

УДК 626.01

© И. Г. Кантарджи, А. Н. Акулинин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
kantardgi@yandex.ru

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА БЕРЕГОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Статья поступила в редакцию 27.05.2017, после доработки 02.07.2017.

Исследование цунами — чрезвычайно важная прикладная задача. Даже частичное решение данной задачи позволит значительно смягчить катастрофические разрушения и снизить число человеческих жертв после этого природного явления. При изучении явления цунами физическое моделирование часто дает дополнительную информацию по сравнению с численным моделированием. Прежде всего, это информация о взаимодействии цунами с сооружениями сложной конструкции, а также о возможных разрушениях этих сооружений. Такая информация может быть получена с помощью CFD, методом численного моделирования. Однако модель CFD тоже нуждается в верификации лабораторными данными. При физическом моделировании волн цунами целесообразно использовать опыт лабораторного и численного изучения ветрового волнения. Существует большое количество способов генерации волн цунами в лаборатории. Наиболее распространен и изучен способ генерации волн при помощи скользящего с наклонной поверхности блока. Также применяется метод генерации волн с помощью специальных лопаток или щитов. Сравнительно недавно был разработан принципиально новый способ моделирования цунами при помощи пневматического цунами-генератора, который представляет собой бак с вакуумным насосом. У каждого из вышеперечисленных методов есть свои преимущества и недостатки.

Ключевые слова: цунами, физическое моделирование волн цунами, генерация волн цунами.

I. G. Kantardgi, A. N. Akulinin

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

PHYSICAL MODELING OF TSUNAMI WAVES IMPACT ON SHORE STRUCTURES

Received 27.05.2017, in final form 02.07.2017.

Tsunami research is a very complex applied problem. Even a partial solution of this problem will significantly mitigate catastrophic destruction and reduce the number of human casualties after this natural phenomenon. In the process of tsunami studying physical modeling often provides the additional information for numerical simulation. First of all, this is the information about the interaction of tsunamis with the complex design constructions and possible destruction of these constructions. Such information is, in principle, can be obtained using a CFD simulation method. However, CFD model also requires verification by the laboratory data. There are many ways to conduct tsunami simulation and many methods of tsunami wave generation. The most widespread and studied way of wave generation is moving block method. The method of wave generation using special wave paddles or shields is also used. In recent times, a fundamentally new way of tsunami simulating was developed. New pneumatic tsunami generator consists of a tank with water and vacuum pump. Each of the methods has its advantages and disadvantages.

Key words: tsunami, physical modeling of tsunami waves, tsunami waves generation.

Ссылка для цитирования: Кантарджи И. Г., Акулинин А. Н. Физическое моделирование воздействия волн цунами на береговые сооружения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 3. С. 78—90.

For citation: Kantardgi I. G., Akulinin A. N. Physical modeling of tsunami waves impact on shore structures. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 3, 78—90.

DOI: 10.7868/S2073667317030078.

Исследование волн цунами — важная прикладная задача, в которую включаются несколько задач: возникновение цунами, распространение цунами, расчет нагрузок на здания и сооружения.

Одно из определений цунами сформулировано в своде правил «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования и строительства», находящимся в настоящее время на официальном утверждении. Оно звучит следующим образом: цунами — это поверхностные гравитационные волны в океанах и морях, вызванные подводными землетрясениями и вулканами, падением астероидов или других небесных тел, подводными и надводными береговыми оползнями, и обвалами, а также подводными взрывами большой мощности.

Известны некоторые условия возникновения цунами. Наиболее вероятные, около 90 % случаев, — подводные землетрясения магнитудой более 7. При этом на поверхности океана возникают волны высотой 1—2 м, распространяющиеся со скоростью более 100 м/с и имеющие период 10—30 мин. Отличительной особенностью волны цунами по сравнению с ветровыми волнами является вовлечение в процесс движения всей толщи океанической воды над очагом землетрясения. Волновой нагон при этом на прибрежном мелководье может достигать от 5 до 15 м. В конце концов, это приводит к тому, что возмущения водной поверхности длиной более 100 км, распространяющиеся со скоростью более 360 км/ч, набегая на прибрежное мелководье, образуют крутую волну высотой до 30 м, которая после обрушения наносит разрушающее воздействие на территории свыше 3 км от уреза воды.

Другим распространенным источником цунами являются оползни (около 5 % случаев). Вулканическое извержение (около 5 % случаев) — следующая по частоте причина образования волн цунами, причем волна образуется не только при взрывах и оползнях, но также от заполнения полости вулкана от извергнутого материала.

Различают 2 вида цунами: цунами близкое — цунами, генерируемое близким к цунамиопасной территории источником, со временем добегания от нескольких минут до часа и цунами далекое — время добегания превышает 1 ч.

В России вопросы, связанные с цунами, актуальны для Дальнего Востока. Тихоокеанское побережье РФ находится рядом с сейсмоактивными районами, так называемым Огненным поясом. В истории нашей страны было несколько трагедий, связанных с цунами, самой значительной из которых было цунами в Северо-Курильске в 1952 г., когда число жертв превысило 2000 чел. На сегодняшний день в связи с вновь начавшимся активным освоением побережья дальнего Востока и шельфа Сахалина, возникает множество неопределенностей при проектировании и строительстве сооружений в цунами- и сейсмоопасных районах.

В начале 2017 г. закончена разработка свода правил «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования и строительства», в котором была собрана и систематизирована информация, связанная с проблематикой цунами, применительно к условиям России. Рассмотрен широкий спектр вопросов, начиная от формулирования терминов и разработки концептуального подхода к цунамибезопасности сооружений, и заканчивая вопросами, связанными с расчетами воздействия волн на прибрежные территории и гидротехнические сооружения.

Сформулированы требования к исходным данным для расчетов, предложен подход к определению параметров опасности волн цунами, дана классификация прибрежных и береговых сооружений. В заключение рассмотрены аспекты уменьшения цунами-риска при планировке и застройке территорий, подверженных воздействию цунами, так называемых цунамиопасных территорий, дана аналитическая оценка цунами-риска и проработаны сценарии бедствия.

В составе разработанного СП «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования и строительства», имеется следующий пункт: «5.2.5. Для гидротехнических сооружений, расположенных на цунамиопасных территориях, где значения вертикального заплеска h_{100} превышают 4 м, необходимо выполнять физическое моделирование для уточнения нагрузок». Здесь h_{100} — заплеск повторяемостью 1 раз в 100 лет.

В том же СП имеется обязательное приложение А, в котором дана характеристика цунамиопасности береговых зон России. Основным параметром цунамиопасности как раз и является значение вертикального заплеска h_{100} . В соответствии с представленными там данными необходимость физического моделирования воздействия волн цунами на гидротехнические сооружения возникает при строительстве в береговой зоне Приморского края, Камчатского края и Курильских островов.

Принятый подход соответствует аналогичной норме СП 38.13330.2012 [1], где физическое моделирование воздействия ветровых волн и зыби является обязательным, если высота волн перед сооружением превышает 5 м.

Однако опыт применения такого принципа для ветровых волн сталкивается с серьезными неопределенностями. В настоящей работе приводятся некоторые результаты использования физического моделирования в задачах воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения из опыта Московского государственного строительного университета, которые важны, по мнению авторов, и для задач цунами.

Кроме того, в отличие от ситуации ветровых волн, задача создания волн цунами при физическом моделировании в лаборатории, не является полностью понятной. В новом СП имеется обязательное приложение Г «Требования к физическому моделированию цунами», однако там указано только, что такое моделирование должно опираться на критерий подобия Фруда.

В настоящей статье дан также краткий обзор методов создания модели волны цунами в лаборатории.

Физическое моделирование ветровых волн в лаборатории. В СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)», официально введенном в 2013 г., имеются следующие положения: «А.5 Допускается определение характеристик волнения на основе гидродинамического и вероятностного моделирования с использованием спектрально-дискретных или спектрально-параметрических моделей.

Верификацию результатов гидродинамического моделирования рекомендуется проводить по имеющимся данным измерений характеристик волнения в натурных условиях или на физических моделях».

Это важные положения, так как первое из них открыло путь официального, принимаемого государственной экспертизой проектной документации, применения современных гидродинамических моделей при обосновании проектных решений.

Но второе положение требует проводить верификацию результатов математического моделирования волнения натурными или лабораторными данными. К сожалению, возможность использования натурных данных обычно ограничена. Такие данные имеются в редких случаях и только для отдельных участков береговой зоны.

Так для Черного моря различные авторы используют для верификации данные измерений волн глубоководным бумом, выполненные Южным отделением Института океанологии РАН в 1983 г. [2]. В частности, именно таким образом были верифицированы результаты моделирования ветровых волн по программе SWAN для побережья Имеретинской низменности в районе г. Сочи [3, 4]. Пример такой верификации показан на рис. 1.

Для использования данных по данному бую необходимо «провести» волны шторма февраля 2003 г. с глубокой воды до точки установки буя на глубине 85 м. А уже затем использовать эти волны для участка проектирования сооружений.

Конечно, если натурные измерения волн на участке строительства отсутствуют, их можно выполнить. Это технически возможно, как показано, например, в [4]. Но специальная работа по выполнению натурных измерений волн, и верификации используемых гидродинамических моделей требует ресурсов и времени. Поэтому, проводится достаточно редко. Так в настоящее время специалистами Московского государственного строительного университета выполняется верификация математической модели волн для Обской губы по натурным данным, полученным ФГБУ «ААНИИ» Росгидромета в 2012—2016 гг.

На рис. 2 показано положение точек измерения, а на рис. 3 пример сравнения данных измерений с данными моделирования по высотам генерируемых волн. В 2017 г. продолжаются измерения в новых точках объекта и верификация модели будет продолжена.

Получение данных лабораторных измерений для верификации математических моделей волн является более простой задачей, чем натурные измерения. Конечно, если исследователи располагают соответствующей лабораторией. Однако и здесь существуют неопределенности, вызывающие серьезные вопросы.

Для натурных измерений сравнение проводится с реальными штормами, которые измерены, с одной стороны, и промоделированы, с другой. Параметры соответствующих штормов определяются

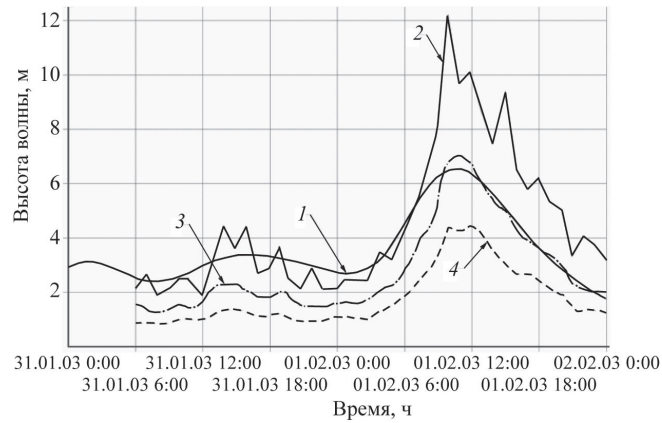


Рис. 1. Сравнение высот волн, рассчитанных и измеренных волномерным буюм возле г. Геленджик.

1 — высота волны по результатам численного моделирования; 2 — высота волны обеспеченностью 1 % (максимальная волна); 3 — высота волны обеспеченностью 13 % (значительная волна); 4 — высота волны обеспеченностью 50 % (средняя волна).

Fig. 1. Comparison of wave heights calculated and measured by a wave buoy near Gelendzhik.

1 — the wave height from the numerical simulation results; 2 — the wave height of the 1 % security (maximum wave); 3 — wave height of 13 % security (significant wave); 4 — the wave height of the 50 % security (medium wave).

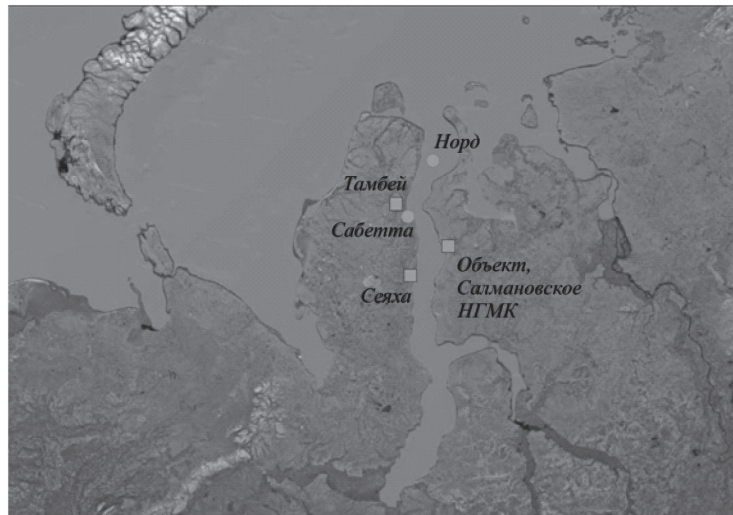


Рис. 2. Спутниковый снимок района Обской губы с указанием положения объекта исследования.

Кругами показано положение волномеров, квадратами — метеостанций.

Fig. 2. Satellite image of the Ob Bay area, indicating the location of the research object.

The circles show the position of the wavemeters, the squares of the weather stations.

процедурой реанализа климатических данных и применением ветро-волновой модели. Эти же шторма могут быть смоделированы в лаборатории, если позволяют возможности модели.

Но, как известно, при решении инженерных задач воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения используется метод эквивалентной или характерной волны. Во-первых, определяются шторма заданной повторяемости, в соответствии с классом гидротехнических сооружений.

Во-вторых, определяются волновые режимы различной обеспеченности в соответствии с решаемой инженерной задачей. Так, условия швартовки у причалов определяются волнами шторма повторяемостью один раз в год, обеспеченностью 5 %; нагрузки на оградительные сооружения определяются волнами шторма один раз в 100 или в 50 лет, 1 % обеспеченности; устойчивость набросного откосного покрытия определяется волнами 2 % обеспеченности и т. д. Так для порта в бухте Восток пришлось рассматривать с учетом волноопасных направлений и решаемых гидротехнических задач 260 волновых режимов.

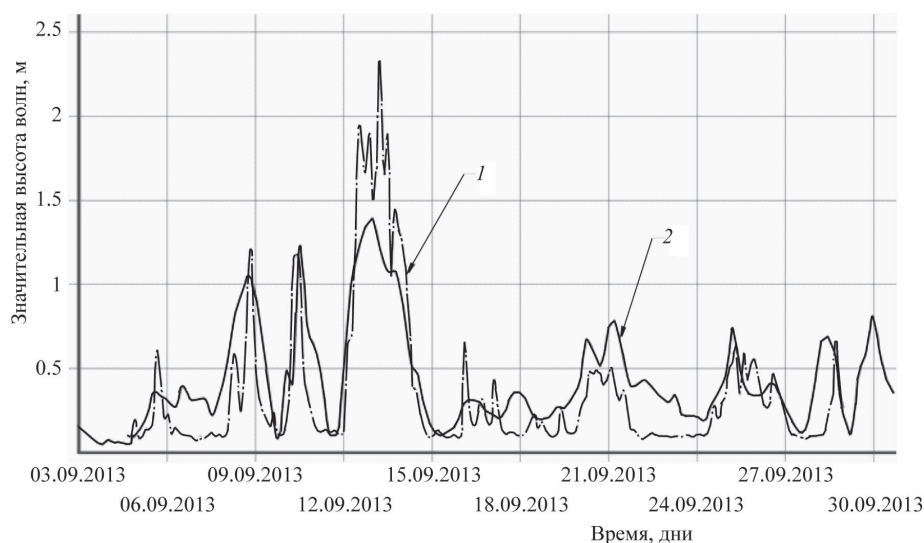


Рис. 3. Сравнение высот значительных волн, измеренных в районе пункта Сабетта (1) и результатов расчета волновой моделью SWAN (2).

Fig. 3. Comparison of the significant waves heights measured in the Sabetta point area (1) and the results of the SWAN wave model calculation (2).

Их характеристики были получены математическим моделированием. Но как быть с верификацией лабораторными данными? Нужно ли моделировать в лаборатории все эти режимы? Или отдельные, тогда какие? Определенного ответа на этот вопрос нет, по опыту выполнения подобных работ в Московском государственном строительном университете в лаборатории исследуются отдельные режимы, иногда не входящие в комплекс расчетных. Однако, именно для этих режимов, исследуемых в лаборатории, проводится и математическое моделирование с последующим сравнением.

Второй вопрос, который возникает при верификации численного моделирования лабораторными данными, это вопрос о том, в каких точках в лаборатории необходимо выполнять синхронные измерения волн. При математическом моделировании определяются поля волн, а при физическом моделировании обычно измеряется положение волновой поверхности в точке установки датчика-волнографа. Нужно отметить, что существуют способы измерить поле волн в лаборатории, с помощью ультразвуковых датчиков или стерео-фото-видео съемкой. Однако, эти методы не распространены. Чаще измерения волн, все же, выполняются в нескольких конкретных точках на модели.

При сравнении точечных измерений высот волн, измеренных в лаборатории, и полученных численным моделированием возникает серьезная проблема. Она связана с тем, что, если в лаборатории, в волновом бассейне моделируется распространение волн в зоне оградительных и причальных сооружений, в бассейне возникает система частично стоячих волн. Это происходит благодаря образованию многократно отраженных волн и может иметь более или менее сильный характер.

По этой причине небольшое отклонение в пространстве точки вывода результата математического моделирования волн от точки, где был установлен датчик-волнограф в бассейне, может приводить к значительным отклонениям по высотам волн.

В качестве иллюстрации приведем результаты подобной работы для проекта порта в заливе Восток Японского моря. Схематическое изображение плана модели порта в волновом бассейне для исследования воздействия волн Южного направления на Восточную часть волнозащитного мола приведено на рис. 4.

Горизонтальный масштаб физической модели 1:100 и вертикальный масштаб физической модели 1:50 были выбраны, исходя из плановых размеров волнового бассейна (27×27 м) [5], натурных размеров порта, достаточного волнообразующего расстояния от волнопродуктора до входа в акваторию порта, глубины воды в бассейне, соответствующей проектной, преобладающего направления волнения. Выполнялись четыре серии экспериментов для исследования воздействия волн Южного и Юго-Западного направления на восточную и западную части волнозащитного мола (рис. 4). В первой серии опытов эксперименты проводились на восточной части волнолома со следующими параметрами волн

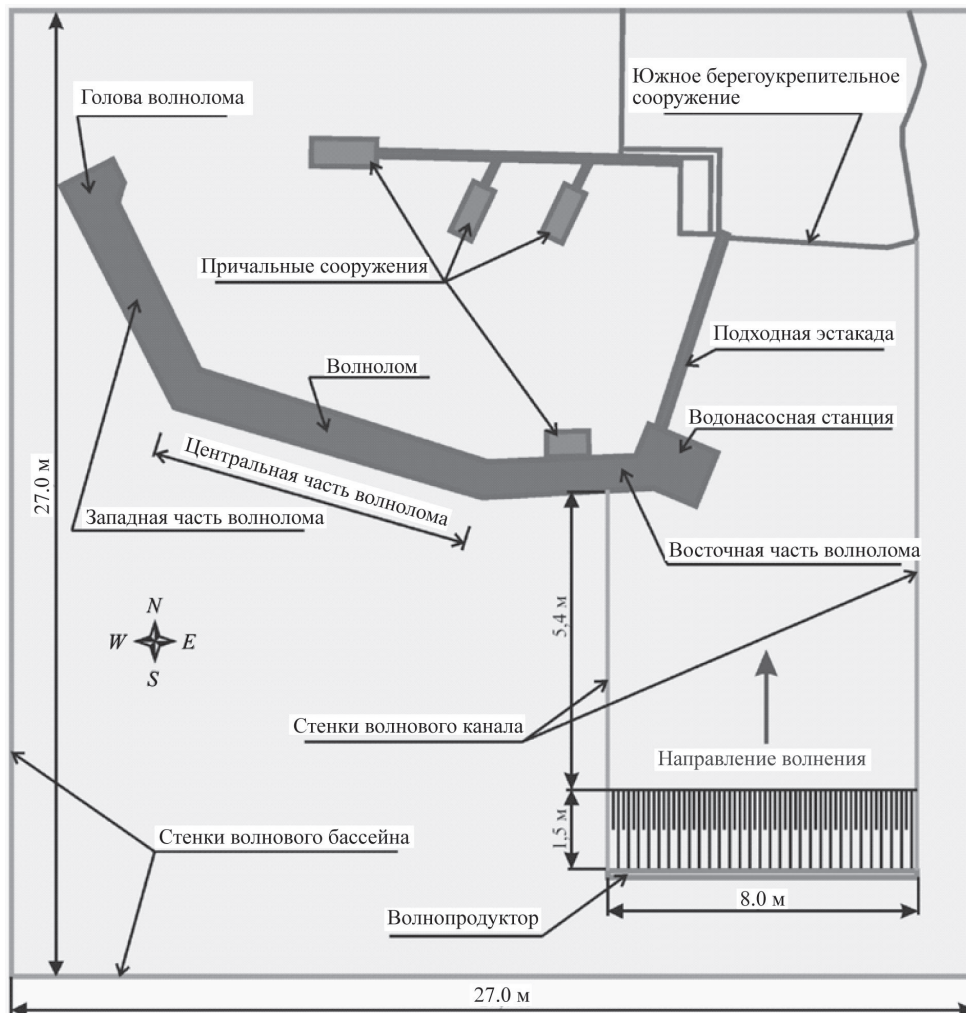


Рис. 4. Схема модели порта в волновом бассейне лаборатории Московского государственного строительного университета для исследования воздействия волн Южного направления на Восточную часть волнолома.

Fig. 4. Scheme of the port model in the wave pool in Moscow State University of Civil Engineering laboratory used for the study of the effect of Southern waves on the eastern part of the breakwater.

для шторма Южного направления: $T = 12.3$ с, $h = 5$ м (натурные значения), $T = 1.74$ с, $h = 10$ см (модельные экспериментальные).

Эти четыре серии экспериментов в волновом лотке моделировались численно моделью ARTEMIS. Модель ARTEMIS — «Agitation and Refraction with Telemac Mild Slope» (Aelbrecht, 1997) основана на уравнениях пологих склонов (УПС) (Berkhoff, 1972, 1976). Она описывает трансформацию волн в прибрежной зоне с учетом рефракционно-дифракционных процессов, диссипации за счет трения о дно и разрушения волн. Эллиптические УПС решаются численно методом конечных элементов. Модель представлена в открытом доступе на сайте (<http://www.opentelemac.org/>) моделирующего комплекса TELEMAT (Hervouet, 1999): <http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/19-artemis-presentation>.

На рис. 5 показано поле волн в зоне дифракции и отражения в волновом бассейне. А результаты математического моделирования представлены на рис. 6 и 7 (см. вклейку).

На пространственном распределении волновых фаз (рис. 6) виден дифракционный разворот волны сразу за насосной станцией, с проникновением волн на акваторию порта. Подобный разворот наблюдался и в физическом эксперименте (рис. 6). Форма фронта волн на подходе к Южному берегоукрепительному сооружению также соответствует волновой картине, наблюдавшейся в волновом бассейне. Высоты промоделированных волн показаны на рис. 7.

Картина сравнения численного и физического моделирования поля волн получается вполне удовлетворительной. Однако перейдем к численному сравнению высот волн в точках измерений. Высоты

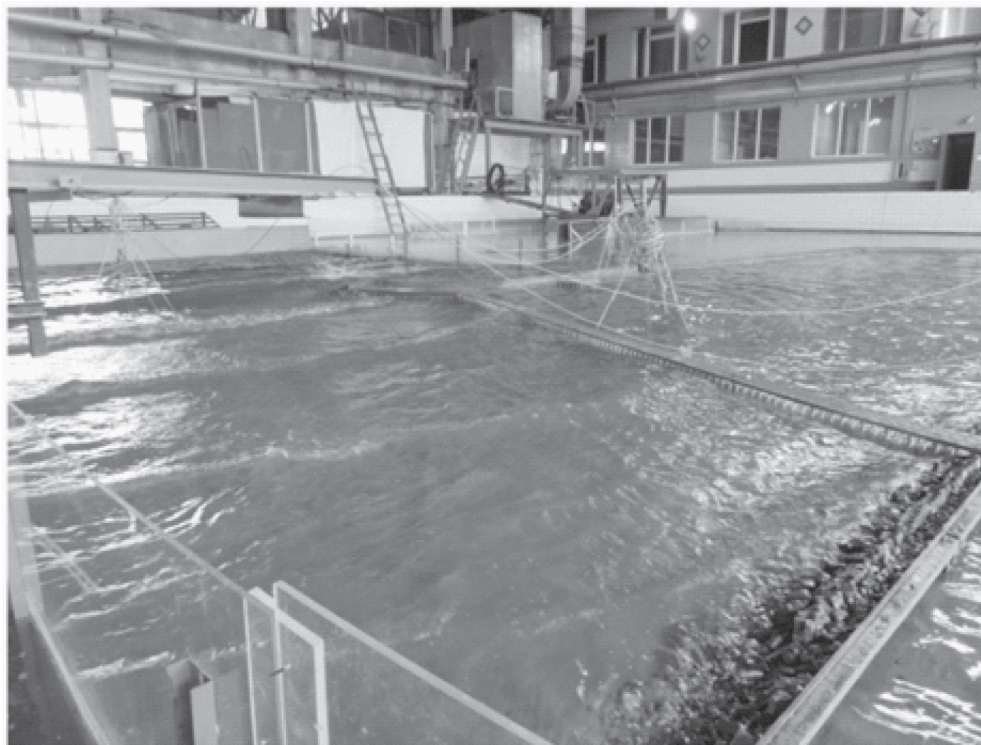


Рис. 5. Поле волн от воздействия шторма Южного направления на гидротехнические сооружения восточной части порта при физическом эксперименте на модели порта в волновом бассейне.

Fig. 5. The wave field from the impact of the Southern Storm on the hydraulic structures in the eastern part of the port in a physical experiment on the port model in the wave pool.

промоделированных волн в контрольных точках приведены в таблице, там же они сравниваются с высотами волн, измеренными датчиками-волнографами, в пересчете на натурные данные.

Волновая картина для монохроматической волны существенно неоднородна и представляет собой чередование минимумов и максимумов. Небольшие смещения в геометрии численной модели по сравнению с физической моделью могут привести к значительным изменениям в высотах волн в контрольных точках при схожести волновых полей в физическом и численном эксперименте. Поэтому, сопоставление значений высот волн, измеренных в контрольной точке следует проводить с результатами расчетов в ее окрестности. Именно поэтому в таблице и на рис. 8 для сравнения с экспериментом, помимо значения высоты волн непосредственно в контрольной точке, представляются минимальное и максимальное значение высоты волн в круговой окрестности точки радиусом 30 м ($1/4$ средней длины волны 120 м), характеризующее диапазон высот волн в окрестности точки измерений. Измеренные

Таблица

Высоты волн в контрольных точках, промоделированные ARTEMIS и измеренные в физическом эксперименте, в пересчете на натуру. Для промоделированных высот также указаны минимальное и максимальные значения в круговой окрестности точки радиусом 30 м

№ точки	Измеренная высота волн, м	Глубина воды (физмодель), см	Промоделированная высота волн, м			Глубина воды (матмодель), м
			в точке	min	max	
1	5	7.4	4.28	3.23	5.13	7.40
2	2.73	9.5	1.92	0.39	2.35	9.48
3	1.20	12	0.97	0.28	1.21	12.00
3"	0.89	10.5	0.49	0.12	1.25	10.48
4	0.83	14.5	0.07	0.03	0.51	14.42
5	0.55	11.5	1.18	0.30	1.39	11.43

значения высот волн для большинства контрольных точек лежат внутри диапазона рассчитанных значений. Только для точек 2 и 4 измеренная высота волн находится несколько выше верхней границы соответственно на 39 и 14 % от измеренных значений.

Таким образом, прямое сравнение измеренных и промоделированных высот волн подтверждает, с нашей точки зрения, существование проблемы, которая обсуждалась выше.

Физическое моделирование волн цунами. При физическом моделировании воздействия волн цунами на гидротехнические сооружения, обе рассмотренные проблемы лабораторного моделирования ветровых волн также имеют место. Какие именно волны следует воспроизводить в лаборатории? Эта задача здесь несколько проще, так как для воздействия цунами исследуются экстремальные волновые характеристики для данного цунамиопасного региона. Как это и рекомендуется новым СП по цунами.

Кроме того, физическое моделирование может применяться для непосредственного изучения устойчивости и прочности сооружений под воздействием цунами. Такая задача решается и для ветровых волн, только в случае ветровых волн диапазон волновых режимов шире.

Сравнение волн в береговой зоне и в зоне сооружений, получаемых в лаборатории и численным моделированием, как и для ветровых волн, целесообразно делать не в контрольных точках, а по всему волновому полю. При этом могут использоваться методы, показанные выше для ветровых волн. Например, включение окрестности контрольной точки.

Реализация в лаборатории модельных волн цунами производится разными способами. Необходимо оборудовать лоток или глубоководный бассейн соответствующими устройствами и затем воспроизвести серию волн (обычно три волны) с очень длинным периодом и специфической формы.

По форме волна цунами отличается от ветровых волн (рис. 9). Уровень воды сначала отклоняется ниже спокойного уровня (а не выше, как при ветровых волнах) при этом в движении находится вся толща воды. В реальных условиях первая волна обычно не содержит вредоносных предметов (различных обломков и мусора), далее следует откат волны, при котором происходит размыв донного грунта у гидротехнических сооружений и вымыв из их основания. Последующие волны уже содержат в себе большое количество зачастую крупногабаритных обломков, которые оказывают дополнительное воздействие на уцелевшие сооружения. При откате волн также происходят процессы размыва и вымыва грунта [6].

Достоверность моделирования цунами зависит главным образом и от исходных данных по параметрам волны, как для численного моделирования, так и для физического. Были проведены исследования для определения модельных форм волн цунами. Исследования включали в себя использование общих волновых колебаний, таких как одиночные или N -волны, или моделирование определенных волновых событий. Опубликованы и обзорные работы, показывающие различные подходы к определению модельных волн цунами [6—8, 10].

Самая общая модель, используемая для описания непериодической волны — это одиночная волна или солитон, поверхностная волна, которая состоит из одиночного перемещения массы воды относительно поверхности по вертикали [6]. Показано, как положительное начальное возмущение в конце концов распадается на солитоны и этот вывод был использован для обоснования использования солитонов при моделировании цунами.

Использование солитонов в качестве модели цунами не могло давать точных результатов, так как в этой модели было множество допущений. Для повышения достоверности моделирования было предложено заменить одиночную волну на N -образную, в которой в начале серия волн может начинаться с депрессии водной поверхности или подъема. Обобщенное уравнение N -волны [9] выглядит следующим образом:

$$\eta(x, 0) = \alpha H(x - x_2) \operatorname{sech}^2(k(x - x_1)),$$

где $k = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{3H}{4h}}$; α — масштабный параметр, позволяющий делать сравнение с одиночными волнами, x_1 и x_2 — координаты гребня и впадины волны, H и h — глубина и высота волны, соответственно.

Экспериментальные исследования волн цунами и цунами воздействия на прибрежные сооружения в лабораторных условиях должны соответствовать критерию подобия Фруда:

$$\operatorname{Fr} = \frac{V^2}{gL},$$

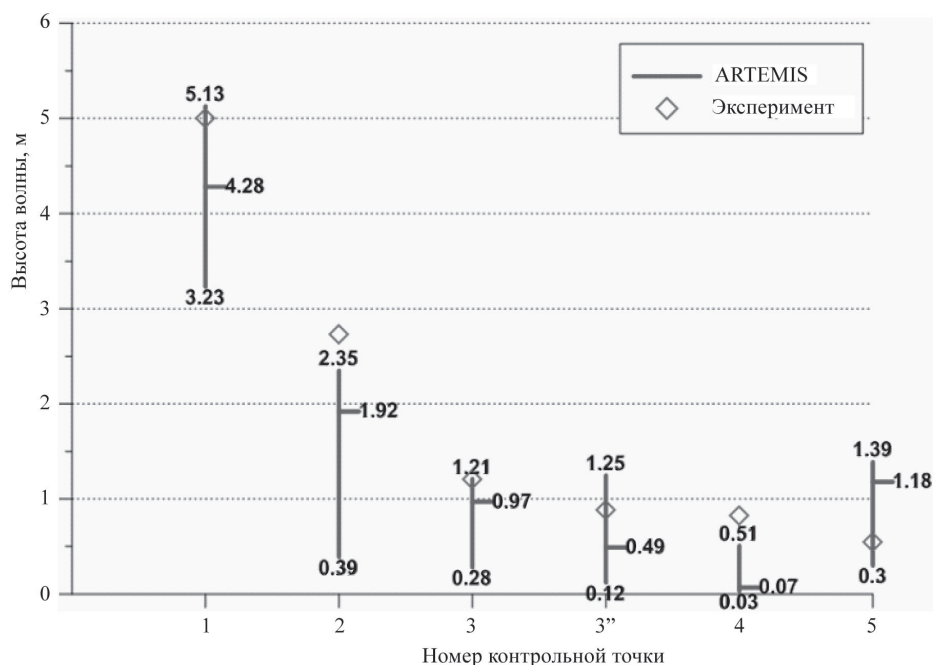


Рис. 8. Высоты волн в контрольных точках, промоделированные ARTEMIS и измеренные в физическом эксперименте, в пересчете на натуру.

Fig. 8. The wave heights at control points, modeled by ARTEMIS and measured in a physical experiment, in terms of nature.



Рис. 9. Пример волны цунами с указанием ее параметров.

Fig. 9. Example of a tsunami wave with its parameters.

где V — характерный масштаб скорости, L — определяющий размер, g — ускорение свободного падения.

Ограниченные размеры лабораторных установок и значительные длины и периоды волн цунами приводят к значительным трудностям в выборе масштаба исследований. Так, например, волны цунами с очагом землетрясения на глубине 1 км распространяются с скоростью около 100 м/с и при периоде 20 мин имеют длину около 120 км. При масштабе 1:100 глубина воды у волнопродуктора должна составлять около 10 м, что не достижимо для существующих лабораторных установок. При масштабе 1:500 глубина воды у волнопродуктора должна составлять 2 м, скорость распространения возмущений — 4.5 м/с, период — 54 с, длина волны — 240 м. При этом масштабе (1:500) для определения длины волны возмущения необходима длина волнового лотка не менее 300 м.

Генератор волны необходимой мощности должен обеспечивать однократное возмущение всей толщи воды в очаге. Подбирая размеры и мощность волнопродуктора, следует в методических экспериментальных исследованиях определить достижимые периоды и длины волн возникающих возмущений.

Экспериментальные исследования воздействия цунами на береговые сооружения, выполняемые в соответствии с критерием Фруда, возможно проводить с масштабом подобию 1:10. В этом случае исследуется процесс обрушения волны цунами с образованием бора, распространяющегося вглубь береговой зоны.

Исторически лабораторное моделирование цунами развивалось независимо от аналитических исследований. За время исследования явления цунами было придумано достаточно большое количество методов моделирования, но далеко не все методы получили широкое распространение. Наиболее актуальными методами моделирования цунами в настоящее время являются методы генерации волн с помощью [6, 7, 10, 11]:

- скользящего блока;
- специальных лопаток или щитов;
- пневматического цунами-генератора.

Метод скользящего блока (рис. 10) является одним из самых распространенных способов моделирования цунами. Он заключается в том, что твердотельный блок скользит по наклонной поверхности в воду и после столкновения образуется одиночная волна. Размер, материал и форма блоков могут быть подобраны индивидуально к конкретному испытанию. Кроме того, вместо твердотельного блока может быть использован грунт (рис. 11, см. вклейку).

В качестве примера моделирования цунами методом скользящего блока (рис. 10) можно привести эксперименты в волновом лотке гидродинамической лаборатории факультета промышленного и гражданского строительства в Имперском колледже Лондона [7]. Целью работы была количественная оценка расхождений результатов исследований при использовании наклонных рамп и блоков с различными геометрическими параметрами. Этими параметрами являются:

- коэффициент блокировки, отношение ширины рампы к ширине лотка;
- угол наклона плоскости скольжения блока;
- тип сопряжения наклонной плоскости с поверхностью воды (наклонная плоскость может быть сопряжена с поверхностью воды по радиусу).

В качестве лабораторной установки для проведения опытов использовался лоток длиной 24.5 м, шириной 0.6 м и глубиной 1 м. С одной стороны лотка была смонтирована рампа, с покрытием ПВХ наклонной плоскости скольжения. Блоки, выполненные также из ПВХ, монтируются в исходном положении на вершине рампы при помощи системы шкивов. Для сопряжения поверхности скольжения и поверхности воды радиусом 0.4 м был использован алюминиевый лист.

Всего было проведено 144 испытания с блоками различной массы и толщины. Проанализированы параметры амплитуды, высоты и периода волны. Также было проанализировано влияние трех основных геометрических параметров. Выяснилось, что влияние отношения ширины рампы к ширине лотка очень мало, при изменении угла наклона амплитуда волны может меняться примерно на 50.6 %, а высота волны на 55.0 %, период волны практически не изменялся. При варьировании сопряжением наклонной

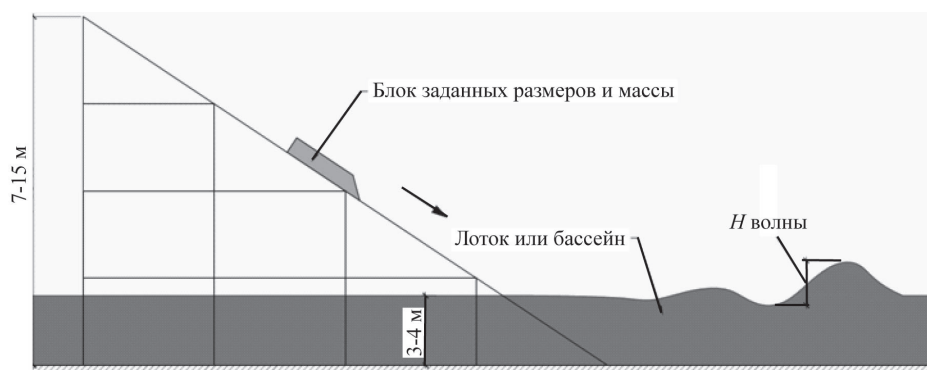


Рис. 10. Моделирование цунами методом скользящего блока.

Fig. 10. Tsunami modeling by the moving block method.

поверхности с водой амплитуда волн изменялась на 57.6 %, высота на 39.0 %, а период волны на 26.0 %. По результатам исследований были составлены эмпирические уравнения для прогнозирования параметров волны.

При моделировании цунами в Орегонском государственном университете [10] в качестве тела, генерирующего волну цунами, был использован грунт. Конструкция наклонной ramпы была смонтирована в бассейне длиной 48.8 м и шириной 26.5 м и с глубинами, варьирующимися в диапазоне от 0.3 до 1.2 м. Угол наклона поверхности скольжения ramпы, выполненной из листа нержавеющей стали, составил 27.1° . Длина поверхности скольжения 9.3 м. В качестве грунта была использована речная галька с размерами частиц от 6.35 до 19.05 мм, $d_{50} = 17.70$ мм и плотностью $\rho_g = 2.60$ т/м³. Объемная плотность грунта составляла $\rho_s = 1.76$ т/м³, пористость — $n = 0.31$, эффективный угол внутреннего трения — $\phi = 41^\circ$. Было проведено 64 опыта в 2006 г. и 24 в 2010 г. и по результатам исследований был собран большой объем данных, который позволил проанализировать скорость и форму распространения волн после контакта грунта с водой.

Следующий метод — это генерация волн с помощью специальных лопаток или щитов (рис. 12). Волна создается при помощи возвратно-поступательных движений специальных лопаток, смонтированных на дне лотка или с помощью щита во все сечение в торце лотка. Характеристики волны (высота и период волны) лимитированы глубиной лотка и ходом щита. Например, в Дельфтском университете, Нидерланды был создан лоток длиной 300 м, высотой 9.5 м и шириной 5 м. Размеры и оборудование позволяют генерировать волны высотой до 4.5 м.

Основной недостаток данного метода заключается в несоответствии характеристик волн, (форма и длина волны), полученных в лабораторных условиях реальным волнам цунами, поэтому результаты экспериментов не могут быть вполне достоверными и точными.

Самым приближенным к реальности на сегодня способом генерации серии волн с экстремально длинными периодами является использование пневматического цунамигенератора [6].

Впервые данный метод генерации волн был применен в исследовательском центре Валлингфорд, Великобритания в 2008 г. Были использованы пневматические волнопродукторы, которые моделировали приливы в устьях рек. Как оказалось, пневмонасосы идеально подходят для генерации волн экстремально большой длины. Изначально в 2009 г. были проведен опыт, в котором масса воды сначала закачивалась в вертикально стоящий бак вакуумным насосом, а затем под действием собственной массы обрушивалась обратно. При этом профиль и длину волны невозможно было регулировать каким-либо образом.

Через год установка была доработана и стало возможным генерировать волны заданной длины и различных форм, то есть волн цунами, начинающихся как с понижения уровня воды, так и с повышения.

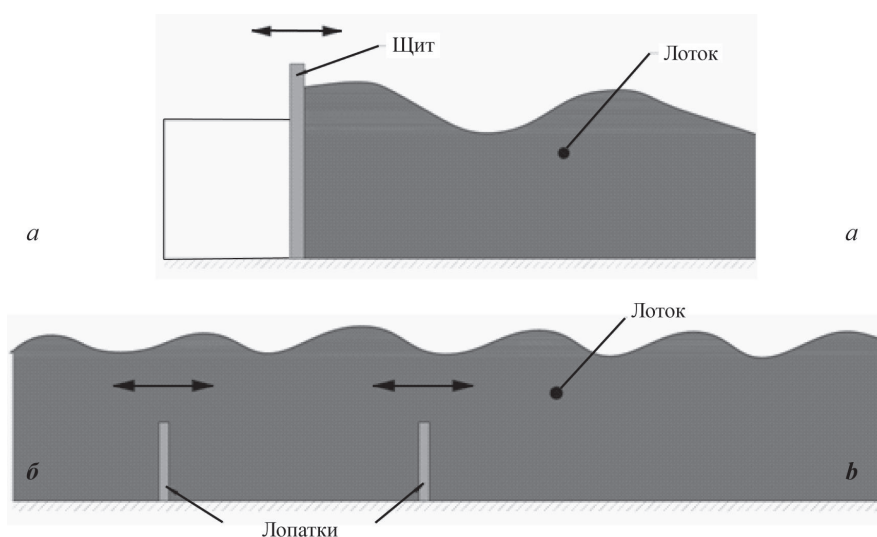


Рис. 12. Генерация волн цунами с помощью щита (а) или лопаток (б).

Fig. 12. Tsunami waves generation by shield (a) or wave paddles (b).

Пневматический цунамигенератор (рис. 13) представляет собой следующее. С одной стороны волнового лотка устанавливается бак, открытой частью к поверхности воды. Воздух из бака выкачивается насосом, и уровень воды в баке постепенно повышается. После заполнения бака, вода освобождается и генерирует волну. Воздушный клапан наверху бака с помощью компьютера позволяет задавать желаемую форму генерируемой волны.

Стартовая конфигурация установки: при включенном насосе клапан № 1 слегка приоткрыт, клапан № 2 полностью открыт (рис. 13, а).

Уровень воды постепенно повышается и становится выше уровня воды в лотке. Затем клапан № 2 перекрывается, уровень воды в баке продолжает повышаться, а поверхность воды рядом с баком начинает понижаться относительно уровня воды (образуется характерное понижения уровня воды перед первой волной цунами) (рис. 13, б).

После этого клапан № 2 открывается и формируется гребень волны. Все это время насос остается включенным, а клапан № 1 слегка приоткрытым (рис. 13, в).

В конце концов клапан № 2 возвращается в начальное положение, и цикл завершается (рис. 13, г). Далее последовательно генерируются вторая и последующие волны серии.

Физическое моделирование воздействия волн цунами на сооружения является важным способом определения степени возможного цунами риска и последствий. Соответствующее требование сформулировано в СП «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования и строительства». Физическое моделирование позволяет решить две основные задачи. Первая — определить степень устойчивости и прочности сооружений под воздействием цунами, и вторая — выполнить верификацию численных моделей цунами для заданных условий.

При физическом моделировании волн цунами полезно использовать опыт физического моделирования ветровых волн и их взаимодействия с сооружениями. В частности, при сравнении плановой картины волн в зоне сооружений, полученной в лаборатории и численным моделированием, следует использовать сравнение с учетом окрестностей контрольных точек.

Опыт моделирования волн цунами в лаборатории разными методами позволяет выделить наиболее подходящий технический метод — метод пневматического цунами-генератора. Выбор способа генерации

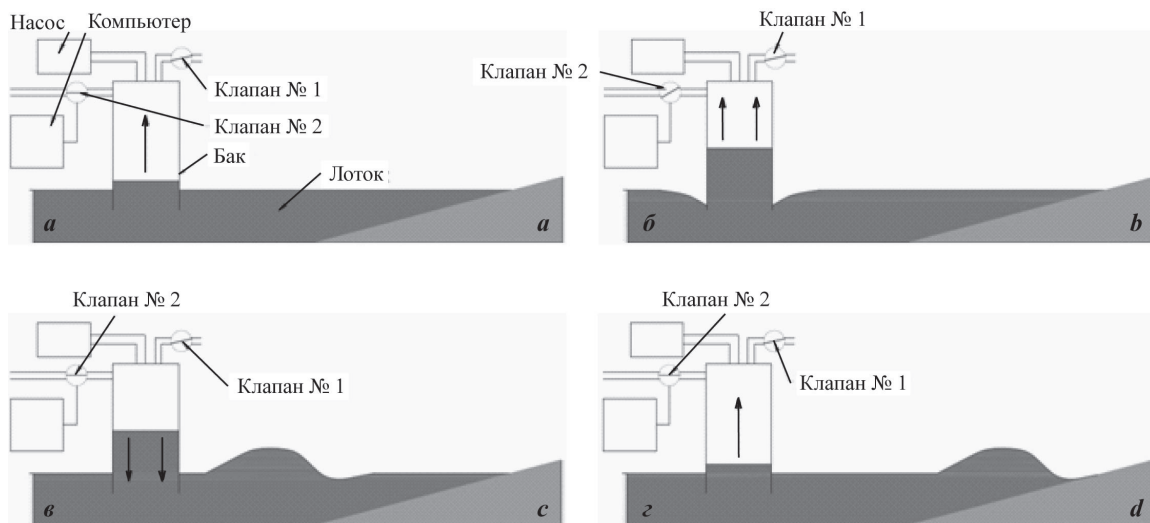


Рис. 13. Генерация волн цунами с помощью пневматического цунамигенератора в лаборатории HR Wallingford, этапы 1—4.

а — стартовая конфигурация установки; б — закачка воды в бак;

в — формирование волны; г — возвращение к стартовой конфигурации.

Fig. 13. Tsunami waves generation by means of a pneumatic tsunami generator in the HR Wallingford laboratory, steps 1—4.

a — the initial configuration of the installation (step 1); b — water injection into the tank (step 2);

c — wave formation (step 3); d — return to the starting configuration (step 4).

волны цунами зависит главным образом от поставленной задачи. Если для моделирования цунами, вызванных оползнями, наиболее оптимальным и точным способом генерации волны является метод скользящего блока, то для моделирования цунами, вызванных подводными землетрясениями, данный метод неприемлем.

References

1. SR 38.13330.2012. Set of rules. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships). *Updated version of SNiP 2.06.04—82**. M., Minregion RF, 2012. 112 p. (in Russian).
2. Divinsky B. V., Kosyan R. D., Podymov I. S., Pushkarev O. V. Extreme unrest in the north-eastern part of the Black Sea in February 2003. *Oceanology*. 2003, 23, 6, 948—950 (in Russian).
3. Zheleznyak M. I., Kantardgi I. G., Leontiev I. O., Shakhin V. M. Mathematical modeling of coastal processes of the Imeretinskaya lowland to justify bank protection measures. *Hydraulic engineering*. 2011, 10, 22—29 (in Russian).
4. Kantardgi I. G., Kuznetsov K. I. Full-scale measurements of waves during the determination of loads on marine hydraulic structures. *Engineering and construction magazine*. 2014, 4, 49—62 (in Russian).
5. Kantardgi I. G., Mordvintsev K. P. Numerical and physical modeling of sea port hydraulic structures in MSUCE. *Quarterly scientific journal "Science and Security"*. 2015, 2(15), 2—15 (in Russian).
6. Allsop W., Chandler I., Zaccaria M. Improvements in the physical modeling of tsunamis and their effects. *Proc. 5th Int. Conf. Coastlab14*. 29 September—2 October 2014. Varna, Bulgaria, 3—22.
7. Heller V., Spinneken J. Improved landslide-tsunami predictions: Effects of block model parameters and slide model. *J. Geophys. Res.* 2013, 118, 1489—1507.
8. Romano A., Guerrini M., Bellotti G. Laboratory generation of solitary waves: an inversion technique to improve available methods. *Proc. 4th Int. Conf. Coastlab12*. September 17—20, 2012, 456—464.
9. Tadepalli S., Synolakis C. E. The run-up of N-waves on sloping beaches. *Proc. R. Soc. Lond.* 1994, A, 445, 99—112.
10. Mohammed F., Fritz H. M. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. *J. Geophys. Res.* 2012, 117, C11015, doi:10.1029/2011JC007850.
11. Belyaev N. D., Lebedev V. V., Nudner I. S., Mishina A. V., Semenov K. K., Shchemelinin D. I. Experimental studies of tsunami-type waves effects on the ground at the marine gravity platforms bases. *Engineering and construction magazine*. 2014, 6(50), 4—12 (in Russian).

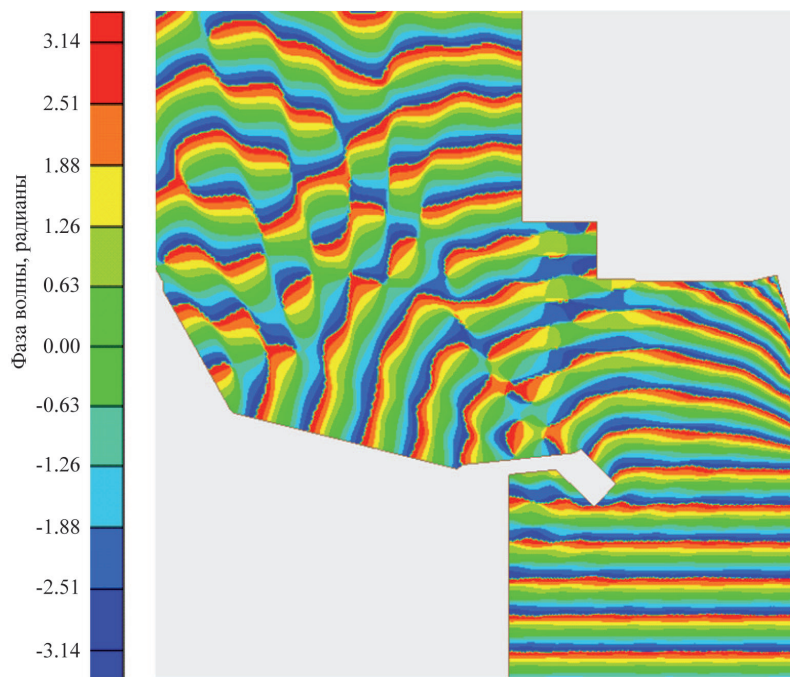


Рис. 6. Фазовая картина волн, рассчитанных моделью ARTEMIS, для условий физического эксперимента на модели порта, построенной для исследования воздействия волн Южного направления на восточную часть волнолома.

Fig. 6. The waves phase picture calculated by the ARTEMIS model for the physical experiment conditions on the port model constructed to study the effect of Southern waves on the eastern part of the breakwater.

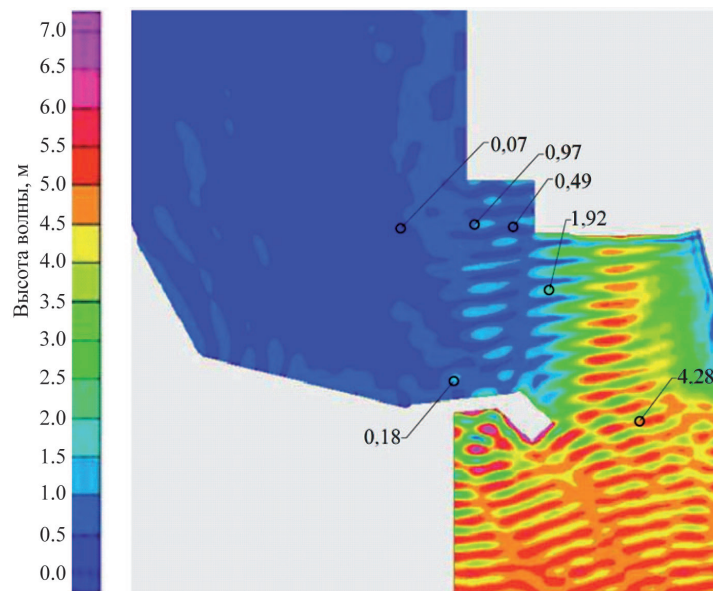


Рис. 7. Высоты волн, рассчитанных моделью ARTEMIS, для условий физического эксперимента на модели порта. Высоты волн показаны цветом. Числами показаны измеренные высоты волн в контрольных точках.

Fig. 7. The wave heights calculated by the ARTEMIS model, for the physical experiment conditions on the port model. The wave heights are shown in color. Numbers show the measured wave heights at the control points.

К статье Кантарджи И. Г., Акулинин А. Н. Физическое моделирование воздействия...

Kantardgi I. G., Akulinin A. N. Physical modeling...

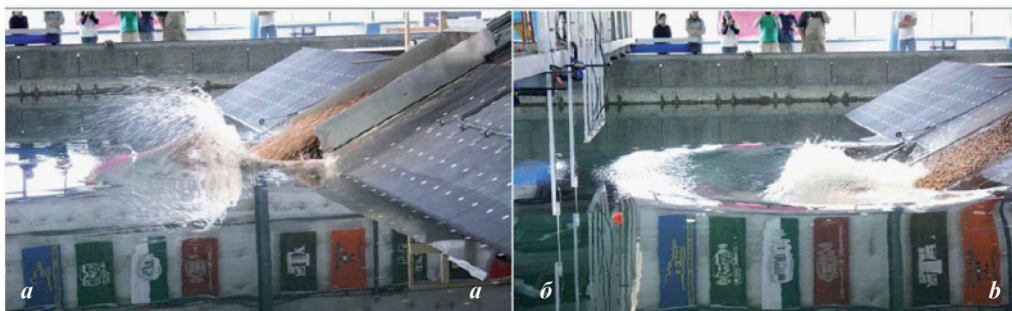


Рис. 11. Использование грунта для создания одиночной волны
в исследовательской лаборатории Орегонского государственного университета [9].

a — столкновение оползня с водой и формирование ударного кратера;

б — показан ведущий гребень волны за которым следует понижение уровня воды.

Fig. 11. The use of soil to create a single wave in the research laboratory of the Oregon State University [9].

a — collision of the landslide with water and the impact crater formation;

b — the leading wave crest which is followed by a lowering of the water level.