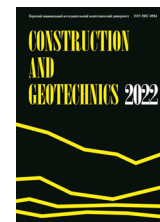




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 3, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.04

УДК 624-2/-9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЛНОГАСЯЩИХ ОТКОСОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МОСТОВЫХ ОПОР ОТ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Г.В. Тлявлиная

Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства (ЦНИИТС),
Москва, Россия
НИЦ «Морские берега», Сочи, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 02 марта 2023
Одобрена: 22 июня 2023
Принята к публикации:
24 июля 2023

Ключевые слова:

берегоукрепление, волновой бассейн, волногасящий откос, волны, защита, опоры мостов, размыв, физическое моделирование.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости волногасящих откосов для защиты мостовых опор от волнового воздействия. Объектом исследования являются конструкции защитных волногасящих откосов, сооружаемых для защиты опор мостов, проектируемых и эксплуатируемых в условиях волнового воздействия (таких как мост на остров Русский во Владивостоке и др.) на берегах морей. Цель работы – выбор оптимальных конструктивных решений защитных откосов, обеспечивающих надежную и безопасную эксплуатацию мостового перехода при морских штормах редкой повторяемости.

Исследования выполнены методом физического моделирования в волновом бассейне. Рассмотрены различные варианты конструктивных решений защитных откосов: из каменной наброски и из габионов, а также комбинированные конструкции. В процессе исследований проводилась оценка взаимодействия расчетного волнения морских штормов редкой повторяемости с волногасящими откосами различной конструкции. На физической модели исследовалась устойчивость элементов защитных креплений волногасящих откосов при воздействии волн. Выполнялась оценка деформаций (в том числе характер и интенсивность) защитных откосных конструкций. Приводится описание исследованных конструкций защитных откосов и их конструктивные особенности. По результатам исследований на физической модели в волновом бассейне получены конструкции защитных откосов опор мостов, наиболее устойчивые к воздействию морских штормовых волн редкой повторяемости.

Результаты исследований предназначены для выбора оптимальных проектных решений защиты опор мостов от волнового воздействия и могут быть также использованы для защиты иных транспортных сооружений, например земляного полотна железных дорог, проектируемых на морских побережьях.

Данные результаты использованы автором в развитие нормативной базы по проектированию и мониторингу конструкций инженерной защиты транспортных сооружений от волнового воздействия.

© ПНИПУ

© Тлявлиная Галина Вячеславовна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве, e-mail: TlyavlinaGV@Tsniiis.com, ORCID: 0000-0003-4083-9014.

Galina V. Tlyavlina – Ph. D. in Technical Science, Head of the Laboratory of Modeling, Calculations and Standardization in Hydraulic Engineering, e-mail: TlyavlinaGV@Tsniiis.com, ORCID: 0000-0003-4083-9014.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STABILITY OF WAVE-DAMPING SLOPES TO PROTECT BRIDGE SUPPORTS FROM WAVE ACTION

G.V. Tlyavlina

Central research institute of Transport Construction (TSNIIS), Moscow, Russian Federation
Branch R&D Centre «Morskije berega», Sochi, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 March 2023
Approved: 22 June 2023
Accepted for publication:
24 July 2023

Keywords:

shore protection, wave basin, wave damping slope, waves, coastal protection, bridge supports, erosion, physical modeling.

ABSTRACT

This article presents the results of experimental studies of the stability of wave-damping slopes to protect bridge supports from wave action. The object of the study is the construction of protective wave-damping slopes constructed to protect the supports of bridges designed and operated under wave action conditions (such as the bridge to Russian Island in Vladivostok, etc.) on the shores of the seas. The purpose of the work is to select the optimal design solutions for protective slopes that ensure reliable and safe operation of the bridge crossing during sea storms of rare frequency.

The research was carried out by the method of physical modeling in a wave pool. Various variants of structural solutions of protective slopes are considered: from a stone outline and from gabions, as well as combined structures.

According to the results of research on a physical model in the wave basin, the structures of the protective slopes of bridge supports that are most resistant to the effects of sea storm waves of rare frequency have been obtained.

The results of the research are intended to select optimal design solutions for protecting bridge supports from wave action and can also be used to protect other transport structures, for example, the roadbed of railways designed on sea coasts.

These results were used by the author in the development of the regulatory framework for the design and monitoring of engineering structures for the protection of transport structures from wave action.

© PNRPU

Введение

Безопасная эксплуатация транспортных сооружений не может быть обеспечена без надежных и эффективных сооружений инженерной защиты. Недостаточная степень учета геологических условий приводит к авариям сооружений [1]. В последние годы для проектирования земляного полотна автомобильных дорог и устоев мостов разрабатывается и применяется большое количество расчетных комплексов [2–4], которые предназначены для оценки устойчивости склонов.

При проектировании и эксплуатации мостов в береговой зоне важнейшей задачей является также обеспечение защиты мостовых опор от размыва. Данный вопрос достаточно широко освещен в нормативной и технической литературе по проектированию мостовых переходов через водотоки, когда требуется обеспечить устойчивую защиту при воздействии речного потока [5–7]. Однако для случаев, когда опоры мостов расположены на морских акваториях в зоне воздействия волн, требуется иной подход к проектированию. При этом руководствоваться нормами для проектирования морских берегозащитных сооружений также недостаточно ввиду того, что в отличие от линейных береговых сооружений (защитные волногасящие полосы земляного полотна железных дорог) вблизи мостовых опор на акваториях возникают достаточно сложные гидрологические рефракционно-дифракционные эффекты [8]. Также может иметь место интерференция ветровых волн (т.е. наложение подходящих и отраженных волн, и, как следствие, увеличение амплитуды), которая обуславливает возрастающую волновую нагрузку на элементы крепления защитных откосов при косом подходе волн [9–11], что, в свою очередь, создает угрозу размыва основания мостовых опор.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований волногасящих откосов для защиты мостовых опор от волнового воздействия. Объектом исследования являются конструкции защитных волногасящих откосов, сооружаемых для защиты опор мостов, проектируемых и эксплуатируемых в условиях волнового воздействия на берегах морей (таких как мост на остров Русский во Владивостоке и др.).

Цель работы – выбор оптимальных конструктивных решений защитных откосов, обеспечивающих надежную и безопасную эксплуатацию мостовых переходов при морских штормах редкой повторяемости.

Методика исследования

Для обеспечения устойчивости откосов и определения возможных деформаций при волновом воздействии проводились исследования методом физического моделирования в научно-исследовательском центре «Морские берега», г. Сочи (в настоящее время ОП АО ЦНИИТС «НИЦ “Морские берега”»). Метод физического моделирования широко применяется при решении разного рода задач в геотехнике [12–14], гидротехническом строительстве [15, 16] и т.п.

В масштабе 1 : 52 в волновом бассейне была построена модель сооружения с волногасящими откосами. Линейные размеры (геометрические размеры сооружений и их элементов, глубины, высоты и длины волн) на модели принимались в линейном масштабе.

Подводный рельеф строили по деревянным шаблонам, устанавливаемым по нивелиру. Подготовленное основание модели засыпалось песком, а затем покрывалось бетонной стяжкой. Модель исследуемого участка от остальной части бассейна была отгорожена металлическими щитами (рис. 1).

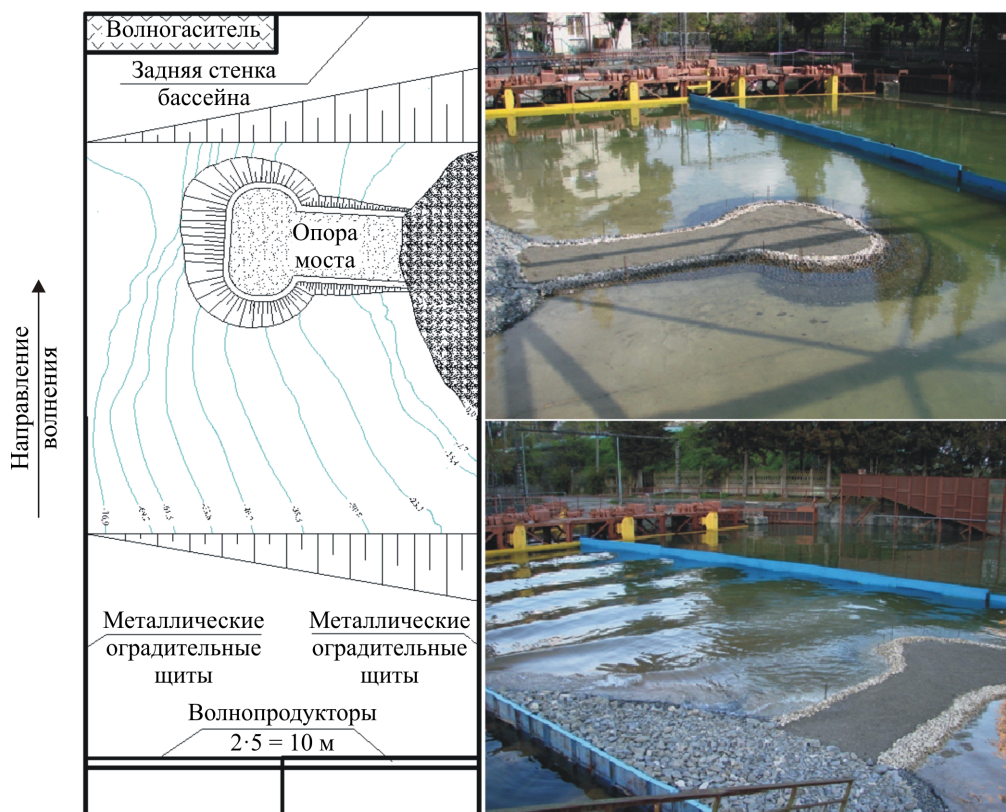


Рис. 1. Вид модели в волновом бассейне
Fig. 1. Layout model in the wave basin

При моделировании принимались параметры волн, соответствующие волнам расчетного шторма, возможного один раз в 25 лет, 5 % обеспеченности. Продолжительность шторма во всех опытах была принята равной 10 ч в пересчете на натуру.

Физическое моделирование проводилось по методике, изложенной в [15, 16]. Данная методика применяется исследователями для оценки устойчивости волногасящих откосов как в мировой практике [17–19], так и в нашей стране [20–22]. При этом в качестве основного критерия подобия следует использовать число Фруда, т.е. необходимо обеспечить равенство чисел Фруда объекта и модели [23, 24]:

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

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

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

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.

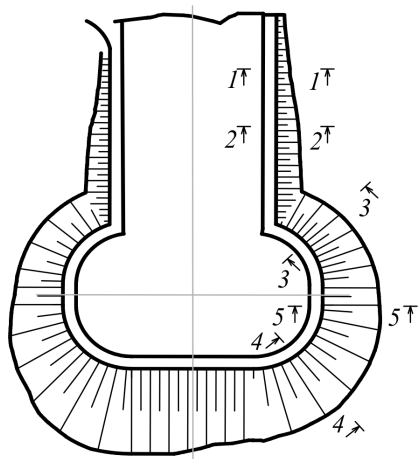


Рис. 2. Схема расположения поперечных профилей для оценки деформаций волногасящего откоса: 1-1...5-5 – номера сечений поперечных профилей

Fig. 2. The layout of the transverse profiles for the evaluation of deformations of the wave damping slope: 1-1...5-5 – numbers of sections of transverse profiles

В работе, с учетом размеров волнового бассейна и моделируемого сооружения, геометрический масштаб модели принят равным

$$\alpha_\ell = 1 : 52. \quad (4)$$

Чтобы обеспечить на модели и в натуральных условиях равенство чисел Фруда (1) масштаб периода волн составил:

$$\alpha_t = \sqrt{\alpha_\ell} = 1 : 7,21, \quad (5)$$

а масштаб массы элементов наброски волногасящего откоса

$$\alpha_G = \alpha_\ell^3 = 1 : 140608. \quad (6)$$

Деформации оценивались путем сравнения поперечных профилей (рис. 2).

Результаты

Конструкция № 1. Вначале для защиты откоса от волнового воздействия исследовалась конструкция, представленная на рис. 3. В верхней части откоса от отметки минус 11,5 см (минус 6,0 м)¹ на скальную массу крупностью 0,14÷1,9 см (70÷1000 мм) отсыпан камень крупностью 1,9÷2,9 см (1,0÷1,5 м) толщиной слоя 6,3 см (3,3 м) до отметки 8,5 см (4,4 м). Уклон откоса с морской стороны составлял 1 : 2,5, а отметка верха технологической площадки – +5,8 см (+3,0 м по Балтийской системе высот (БС) 1977 г.). Во время проведения опыта наблюдались переливы через волногасящий откос. Кроме того, произошло значительное уположение откоса (рис. 4). Профили откоса, переформированные волнением, представлены на рис. 5.

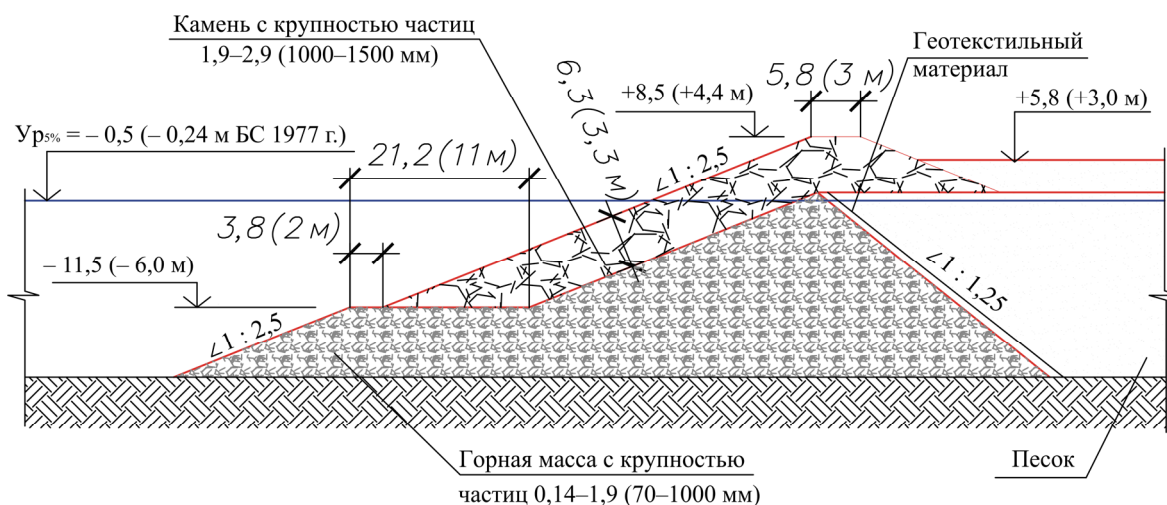


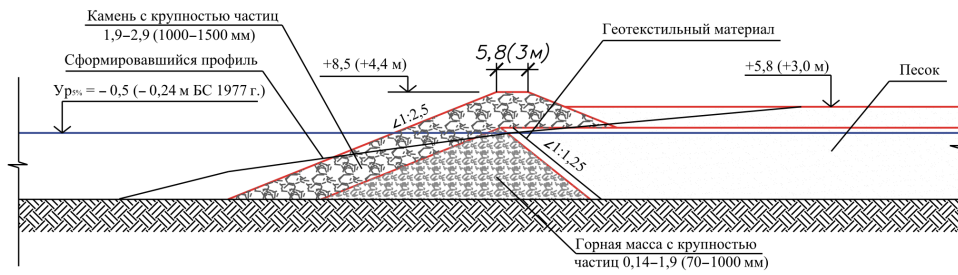
Рис. 3. Конструкция № 1. Схема
Fig. 3. Construction No. 1. Scheme



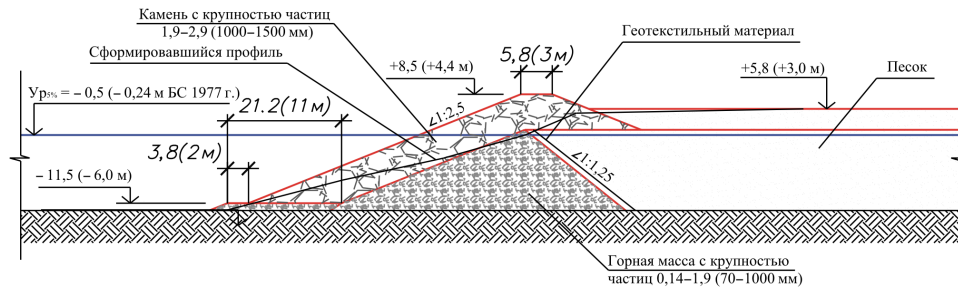
Рис. 4. Конструкция № 1. Деформации волногасящего откоса во время опыта
Fig. 4. Construction No. 1. Deformation of the wave-damping slope during the experiment

¹ Здесь и далее по тексту и на рисунках в скобках приводятся величины, соответствующие натурным.

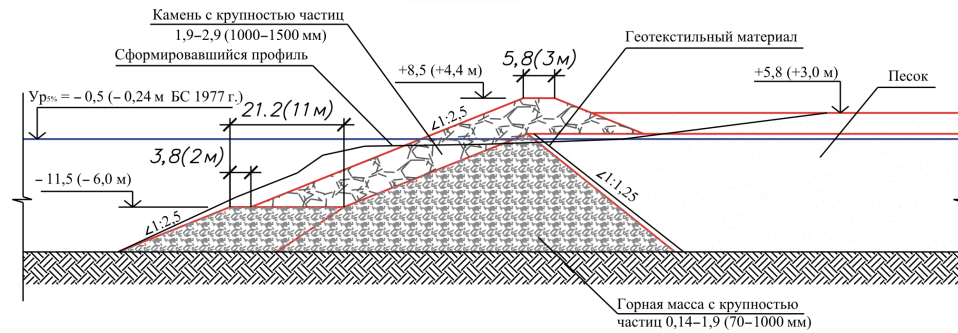
Сечение 1-1



Сечение 2-2



Сечение 3-3



Сечение 4-4

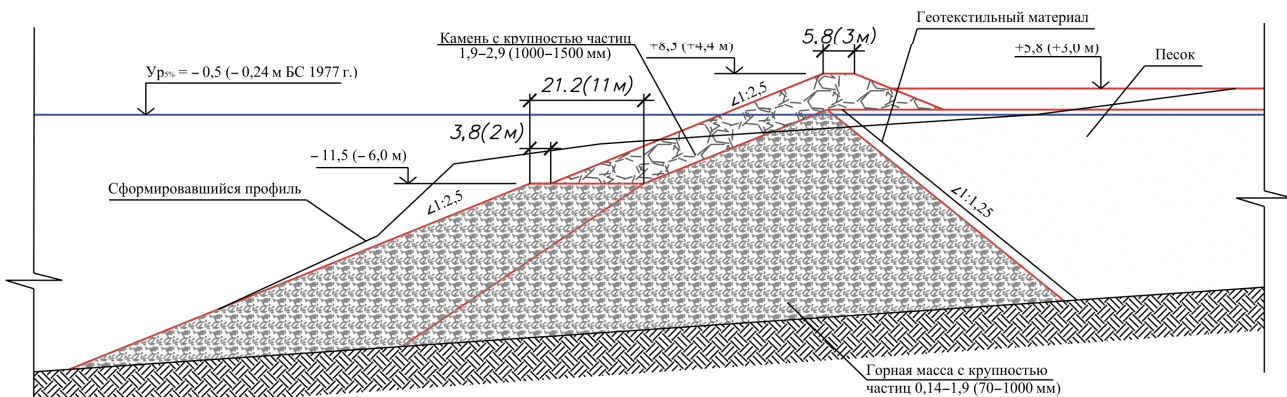


Рис. 5. Конструкция № 1. Переформирование откоса на разных участках по окончании опыта
 Fig. 5. Construction No. 1. Reshaped slopes at different sites at the end of the experiment

Конструкция № 2. Далее исследовалась конструкция, представленная на рис. 6. Отличие от предыдущей конструкции состояло в том, что ширина полки в верхней части защитной отсыпки камня увеличена до 19,2 м (10,0 м). Во время проведения опыта наблюдались незначительные переливы через волногасящий откос, а также небольшое уположение откоса (рис. 7). Разрушения откоса критическими не являются, сооружение подлежит восстановлению и дальнейшей эксплуатации. Профили откоса, переформированные волнением, представлены на рис. 8.

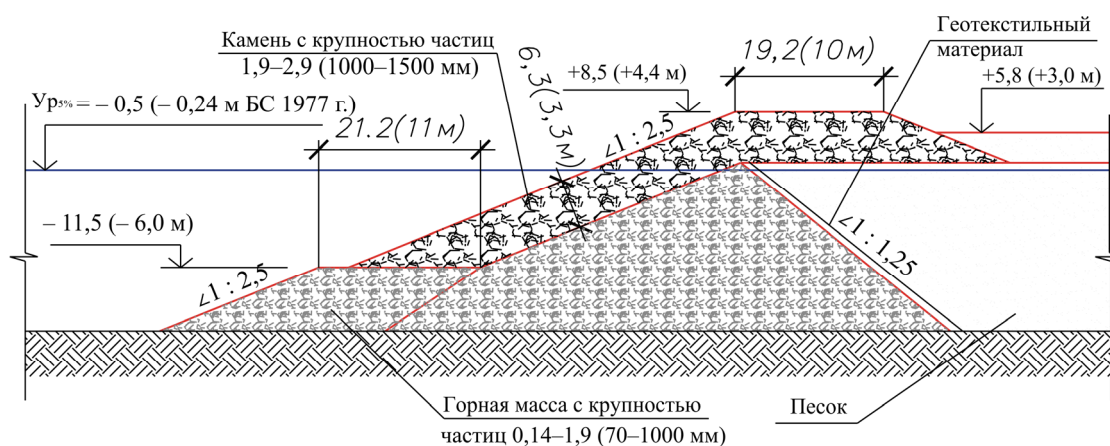


Рис. 6. Конструкция № 2. Схема
Fig. 6. Construction No. 2. Scheme



Рис. 7. Конструкция № 2. Деформации волногасящего откоса во время опыта
Fig. 7. Construction No. 2. Deformation of the wave-damping slope during the experiment

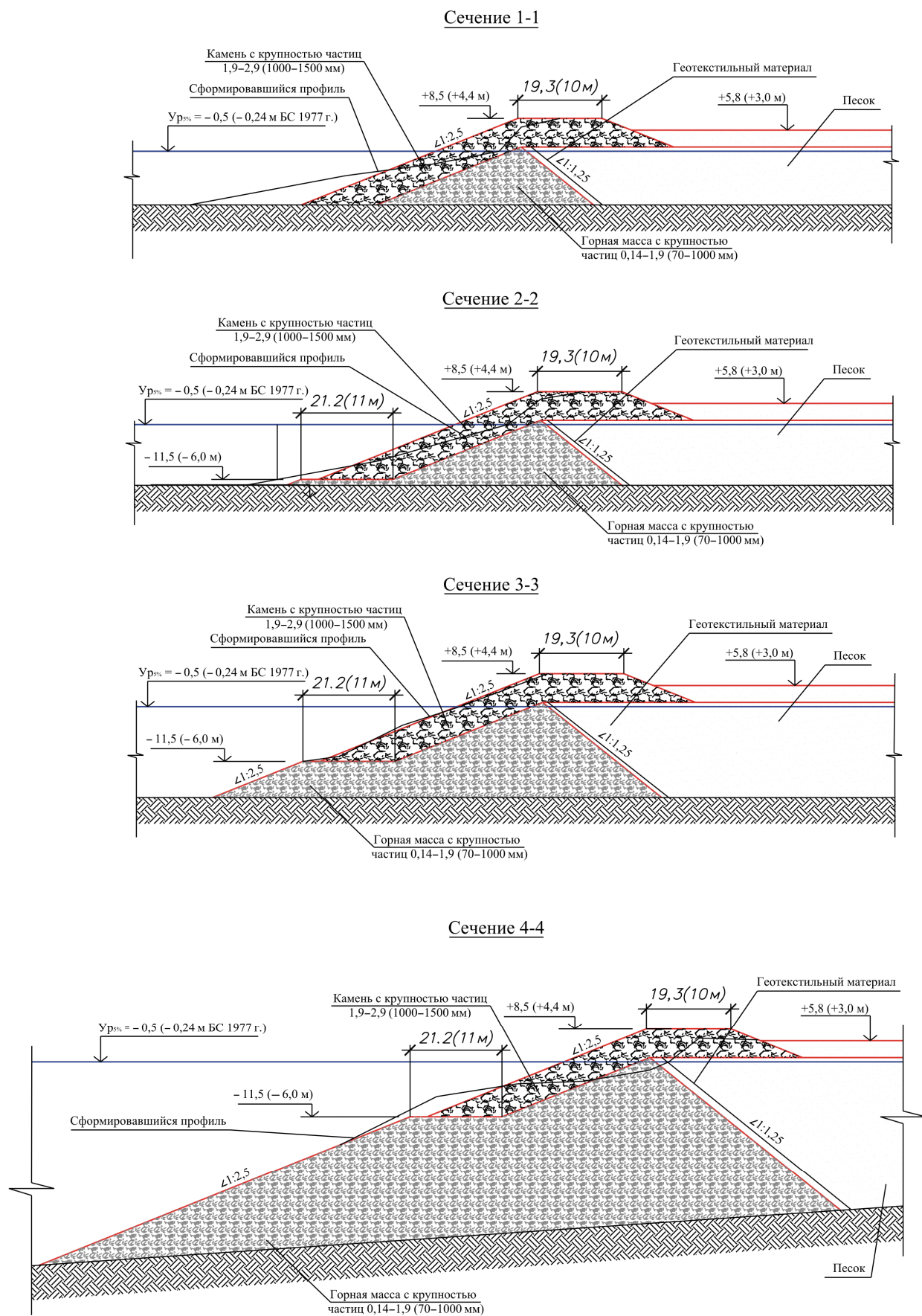


Рис. 8. Конструкция № 2. Переформирование откоса на разных участках по окончании опыта
 Fig. 8. Construction No. 2. Reshaped slopes at different sites at the end of the experiment

Конструкция № 3. Затем для защиты опоры моста от волнового воздействия исследовалась конструкция волногасящего откоса, представленная на рис. 9. В верхней части откоса от отметки минус 11,5 см (минус 6,0 м) на скальную массу крупностью 0,14÷1,9 см (70÷1000 мм) уложены цилиндрические габионы в три слоя. Уклон откоса с морской стороны составлял 1 : 2,5. Отметка верха защитного слоя +8,5 см (+4,40 м), а технологической площадки – +5,8 см (+3,0 м). Во время проведения опыта защитное покрытие из габионов было разрушено, что повлекло за собой размыв волногасящего откоса (рис. 10). Профили откоса, переформированные волнением, представлены на рис. 11.

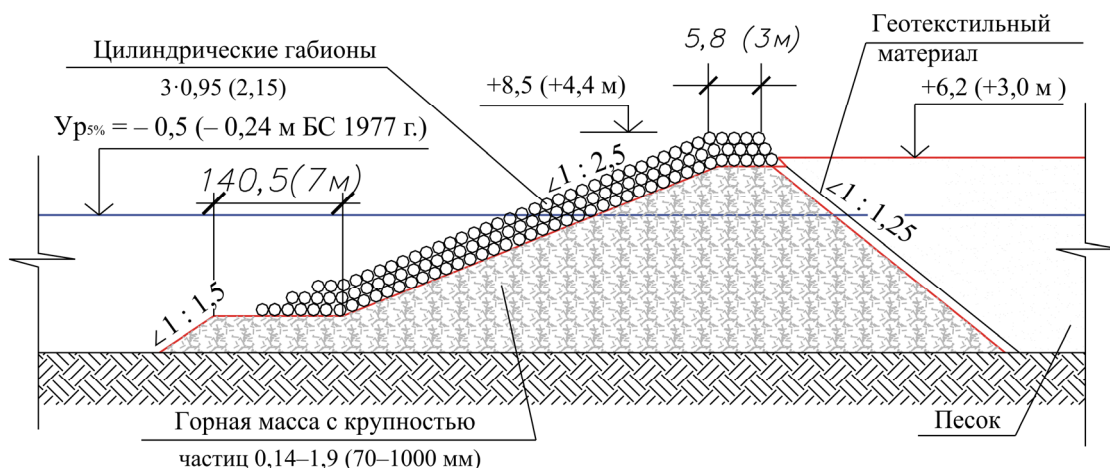


Рис. 9. Конструкция № 3. Схема
Fig. 9. Construction No. 3. Scheme



Рис. 10. Конструкция № 3. Деформации волногасящего откоса во время опыта
Fig. 10. Construction No. 3. Deformation of the wave-damping slope during the experiment

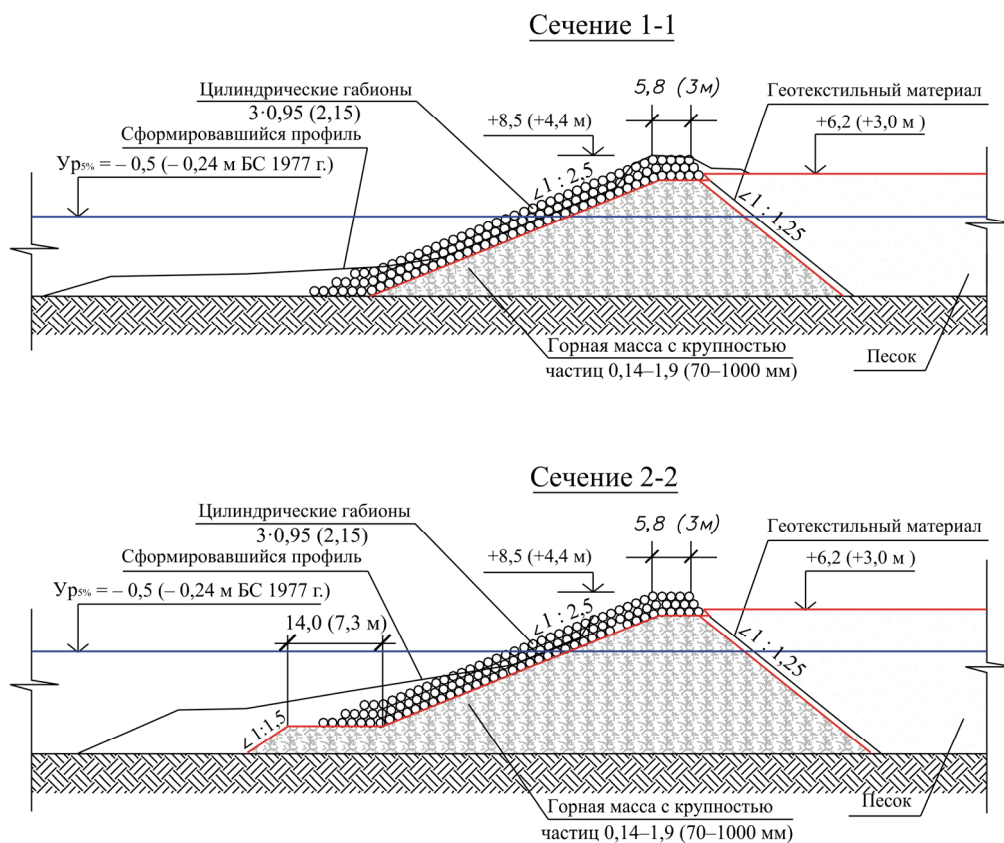


Рис. 11. Конструкция № 3. Переформирование откоса на разных участках по окончании опыта
Fig. 11. Construction No. 3. Reshaped slopes at different sites at the end of the experiment

Заключение

По результатам проведенных исследований волногасящих откосов для защиты мостовых опор от волнового воздействия можно сделать следующие выводы:

1. Ввиду сложных гидрологических рефракционно-дифракционных эффектов и интерференции волн при взаимодействии с волногасящими откосами, защищающими опоры мостов, характер деформаций носит различный характер по периметру сооружения. При этом наблюдается картина, схожая с деформациями защитных набросок в корневых частях оградительных молов портов [9], что подтверждается также исследованиями [10], когда имеет место косой подход волн к сооружению.

2. При одних и тех же условиях (параметры расчетного волнения, подводный рельеф дна, конфигурация опоры) наиболее надежным является вариант крепления волногасящего откоса камнем. Камень может быть заменен фасонными массивами (например, гексабитами).

3. Использование цилиндрических габионов для защиты волногасящих откосов опор мостов является наименее надежным вариантом и не может рассматриваться как универсальный (типовой) вариант защиты. Использование подобных конструкций требует детальных исследований на пространственных моделях в каждом конкретном случае с учетом условий конкретного объекта (волнение, уровень режим, подводный рельеф и т.п.).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад 100 %.

Библиографический список

1. Шапиро Д.М., Тютин А.П. Геотехнические аварии дорожных сооружений и их ликвидация // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 89–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.08
2. Шапиро Д.М. Теория и расчет оснований обсыпных устоев автодорожных мостов // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 104–116. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.11
3. Оценка устойчивости нагруженного склона в сложных инженерно-геологических условиях / А.Н. Богомолов, В.Г. Оффрихтер, А.В. Редин, О.А. Богомолова, С.А. Богомолов // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 70–85. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.06
4. Богомолова О.А., Жиделев А.В. Расчет устойчивости системы «основание – насыпь» // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 19–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.02
5. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки / М.А. Баранов, В.К. Тавлинов, Л.Г. Бегам, В.В. Беликов и др.; Государственная корпорация «Трансстрой»; Всесоюзный Ордена Октябрьской революции Научно-исследовательский институт транспортного строительства (ЦНИИС). – М.: ГК «Трансстрой», 1992. – 425 с.
6. СП 32-102-95. Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. – М.: Корпорация «Трансстрой», 1990. – 79 с.
7. Саноцкая Н.А., Горбенко О.Ю. Расчет местных размывов русла под мостами при проектировании железных дорог // *Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Челябинск, 25 августа 2018 года*. – Челябинск, 2018. – С. 121–123.
8. Лищишин И.В., Глявлиня Г.В., Глявлин Р.М. Исследования для проектирования мостовых переходов в особо сложных гидрологических условиях // *Гидротехника*. – 2010. – № 3. – С. 36–37.
9. Некоторые вопросы проектирования морских гидротехнических сооружений / А.А. Горлова, А.Н. Иваненко, Н.А. Иваненко, К.Н. Макаров [и др.]. – Сочи: Сочинский государственный университет, 2015. – 230 с.
10. Глявлин Р.М. Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2020. – Т. 17, вып. 2. – С. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209
11. 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. – P. 29–32. DOI: 10.1007/s10749-019-01029-5
12. Семенов Д.А., Клевеко В.И. Планирование модельных экспериментов по исследованию работы оснований, армированных геосинтетическими оболочками // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 29–37. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01
13. Ширанов А.М., Невзоров А.Л. Физическое моделирование армированной песчаной подушки в основании фундамента // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08

14. Численные и модельные эксперименты по определению устойчивости однородного откоса, подработанного горизонтальной выработкой / А.Н. Богомолов, Г.А. Абрамов, О.А. Богомоллова, А.А. Пристансков, О.В. Ермаков // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 30–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.03
15. 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
16. Шарп Д.Д. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984. – 280 с.
17. Laboratory Tests on Wind-Wave Generation, Interaction and Breaking Processes / M. Clavero, L. Chiapponi, S. Longo, M.A. Losada // Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. – Springer, Cham, 2023. – P. 259–281. DOI: 10.1007/978-3-031-05875-2_11
18. Uncertainties of the actual engineering formulas for coastal protection slopes. The dimensional analysis and experimental method / M. Santamaría, P. Diaz-Carrasco, M.V. Moragues, M. Clavero, M. Losada // Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 2022. DOI: 10.3850/IAHR-39WC252171192022900
19. Effectiveness of dummy water levels in physical models to optimize the toe and the crest levels / D.P.L. Ranasinghe, I.G.I.K. Kumara, N.L. Engiliyage, K. Raveenthiran // Proc. 8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science Dec. 9th – 12th, 2020, Zhoushan, China. – P. 42–51.
20. Laboratory modelling of urban flooding: Strengths and challenges of distorted scale models / X. Li, S. Erpicum, M. Bruwier, E. Mignot, P. Finaud-Guyot, P. Archambeau [et al.] // Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – Vol. 23, issue 3. – P. 1567–1580. DOI: 10.5194/hess-2018-484
21. Рогачко С.И., Шунько Н.В. Научное сопровождение проектов морских гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 11. – С. 5–10.
22. Шелушинин Ю.А. Преобразование параметров исходного волнения при искажении масштаба гидравлической модели // Вестник Моск. гос. строит. ун-та. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 83–92. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.83-92
23. Шелушинин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. – 2019. – Т. 9, № 2 (32). – С. 4. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4
24. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости. – М.: Энергия, 1971. – 480 с.

References

1. Shapiro D.M., Tyutin A.P. Geotexnicheskie avarii dorozhny`x sooruzhenij i ix likvidaciya [Geotechnical accidents of road structures and their liquidation]. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 89–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.08
2. Shapiro D.M. Teoriya i raschet osnovanij obsy`pny`x ustoev avtodorozhny`x mostov [Theory and calculation of road bridges buried abutments bases]. *Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arxitektura*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 104–116. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.11
3. Bogomolov A.N., Ofrixtter V.G., Redin A.V., Bogomolova O.A., Bogomolov S.A. Ocenka ustojchivosti nagruzhenogo sklona v slozhny`x inzhenerno-geologicheskix usloviyax [Assessment of the stability of a loaded slope in complex engineering and geological conditions]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 70–85. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.06

4. Bogomolova O.A., Zhidelev A.V. Raschet ustojchivosti sistemy` «osnovanie – nasy`p`» [Calculation of the «base – embankment» system stability]. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 19–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.02.

5. Posobie k SNiP 2.05.03-84 "Mosty` i truby`" po izy`skaniyam i proektirovaniyu zheleznodorozhny`x i avtodorozhny`x mostovy`x perexodov cherez vodotoki [SNIP 2.05.03-84 "Bridges and Underpasses" Handbook on Surveying and Design of Railroad and Road Bridge Crossings of Streams]/ M.A. Baranov, V.K. Tavlinov, L.G. Begam, V.V. Belikov i dr.; Gosudarstvennaya korporaciya «Transstroj» Vsesoyuzny`j Ordena Oktyabr`skoj Revolyucii Nauchno-issledovatel`skij institut transportnogo stroitel`stva (CzNIIS). Moscow, GK «Transstroj», 1992. – 425 p.

6. SP 32-102-95. Sooruzheniya mostovy`x perexodov i podtoplyaemy`x nasy`pej. Metody` rascheta mestny`x razmy`vov [Constructions of bridges and abutments. Methods of local scour calculation]. Moscow, Korporaciya «TRANSSTROJ», 1990. – 79 p.

7. Sanoczka N.A., Gorbenko O.Yu. Raschet mestny`x razmy`vov rusla pod mostami pri proektirovanii zhelezny`x dorog. *Nauchny`e revolyucii: sushhnost` i rol` v razvitii nauki i texniki: Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Chelyabinsk, 2018, pp. 121-123.

8. Lishhishin I.V., Tlyavlina G.V., Tlyavlin R.M. Issledovaniya dlya proektirovaniya mostovy`x perexodov v osobo slozhny`x gidrologicheskix usloviyax. *Gidrotexnika*, 2010, no. 3, pp. 36-37.

9. Gorlova A.A., Ivanenko A.N., Ivanenko N.A., Makarov K.N. and oth. Nekotory`e voprosy` proektirovaniya morskix gidrotexnicheskix sooruzhenij [Some questions of designing of marine hydraulic structures]. Sochi, Sochinskij gosudarstvenny`j universitet, 2015, 230 p.

10. Tlyavlin R.M. Ocenka texnicheskogo sostoyaniya volnogasyashhix sooruzhenij inzhenernoj zashhity` zemlyanogo polotna ot volnovogo vozdejstviya [Assessment of the technical condition of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds from wave exposure]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya*, Saint Petersburg, PGUPS, 2020, vol. 17, iss. 2, pp. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209.

11. 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.

12. Semenov D.A., Kleveko V.I. Planirovanie model`ny`x e`ksperimentov po issledovaniyu raboty` osnovanij, armirovanny`x geosinteticheskimi obolochkami [The planning of the model experiments to investigate the operation of bases reinforced with geosynthetic shells]. *Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arxitektura*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 29–37. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01.

13. Shiranov A.M., Nevzorov A.L. Fizicheskoe modelirovanie armirovannoj peschanoj podushki v osnovanii fundamenta [Physical modeling of a reinforced sand base of the foundation]. *Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arxitektura*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08.

14. Bogomolov A.N., Abramov G.A., Bogomolova O.A., Pristanskov A.A., Ermakov O.V. Chislenny`e i model`ny`e e`ksperimenty` po opredeleniyu ustojchivosti odnorodnogo otkosa, podrobotannogo gorizontal`noj vy`rabortkoj [Numerical and model experiments to determine the stability of a homogeneous slope undermined with a horizontal production]. *Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arxitektura*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 30–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.03

15. 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.

16. Sharp D.D. Gidravlicheskoje modelirovanie [Hydraulic modelling]. Moscow, Mir, 1984, 280 p.

17. Clavero M., Chiapponi L., Longo S., Losada M.A. Laboratory Tests on Wind-Wave Generation, Interaction and Breaking Processes. Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. Springer, Cham, 2023, pp. 259-281. DOI: 10.1007/978-3-031-05875-2_11.

18. 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.

19. Ranasinghe D.P.L., Kumara I.G.I.K., Engiliyage N.L., Raveenthiran K. Effectiveness of dummy water levels in physical models to optimize the toe and the crest levels. *Proc. 8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science* Dec. 9th - 12th, 2020, Zhoushan, China, pp. 42-51.

20. Li X., Erpicum S., Bruwier M., Mignot E., Finaud-Guyot P., Archambeau P. et al. Laboratory modelling of urban flooding: Strengths and challenges of distorted scale models. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019, vol. 23, iss. 3, pp. 1567-1580. DOI: 10.5194/hess-2018-484.

21. Rogachko S.I., Shun'ko N.V. Nauchnoje soprovozhdenie proektov morskix gidrotexnicheskix sooruzhenij [Scientific support of projects of offshore hydraulic structures]. *Gidrotexnicheskoe stroitel'stvo*, 2021, no. 11, pp. 5-10.

22. Shelushinin Yu.A. Preobrazovanie parametrov isxodnogo volneniya pri iskazhenii masshtaba gidravlicheskoj modeli [Changes in the initial parameters of waves caused by distortions in the scale of a hydraulic model]. *Vestnik MGSU*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 83-92. DOI 10.22227/1997-0935.2022.1.83-92.

23. Shelushinin Yu.A., Makarov K.N. Problemy` i perspektivy` gidravlicheskoego modelirovaniya volnovy`x processov v iskazhenny`x masshtabax [Problems and prospects for hydraulic modeling of wave processes in the distorted scales]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*, 2019, vol. 9, no. 2 (32), p. 4. DOI 10.22227/2305-5502.2019.2.4.

24. Dejli Dzh., Xarleman D. Mexanika zhidkosti. Moscow, Energiya, 1971, 480 p.