



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.122

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-8>

Физическое моделирование в развитие нормативной базы в транспортном строительстве

**Галина Вячеславовна Тлявлиная***«Научно-исследовательский центр «Морские берега», обособленное подразделение АО «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства», Сочи, Россия.*✉ TlyavlinaGV@Tsnii.com.**Галина ТЛЯВЛИНА****АННОТАЦИЯ**

Рассматривается применение метода физического моделирования для обоснования нормативных требований по проектированию конструкций инженерной защиты транспортных сооружений от волнового воздействия на примере трёх выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Описаны экспериментальные исследования взаимодействия волн с сооружениями, выполненные в волновых бассейнах и лотках.

Целью исследований является научное обоснование требований нормативных документов по проектированию берегоукрепления для обеспечения безопасной эксплуатации земляного полотна железных и автомобильных дорог, опор мостов и других транспортных сооружений, эксплуатируемых в условиях волнового воздействия на берегах морей и озёр. Нормируемыми параметрами при этом в зависимости

от гидрологических (ветро-волновой и уровенный режимы акватории и течения), геолого-морфологических и литодинамических (динамика береговой зоны) условий являются типы применяемых защитных конструкций, плановые и конструктивные решения защитных гидротехнических сооружений (месторасположение, высотные отметки, габариты), а также применяемые материалы и изделия для строительства (в том числе требования к качеству).

Опытно-конструкторская часть описанных исследований выполнена методом физического (гидравлического) моделирования в волновых бассейнах и лотках. Физическое моделирование выполнялось в соответствии с теорией подобия. При этом в волновых лотках решается «плоская задача», а в волновых бассейнах – «пространственная задача».

Ключевые слова: берегозащитные сооружения, волновой бассейн, волновой поток, земляное полотно, нормативная база, физическое моделирование.

Для цитирования: Тлявлиная Г. В. Физическое моделирование в развитие нормативной базы в транспортном строительстве // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-8>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нормативной базы в целом и, в частности, в области транспортного строительства, основывается на научных исследованиях [1]. Научные исследования в развитие нормативной базы в области проектирования инженерной защиты транспортных сооружений на берегах морей выполняются в основном путём натурных наблюдений и обследований [2–5] и методом физического моделирования (лабораторные исследования в волновых бассейнах и лотках) [6–9].

Недостаточное научное обоснование положений нормативных документов приводит к потере надёжности строительных конструкций либо к снижению эффективности их работы, что в свою очередь влечет за собой крупные финансовые потери. В этой связи исследования, в том числе экспериментальные, в обеспечение обоснования требований строительных норм и стандартов имеют очень важное значение.

Цель работы – обобщение серии исследований, заключающихся в выявлении новых аспектов нормирования (методы расчета волногасящих сооружений на приливных морях, методика расчета массы элементов крепления волногасящих откосов при косом подходе волн, а также расчет волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой), проведении экспериментальных исследований на физических моделях и подготовке предложений для внесения в нормативную базу в области инженерной защиты транспортных сооружений от гидродинамических воздействий водной среды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования в целях развития нормативной базы в области взаимодействия морских волн с конструкциями инженерной защиты транспортных сооружений (земляного полотна железных и автомобильных дорог, опор мостов и других) проводятся методом физического моделирования в волновых бассейнах и лотках. Поэтапно решаются следующие задачи:

- анализ состояния исследуемой проблемы;
- разработка программы работ, включая методику исследований;
- проведение лабораторных исследований в волновых лотках и на пространственных моделях в волновых бассейнах;

- разработка предложений по использованию полученных результатов в нормативно-технических документах по рассматриваемому вопросу.

Данная работа основана на обобщении отдельных результатов научных исследований, проведённых под руководством автора за последние годы Научно-исследовательским центром «Морские берега» в целях развития нормативной базы в области инженерной защиты земляного полотна железных и автомобильных дорог, а также опор мостов от волнового воздействия. Данные исследования проведены по заданию ФАУ «ФЦС», утверждённому Минстроем России [1]. В их числе следующие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР): «Разработка методов расчёта волногасящих сооружений на приливных морях», «Исследования устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений» и «Исследование волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой». Некоторые результаты данных работ были использованы для разработки новых сводов правил и национальных стандартов.

Опытно-конструкторская часть исследований выполнялась методом физического (гидравлического) моделирования в волновых бассейнах и лотках в соответствии с теорией подобия. При этом обеспечивалось как геометрическое подобие (в соответствии с выбранными масштабами), так и динамическое (подобие поверхностных и объёмных сил).

Физическое моделирование проводилось по методике, изложенной в [8, 9]. При этом, в качестве основного критерия подобия следует использовать число Фруда, то есть необходимо обеспечить равенство чисел Фруда объекта и модели [9]:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} = idem, \quad (1)$$

где Fr – число Фруда;

V – характерная скорость (например, скорость распространения волны);

g – ускорение свободного падения;

L – характерный линейный размер (например, длина волны).

Так как исследовалось волновое воздействие на откосы набросных сооружений (из камня или фасонных массивов), также обеспечивалось на модели выполнение условия

$$Re \geq 1000, \quad (2)$$



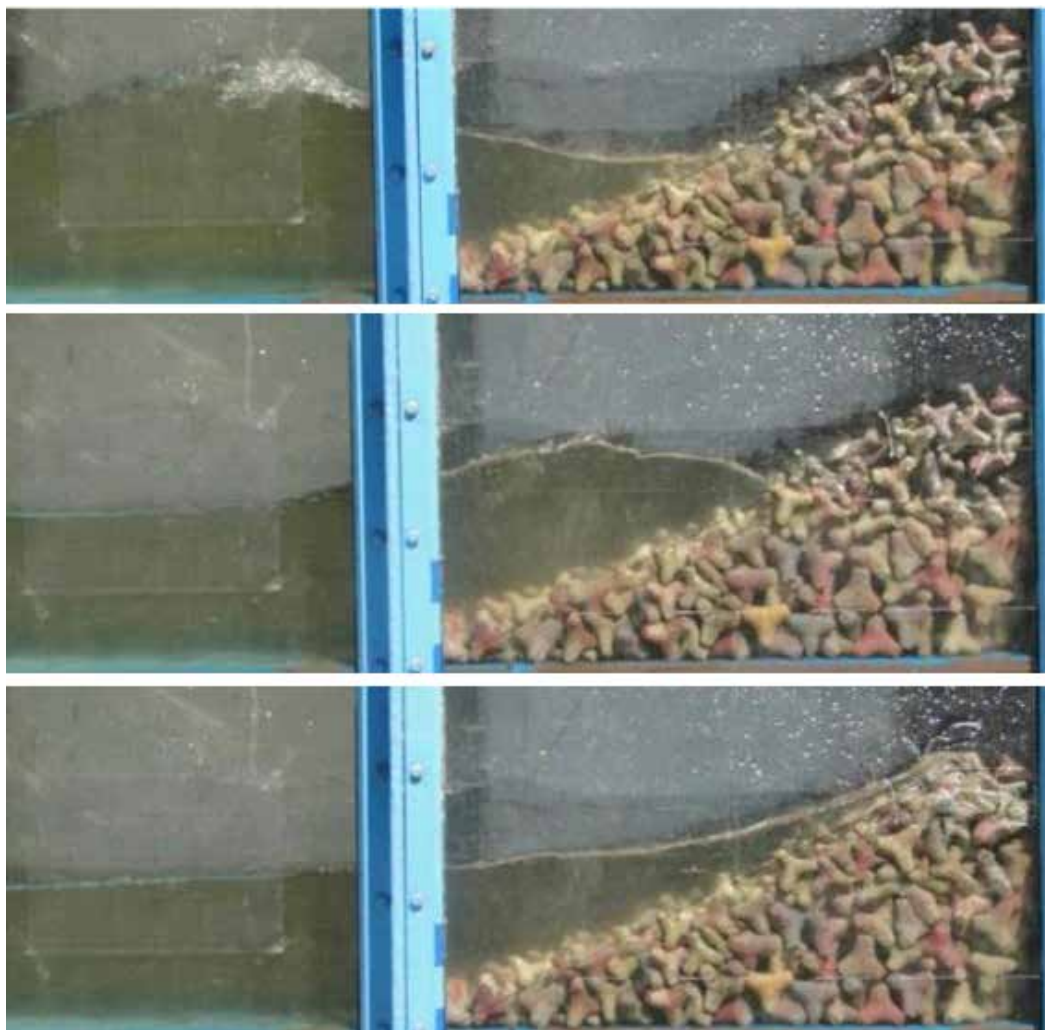


Рис. 1. Лабораторные исследования волногасящих берм из фасонных массивов для защиты опор мостов, а также линейных сооружений (земляного полотна железных дорог) в волновой лотке в условиях приливов [выполнено автором].

где Re – число Рейнольдса, определяемое по формуле

$$Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (3)$$

где V – характерная скорость (например, скорость распространения волны);

L – характерный линейный размер (например, диаметр элементов наброски);

ν – кинематическая вязкость жидкости.

В процессе исследований выполнялись измерения следующих физических характеристик: среднего уровня воды в лотке или бассейне; параметров волн (высоты, длины и периода); волнового давления; скорости течений; профилей берегового склона; расхода наносов; крупности наносов. Также в опытах проводился анализ устойчивости набросных элементов или отдельных конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработка методов расчёта волногасящих сооружений на приливных морях [10]

Объектом исследований являлись волногасящие сооружения – набросные бермы и дамбы различной конструкции (из камня, из горной массы, из фасонных массивов) и галечные пляжи в условиях приливно-отливных явлений [11].

В задачи исследования входило:

- получение экспериментальных данных по устойчивости и эффективности волногасящих сооружений в условиях приливов;
- разработка теоретических основ методики расчёта параметров волногасящих сооружений, проектируемых на берегах приливных морей;



Рис. 2. Лабораторные исследования конструкций для защиты линейных сооружений (земляного полотна железных дорог) в волновом бассейне [выполнено автором].

- формулирование положений для внесения изменений в существующую нормативную базу.

Для решения поставленных задач в лабораторных условиях в волновом бассейне и лотке было выполнено несколько серий экспериментов (рис. 1 и 2) [11]. При этом изучалось влияние как приливов, так и отливов на устойчивость и волногасящую эффективность конструкций.

Выбор параметров волнения для изучения устойчивости конструкций исследуемых сооружений осуществлялся с учётом приливов [10].

Проведённые опыты легли в основу методики, которая используется при назначении плановых и конструктивных параметров волногасящих сооружений, используемых для защиты земляного полотна автомобильных и железных дорог, опор мостов и т.п. от волнового воздействия (таких, как бермы из камня, фасонных массивов или горной массы, а также пляжей).

Анализ проведённых исследований показал, что «расчёт параметров и устойчивости галечных пляжей, бермы из горной массы, фасонных массивов и камня, возводимых на приливных морях, не допускается проводить по нормам, разработанным для бесприливных

морей, а именно, по СП 277.1325800.2016» [10]. Положения данного норматива могут быть взяты за основу в части расчёта волногасящих сооружений, но со значительными корректировками в части расчёта волногасящих сооружений.

На основе проведённых работ [12–14] по исследованию взаимодействия морских волн с волногасящими сооружениями с учетом приливно-отливных явлений под руководством автора разработан новый свод правил СП 416.1324800.2018.

Исследования устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений

В данном исследовании изучалась устойчивость защитного крепления волногасящих откосов при различных углах подхода волн. Такие исследования особенно актуальны для проектирования конструкций инженерной защиты опор мостов [15].

Устойчивость откосов при волновом воздействии изучается исследователями на физических моделях, в основном при фронтальном волновом воздействии [16; 17].

В ходе данного исследования на моделях в волновом лотке воспроизводились случаи





Рис. 3. Лабораторные исследования откосного волногасящего сооружения из фасонных массивов (тетраподов) при фронтальном подходе волн в волновом лотке [выполнено автором].



Рис. 4. Волновой бассейн с поворотным кругом для лабораторных исследований при различных углах подхода волн к сооружениям [выполнено автором].

фронтального подхода волн к гидротехническому сооружению (рис. 3), а в волновом бассейне, оснащённом поворотным кругом для изменения угла подхода волн (рис. 4), – случаи косоугольного подхода волн к гидротехническому сооружению. Исследовалась волновая картина у волногасящих откосов при воздействии косоподходящих волн (рис. 5). Основной задачей исследований была оценка влияния интерференции подходящих под углом волн и отражённых волн на увеличение высоты волн и, как следствие, увеличение волнового воздействия на элементы

крепления откосов (относительно фронтального подхода).

Результаты экспериментов показали существенное отличие от расчётов, выполненных согласно СП 38.13330.2018 в части массы предельного равновесия элементов крепления (камня или фасонных массивов). Получено, что в случае нефронтального подхода волн к волногасящему откосу имеет место интерференция отражённых и подходящих волн.

Разработанная на основании исследований на гидравлической модели методика



Рис. 5. Лабораторные исследования откосного волногасящего сооружения из камня в волновом бассейне [выполнено автором].

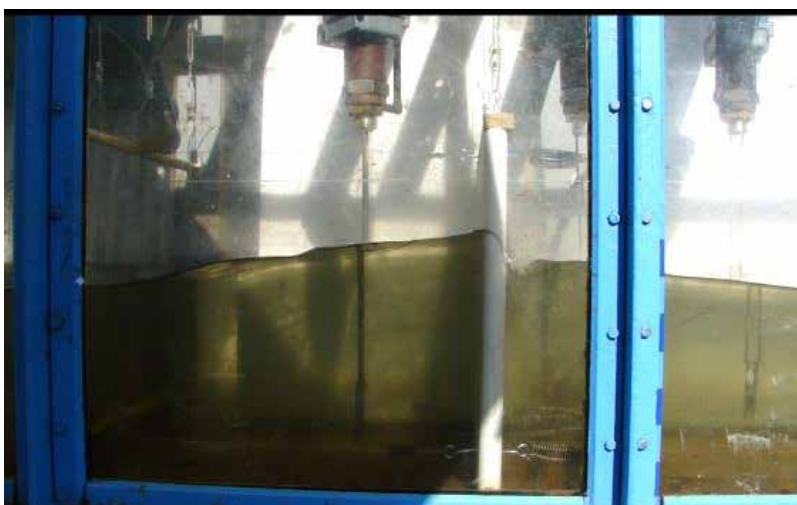


Рис. 6–7. Экспериментальные исследования взаимодействия волн со сквозными стенами в волновом лотке [выполнено автором].

- Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 68–75

Тлявлиня Г. В. Физическое моделирование в развитие нормативной базы в транспортном строительстве

расчёта массы элементов крепления волногасящих откосов может быть рекомендована для корректировки действующих нормативных документов по рассматриваемому вопросу, а именно СП 38.13330.2018 и СП 277.12325800.2016. Были подготовлены предложения по использованию результатов НИОКР в нормативных документах.

Исследование волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой [18]

В данной работе исследовался процесс волнового воздействия на волногасящие сооружения с волновой камерой.

Целью исследований было получение экспериментальных данных по волновым нагрузкам на исследуемые конструкции для последующего сравнения с результатами расчётов по нормативной методике СП 38.13330.2018, а также для корректировки и уточнения нормативных методов расчёта исследуемых конструкций.

По данным проведённых лабораторных исследований (рис. 6–7) выполнены корректировка и уточнение используемых в действующих нормативах формул для расчёта взаимодействия волн со сквозными стенами [19, 20].

Кроме того, полученные экспериментальные данные представляется возможным использовать для развития и совершенствования нормативной базы в транспортном строительстве.

АПРОБАЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты проведённых исследований послужили основой для составления соответствующих разделов (расчёт волногасящих сооружений на приливных морях, расчет массы элементов крепления волногасящих откосов при косом подходе волн, а также расчет волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой) следующих нормативных документов:

- СП 277.1325800.2016 Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования (внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство». Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 963/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г.);

- СП 416.1324800.2018 Инженерная защита берегов приливных морей. Правила проектирования (Внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство». Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 ноября 2018 г. N 781/пр и введен в действие с 31 мая 2019 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна проведённых исследований заключается в том, что выявлены новые аспекты нормирования (методы расчета волногасящих сооружений на приливных морях, методика расчета массы элементов крепления волногасящих откосов при косом подходе волн, а также расчет волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой); подготовлены и проведены экспериментальные исследования на физических моделях; на основании выполненных исследований подготовлены предложения для внесения в нормативную базу в области инженерной защиты транспортных сооружений от гидродинамических воздействий водной среды.

Представленные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) являются примером научного обоснования положений нормативных документов и национальных стандартов в области инженерной защиты транспортных сооружений от волнового воздействия. Разработанные на основе подобных НИОКР нормативные требования позволят обеспечить надёжность и эффективность конструкций инженерной защиты, что в свою очередь положительно скажется на общей безопасности объектов транспорта.

Разработанные по результатам приведённых в настоящей работе исследований методы расчёта волногасящих сооружений на приливных морях, методика расчёта массы элементов крепления волногасящих откосов при косом подходе волн, а также расчёт волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой, заполнят значительную часть пробелов в нормативной документации в области инженерной защиты мостовых переходов, земляного полотна железных и автомобильных дорог, а также других транспортных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тлявлиня Г. В., Тлявлин Р. М. Техническое регулирование в области проектирования берегозащитных сооружений // Гидротехника. – 2018. – № 3. – С. 70–72. [Электронный ресурс]: <https://tsniis.choose.digital/technicoskoe-regulirovanie-v-oblasti-proektirovaniya-beregozashhitnyx-sooruzhenij/>. Доступ 22.03.2023.
2. Ashpiz, E., Savin, A., Tlyavlin, R., Tlyavlina, G. Urgent issues of anti-deformation measures to protect coastal railways. Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019), 2019, Vol. 2, pp. 841–852. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43226040>. Доступ 22.03.2023.
3. Тлявлин Р. М. Проблемы обследования и мониторинга сооружений инженерной защиты береговой зоны // Олимпийское наследие и крупномасштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций: Материалы XI Международной науч.-практ. конференции (г. Сочи, 14–15 ноября 2019 г.). – Сочи: РИЦ ФГБОУ ВО «СГУ», 2019. – С. 244–248. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41552411>. Доступ 22.03.2023.
4. Ашпиз Е. С., Савин А. Н., Явна В. А. Защита железнодорожного пути линии Туапсе-Адлер от опасных склоновых процессов // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 7. – С. 52–57. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29670918>. Доступ 22.03.2023.
5. Тлявлин Р. М. Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земельного полотна от волнового воздействия // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209.
6. Горлова А. А., Иваненко А. Н., Иваненко Н. А., Макаров К. Н. и др. Некоторые вопросы проектирования морских гидротехнических сооружений. – Сочи: Сочинский государственный университет, 2015. – 230 с. ISBN 978-5-88702-550-6.
7. Рогачко С. И., Шунько Н. В. Научное сопровождение проектов морских гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 11. – С. 5–10. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47241528>. Доступ 22.03.2023.
8. Frostick, L. E., McLelland, S. J., Mercer, T. G. Users guide to physical modelling and experimentation. London: Taylor & Francis Group, 2011, 272 p. DOI: 10.1201/b11335. ISBN 9780415609128.
9. Шарп Д. Д. Гидравлическое моделирование / Перевод с англ. Л. А. Яскина; Под ред. С. С. Григоряна. – М.: Мир, 1984. – 280 с. [Электронный ресурс]: <https://rusist.info/book/5998066>. Доступ 22.03.2023.
10. Тлявлиня Г. В., Тлявлин Р. М. Экспериментальные исследования эффективности волногасящих сооружений на приливных морях // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования: Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 23–28 сентября 2019 года. – Севастополь: ФГБУ науки, ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», 2019. – С. 296–298. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41144863>. Доступ 22.03.2023.
11. Тлявлиня Г. В., Петров В. А., Тлявлин Р. М. Особенности проектирования морских берегозащитных сооружений на приливных морях // Транспортное строительство. – 2016. – № 4. – С. 4–6. [Электронный ресурс]: <https://rucont.ru/efd/427489> [платный доступ].
12. Петров В. А., Тлявлиня Г. В., Ярославцев Н. А. Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2022. – № 3. – С. 54–70. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-3-54-70.
13. Тлявлиня Г. В. Лабораторные исследования волногасящих бERM из камня и фасонных массивов для защиты берегов приливных морей // Транспортное строительство. – 2022. – № 1. – С. 25–28. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48551701>. Доступ 22.03.2023.
14. Тлявлиня Г. В., Макаров К. Н., Тлявлин Р. М. Обоснование основных положений свода правил по защите берегов приливных морей // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 1. – С. 42–46. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36921765>. Доступ 22.03.2023.
15. Лищишин И. В., Тлявлиня Г. В., Тлявлин Р. М. Исследования для проектирования мостовых переходов в особо сложных гидрологических условиях // Гидротехника. – 2010. – № 3. – С. 36–37. [Электронный ресурс]: https://hydroteh.ru/upload/journals/files/Hydroteh_03_2010_file.pdf 66_1_1157.pdf. <https://rucont.ru/efd/565254> Доступ 22.03.2023.
16. Zuev, N. D., Shun'ko, A. S., Shun'ko, N. V. Investigation of Coefficient of Reflection of Waves Produced by a Rock-Fill Inclined Bank Protection Structure. Power Technology and Engineering, 2019, Vol. 53, No. 1, pp. 29–32. DOI 10.1007/s10749-019-01029-5.
17. Santamaría, M., Diaz-Carrasco, P., Moragues, M. V., Clavero, M., Losada, M. Uncertainties of the actual engineering formulas for coastal protection slopes. The dimensional analysis and experimental method. Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 2022. DOI: 10.3850/IAHR-39WC252171192022900.
18. Тлявлин Р. М., Макаров К. Н., Тлявлиня Г. В. Экспериментальные исследования волновых нагрузок и воздействий на волногасящие сооружения с волновой камерой // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования: Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 23–28 сентября 2019 года. – Севастополь: ФГБУ науки ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», 2019. – С. 294–296. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41144859>. Доступ 22.03.2023.
19. Вялый Е. А., Макаров К. Н., Тлявлиня Г. В. Проницаемые конструкции искусственных островов // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 12. – С. 21–28. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47400315>. Доступ 22.03.2023.
20. Vyaly, E., Makarov, K., Tlyavlina, G. Permeable Constructions of Artificial Islands. Power Technology and Engineering, 2022, Vol. 56, Iss. 1, pp. 52–58. DOI: 10.1007/s10749-023-01470-7. ●

Информация об авторе:

Тлявлиня Галина Вячеславовна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, расчётов и нормирования в гидротехническом строительстве обособленного подразделения «Научно-исследовательский центр «Морские берега» («НИЦ «Морские берега») АО «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства» (АО ЦНИИТС), Сочи, Россия, TlyavlinaGV@Tsniis.com.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023, актуализирована 16.05.2023, одобрена после рецензирования 18.05.2023, принята к публикации 19.05.2023.

