УДК 532.59+539.3+519.63

© *И. С. Нуднер*[1,2], *К. К. Семенов*[1,3], *Г. С. Хакимзянов*[4], *Н. Ю. Шокина*[4]
[1]23 ГМПИ — филиал АО «31 ГПИСС», г. Санкт-Петербург
[2]Балтийский государственный технический университет «Военмех», г. Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[4]Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск
igor_nudner@mail.ru, semenov.k.k@gmail.com, khak@ict.nsc.ru, nina.shokina@ict.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛИННЫХ МОРСКИХ ВОЛН С СООРУЖЕНИЯМИ, ЗАЩИЩЕННЫМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЭКРАНАМИ

Статья поступила в редакцию 25.05.2017, после доработки 14.08.2017.

Для уменьшения волновых нагрузок на плавучие морские сооружения (платформы, и понтоны) в настоящее время используют защитные экраны, частично или полностью непроницаемые. Настоящая работа посвящена изучению взаимодействия длинных морских волн с конструкциями, образованными защищаемым сооружением и защитным экраном и расположенными над пологим откосом. В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований величин заплесков и силовых воздействий на полупогруженное тело в широком диапазоне высот набегающих волн для разных типов экрана, разных отношений осадки тела и местной глубины, расстояний между экраном и телом и для других характеристик. Опытные исследования проводились в гидроволновой лаборатории в лотке с установленным в нем стационарным вакуумным волнопродуктором для создания волн типа цунами. Для численных исследований использовались нелинейная модель течений несжимаемой жидкости и пошаговый алгоритм расчета на подвижных сетках, адаптирующихся к подвижной свободной границе и имеющих сгущения в окрестности исследуемых сооружений. Генерация волн выполнялась численным волнопродуктором, моделирующим реальный вакуумный волнопродуктор экспериментальной установки. В статье определены значения параметров конструкции, при которых защитный экран уменьшает величины заплесков и силовых воздействий на плавучее тело.

Ключевые слова: волна цунами, частично погруженное сооружение, защитный экран, заплеск, гидроволновое давление, лабораторный эксперимент, численное моделирование, результаты измерений.

I. S. Nudner[1,2], *K. K. Semenov*[1,3], *G. S. Khakimzyanov*[4], *N. Yu. Shokina*[4]
[1]23 State Marine Design Institute – Branch of «31 State Design Institute of Special Construction», St.-Petersburg, Russia
[2]Baltic State Technical University, St. Petersburg, Russia
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, Russia
[4]Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

INVESTIGATIONS OF THE LONG MARINE WAVES INTERACTION WITH THE STRUCTURES PROTECTED BY THE VERTICAL BARRIERS

Received 25.05.2017, in final form 14.08.2017.

To reduce the wave loads on floating marine structures (like platforms, and pontoons), at present, protective barriers are used that are partially or completely impermeable. This work is dedicated to the study of the interaction between long sea waves with constructures formed by a protected structure and a protective barrier that are located above a shallow slope. The paper presents the results of experimental and numerical investigations of runup values and force impacts on a semi-submerged body over a wide range of incident wave heights for different barriers types, for different ratios between body draft and local depths, for the different distances between the barrier and the body and for other characterisitcs. Experimental studies were performed in a hydrowave laboratory in a flume with an installed vacuum wavemaker that

Ссылка для цитирования: *Нуднер И. С., Семенов К. К., Хакимзянов Г. С., Шокина Н. Ю.* Исследование взаимодействия длинных морских волн с сооружениями, защищенными вертикальными экранами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 4. С. 31—43.

For citation: *Nudner I. S., Semenov K. K., Khakimzyanov G. S., Shokina N. Yu.* Investigations of the long marine waves interaction with the structures protected by the vertical barriers. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 4, 31—43.

DOI: 10.7868/S2073667317040037.

creates tsunami-type waves. For numerical studies, we used the nonlinear model of incompressible fluid flows and a step-by-step computational algorithm using the moving grids that adapt to a mobile free boundary and condense near the structures under study. Wave generation was performed by a numerical wavemaker that simulates a real vacuum wavemaker of an experimental setup. The paper presents the values of design parameters, that allow the protective barrier to reduce the wave runup values and force impacts on the floating body.

Key words: tsunami waves, partially submerged structure, protective means, runup, hydrodynamical pressure, laboratory studies, numerical modeling, measurement results.

Для уменьшения волновых нагрузок на морские суда и плавучие сооружения (платформы, понтоны, причалы, доки и т. п.) используют защитные экраны, частично или полностью непроницаемые. Взаимодействие длинных волн с объектами при наличии защищающих их экранов изучено в недостаточной мере, поскольку исследование взаимодействия волн цунами с различными конструкциями в основном ведется в направлении прогноза последствий их наката на берега и воздействий на береговые сооружения с использованием, в частности, метода физического моделирования [1—5]. Несмотря на сложности использования, с помощью этого метода изучены [6, 7] процессы наката волн цунами на отдельные береговые сооружения. По итогам ряда работ созданы инженерные методики расчета силового воздействия волн цунами на здания в цунамиопасных районах [8] и получены соответствующие эмпирические формулы.

Однако в литературе испытывается недостаток данных, касающихся изучения взаимодействия волн со сложными составными конструкциями, образованными морскими гидротехническими сооружениями и средствами их защиты. Пример применения физического моделирования для составной конструкции дан в работе [9], в которой приведена методика исследования, дано описание лабораторной установки и характеристик измерительных приборов для определения заплесков поверхностных волн на модель плавучего энергоблока, защищенного вертикальным экраном, а также определения давления в фиксированных точках экрана и контура модели.

Многопараметричность задачи (тип экрана, величины зазоров между ним и моделью энергоблока, между дном и нижним концом непроницаемого экрана, глубина в месте установки частично проницаемого экрана, амплитуда и длина набегающей волны, угол заложения откоса и др.) приводит к необходимости большого количества трудозатрат и ресурсов при поиске оптимальной конструкции с помощью физических экспериментов, поэтому параллельно с ними целесообразно проводить численное моделирование на основе подходящих математических моделей и соответствующих численных алгоритмов, которое позволяет сократить объем экспериментальных работ и дополнить лабораторные измерения большими массивами новых данных о процессах генерации, распространения и трансформации поверхностных волн. В качестве примера применения численных методов для изучения взаимодействия поверхностных волн с составными конструкциями можно отметить работу [10], в которой приводятся результаты расчетов для конструкции, состоящей из неподвижного понтона, между днищем которого и горизонтальным дном размещены три пористые мембраны. В статье [11] изучаются отражение, силовое воздействие волн и их заплеск на волнолом, установленный на горизонтальном дне перед вертикальной непроницаемой стенкой и состоящий из частично проницаемого вертикального экрана и пористого материала между ним и стенкой.

Список подобных работ невелик и примеры использования численного моделирования для случая составных конструкций встречаются пока значительно реже, чем для отдельных элементов этих конструкций, таких как вертикальные, наклонные или горизонтальные стенки [5, 12], подводные волноломы простой формы [13—15], сплошные, частично проницаемые или пористые экраны, плавающие или жестко закрепленные полупогруженные тела и т. п. Так, например, работы [9, 16—19] посвящены исследованию взаимодействия поверхностных волн с неподвижными частично погруженными телами, а [20] — с подвижными.

Защитные свойства сплошных (непроницаемых) вертикальных экранов, выступающих над водой, не касающихся дна и частично пропускающих набегающие волны снизу, исследовались, например, в работах [21—26]. В [21] предложена модификация метода граничных интегральных уравнений, учитывающая сингулярность потенциала вектора скорости в концевой точке бесконечно тонкого непроницаемого экрана. Используя модель потенциальных течений в линейном приближении, авторы работ [22—24] получили приближенные формулы для коэффициентов прохождения и отражения,

распределения давления по лицевой и тыльной граням различных типов сплошных экранов (полупогруженных, полностью погруженных, но не касающихся дна, установленных на горизонтальное дно). В [25, 26] приведены некоторые результаты экспериментальных исследований для таких экранов.

Защитные свойства пористых экранов (коэффициенты отражения и прохождения, дифракционные характеристики) изучались в основном аналитически на основе линеаризованных уравнений для потенциальных течений над горизонтальным дном и волн малой амплитуды [27, 28] или численно [29]. Особо отметим работу [30], в которой показано, что полупогруженное тело, установленное перед пористым экраном, может как увеличивать, так и уменьшать коэффициент отражения, при этом отражение увеличивается при возрастании длины тела и его заглубления.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных и численных экспериментов по исследованию воздействия длинных волн на частично погруженное тело прямоугольного сечения, расположенное над пологим откосом и защищенное экраном. Рассмотрено несколько типов защитного экрана и определены диапазоны значений параметров составной конструкции, при которых защитные экраны уменьшают величины заплесков и силовых воздействий на плавучее тело.

Методика исследований. Опытные исследования выполнены в гидроволновой лаборатории в лотке (рис. 1) с установленным в нем стационарным вакуумным волнопродуктором [31, 32] для создания длинных волн типа цунами. Эксперименты проводились с целью определения возвышения свободной поверхности перед и за преградой и давления в фиксированных точках преграды. При проведении экспериментов количественные сведения о характеристиках взаимодействия волн цунами с сооружениями получались в результате измерений, выполненных с помощью специальной измерительной информационной системы [9], обеспечивающей синхронность измерений и цифровую обработку их результатов.

При выполнении экспериментов по физическому моделированию взаимодействия волны цунами с изучаемыми преградами основными действующими в жидкости силами являлись гравитационные силы. По этой причине определяющим критерием моделирования был выбран критерий подобия Фруда, что является распространенной практикой при моделировании волн цунами [33].

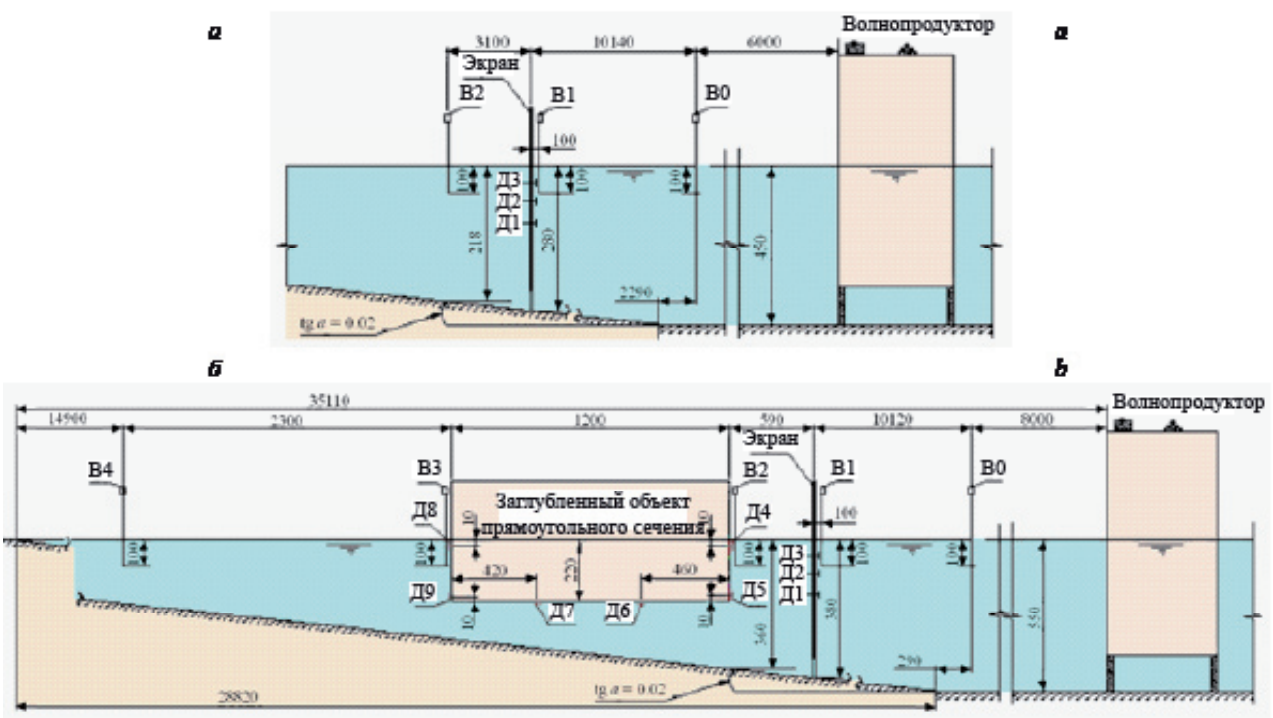

Рис. 1. Схема лабораторной установки и размещение измерительных устройств.
а — эксперименты с защитными экранами; *б* — эксперименты с заглубленным объектом прямоугольного сечения, защищенным экраном. В — волномер; Д — датчик давления; все размеры указаны в мм.

Fig. 1. The laboratory setup and scheme of measuring devices placement.
a — experiments with protective barriers; *b* — experiments with a submerged object of rectangular section that is protected by a vertical barrier. В — wave sensor; Д — pressure meter; all dimensions are in mm.

Одновременно с лабораторными экспериментами выполнялось также численное моделирование, которое позволяло дополнить лабораторные измерения новыми данными в тех точках, где датчики давления или волномеры не устанавливались, а также для тех значений определяющих параметров (высота волны, зазор между дном и нижним краем экрана, глубина в месте установки экрана, угол откоса), для которых лабораторные эксперименты не проводились. Для численных исследований использовалась нелинейная модель плоских потенциальных течений несжимаемой жидкости.

Математическая постановка задачи заключается [9] в определении функции $z = \eta(x, y)$, описывающей свободной границу жидкости, и потенциала скорости $\varphi(x, z, t)$, удовлетворяющего в области, занятой жидкостью, уравнению Лапласа $\Delta\varphi = 0$. Здесь t — время, ось z декартовой системы координат направлена вертикально вверх, а ось x совпадает с невозмущенной свободной границей. На дне, а также на вертикальных стенках и горизонтальной кромке контура ставилось условие непротекания $\partial\varphi/\partial n = 0$. Это же условие ставилось на передней стенке волнопродуктора, а также на непроницаемом частично заглубленном экране, которые представлялись бесконечно тонкими стенками с различными значениями потенциала и уровня воды на их левой и правой гранях. На свободной границе ставились нелинейные кинематическое и динамическое условия:

$$\eta_t + \varphi_x\eta_x - \varphi_z = 0\,,\ \varphi_t + \frac{1}{2}\left(\varphi_x^2 + \varphi_z^2\right) + g\eta = 0\,.$$

Давление p вычислялось с помощью интеграла Лагранжа—Коши:

$$\varphi_t + \frac{1}{2}\left(\varphi_x^2 + \varphi_z^2\right) + gz + p = 0\,,$$

причем давление на свободной границе принималось равным нулю.

Расчеты проводились на адаптивных сетках, подстраивающихся под подвижную свободную границу и неровное дно (рис. 2). Конечно-разностная схема на подвижной сетке и алгоритм решения разностной задачи описаны в работах [9, 34].

Генерация одиночной волны. Принцип работы вакуумного волнопродуктора, генерирующего в лабораторных экспериментах одиночную волну на поверхности воды, подробно описан в работах [31, 32]. Сгенерированная вакуумным волнопродуктором одиночная волна отличается от солитона наличием «дисперсионного хвоста» — цуга волн меньшей амплитуды, движущихся вслед за основной волной.

В работе [9] форма свободной границы и компоненты вектора скорости жидкости в начальный момент времени задавались по аналитическим формулам, описывающим уединенную волну, располагающуюся над горизонтальным дном в достаточном удалении от исследуемых объектов. Отличие в механизмах генерации начальной волны в эксперименте и расчетах приводило в некоторых случаях к весьма заметному отклонению экспериментальных и расчетных данных как по величинам заплесков на исследуемый объект, так и по значениям волнового давления в точках расположения датчиков [9]. В настоящей работе начальная волна в расчетах генерируется с помощью численного волнопродуктора [26], моделирующего реальный вакуумный волнопродуктор экспериментальной установки. Численный волнопродуктор представляет собой прямоугольную область, заполненную водой до заданного уровня и отгороженную от лотка тонкой вертикальной стенкой, которая в начальный момент времени мгновенно

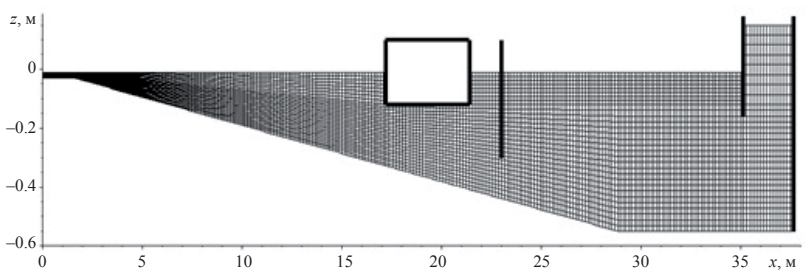

Рис. 2. Расчетная сетка в начальный момент времени.

Fig. 2. The calculated grid at the initial time moment.

поднимается вверх на высоту, равную величине зазора между дном и передней стенкой реального волнопродуктора (см. правую часть рис. 2). Вытекающая в лоток вода генерирует одиночную волну и цуг сопровождающих ее волн меньшей амплитуды.

Использование похожих механизмов генерации начальной волны обеспечило хорошее соответствие результатов численного моделирования и результатов измерений, выполненных волномером В0 (ближайшим к волнопродуктору и размещенным над горизонтальным участком дна). Из рис. 3, *а* видно, что максимальная высота h_0 одиночной волны в численных экспериментах хорошо согласуется с данными лабораторных опытов во всем диапазоне значений h_w уровня воды, набранной в колокол волнопродуктора. Вместе с тем форма и скорости генерируемой начальной волны соотносятся с опытными данными хуже: записи волномера В0 показывают (рис. 3, *б*), что основная волна воспроизводится в численных расчетах удовлетворительно, но цуг волн малой амплитуды в расчетах смещен вниз по сравнению с экспериментальными данными. В работе [32] показано, что и для этих волн можно добиться лучшего соответствия с экспериментом, если учитывать конечность промежутка времени, за которое происходит выравнивание давления воздуха в волнопродукторе после открытия специального клапана и атмосферного давления.

Появление цуга волн малой амплитуды, следующих за основной волной, можно объяснить тем, что истечение воды в лоток сопровождается довольно длительными колебаниями свободной границы в волнопродукторе (рис. 4, см. вклейку). Эти колебания и генерируют «дисперсионный хвост», наблюдаемый как в экспериментах, так и в расчетах.

Взаимодействие одиночной волны с экранами. В ходе выполненной работы были исследованы характеристики взаимодействия волн цунами со следующими защитными экранами (рис. 1, *а*). В качестве экрана $Э_1$ использовали непроницаемую вертикальную стенку, $Э_2$ и $Э_3$ — сплошные (непроницаемые) экраны, не касающиеся дна и образующие с ним зазоры размером $\Delta_d = 4$ см и $\Delta_d = 8$ см, соответственно, $Э_4$ и $Э_s$ — пористые экраны, размещенные на всю глубину, с шириной щелей в них, равных $\Delta_a = 2.4$ см и $\Delta_a = 4.8$ см, соответственно (по две щели на каждый погонный метр ширины экрана). Для перечисленных типов экранов были исследованы их защитные характеристики при следующих значениях определяющих параметров: $d_0 = 45$ см — глубина перед волнопродуктором, $d_1 = 28$ см — глубина в месте установки экрана.

На приведенных ниже рисунках использованы следующие обозначения: h_0 — высота исходной волны, создаваемой волнопродуктором (измерялась волномером В0); h_1 — высота волны вблизи экрана

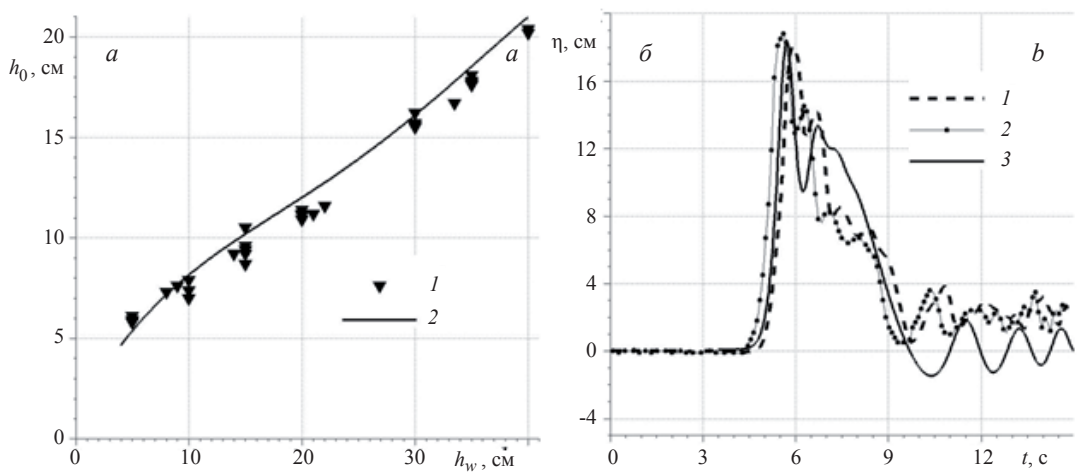

Рис. 3. Генерация одиночной волны волнопродуктором.
а — высота волны h_0, измеренная волномером В0, в зависимости от уровня h_w воды в колоколе в эксперименте (*1*) и расчете (*2*); *б* — изменение со временем *t* уровня воды η в точке установки волномера В0 при $h_w = 35$ см в экспериментах (*1, 2*) и расчете (*3*).

Fig. 3. Generation of a solitery wave by a wavemaker.
a — the dependence of the wave height h_0 measured by wave sensor B0 on the water level h_w in the wavemeker tank in experiment (*1*) and calculations (*2*); *b* — changes of the water level η with time *t* in the place of wave sensor B0 installation for $h_w = 35$ cm in experiments (*1, 2*) and calculations (*3*).

(измерялась волномером В1); p_i — значения гидроволнового давления, измеренного датчиками Д$_i$, размещенными на лицевой грани экрана (рис. 1, *а*), i = 1, 2, 3; z_i — величина заглубления датчика Д$_i$; ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения. В выполненных опытах величина заглубления экрана составляла величину $z_0 = (d_1 - \Delta_d)$.

На рис. 5 (см. вклейку) представлены зависимости характеристик взаимодействия волны цунами с защитным экраном Э$_1$—Э$_s$ в зависимости от высоты исходной волны. Поскольку экраны Э$_2$—Э$_s$ являются либо частично заглубленными, либо частично проницаемыми, т. е. частично пропускают волну за экран, на рисунках представлены показания волномера В2 (в отсутствие прямоугольного контура за экраном) и использовано значение глубины в месте его установки — d_2 = 21.8 см. На рис. 5: *а*(*a*) — экран Э$_1$ – Δ_d = 0 см, Δ_a = 0 см; *б*(*b*) — экран Э$_2$ – Δ_d = 4 см, Δ_a = 0 см; *в*(*c*) — Э$_3$ – Δ_d = 8 см, Δ_a = 0 см; *г*(*d*) — Э$_4$ – Δ_d = 0 см, Δ_a = 2.4 см; *д*(*e*) — Э$_5$ – Δ_d = 0 см, Δ_a = 4.8 см.

Данные, представленные на рис. 5, были использованы для построения эпюр распределения давления вдоль лицевой грани экранов. В промежуточных точках между местами размещения датчиков значения давления интерполировалось линейно, величина заплеска на лицевую грань определялась по показаниям волномера В1. По построенным эпюрам были определены значения сосредоточенной погонной силы F, действующей на каждый метр ширины лицевой грани экрана. Зависимости значения F от высоты исходной волны цунами представлены на рис. 6.

Данные рис. 6 свидетельствуют о том, что экран Э$_2$ испытывает нагрузку, составляющую в среднем примерно 65 % от нагрузки вертикальной стенки Э$_1$, экран Э$_3$ — 55 %, Э$_4$ — 85 %, Э$_5$ — 70 %.

Численные расчеты проводились только для сплошных экранов, частично пропускающих волну под ними, поскольку при использовании экранов типа Э$_4$ и Э$_5$ наличие вертикальных прорезей в них приводит к возникновению сильно завихренных турбулентных течений при взаимодействии потока с экраном, для описания которых необходимо использовать соответствующие математические модели, отличные от модели потенциальных течений. На рис. 7 показаны графики записей волномеров В1 и В2, полученные в экспериментах и расчетах для экрана Э$_1$. Для первого волномера (В1) имеет место хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных по максимальным значениям возвышения, для второго (В2) наблюдается отличие примерно в 10 %, что связано с тем, что вязкость жидкости и шероховатость дна, не учитываемые в используемой модели идеальной жидкости, начинают оказывать заметное влияние на скорость придонного потока, замедляя его в узком зазоре под экраном. Отметим, что для экрана Э$_2$, имевшего меньший зазор до дна, отличие опытных и расчетных данных по максимальным значениям возвышения при набегании волн большой амплитуды достигало 20 % для волномера В2.

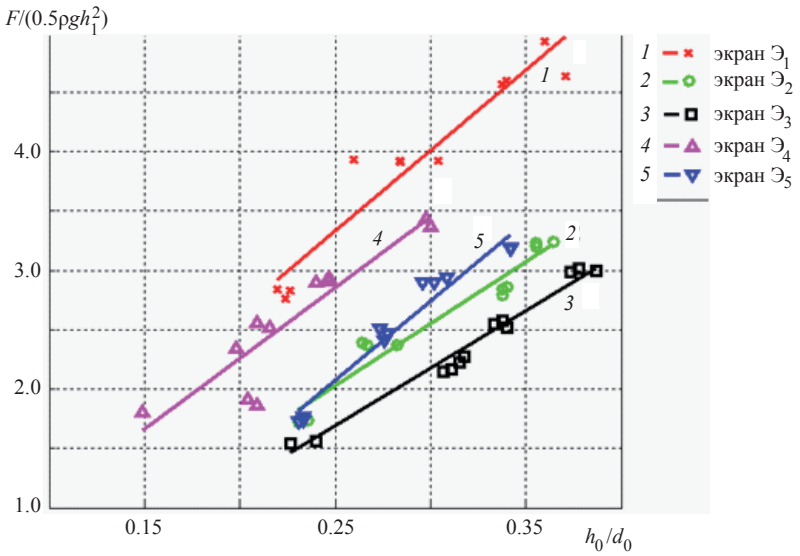

Рис. 6. Зависимость горизонтальной составляющей силы, действующей на экран, от высоты набегающей на него одиночной волны.

Fig. 6. The dependence of the horizontal component of the force acting on the protective barrier on the incident solitary wave height.

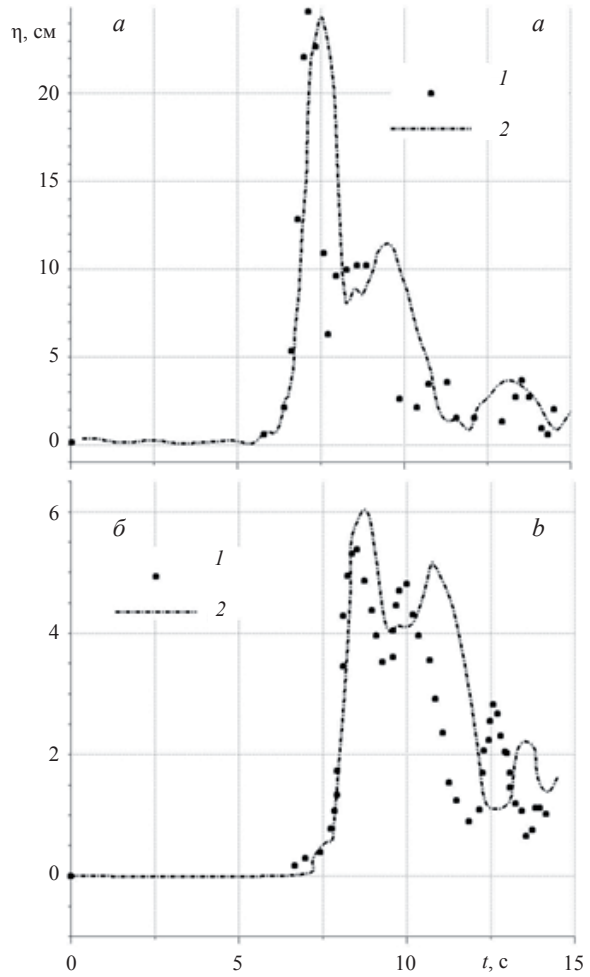

Рис. 7. Изменение со временем t уровня воды η в точках установки волномеров В1 (*а*) и В2 (*б*) в экспериментах (*1*) и расчетах (*2*): экран Э$_3$; h_0 = 10.2 см.

Fig. 7. The influence of the solitary wave height on the characteristics of its interaction with the protective barrier Э$_3$.

На рис. 8 представлены величины коэффициента прохождения волны цунами через экран в зависимости от типа экрана и высоты исходной волны.

На основе выполненных исследований установлены следующие качественные закономерности. При прочих равных условиях увеличение амплитуды набегающей волны ведет к увеличению амплитуд отраженных от экрана волн и прошедших за него волн. Увеличение зазора между дном и сплошным экраном приводит к росту амплитуды прошедшей волны и уменьшению амплитуды отраженной волны. При уменьшении зазора Δ_d максимальные значения заплесков и давления на лицевой грани экрана растут, а на тыльной — падают. При большом заглублении экрана зазор становится столь малым, что взаимодействие волны с экраном происходит почти так же, как при ее накате на вертикальную стенку, размещенную на откосе.

Взаимодействие одиночной волны с составной конструкцией. Для этой серии экспериментов по физическому моделированию расположение датчиков давления и волномеров изображено на рис. 1, *б*. При разных значениях амплитуды h_0 набегающей волны (по показаниям волномера В0) измерялись величины волнового давления (датчики Д1—Д3 на экранах и Д4—Д9 на контуре полупогруженного тела) и максимальных заплесков на лицевую (волномер В2) и тыльную (волномер В3) грани тела, а также амплитуды прошедших за тело волн (волномер В4) как при отсутствии защитного экрана, так и при наличии одного из экранов Э$_2$—Э$_5$. В последнем случае дополнительно анализировались показания волномера В1, установленного перед лицевой гранью экрана.

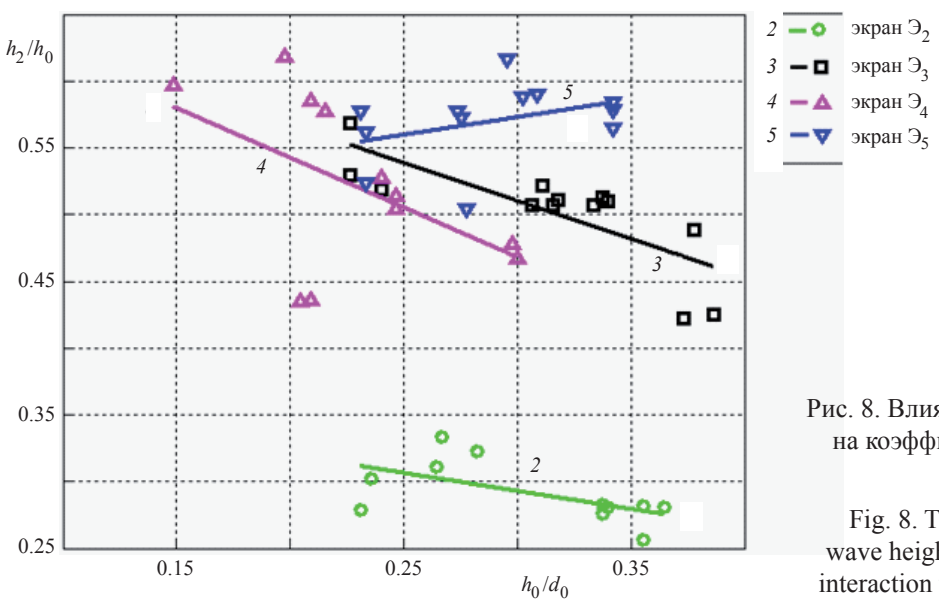

Рис. 8. Влияние высоты исходной волны на коэффициент прохождения через защитный экран.

Fig. 8. The influence of the solitary wave height on the characteristics of its interaction with the protective barrier Э$_4$.

В численных расчетах исследовались защитные свойства только частично погруженных сплошных экранов типа $Э_2$ и $Э_3$, но в существенно более широком диапазоне определяющих параметров, чем в лабораторных экспериментах.

В качестве примера на рис. 9, 10 изображены графики максимальных значений волнового давления в точках установки датчиков на лицевой и тыльной гранях тела в зависимости от амплитуды набегающей волны. Видно, что пористый экран $Э_5$ существенно уменьшает силовое воздействие волн на контур тела, особенно сильно это проявляется при больших значениях амплитуды h_0 набегающей одиночной волны. Имеет место хорошее соответствие результатов численных и экспериментальных исследований в случае отсутствия защитного экрана. Результаты одного из таких экспериментов представлены на рис. 11 в виде графиков хронограмм волнового давления на датчике Д5.

Далее было изучено влияние определяющих параметров составной конструкции на величины заплесков одиночных волн на грани полупогруженного тела. Стоит отметить, что наличие сплошного экрана может приводить в некоторых случаях к обратному эффекту: вместо понижения величин

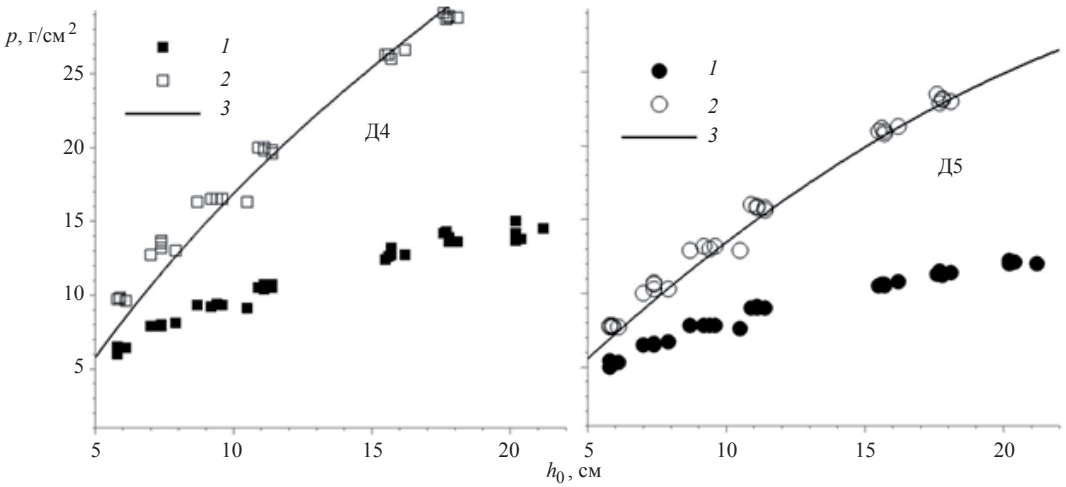

Рис. 9. Зависимость максимальных значений волнового давления от амплитуды h_0 набегающей волны: записи датчиков Д4 (*а*) и Д5 (*б*) в экспериментах (*1*, *2*) и расчетах (*3*) при наличии защитного пористого экрана $Э_5$ (*1*) и при его отсутствии (*2*, *3*).

Fig. 9. Dependence of the maximum values of wave pressure on the height h_0 of the incident wave: records of the sensors Д4 (*a*) и Д5 (*b*) in experiments (*1*, *2*) and calculations (*3*) in the presence of the protective porous vertical barrier $Э_5$ (*1*) and in his absence (*2*, *3*).

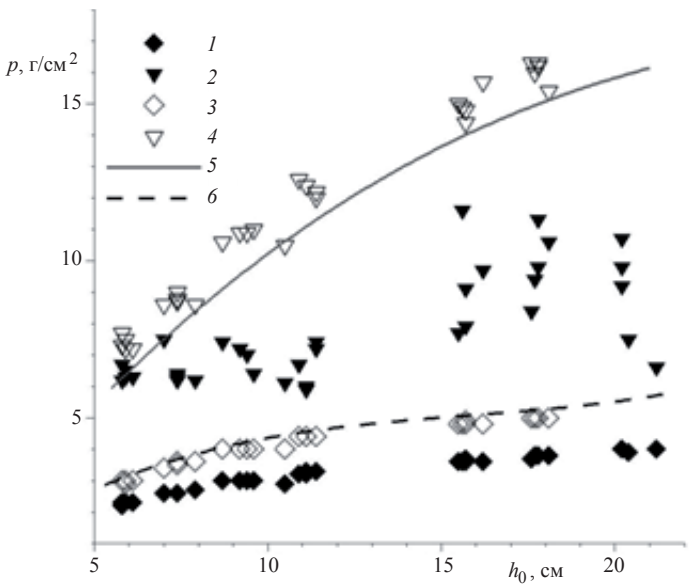

Рис. 10. Зависимость максимальных значений волнового давления p от амплитуды h_0 набегающей волны: записи датчиков Д8 (маркеры *2*, *4* и линия *5*) и Д9 (маркеры *1*, *3* и линия *6*) в экспериментах (*1*—*4*) и расчетах (*5*, *6*) при наличии защитного пористого экрана $Э_5$ (*1*, *2*) и при его отсутствии (*3*—*6*).

Fig. 10. Dependence of the maximum values of wave pressure p on the height h_0 of the incident wave: records of the sensors Д8 (markers *2*, *4* and line *5*) and Д9 (markers *1*, *3* and line *6*) in experiments (*1*—*4*) and calculations (*5*, *6*) in the presence of the protective porous vertical barrier $Э_5$ (*1*, *2*) and in his absence (*3*—*6*).

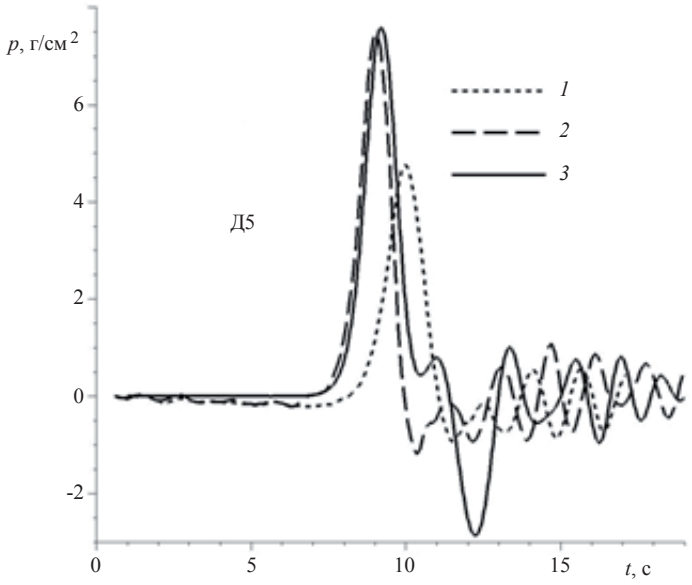

Рис. 11. Зависимость от времени волнового давления в месте размещения датчика Д5 в эксперименте (*1*, *2*) и расчете (*3*) при наличии защитного пористого экрана $Э_5$ (*1*) и при его отсутствии (*2*, *3*): h_w = 5 см.

Fig. 11. The time dependence of the wave pressure at the locationof the sensor Д5 in experiment (*1*, *2*) and in calculations (*3*) in the presence of the protective porous vertical barrier $Э_5$ (*1*) and in his absence (*2*, *3*): h_w = 5 cm.

заплесков происходит их рост по сравнению с незащищенным телом (рис. 12, *б* и 13, *б*). Это возможно, например, в случае сильно заглубленного сплошного экрана с небольшим зазором между ним и полупогруженным телом. В этом случае возникает более сложная волновая картина взаимодействия с несколькими отраженными и прошедшими волнами и значительными колебаниями уровня воды в зазоре между экраном и лицевой гранью контура.

Далее в графическом виде представлены результаты численных исследований по изучению влияния разных геометрических параметров задачи на характеристики взаимодействия одиночных волн с составной конструкцией, состоящей из сплошного экрана и установленного за ним полупогруженного тела. На рис. 14, *а* изображены графики зависимостей максимальных значений заплесков на лицевую грань тела, погруженного на глубину z_T = 22 см, от амплитуды набегающей волны при разных значениях величины зазора Δ_d между нижним краем сплошного экрана и дном. На рис. 14 линия *1* изображает указанную зависимость при отсутствии экрана. Графики на рис. 14, *а* получены для экрана, расположенного от тела справа на расстоянии δ = 59 см (рис. 1, *б*). Глубина в месте установки экрана составляла d_1 = 38 см, а величина зазора Δ_d/d_1 варьировалась: на рис. 14, *а* представлены графики

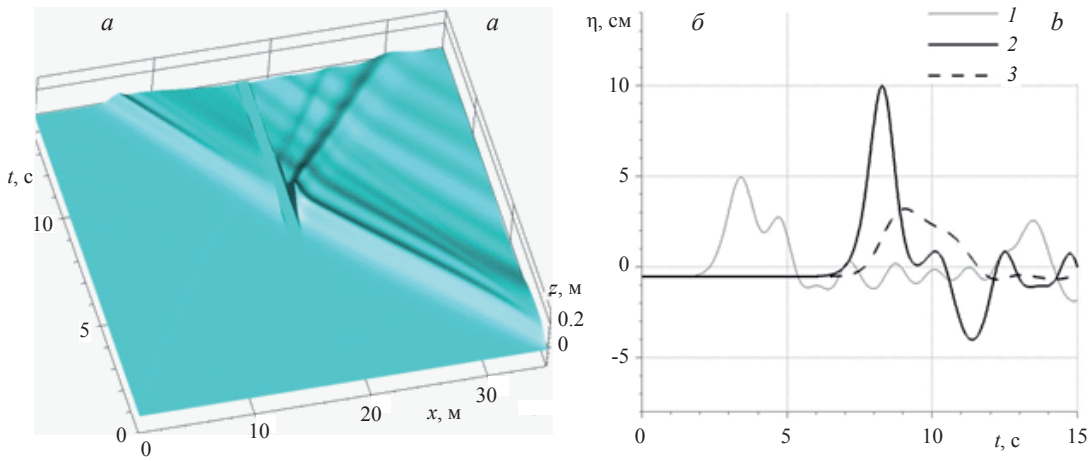

Рис. 12. Взаимодействие одиночной волны с полупогруженным телом.
а — пространственно-временная картина взаимодействия; *б* — изменение со временем *t* уровня воды η в точках установки волномеров В0 (*1*), В2 (*2*) и В3 (*3*), h_0 = 5 см.

Fig. 12. Interaction of a solitary wave with a semisubmerged body.
a — space-time surface of interaction; *b* — changes of the water level η with time *t* at the locations of the wavemeters B0 (*1*), B2 (*2*) and B3 (*3*), h_0 = 5 cm.

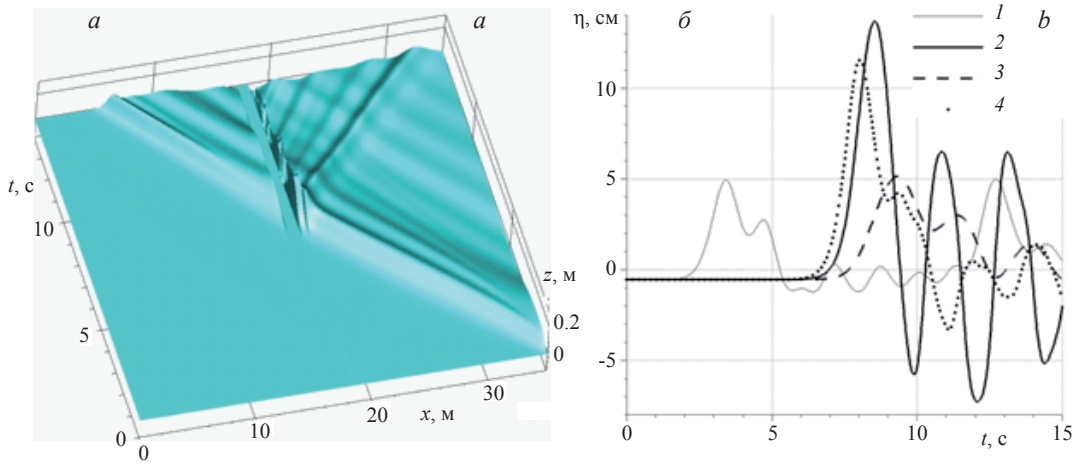

Рис. 13. Взаимодействие одиночной волны с полупогруженным телом, защищенным частично погруженным вертикальным сплошным экраном.
а — пространственно-временная картина взаимодействия; *б* — изменение со временем *t* уровня воды η в точках установки волномеров B0 (*1*), B2 (*2*), B3 (*3*) и B1 (*4*) , h_0 = 5 см.

Fig. 13. Interaction of a solitary wave with a semi submerged body protected by thepartially submerged vertical impermeable barrier.
a — space-time surface of interaction; *b* — changes of the water level η with time *t* at the locations of the wavemeters B0 (*1*), B2 (*2*), B3 (*3*) и B1 (*4*), h_0 = 5 cm.

для значений Δ_d/d_1 = 0.04 (*2*), 0.11 (*3*), 0.26 (*4*) и 0.37 (*5*). В последнем случае заглубление экрана z_0 совпадает с заглублением тела z_T. Видно, что зависимость максимальных заплесков от амплитуды набегающей волны имеет немонотонный характер и с увеличением зазора Δ_d максимальные заплески на лицевую грань тела возрастают. Кроме того, анализ данных показывает, что сплошной экран, даже с большим заглублением, хуже защищает рассматриваемый объект от воздействия длинных волн по сравнению с частично проницаемым экраном, установленным на дне.

На рис. 14, *б* показано влияние расстояния δ от тела до экрана на значения максимального заплеска на лицевую грань тела. В этих расчетах заглубление экрана было таким же, как и заглубление тела, и составляло $z_0 = z_T$ = 22 см, а представленные на рис. 14, *б* графики получены при δ/l = 0.02 (*2*), 0.17 (*3*), 0.49 (*4*), 1.0 (*5*), где l = 120 см — протяженность полупогруженного тела (рис. 1, *б*). Видно, что при дальнем расположении экрана его защитные свойства ухудшаются. При близком расположении наиболее сильно гасятся волны большей амплитуды: примерно в полтора раза по сравнению со случаем, когда экран не используется.

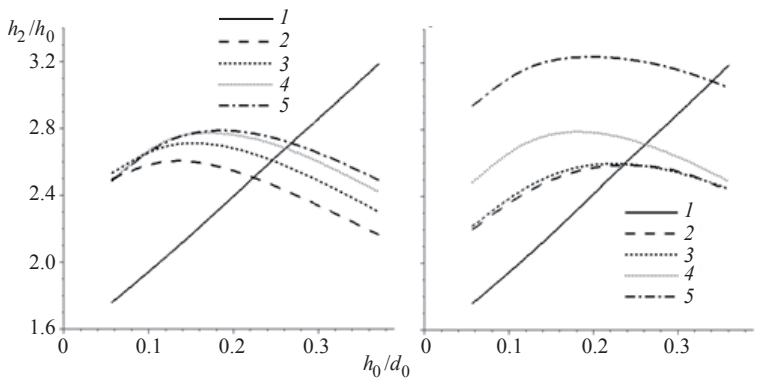

Рис. 14. Зависимость максимального заплеска h_2/h_0 на лицевую грань тела от амплитуды набегающей волны h_0/d_0 и заглубления экрана (*а*) или расстояния между экраном и телом (*б*).

Fig. 14. Dependence of the maximum runup h_2/h_0 on the front face of the body from the incident wave height h_0/d_0 and barrier submerging (*a*) or the distance between the barrier and the body (*b*).

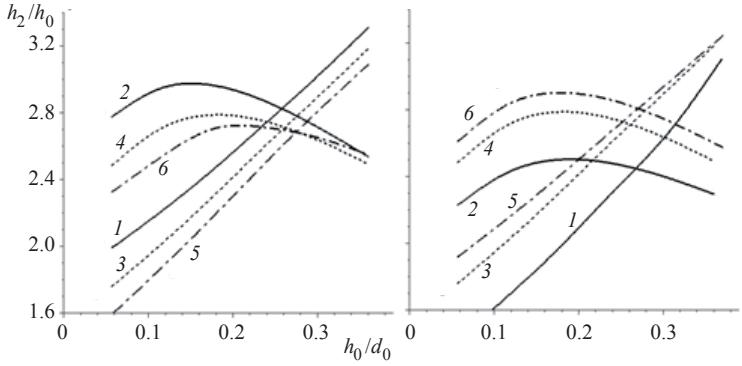

Рис. 15. Зависимость максимального заплеска h_2/h_0 на лицевую грань тела от амплитуды набегающей волны h_0/d_0 и заглубления тела (*а*) или протяженности тела (*б*).

Fig. 15. Dependence of the maximum runup h_2/h_0 on the front face of the body from the incident wave height h_0/d_0 and draft (*a*) or the body length (*b*).

Из рис. 15, *а* видно, как на величины максимальных заплесков влияет заглубление тела. При расчетах было положено, что δ = 59 см, l = 120 см, экран и тело погружены на одну и ту же глубину $z_0 = z_T$, при этом линии *1*, *2* получены при заглублении z_T = 30 см, *3*, *4* — z_T = 22 см, *5*, *6* — z_T = 14 см. Графики *1*, *3*, *5* соответствуют случаю, когда экран не был установлен, графики *2*, *4*, *6* построены при наличии экрана. Видно, что при уменьшении относительного заглубления заплески на лицевую грань тела также уменьшаются. В отсутствие экрана величины максимальных заплесков монотонно возрастают с увеличением амплитуды набегающей волны. Использование экрана делает зависимость максимального заплеска от амплитуды набегающей волны немонотонной, при этом для больших амплитуд набегающей волны использование экрана приводит к уменьшению величин заплесков при любом заглублении тела.

На рис. 15, *б* изображены графики зависимостей вертикального заплеска на лицевую грань тела при различной его протяженности l. В данных расчетах все геометрические размеры (δ = 59 см, z_T = 22 см) и расположение конструкции были такими же, как на рис. 1, *б*, за исключением координаты x тыльной грани тела, которая варьировалась, приближаясь к координате x лицевой грани при $l \to 0$. Графики получены при заглублении экрана, совпадающем с заглублением тела, т. е. $z_0 = z_T$. На рис. 15, *б* линии *1*, *2* изображают максимальные заплески на лицевую грань тела с протяженностью l = 30 см, *+3*, *4* — l = 120 см, *5*, *6* — l = 240 см. Графики *1*, *3*, *5* получены при отсутствии экрана, *2*, *4*, *6* — при его наличии. Видно, что для более протяженных тел величина максимального заплеска больше, чем для менее протяженных, при этом для любых значений l защитные свойства сплошного экрана начинают заметно проявляться только при относительных амплитудах набегающей волны $h_0/d_0 > 0.25$.

***

В данной работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований величин заплесков и силовых воздействий на полупогруженный объект для широкого диапазона высот набегающих волн, нескольких типов защитных экранов, разных отношений осадки тела и местной глубины, расстояний между экраном и объектом. Взаимодействие поверхностных волн с подобными объектами при наличии защищающих их экранов изучено в недостаточной мере и настоящая работа частично восполняет этот пробел.

Анализ результатов измерений и расчетов показал, что на лицевой грани полузаглубленного тела прямоугольного сечения заплеск значительно больше, чем на тыльной, при этом и та и другая величины при увеличении амплитуды набегающей волны возрастают нелинейным образом при наличии экрана и практически по линейному закону при его отсутствии. Увеличение амплитуды набегающей волны ведет и к увеличению амплитуды отраженной волны.

При возрастании длины тела максимальные значения заплесков и давления на лицевой грани растут, а на тыльной — падают. Это связано с тем, что для протяженных тел, размещенных над откосом, зазор между дном и днищем тела становится малым около тыльной грани, что ведет к росту отраженной от тела волны и уменьшению амплитуды волны, прошедшей за тело. Похожие зависимости возникают и при варьировании величин 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.

Сравнение защитных свойств экранов разных типов показало, что частично проницаемые экраны существенно уменьшают силовые нагрузки и величины заплесков на полупогруженное тело и являются более эффективными по сравнению со сплошными экранами, не касающимися дна. Причина низкой эффективности последнего типа экранов кроется в том, что длинные поверхностные волны вовлекают в движение всю толщу воды, вследствие чего возникающий под нижним краем экрана поток воды генерирует новые волны за экраном, а также колебания большой амплитуды в зазоре между телом и экраном.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущей научной школы РФ (№ НШ-7214.2016.9).

References

1. *Thusyanthan N. I., Modoni A., Hakin R., Madabhushi S.P.G.* Model study of tsunami wave loading on coastal structures. *Proc. 1st Sri Lankan Geotechnical Society (SLGS) International Conference on Soil and Rock Engineering.* 2007, 5—11.
2. *Kihara N., Niida Y., Takabatake D., Kaida H., Shibayama A., Miyagawa Y.* Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall. *Coastal Engineering.* 2015, 99, 46—63.
3. *Kamynin E. Yu., Nudner I. S., Maximov V. V., Revyakin A. Yu., Babchik D. V.* Determination of the wave protection characteristics of partially permeable pier structures. *Proc. IX All-Russian conference "Applied technologies of the hydroacoustics andhydrophysics". St.-Petersburg, Science,* 2008, 469—473 (in Russian).
4. *Manoilin S. V., Maximov V. V., Nudner I. S.* Interaction of a solitary wave with the obstacles of complex configuration. *Proc. IX All-Russian conference "Applied technologies of the hydroacoustics and hydrophysics". St.-Petersburg, Science,* 2008, 441—443 (in Russian).
5. *Babchik D. V., Maximov V. V., Nunder I. S., Semenov K. K., Khakimzyanov G. S.* Numerical and experimental studies of periodic waves interaction with a sloping construction of a complex profile. *Proc. XI All-Russian conference "Applied technologies of the hydroacoustics and hydrophysics". St.-Petersburg, Science,* 2012,198—200 (in Russian).
6. *Palermo D., Nistor I., Nouri Y., Cornett A.* Tsunami loading of near-shoreline structures: a primer. *Can. J. Civ. Eng.* 2009, 36, 1804—1815.
7. *Nouri Y., Nistor I., Palermo D., Cornett A.* Experimental investigation of tsunami impact on free standing structures. *Coastal Engineering.* 2010, 52, 1, 43—70.
8. *Nistor I., Palermo D., Nouri Y., Murty T., Saatcioglu M.* Tsunami-induced forces on structures. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering.* 2009, 261—286.
9. *Kamynin E. Yu., Maximov V. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Khakimzyanov G. S.* Studies of the solitary wave interaction with a partially submerged stationary construction. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2010, 4 (10), 39—54 (in Russian).
10. *Kee S.-T.* Floating pontoon-membrane breakwater. *J. Ocean Science Technology.* 2004, 1, 1, 49—57.
11. *Isaacson M., Baldwin J., Allyn N., Cowdell S.* Wave interactions with perforated breakwater. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engrg.* 2000, 126, 5, 229—235.
12. *Ramsden J. D.* Tsunamis: forces on a vertical wall caused by long waves, bores, and surges on a dry bed. *PhD thesis. California Institute of Technology.* 1993.
13. *Wu Y.T., Hsiao S.C.* Propagation of solitary waves over a submerged permeable breakwater. *Coastal Engineering.* 2013, 81, 1—18.
14. *Silva R., Losada I. J., Losada M. A.* Reflection and transmission of tsunami waves by coastal structures. *Appl. Ocean Res.* 2000, 22, 4, 215—223.
15. *Lin P.* A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles. *Coastal Engineering.* 2004, 51, 35—51.
16. *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, 21, 4, 295—310.
17. *Yeung R. W., Wu Ghun-Fa.* Nonlinear wave-body motion in a closed domain. *J. Comput. Fluids.* 1989, 17, 2, 351—370.
18. *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, 95, 1, 115—138.
19. *Teles da Silva A. F., Peregrine D. H.* Nonlinear perturbations ona free surface induced by a submerged body: a boundary integral approach. *Engineering Analysis with Boundary Elements.* 1990, 7, 4, 214—222.
20. *Xiao Feng.* A computational model for suspended large rigid bodies in 3D unsteady viscous flows. *J. Comput. Phys.* 1999, 155, 2, 348—379.
21. *Liu P. L.-F., Abbaspour M.* Wave scattering by a rigid thin barrier. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engrg.* 1982, 108, 4, 479—491.
22. *Losada I. J., Losada M. A., Roldan A. J.* Propagation of oblique incident waves past rigid vertical thin barriers. *Appl. Ocean Res.* 1992, 14, 191—199.
23. *Abul-Azm A. G.* Wave diffraction through submerged breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engrg.* 1993,119, 6, 587—605.
24. *Porter R., Evans D.V.* Complementary approximations to wave scattering by vertical barriers. *J. Fluid Mech.* 1995, 294, 155—180.
25. *Liu P. L.-F., Al-Banaa K.* Solitary wave runup and force on a vertical barrier. *J. Fluid Mech.* 2004, 505, 225—233.

26. *Kamynin E. Yu., Maximov V. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Khakimzyanov G. S.* Interaction of surface waves with partially submerged barrier. *Zbornic radova konferencije MIT 2011. Belgrad,* 2012, 180—185 (in Russian).
27. *Yu X.* Diffraction of water waves by porous breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engrg.* 1995, 121, 6, 275—282.
28. *Lee M. M., Chwang A. T.* Scattering and radiation of water waves by permeable barriers. *Physics Fluids.* 2000, 12, 1, 54—65.
29. *Liu P. L.-F., Lin P., Chang K.-A., Sakakiyama T.* Numerical modeling of wave interaction with porous structures. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engng.* 1999, 125, 6, 322—330.
30. *Yang H. T., Huang L. H., Hwang W. S.* The interference of a semi-submerged obstacle on the porous breakwater. *Appl. Ocean Res.* 1997, 19, 5—6, 263—273.
31. *Afanasiev K. E., Maximov V. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Stukolov S. V.* Numerical modeling of work experimental wave maker solitary waves. *Proceedings of the XI All-Russian conference "Applied technologies of the hydroacoustics and hydrophysics". St.-Petersburg, Nauka,* 2012, 201—203 (in Russian).
32. *Zaharov Yu. N., Zimin A. I., Stukolov S. V., Lebedev V. V., Nudner I. S., Semenov K. K.* Numerical modeling of laboratory vacuum generator of solitary water waves. *Proceedings of the III International conference "Polar mechanics". Vladivostok,* 2016, 954—964 (in Russian).
33. *Charvet I.* Experimental modelling of long elevated and depressed waves using a new pneumatic wave generator. *Doctoral Dissertation. University College London,* 2012.
34. *Khakimzyanov G. S., Shokin Yu. I., Barachnin V. B., Shokina N. Yu.* Numerical simulation of fluid flows with surface waves. *Novosibirsk, Siberian branch of RAS,* 2001, 394 p. (in Russian).

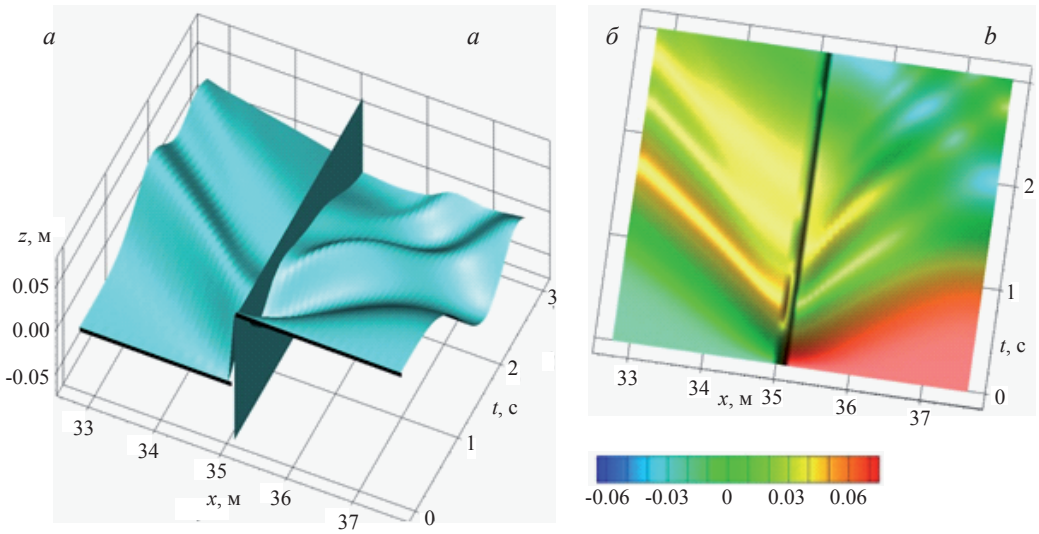

Рис. 4. Генерация одиночной волны волнопродуктором: пространственно-временные картины свободной границы в окрестности передней стенки волнопродуктора (*а*) и отклонений свободной границы от уровня спокойной воды (*б*) при h_w = 7.5 см.

Fig. 4. Generation of a solitery wave by a wavemaker: space-time surface of the free boundary near the front wall of the wavemaker (*a*) and deviations of the free boundary from the level of the calm water (*b*) for h_w = 7.5 cm.

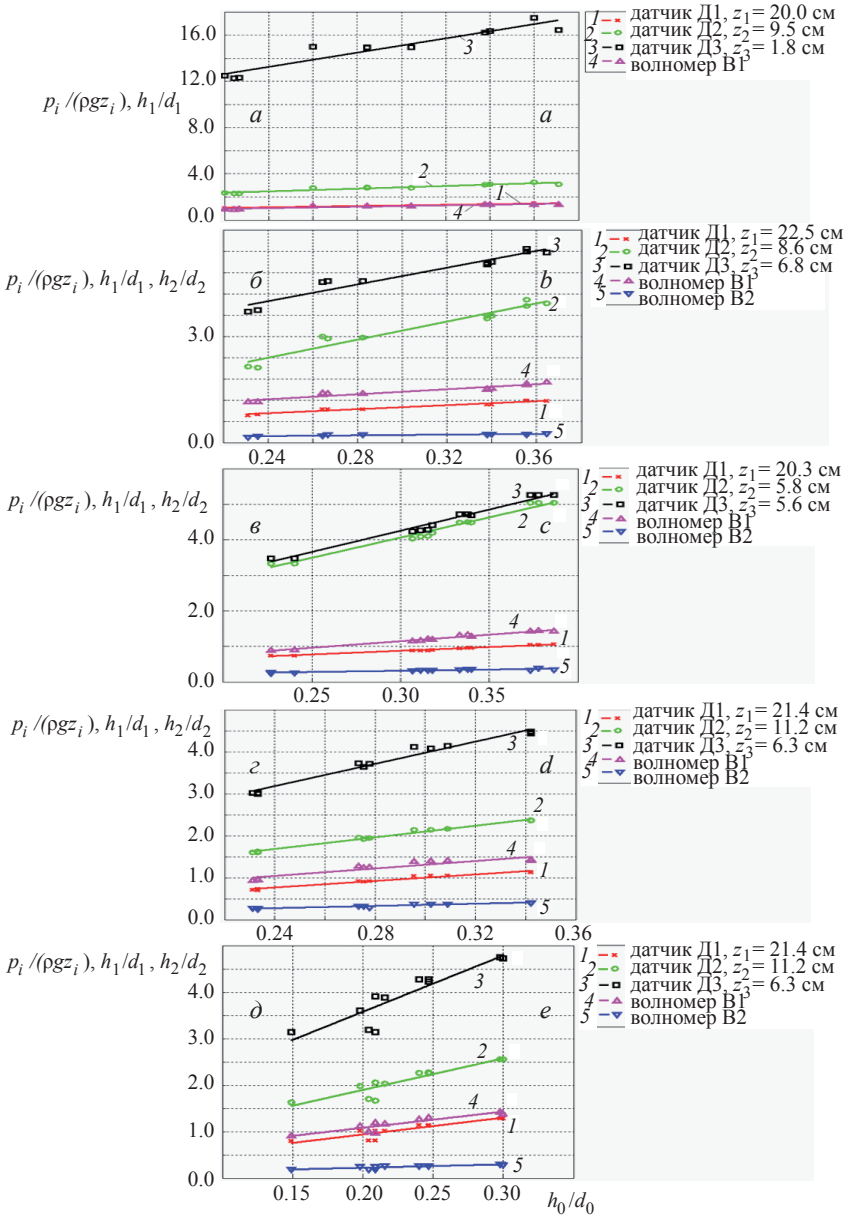

Рис. 5. Влияние высоты одиночной волны на характеристики ее взаимодействия с экранами $Э_1$—$Э_5$ (*а*—*д*).

Fig. 5. The influence of the solitary wave height on the characteristics of its interaction with the protective barrier $Э_1$—$Э_5$ (*a*—*e*).