

Экспериментальные исследования длинных волн в НИУ МГСУ

Гусаров Р. Н.¹, аспирант,
Кантаржи И. Г.², доктор техн. наук, профессор,
Волгин Г. В.³, кандидат техн. наук, доцент (НИУ МГСУ)

Описаны основные составляющие теории волн цунами, проанализированы изменения профиля длинных волн на подходе к берегу, рассмотрены данные изменения длинных волн с точки зрения теории длинных волн, а также показаны основные практические (экспериментальные) исследования длинных волн в лаборатории гидравлики НИУ МГСУ.

Ключевые слова: длинные волны, волны цунами, волновой профиль, форма волны.

Experimental studies of long waves in the NRU MGSU

Gusarov R. N.¹, PhD student,
Kantarzhi I. G.², Prof., Dr. Sc.,
Volgin G. V.³, PhD (NRU MGSU)

It is presented the main components of the theory of tsunami waves, analyzes the changes of the long waves profile on approach to the shore, considers these changes from the point of view of the theory of long waves, and outlines the main practical (experimental) studies of long waves in the laboratory of hydraulics of NRU MGSU.

Keywords: long waves, tsunami waves, wave profile, wave shape, laboratory study.

Волны цунами могут приводить к последствиям, среди которых бывают глобальные разрушения, сопровождающиеся многочисленными человеческими жертвами. Так, в 2004 г. землетрясение в Индийском океане вызвало цунами [1], жертвами которого стали, по разным оценкам, от 225 000 до 300 000 человек. За последние сто лет центром географических данных NOAA [2] был зафиксирован 141 случай возникновения волны цунами, 123 из них привели к различным последствиям и нанесли заметный ущерб.

Защита населения береговых территорий, находящихся в цунамиопасных зонах, а также обеспечение безопасного функционирования береговых территорий являются важной задачей. Строительство гидротехнических сооружений, способных выдерживать нагрузки от таких волн, как цунами, позволит сделать безопаснее многие населённые пункты, находящиеся в цунамиопасных районах. Однако, на данный момент остаётся ряд пробелов в знаниях, касающихся поведения длинных волн на подходе к берегу и при взаимодействии их с различными сооружениями. Теоретические и экспериментальные исследования волновых воздействий могут помочь в решении данных проблем. В связи с этим в НИУ МГСУ проводится работа по изучению цунами [3],

а также по физическому моделированию длинных волн [4, 5].

Общие сведения о волнах цунами. Волны цунами — это длинные волны, период которых достигает от 10 до 30 мин, а длина волны во много раз превышает глубину в месте формирования волны и может достигать 200 км. Скорость распространения волн цунами описывается формулой Лагранжа и зависит только от глубины h

$$c = \sqrt{gh}.$$

Скорость волн цунами в открытом океане может достигать от 700 до 850 км/ч. Когда волна приближается к суше, скорость сильно уменьшается, также уменьшается и длина волн по мере уменьшения глубины воды, а высота волны возрастает (рис. 1).

Подходящая к берегу волна с нарастающей амплитудой движется медленнее, но при этом может достичь высоты до 15 – 30 м. Также при выходе на мелководье или при вхождении волны в устье реки может образоваться волновой бор. Бор представляет собой ударную волну, получившуюся в результате нелинейной трансформации цунами. В теории волн данные процессы изменения формы аналитически описываются как Римановы волны [6, 7].

При обрушении на берег волновой бор может привести к серьёзным разрушениям и жертвам. Такой бор образовался на побережье Таиланда во вре-

¹ romanzets@yandex.ru

² kantardgi@yandex.ru

³ volgin-gv@mail.ru

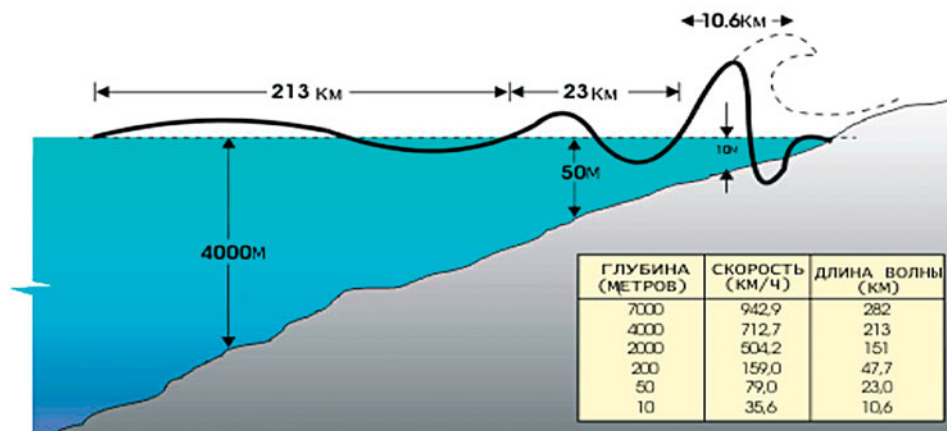


Рис. 1. Изменение характеристик волны цунами по мере её приближения к берегу

мя цунами в Индийском океане в 2004 г. (рис. 2), а также при вхождении цунами 2011 г. в р. Нака у г. Хитачинака, Япония (рис. 3) [7].

Волны цунами особенно опасны на тех территориях, где происходит сужение береговой полосы и уменьшение глубины, в таких местах высота волн значительно увеличивается. Также опасны устья рек, сформировавшийся волновой бор может пройти по реке далеко в глубь береговых территорий, как и произошло при цунами 2011 г. в Японии.

Изучение процесса наката волны цунами на берег является важной задачей. Как сказано ранее, волна трансформируется при подходе к берегу, изменяется её форма; это обусловлено целым рядом факторов, одними из которых являются рельеф берега, форма береговой полосы, изменение глубины на подходе к берегу. Накат волн и изменение формы волн на подходе к берегу описываются в теории длинных волн.

Изменение формы волны в теории длинных волн. Теория длинных волн используется в тех случаях, когда относительная глубина мала. В таких случаях вертикальными ускорениями пренебрегают, а кривизна траекторий частиц воды в волне не-

велика. В связи с этим вертикальная компонента движения не оказывает воздействия на распределение давления, являющееся гидростатическим. Поскольку давление считается гидростатическим, следовательно, вертикальное распределение скорости будет однородным. Исходя из этого взамен скоростей частиц можно рассматривать осреднённое по вертикали значение горизонтальной скорости. Как и в случае обобщённого уравнения Бернулли, когда применяются квадратичные члены, требуется вводить поправочный коэффициент.

Так как скорость волны равна \sqrt{gh} , следовательно, волновые частицы, переносящие в себе много энергии, пытаются догнать частицы, идущие впереди (рис. 4). В результате образуется вертикальная волновая стена, формирующая приливной бор. В реальности начало данного процесса происходит намного позже, чем это следует из теории длинных волн. Также из расчётов получается, что обрушение длинной волны при накате на берег происходит раньше, чем в той ситуации, когда обрушение зависело только от изменения глубины дна.



Рис. 2. Цунами в Таиланде, 2004 г. Пример обрушающегося бора на берегу

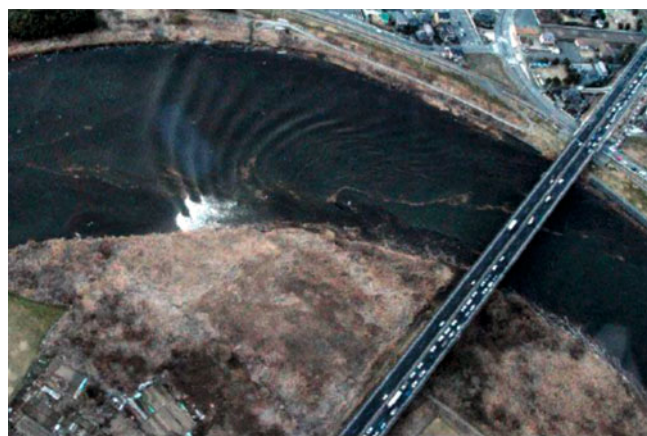


Рис. 3. Волна цунами в Японии, 2011 г. Волны идут против течения на р. Нака, пример волнообразного бора (идёт справа на лево)

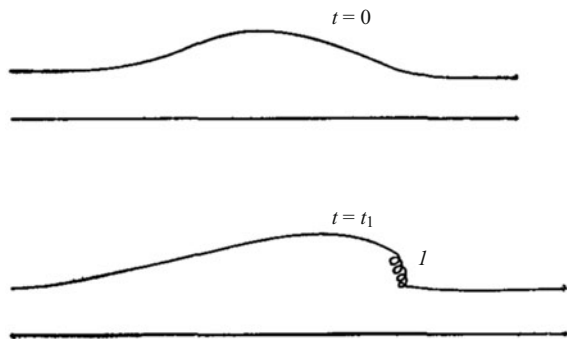


Рис. 4. Физическая иллюстрация парадокса длинных волн: l – волновой бор

Внутренние расхождения в теории длинных волн называется “парадоксом длинных волн” [8].

Лабораторные исследования цунами. Физическое моделирование является одним из важных направлений в изучении цунами. Для уточнений и верификации результатов численного моделирования требуются лабораторные исследования, а при проектировании гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах, необходимость проверки нагрузок на сооружения от волн цунами было подтверждено и в нормативных документах [9].

Последние несколько лет в НИУ МГСУ проводится работа по экспериментальному исследованию длинных волн в лаборатории гидравлики. На базе работ HR Wallingford [10] была запроектирована и собрана экспериментальная установка, способная моделировать волновые воздействия в гидравлическом лотке (рис. 5). Генерация волны происходит благодаря резкому обрушению объема набранной воды в резервуар, стоящий в лотке. Наполнение необходимым объемом воды происходит за счёт работы вакуумного насоса, подключённого к резервуару, который откачивает воздух из ёмкости, тем самым заполняя её водой (рис. 6).

Для волн цунами физическое моделирование выполняется по критерию Фруда (СП292.1325800.2017 [9], приложение Е).

Масштаб моделирования выбирается таким, чтобы значения числа Рейнольдса находились в зоне автомодельности по этому числу. Для выполнения данного условия при исследованиях масштаб моделирования был принят 1:100.

Весной 2021 г. были проведены первые эксперименты (рис. 7). Основными задачами первых испытаний были контроль работы установки, проверка её надёжности и тестирование методики эксперимента. Задачи были полностью выполнены, однако у экспериментальной установки было выявлено слабое место, которое требовалось исправить. Проблема заключалась в малой мощности использованного вакуумного насоса. Во время испытаний было невозможно выполнить полное на-



Рис. 5. Экспериментальная установка по моделированию волн цунами в НИУ МГСУ

полнение резервуара водой, максимально вода могла подняться на уровень 1/3 от его высоты, в связи с этим волны, полученные в лотке, были малы (высота волн была около 2 см).

Последующая работа была нацелена на модернизацию экспериментальной установки, требовалось получение волн с большей высотой для того, чтобы было возможно точнее фиксировать волновые характеристики во время опытов. Был подобран более мощный вакуумный насос ($N = 300$ Вт); помимо этого было решено провести исследования зависимости высоты и формы волны от габаритов выпускного отверстия, через которое изливается волна, в связи с этим был подготовлен ещё один резервуар с увеличенной вдвое площадью выпускного отверстия.

К концу осени 2021 г. были проведены три сравнительные серии опытов:

- с насосом № 1 ($N = 12,5$ Вт) и резервуаром № 1 (выпускное отверстие $20,4 \times 4$ см);
- с насосом № 2 ($N = 300$ Вт) и резервуаром № 1;
- с насосом № 2 и резервуаром № 2 (выпускное отверстие $20,4 \times 8$ см).

Результаты всех проведённых осенних испытаний были сведены в общую таблицу.

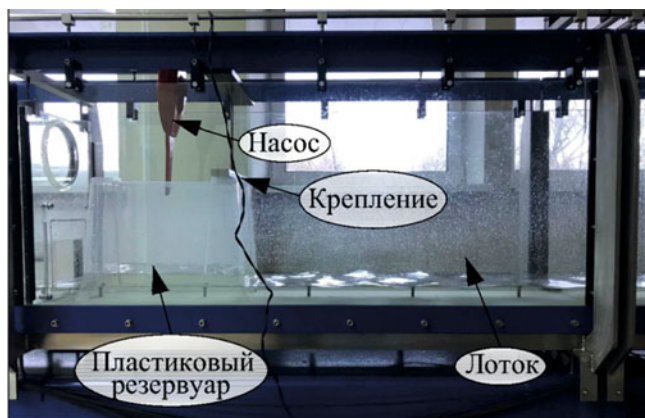


Рис. 6. Экспериментальная установка с обозначением основного оборудования



Рис. 7. Проведение эксперимента по моделированию цунами осенью 2021 г.

Новый вакуумный насос продемонстрировал лучшую работу. Во время испытаний стало возможно полностью откачивать воздух из резервуара и наполнять его целиком водой; это привело к тому, что для генерации волн использовался больший объём накопленной воды и за счёт этого получают волны большей высоты (5 – 6 см).

Увеличение выпускного отверстия, наоборот, отрицательно сказалось на генерации волн. Полученные волны в третьей серии опытов достигали высоты не более 3 см с учётом того, что в данной

серии работал уже обновленный насос и проблем с объёмом воды в резервуаре не было.

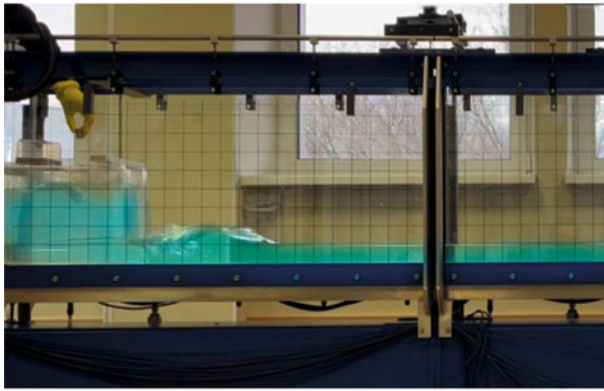
Проанализировав полученные результаты, приняли решение продолжать работу с насосом № 2 и резервуаром № 1 (с меньшим выпускным отверстием).

Следующим этапом было более детальное исследование формы полученных волн, проведение анализа сходства с замеренными цунами.

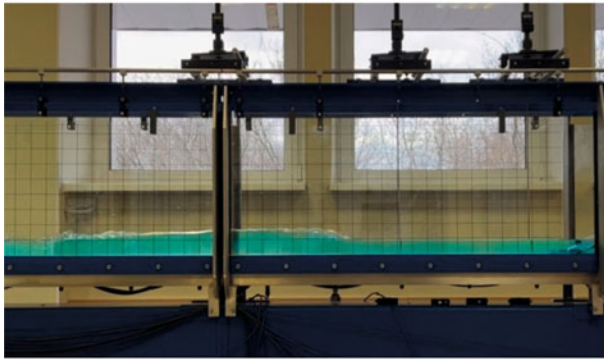
В марте 2022 г. была проведена серия экспериментов с различными глубинами воды в лотке (рис. 8, 9).

Результаты испытаний, проведённых в НИУ МГСУ осенью 2021 г.

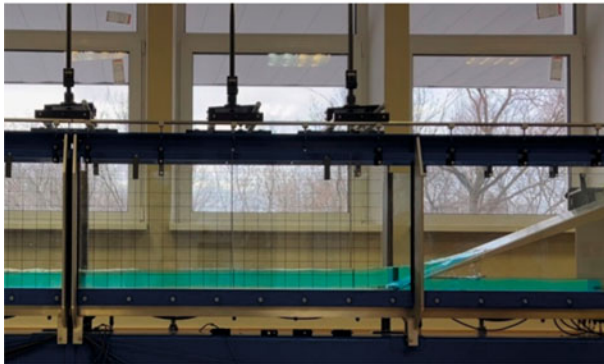
| Номер испытания | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Серия опытов № 1 | | | | | |
| Уровень воды в лотке до включения насоса, мм | 85 | 75 | 65 | 55 | 55 |
| Уровень воды в лотке после заполнения резервуара, мм | 75 | 64 | 52 | 48 | 48 |
| Уровень воды, полученный при генерации волны, мм | 92 | 80 | 68 | 65 | 62 |
| Высота волны, мм | 17 | 16 | 16 | 17 | 14 |
| Серия опытов № 2 | | | | | |
| Уровень воды в лотке до включения насоса, мм | 170 | 140 | 100 | 90 | 85 |
| Уровень воды в лотке после заполнения резервуара, мм | 130 | 91 | 74 | 70 | 67 |
| Уровень воды, полученный при генерации волны, мм | 188 | 145 | 116 | 102 | 99 |
| Высота волны, мм | 58 | 54 | 42 | 32 | 32 |
| Серия опытов № 3 | | | | | |
| Уровень воды в лотке до включения насоса, мм | 180 | 150 | 140 | 120 | 105 |
| Уровень воды в лотке после заполнения резервуара, мм | 170 | 143 | 133 | 110 | 100 |
| Уровень воды, полученный при генерации волны, мм | 198 | 169 | 160 | 130 | 115 |
| Высота волны, мм | 28 | 26 | 26 | 20 | 15 |



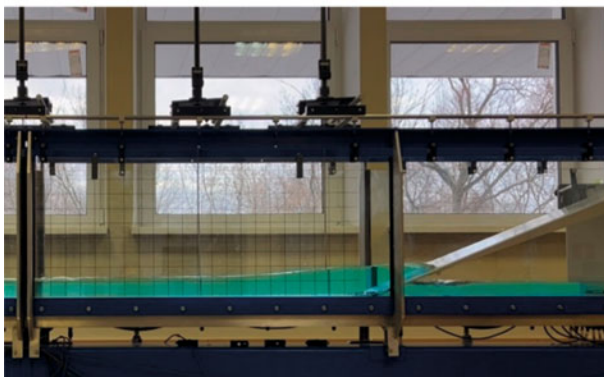
а)



б)



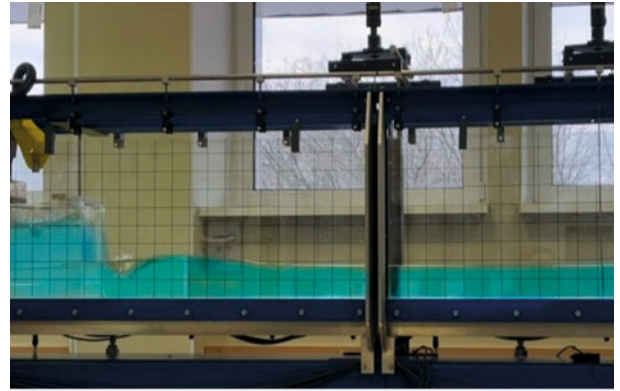
в)



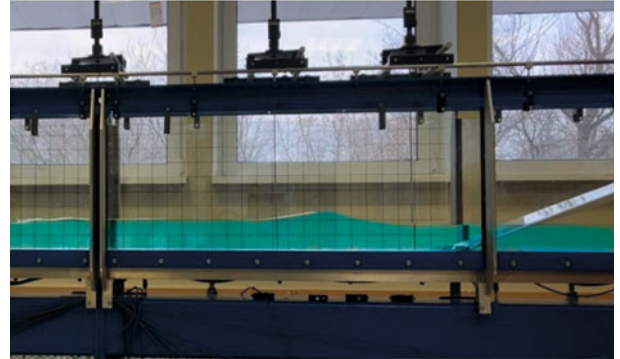
з)

Рис. 8. Формирование (а), распространение (б) и накат на берег (в, з) волны при глубине лотка 5 см

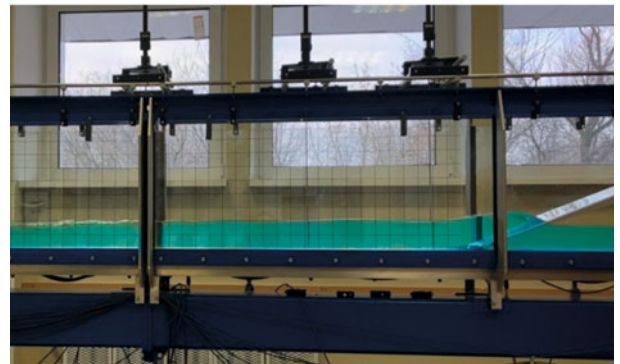
Фиксация результатов осуществлялась установленным на штатив фотоаппаратом, который покадрово снимал получившиеся волны в лотке. Также для удобства измерения волн на лоток была установлена сетка с ячейками 5×5 см.



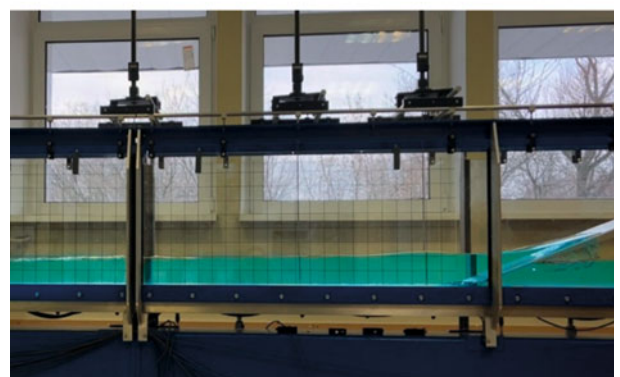
а)



б)



в)



з)

Рис. 9. Формирование (а), распространение (б) и накат на берег (в, з) волны при глубине лотка 10 см

При анализе полученных снимков можно сделать вывод, что при разной глубине воды в лотке образуются различные по форме волны. Так, при глубине воды в лотке 5 см была получена модель волнового бора (рис. 8), а при глубине 10 см волна

более похожа на кноидальную (рис. 9). Волны отличаются друг от друга на протяжении всего прохождения в лотке, начиная от формирования и заканчивая выходом на наклонную поверхность, имитирующую берег. Из чего можно сделать вывод, что при большой глубине воды в лотке получается модель, похожая на цунами в открытом море, а при уменьшении глубины в лотке получаются ударные волны (бор), подобные трансформированным волнам, выходящим на берег.

Следующим этапом планируется провести исследования по зависимости высоты и формы волны от габаритов сечения клапана для подачи воздуха в резервуар. Данный клапан открывается при полном наполнении резервуара водой, и за счёт него происходят обрушение набранного объёма воды и генерация волны в лотке.

Выводы

1. Исследования наката волны является важной частью изучения поведения длинных волн, так как волна может вести себя совершенно по-разному, в зависимости от береговых условий.

2. Помимо теоретических исследований, не менее важна экспериментальная составляющая в изучении волн цунами, а именно физическое моделирование данных волн, в связи с необходимостью верификации результатов численных методов моделирования, а также тестирования моделей воздействия волн на проектируемые гидротехнические сооружения, в соответствии с нормативными документами.

3. В НИУ МГСУ появилась компактная экспериментальная установка, позволяющая моделировать различные по форме длинные волны.

4. Экспериментально подтверждено, что глубина воды в лотке при моделировании волн цунами влияет на форму генерируемой волны.

5. Предстоящий этап научных исследований по физическому моделированию будет связан с изучением зависимости высоты и формы волны от габаритов сечения клапана для подачи воздуха в резервуар экспериментальной установки.

Список литературы

1. *Кайстренко В. М., Разжигаева Н. Г., Королёв Ю. П., Полушин Н. В., Зайцев А. И.* Проявление цунами 26 декабря 2004 года на побережье Индонезии // Вестник ДВО РАН. 2006. № 1. С. 123 – 130.
2. *Global Historical Tsunami Database* (электронный ресурс) / NOAA National Geophysical Data Center. — <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu/db.shtml>.
3. *Кантаржи И. Г., Губина Н. А., Гусаров Р. Н.* Воздействие длинных волн на береговые гидротехнические сооружения // Гидротехническое строительство. 2021. № 2. С. 48 – 52.
4. *Кантаржи И. Г., Акулинин А. Н.* Физическое моделирование воздействия волн цунами на береговые сооружения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10. № 3. С. 783 – 790.
5. *Гусаров Р. Н.* Физическое моделирование волн цунами методом пневматического цунамигенератора // Сборник тезисов докладов Всероссийской научной конференции “Моря России: Год науки и технологий в РФ — Десятилетие наук об океане ООН”. 2021. С. 235 – 236.
6. *Родин А. А., Пелиновский Е. Н.* Динамика длинных волн в прибрежной зоне моря с учётом эффектов обрушения. — Нижний Новгород, 2014. С. 5 – 22.
7. *Стокер Дж.* Волны на воде. — М.: ИЛ, 1959. — С. 618.
8. *Ле Меоте Б.* Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. С. 277 – 278.
9. *Свод правил 292.1325800.2017.* Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. 2017.
10. *Rossetto T., Allsop W., Charvet I., Robinson D.* Physical modelling of tsunamis using a new pneumatic wave generator // Coastal Engineering. 2011. № 58. P. 517 – 527.

Журнал включен в перечень ВАК.
Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ № ФС77-37646 от 1 октября 2009 г.
Рег. орган – Роскомнадзор
При перепечатке ссылка на журнал
«Гидротехническое строительство» обязательна.

Сдано в набор 29.11.2022. Подписано в печать 13.01.2023. Дата выхода в свет 25.01.2023

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Печ. л. 8,5. Цена свободная

Оригинал-макет выполнен в издательстве “Фолиум”
127411, Москва, Дмитровское ш. 157, тел/факс 8(499) 258-08-28
Internet: <http://www.folium.ru>, **E-mail:** info@folium.ru
Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”