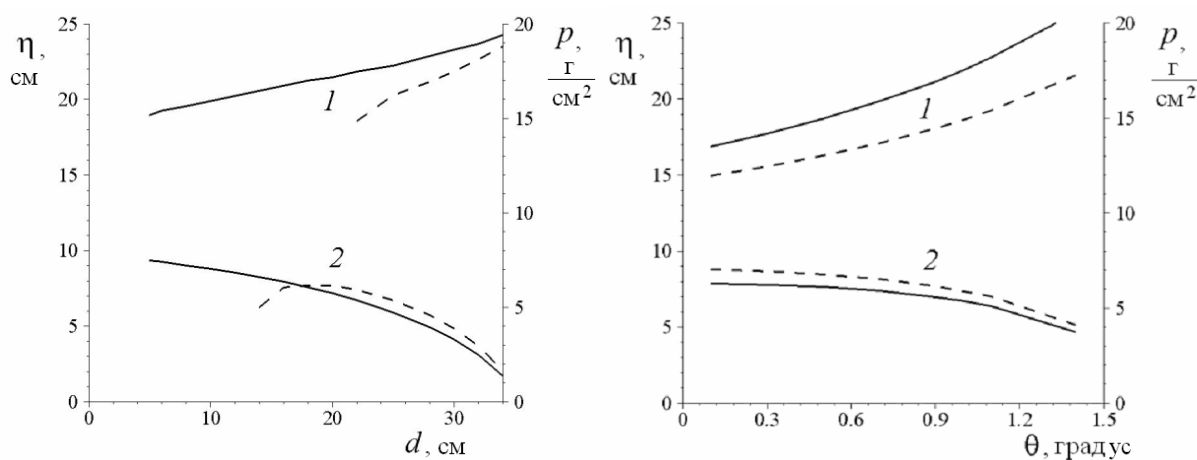


Рис. 24. Влияние заглубления тела d (слева) и угла наклона откоса θ (справа) на максимальные значения заплесков η (сплошные линии) и волнового давления p (штрих) на лицевой (1) и тыльной (2) гранях тела.

Графики максимальных значений заплесков и давлений (см.рис. 23) свидетельствуют о нелинейном росте этих величин при возрастании амплитуды приходящей волны. Протяженность же тела влияет противоположным образом на эти величины: при возрастании l максимальные значения заплесков и давления на лицевой грани растут, а на тыльной – падают, что связано с тем, что для протяженных тел становится весьма малым зазор z_r между дном и днищем тела около тыльной грани, а это ведет к росту отраженной от тела волны и уменьшению амплитуды, прошедшей за тело волны. Например, при указанном выше значении r зазор z_r для $l = 50$ см получается равным 14.05 см, а при $l = 330$ см он

становится равным 9.2 см. При относительно больших углах наклона откоса и большом заглублении тела зазор z_r становится столь малым, что взаимодействие волны с телом происходит также, как при ее накате на вертикальную стенку, размещенную на откосе.

Похожие зависимости возникают и при варьировании заглубления тела и угла наклона откоса: максимальные значения заплесков и волнового давления на лицевой грани тела растут при увеличении заглубления и угла наклона откоса, а на тыльной – уменьшаются. Таким образом, и в этом случае сильно заглубленное тело, расположенное над относительно крутым откосом, является препятствием, с которым волна взаимодействует почти как с вертикальной стенкой. Отметим, что графики волнового давления (рис. 24, слева) изображены только для достаточно больших заглублений, а именно, для тех значений заглубления, когда датчики d_5 и d_9 оказывались выше днища тела ($d > d_5$ или $d > d_9$).

Литература

1. Нуднер И.С., Урусов А.И., Хакимзянов Г.С., Яньшин В.Н. К воздействию длинных волн на частично заглубленные объекты // Моделирование в механике. 1992. Т.6(23). № 1. С.81–86.
2. Takikawa K., Yamada F., Sato K., Furuta H. Numerical analysis of finite amplitude motion of waves and a moored floating body under severe storm conditions // Int. J. Numer. Methods Fluids. 1995. V.21. No.4. P.295–310.
3. Yeung R.W., Wu Ghun-Fa. Nonlinear wave-body motion in a closed domain // J. Comput. Fluids. 1989. V.17. No.2. P.351–370.
4. Nomura T., Hughes T.J.R. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 1992. V.95. No.1. P.115–138.
5. Хакимзянов Г.С., Шокин Ю.И., Барахнин В.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. Новосибирск: СО РАН, 2001. 394 с.
6. Бабчик Д.В., Дымов М.Г., Завьялов В.К., Максимов В.В., Нуднер И.С., Ревякин А.Ю. Воздействие волн на частично-проницаемые волнозащитные сооружения // Тр. междунар. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Павлодар: ТОО НПФ «ЭКО», 2006. Т.1. С.172–185.
7. Камынин Е.Ю., Нуднер И.С., Максимов В.В., Ревякин А.Ю., Бабчик Д.В. Определение волнозащитных характеристик частично проницаемых конструкций мола // Тр. IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2008). СПб.: Наука, 2008. С.469–473.
8. Манойлин С.В., Максимов В.В., Нуднер И.С. Взаимодействие одиночной волны с преградами сложной конфигурации // Тр. IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2008). СПб.: Наука, 2008. С.441–443.
9. Алешков Ю.З. Проникновение волнения через пористую стенку // В кн.: Замечательные работы по прикладной математике. СПб.: СПбГУ, 2006. С.305–309.
10. Овсянников Л.В. Параметры кноидальных волн // В кн.: Проблемы математики и механики. Новосибирск: Наука, 1983. С.150–166.

Статья поступила в редакцию 13.09.2010 г.

