



УДК: 625.122

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.4

EDN: DZBDVS

Устойчивость элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамических воздействиях морских волн

Г.В. Тлявлиная^{1,2}, К.Н. Макаров³, Р.М. Тлявлин¹, Г.А. Емельянова²

¹АО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (АО ЦНИИТС). Обособленное подразделение АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, Российская Федерация

²Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

³Сочинский государственный университет (СГУ), г. Сочи, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* При проектировании транспортных сооружений, расположенных в морской береговой зоне, надежность эксплуатации обеспечивается, в том числе, эффективной работой конструкций инженерной защиты от воздействий морского волнения. В данной работе объектом исследований являются волногасящие откосы из наброски камня или фасонных массивов, расположенные в корневых частях сооружений инженерной защиты (траверсов, бун и т.п.). Исследовалась волновая картина у сооружений при воздействии волн, подходящих к откосам под углами в секторе 35÷90 градусов. Работа выполнена с использованием метода физического (гидравлического) моделирования. Целью исследований является корректировка методики расчета устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений, базирующаяся на теоретических разработках и экспериментальных данных (на данных лабораторных исследований). Задачи: выполнить физическое моделирование волновых воздействий на элементы крепления волногасящих откосов при различных углах подхода морских волн к конструкциям; предложить обоснованные научными исследованиями формулы для дополнения действующих нормативных документов в области проектирования инженерной защиты транспортных сооружений.

Результаты. В настоящей работе получены условия потери устойчивости элементов крепления защитных откосов, а именно, наиболее неблагоприятные углы подходы волн к конструкциям. Обоснованы полученные эффекты интерференции в зоне волновых воздействий на элементы крепления. Предложены расчетные формулы для наиболее полного учета волновых воздействий при косом подходе волн к сооружениям.

Выводы. Проведенные исследования, направленные на развитие и совершенствование нормативной базы в транспортном строительстве, позволят повысить надежность и безопасность автомобильных и железных дорог, а также мостовых переходов, проектируемых и эксплуатируемых на морских побережьях. Полученные результаты, обоснованные научными исследованиями, рекомендуется отразить при актуализации нормативных документов.

Ключевые слова: волногасящий откос, гидродинамическое воздействие, дороги, интерференция волн, мостовой переход, транспортные сооружения, физическое моделирование, эксперимент

Для цитирования: Тлявлиная Г.В., Макаров К.Н., Тлявлин Р.М., Емельянова Г.А. Устойчивость элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамических воздействиях морских волн // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 37-53, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.4, EDN: DZBDVS

Stability of the fastening elements of the slopes of transport structures under the hydrodynamic effects of sea waves

G.V. Tlyavlina^{1,2}, K.N. Makarov³, R.M. Tlyavlin¹, G.A. Emelianova²

¹Central Research Institute of Transport Construction

R&D Centre “Sea shores” — separate subdivision, Sochi, Russian Federation

²Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

³Sochi State University, Sochi, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* When designing transport structures located in the offshore coastal zone, the reliability of operation is ensured, among other things, by the effective operation of engineering protection structures against the effects of sea waves. In this work, the object of research is wave-damping slopes made of rough stone or shaped massifs located in the root parts of engineering protection structures (traverses, buns, etc.). The wave pattern of structures under the influence of waves approaching the slopes at angles in the 35–90-degree sector was studied. The work was performed using the method of physical (hydraulic) modeling. The purpose of the research is to adjust the methodology for calculating the stability of the fastening elements of slope wave damping structures, based on theoretical developments and experimental data (based on laboratory research data). The tasks are to perform physical modeling of wave effects on the fastening elements of wave-damping slopes at different angles of the approach of sea waves to structures; to propose formulas based on scientific research to supplement existing regulatory documents in the field of engineering protection of transport structures.

Results. In this work, the conditions for the loss of stability of the fastening elements of the protective slopes are obtained, namely, the most unfavorable angles of wave approaches to structures. The obtained interference effects in the zone of wave effects on the fastening elements are substantiated. Calculation formulas are proposed for the most complete consideration of wave effects in the oblique approach of waves to structures.

Conclusions. The conducted research aimed at developing and improving the regulatory framework in transport construction will improve the reliability and safety of roads and railways, as well as bridge crossings designed and operated on the sea coasts. It is recommended that the results obtained, based on scientific research, be reflected in the updated version of SP 277.13258.2016.

Keywords: wave-damping slope, hydrodynamic effects, roads, wave interference, bridge crossing, transport structures, physical modeling, experiment

For citation: Tlyavlina G. V., Makarov K.N., Tlyavlin R.M., Emelianova G.A. Stability of the fastening elements of the slopes of transport structures under the hydrodynamic effects of sea waves // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 37-53, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.4, EDN: DZBDVS

1. Введение

В практике транспортного строительства большое значение уделяется вопросам повышения надежности и долговечности конструкций [1, 2]. С этой целью проводится большое количество исследований, анализируются причины разрушений [3-6].

Для защиты автомобильных и железных дорог, мостовых переходов и т.п. от волнового воздействия применяются волногасящие наброски из камня, обыкновенных или фасонных блоков (тетраподов или гексабитов) [7-9]. Исследования, направленные на повышение эффективности защитных свойств волногасящих набросков, а также их устойчивости, имеют важное практическое значение для обеспечения надежности транспортных сооружений [10]. Изучаются вопросы наката волн на откосы, волногасящие свойства и устойчивость элементов наброски [11-13].

При проектировании конструкций защитных откосов важнейшей характеристикой является масса элементов крепления откоса, которая, в общем случае, согласно указаниям СП 277.1325800.2016 определяется по формуле (1) из СП 38.13330.2018:

$$m = \frac{3,16k_{fr}\rho_m h^3}{\left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1\right)^2 \sqrt{1 + ctg^3 \varphi}} \sqrt{\frac{\lambda}{h}}, \quad (1)$$

где m – масса элемента крепления откоса, т;

k_{fr} – коэффициент вида элемента;

h – расчетная высота волны;

ρ_m – плотность материала крепления (камня или бетона), т/м³;

ρ – плотность морской воды, т/м³;

λ – средняя длина волны;

$ctg\varphi$ – заложение откоса.

Однако, известны случаи разрушения откосных волногасящих сооружений в процессе эксплуатации даже при штормах, существенно слабее расчетных [14]. Данные натуральных наблюдений и экспериментальных исследований показали, что при значительных глубинах перед откосными укреплениями в корневых частях и косом подходе волн к ним, имеют место значительные волновые воздействия на эти участки. Это вызывает необходимость значительного усиления конструкций по сравнению с рекомендациями нормативных документов уже на стадии эксплуатации, когда пошли значительные разрушения и причинён существенный материальный вред.

Теоретическое обоснование данного эффекта было предложено в [14]. Оно заключается в том, что при расчете массы предельного равновесия элементов крепления откоса (камня или фасонных массивов) необходимо учитывать интерференцию прямой и отраженной волн при их отражении от мола.

В частности, теоретически было установлено, что при увеличении угла подхода волны к сооружению от 0 до 56 градусов расчетная масса фасонных блоков наброски в его корневой части плавно увеличивается. Поскольку согласно формуле (1), масса предельного равновесия блока зависит от высоты волны в кубе, увеличение расчетной массы блоков может составить до трех раз. При дальнейшем увеличении угла подхода волны, расчетная масса блоков быстро уменьшается (рис. 1).

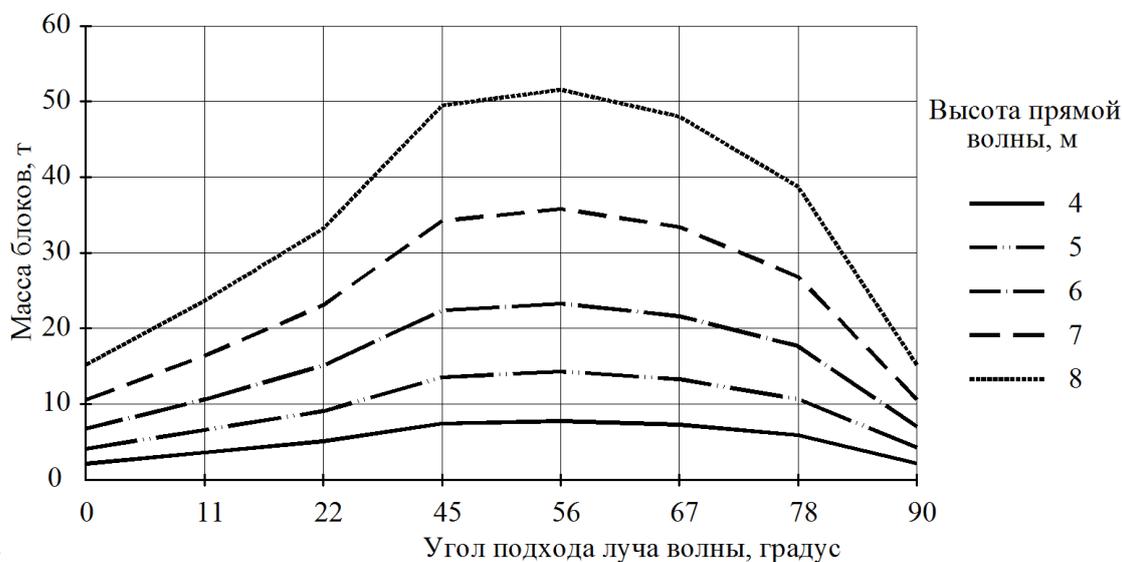


Рис. 1. Зависимость расчетной массы фасонных блоков в волногасящей наброске от высоты и угла подхода волны к сооружению при заложении откоса 1:2 (иллюстрация авторов)

Fig.1. The dependence of the calculated mass of shaped blocks in the wave-damping slope on the height and angle of the wave approach to the structure, slope 1:2 (illustration by the authors)

Была также теоретически обоснована зависимость расчетной массы фасонных блоков в защитной наброске от коэффициента отражения волн, то есть от конструкции мола (рис. 2) [14].

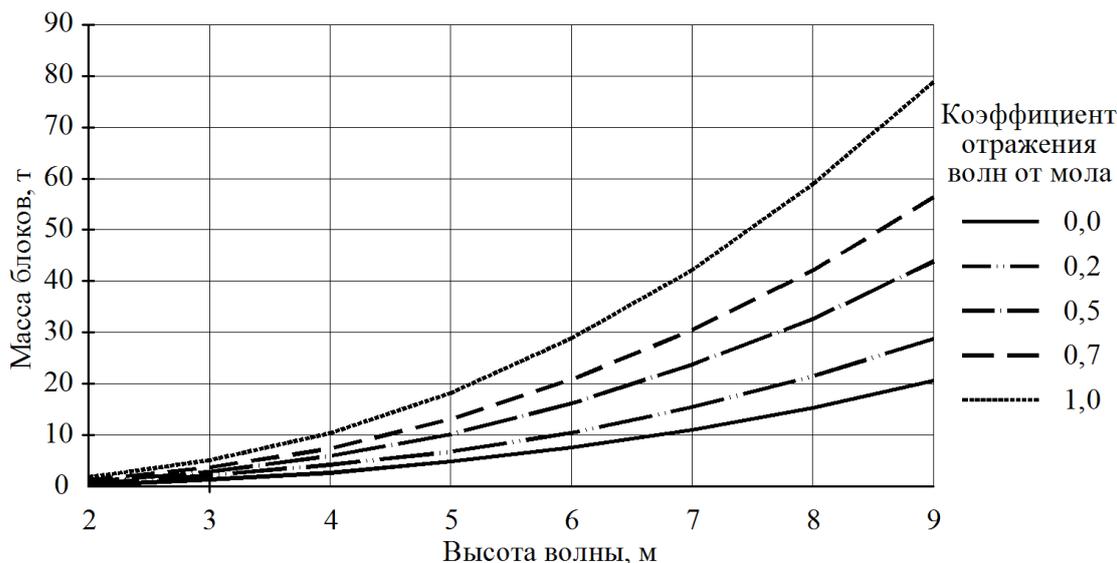


Рис. 2. Зависимость расчетной массы фасонных блоков в волногасящей наброске от высоты волны и коэффициента ее отражения от сооружения при заложении откоса 1:2 и угле подхода волны $\alpha=45^\circ$ (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Dependence of the calculated mass of shaped blocks in the wave-damping slope on the height of the wave and its reflection coefficient from the structure, slope 1:2 and the angle of approach of the wave $\alpha = 45^\circ$ (illustration by the authors)

С целью разработки методики расчета устойчивости элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамическом воздействии косоподходящих волн, были проведены серии экспериментальных исследований на физических моделях в волновом бассейне. Задачи исследований:

- получение экспериментальных данных по параметрам волн у сооружений;
- получение экспериментальных данных по устойчивости элементов крепления откосов при различных углах подхода волн;
- подтверждение теоретических положений, изложенных в [14].

2. Материалы и методы

На физических моделях в волновом бассейне воспроизводились случаи косоугольного подхода волн к сооружению. Исследовалась волновая картина у сооружений при воздействии волн, подходящих к откосам под углами в секторе $35\div 90$ градусов.

Моделирование выполнено в соответствии с теорией подобия [15-17], которая широко применяется для исследований волногасящих откосов как в нашей стране, так и за рубежом [18-20]. В проводимых экспериментальных исследованиях гидродинамических воздействий водной среды (волн) на защитные откосы гидротехнических сооружений, когда влияние вязкости мало, динамическое подобие модельных и натуральных процессов определяется равенством чисел Фруда. При исследовании волн на поверхности несжимаемой жидкости критерий Фруда может быть записан в виде:

$$v_m^2 / L_m g = v_n^2 / L_n g = const = Fr, \quad (2)$$

где v_m - скорость на модели, v_n - скорость в натуре, L_m - характерная длина на модели, L_n - характерная длина в натуре, g - гравитационное ускорение, Fr - число Фруда.

Ограничения по параметрам волн обусловлены необходимостью исключения заметного влияния молекулярной вязкости и капиллярных эффектов. Капиллярность (или поверхностное натяжение) можно не учитывать, если длина волн на модели λ_m больше 20 см [21-23]:

$$\lambda_m > 20 \text{ см.} \quad (3)$$

Чтобы обеспечить на модели и в натуральных условиях равенство чисел Фруда масштаб периода волны будет равен:

$$m_t = \frac{T_m}{T_n} = \sqrt{m_h}, \quad (4)$$

где индекс «м» относится к модели, а «н» – к натурным величинам.

Масштаб массы элементов наброски принимался равным:

$$m_G = \frac{G_m}{G_n} = m_h^3. \quad (5)$$

В процессе испытаний замерялась высота волн в различных точках и оценивалась устойчивость элементов крепления откоса сооружений.

3. Результаты и обсуждение

Вначале (серия 1) исследовалось воздействие волн на фрагмент оградительного мола без волногасящего откоса.

Параметры модели и волнения в опытах первой серии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению α , градусы	Высота исходных волн h , см	Средний период \bar{T} , с
1	90	11,5	1,0
2	80	11,5	1,0
3	70	11,5	1,0
4	60	11,5	1,0
5	55	11,5	1,0
6	50	11,5	1,0
7	45	11,5	1,0
8	35	11,5	1,0
9	90	7,5	1,0
10	55	7,5	1,0
11	50	7,5	1,0
12	45	7,5	1,0
13	40	7,5	1,0
14	35	7,5	1,0
15	30	7,5	1,0

Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн в опытах первой серии представлены на рис. 3, а вид моделей во время опытов – на рис. 4.

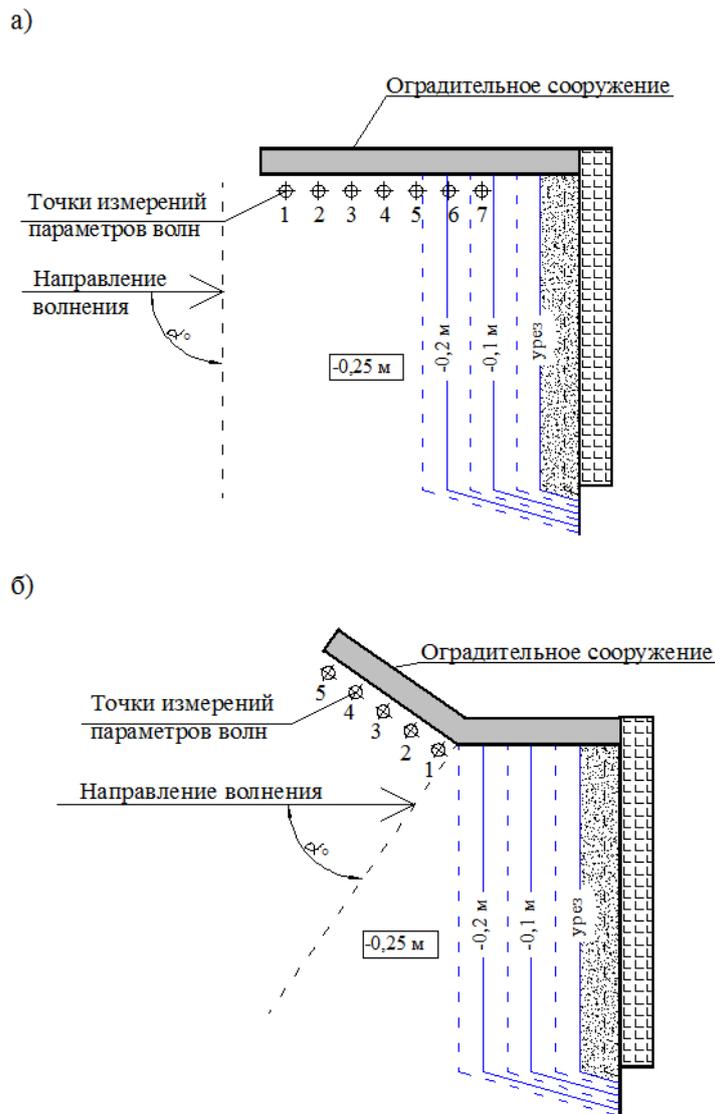


Рис. 3. Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн: а – в опытах 1÷8; б – в опытах 9÷15 (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. Series 1. A coastal protection structure without wave-damping slope. The model schemes and locations of wave height measurement points: а – in experiments 1-8; б – in experiments 9-15 (illustration by the authors)



Рис. 4. Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Вид моделей во время опытов (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. Series 1. A coastal protection structure without wave-damping slope. View of the models during the experiments (illustration by the authors)

Результаты экспериментов первой серии представлены в таблицах 2 и 3, а также на рис. 5.

Таблица 2

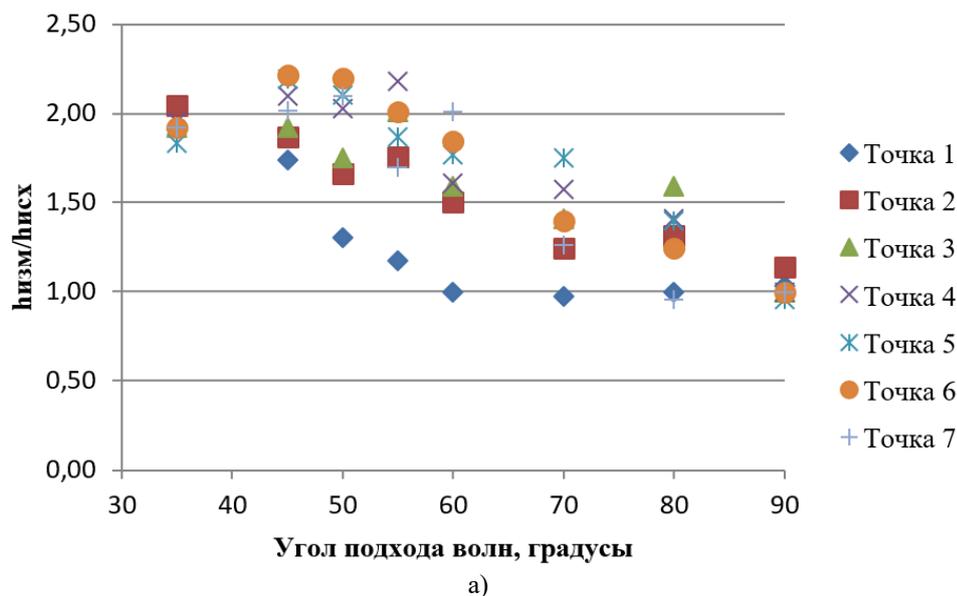
Серия 1. Опыты 1÷8. Сооружение без волногасящего откоса. Результаты экспериментов

№ опыта	α, градусы	Высота волн <i>h</i> , см						
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6	точка 7
1	90	11,9	13,5	11,5	11,5	11,0	11,5	11,5
2	80	11,5	15,1	18,3	16,2	16,1	14,3	11,0
3	70	11,5	14,3	16,2	18,1	20,1	16,1	14,5
4	60	11,5	17,3	18,3	18,5	20,3	21,2	23,1
5	55	13,5	20,2	23,1	25,1	21,5	23,1	19,5
6	50	15,0	19,1	20,1	23,3	24,2	25,3	24,1
7	45	20,0	21,5	22,1	24,1	25,2	25,5	23,2
8	35	22,0	23,5	22,1	22,5	21,1	22,1	19,3

Таблица 3

Серия 1. Опыты 9÷15. Сооружение без волногасящего откоса. Результаты экспериментов

№ опыта	α, градусы	Высота волн <i>h</i> , см				
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5
9	90	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
10	55	14,5	13,1	11,5	11,1	9,5
11	50	15,5	14,5	13,4	11,5	10,1
12	45	16,0	15,0	13,5	12,5	10,5
13	40	16,5	15,5	14,0	13,1	12,0
14	35	15,5	15,1	14,5	14,1	13,5
15	30	15,7	15,3	14,8	14,4	14,0



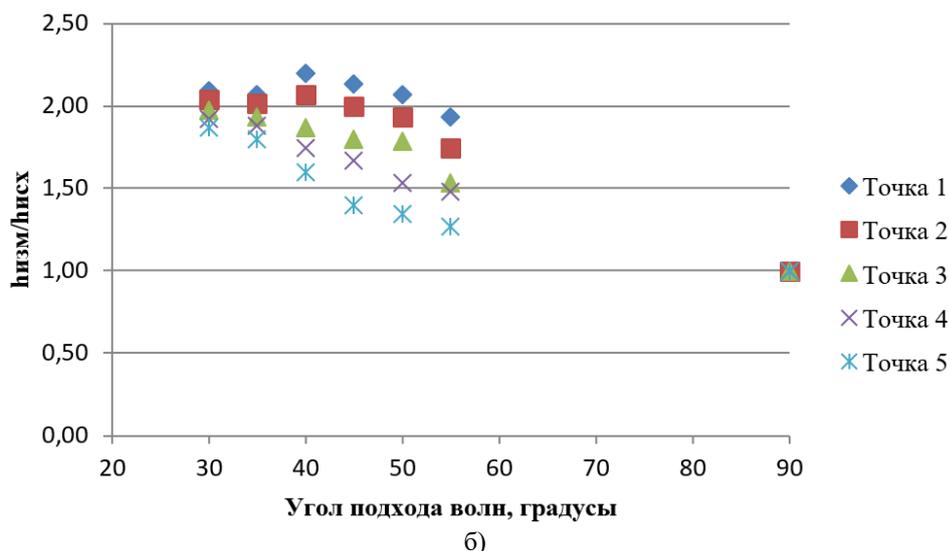


Рис. 5. Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Результаты экспериментов: а – в опытах 1÷8; б – в опытах 9÷15 (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Series 1. A coastal protection structure without wave-damping slope. Experimental results: а – in experiments 1-8; б – in experiments 9-15 (illustration by the authors)

По результатам экспериментов первой серии получено, что при косом подходе волн (в особенности при угле подхода в диапазоне $70\div35^\circ$) к сооружению имеет место интерференция волн, в результате чего возрастает амплитуда (высота) волн, воздействующих на сооружение.

Затем исследовалось воздействие волн на фрагмент Сооружение с волногасящим откосом в корневой части (серия 2).

Масса отдельных элементов крепления волногасящего откоса, соответствующая состоянию их предельного равновесия, была рассчитана по формуле (1) для исследуемых волновых параметров.

Параметры модели и волнения в опытах представлены в таблице 4.

Таблица 4

Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части.

Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению α , градусы	Высота исходных волн $h_{исх}$, см	Средний период \bar{T} , с	Масса камня на откосе, г
1	90	11,5	1,0	118
2	80	11,5	1,0	118
3	70	11,5	1,0	118
4	60	11,5	1,0	118
5	55	11,5	1,0	118
6	50	11,5	1,0	118
7	45	11,5	1,0	118
8	35	11,5	1,0	118

В процессе испытаний замерялась высота волн в точках 1÷7 и оценивалась устойчивость элементов крепления откоса.

Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн в опытах второй серии представлены на рис.6, а вид моделей во время опытов – на рис. 7.

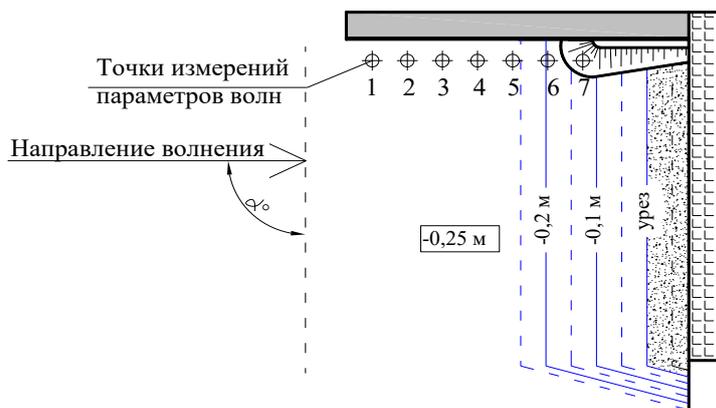


Рис. 6. Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части. Схема расположения точек измерения высот волн (иллюстрация авторов)
 Fig. 6. Series 2. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the root part. The layout of the wave height measurement points (illustration by the authors)



Рис. 7. Серия 2. ГТС с волногасящим откосом в корневой части. Вид модели во время (слева) и по окончании (справа) опытов (иллюстрация авторов)
 Fig. 7. Series 2. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the root part. View of the model during (left) and at the end (right) of the experiments (illustration by the authors)

Результаты испытаний представлены в таблице 5 и на графике (рис. 8).

Таблица 5

Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части.
 Результаты экспериментов

№ опыта	α, градусы	Высота волн, измеренных у сооружения $h_{изм}$, см							Устойчивость
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6	точка 7	
1	90	11,5	13,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	да
2	80	11,5	15,3	19,1	16,1	17,4	15,3	16,2	условно
3	70	11,3	15,2	17,2	19,2	20,3	17,1	15,1	нет
4	60	12,1	16,1	17,1	15,1	17,1	18,5	20,5	нет
5	55	14,5	21,3	20,3	21,3	19,1	21,1	17,5	нет
6	50	15,2	22,1	24,1	23,1	22,5	19,2	19,5	нет
7	45	16,1	19,2	19,2	17,5	21,2	20,1	24,4	нет
8	35	16,1	22,2	23,1	27,1	24,2	28,2	26,3	нет

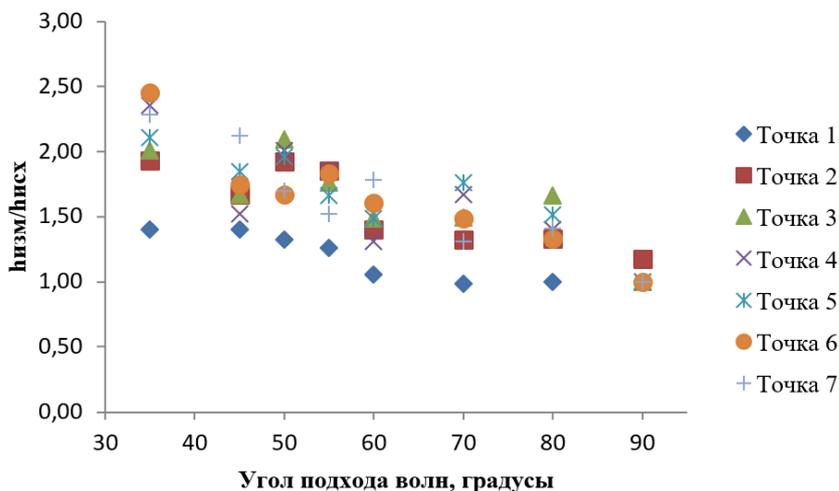


Рис. 8. Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части. Результаты экспериментов (иллюстрация авторов)
 Fig. 8. Series 2. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the root part. Experimental results (illustration by the authors)

После этого исследовалось воздействие волн на фрагмент Сооружение с волногасящим откосом в средней части (серия 3).

Параметры модели и волнения в опытах представлены в таблице 6.

Таблица 6

Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.

Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению α , градусы	Высота исходных волн $h_{исх}$, см	Средний период \bar{T} , с	Масса камня на откосе, г
1	90	7,5	1,0	25
2	55	7,5	1,0	25
3	50	7,5	1,0	25
4	45	7,5	1,0	25
5	40	7,5	1,0	25
6	35	7,5	1,0	25
7	30	7,5	1,0	25

Масса отдельных элементов крепления волногасящего откоса, соответствующая состоянию их предельного равновесия, была рассчитана по формуле (1) для исследуемых волновых параметров.

В процессе испытаний замерялась высота волн в точках 1÷5 и оценивалась устойчивость элементов крепления откоса.

Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн в опытах третьей серии представлены на рис. 9, а вид моделей во время опытов – на рис. 10. Результаты испытаний представлены в таблице 7 и на графике (рис. 11).

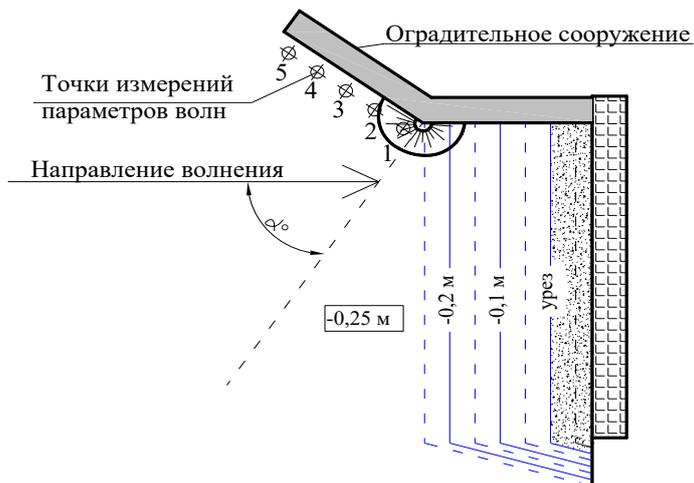


Рис. 9. Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части. Схема расположения точек измерения высот волн (иллюстрация авторов)
 Fig. 9. Series 3. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. The layout of the wave height measurement points (illustration by the authors)



Рис. 10. Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части. Вид модели во время (слева) и по окончании (справа) опытов (иллюстрация авторов)
 Fig. 10. Series 3. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. View of the model during (left) and at the end (right) of the experiments (illustration by the authors)

Таблица 7

Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.
 Результаты экспериментов

№ опыта	α , градусы	Высота волн, измеренных у сооружения $h_{изм}$, см					Устойчивость
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	
1	90	8,5	6,5	7,5	7,5	7,5	да
2	55	13,5	13	12	11,2	9,5	нет
3	50	15,4	15	13,5	12	10,2	нет
4	45	15,8	15,5	14	12,8	10,6	нет
5	40	16	15,6	14,3	13,5	12,2	нет
6	35	16	15,6	14,5	14	13,4	нет
7	30	16,2	15,5	15	14,5	13,8	нет

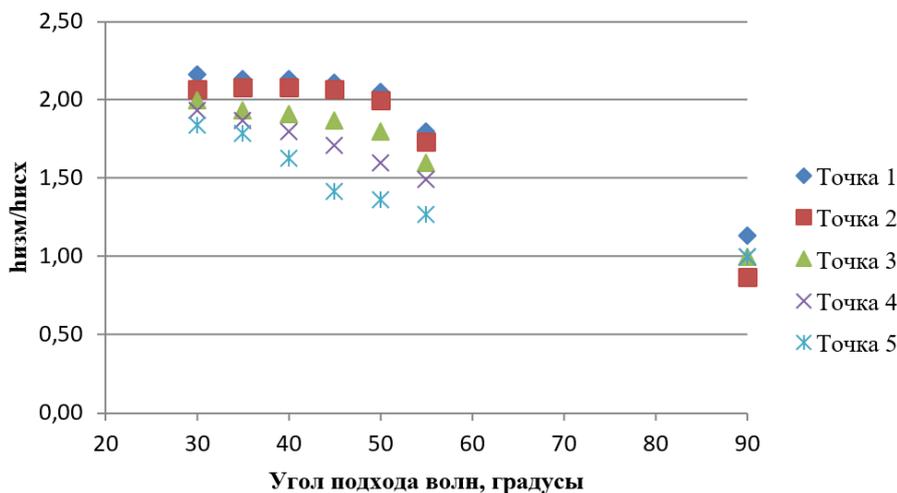


Рис. 11. Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части. Результаты экспериментов (иллюстрация авторов)

Fig. 11. Series 3. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. Experimental results (illustration by the authors)

По результатам экспериментов подтверждено, что при косом подходе волн (в особенности при угле подхода в диапазоне $70 \div 35^\circ$) к сооружению имеет место интерференция волн, в результате чего возрастает амплитуда (высота) волн, воздействующих на защитную наброску. Как следствие, элементы крепления расчетной массы по формуле (1) на откосе теряют устойчивость (рис. 7 и рис. 10).

Полученные результаты согласуются с данными природных наблюдений [7] и экспериментальных исследований [24, 25, 26] и, следовательно, могут быть использованы для корректировки нормативной методики расчета.

Из приведенных в [14] теоретических положений следует, что высота и длина интерферированной волны, определяется формулами (6) и (7):

$$h_{\text{инт}} = h_0 + k_{\text{ref}} h_0 \tag{6}$$

$$\lambda_{\text{инт}} = \lambda_0 + \lambda_0 \cos \alpha \tag{7}$$

где h_0 – исходная высота волны, м; k_{ref} – коэффициент отражения волн от гидротехнического сооружения (например, мола); λ_0 – длина исходной волны, м; α – угол между лучом волны и нормалью к оси мола, градусы.

Поскольку формула (1) полуэмпирическая, а на сооружение воздействует фактически прогрессивно-стоячая волна, рекомендуется в расчетах устойчивости сооружений по формуле (1) при косом подходе волн принимать $\lambda = \lambda_0$.

Коэффициент отражения волн от мола k_{ref} определяется в зависимости от его конструкции:

1. Берегозащитное сооружение (например, буна или мол) имеет сплошную конструкцию. Коэффициент отражения волн от него определяется по формуле А15 из СП 38.13330.2018:

$$k_{\text{ref}} = k_r k_p k_{\text{ref},i} \sqrt{\cos \alpha}, \tag{8}$$

где k_r , k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости поверхности сооружения, $k_{\text{ref},i}$ – коэффициент отражения, также принимаемый в зависимости от угла наклона отражающей поверхности к горизонту, при этом для отражающей поверхности, наклоненной к горизонту на угол более 45 градусов, $k_{\text{ref},i} = 1$.

2. Берегозащитное сооружение (например, буна или мол) имеет набросную конструкцию или защиту из наброски по всей длине. Коэффициент отражения волн от него определяется по формуле ВСП 33–03–07:

$$k_{\text{ref}} = 0,038 \sqrt[3]{\frac{\lambda}{h} \left(\frac{100\%}{\Pi} \right)^{3/2}} \frac{1}{\text{ctg}^2 \phi}, \tag{9}$$

где Π – пористость наброски (для камня $\Pi=20-25$, для обыкновенных бетонных массивов $\Pi=42-44$, для тетраподов и гексабитов $\Pi=47-50$), φ – угол наклона откоса набросной части мола к горизонту.

В расчетах устойчивости защитных набросок рекомендуется рассматривать три варианта расчета [14]:

1) Луч волны направлен перпендикулярно к оси мола. Наибольшие нагрузки испытывает боковая часть наброски. Расчетной является прямая волна высотой h_0 .

2) Луч волны направлен параллельно к оси мола. Наибольшие нагрузки испытывает головная часть наброски. Расчетной является прямая волна высотой h_0 .

3) Луч волны направлен под углом к оси мола $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Наибольшие нагрузки испытывает головная часть наброски. Расчетной является интерферирующая волна, определяемая по формуле (6).

Для подтверждения предложенной методики расчетов была проведена четвертая серия экспериментов, в которой схема модели была такая же, как и в опытах третьей серии (рис. 7). Отличие состояло в том, что исследования проводились с волногасящим откосом из камня массой, рассчитанной на увеличенную (в результате интерференции) волну (см. формулы (6) и (7)).

Параметры модели и волнения в опытах четвертой серии представлены в таблице 8.

Таблица 8

Серия 4. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.

Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению α , градусы	Высота исходных волн h , см	Средний период \bar{T} , с	Масса камня на откосе, г
1	90	7,5	1,0	210
2	55	7,5	1,0	210
3	50	7,5	1,0	210
4	45	7,5	1,0	210
5	40	7,5	1,0	210
6	35	7,5	1,0	210
7	30	7,5	1,0	210

Результаты экспериментов четвертой серии представлены на рис. 12. Элементы крепления откоса оказались устойчивы к воздействию волнения.



Рис. 12. Серия 4. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.

Вид модели во время опытов (иллюстрация авторов)

Fig. 12. Series 4. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. View of the model during the experiments (illustration by the authors)

4. Заключение

Выполненные экспериментальные исследования устойчивости камня в защитной наброске показали, что масса предельного равновесия элементов при косом подходе волн к гидротехническому сооружению оказывается существенно большей, чем рассчитанная по указаниям СП 38.13330.2018.

Таким образом, дано экспериментальное обоснование теоретическим разработкам, которое подтверждает необходимость учета в расчетной массе фасонных блоков интерференции волн при их отражении от мола.

Разработанная методика расчета массы предельного равновесия элементов волногасящих набросок после ее проверки на гидравлической модели может быть рекомендована для корректировки СП 277.1325800.2016 *Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования.*

Список литературы / References

1. Гусев, А. А. К вопросу минимизации рисков при эксплуатации мостовых сооружений / А. А. Гусев, И. Ю. Майстренко // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(11). – С. 45. – EDN TFOGMR. [Gusev A.A., Maystrenko I.Y. To the issue of minimizing risks in the operation of bridge structures // Technique and Technology of Transport. – 2019. – № 11. – P. 45]
2. Зиннуров, Т. А. Предгарантийные испытания как способ повышения надежности мостовых сооружений / Т. А. Зиннуров, Б. Д. Юсупов // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 1(1). – С. 24-32. – EDN ILEHUW. [Zinnurov T.A., Yusupov B.D. Pre-warranty tests as a way to improve the reliability of bridge structures // Roads and transport infrastructure. 2023. №1 (1). P. 24-32]
3. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417. [Maistrenko I.Yu., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. Part 1 // Internet Journal "Transport Facilities", Volume 4, No. 4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (free access). DOI: 10.15862/13TS417.]
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14TS417. [Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 3. Available at: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/14TS417]
5. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS118. [Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. (2018). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. Russian journal of transport engineering, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/08SATS118]
6. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05SATS118. [Ovchinnikov I.I., Maistrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. Part 4 // Internet Journal "Transport Facilities", 2018 No. 1, <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (free access). DOI: 10.15862/05SATS118.]

7. Ashpiz, E., Urgent issues of anti-deformation measures to protect coastal railways / Ashpiz, E., Savin, A., Tlyavlin, R., & Tlyavlina, G. // Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019) / Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 841-852.
8. Козлов, Д. В. Комплексные технические решения при реконструкции плотин / Д. В. Козлов, Д. А. Крутов // Природообустройство. – 2018. – № 2. – С. 22-28. – DOI 10.26897/1997-6011/2018-2-22-28. [Kozlov D.V., Krutov D.A. Complex technical solutions for dams reconstruction // Environmental Engineering. – 2018. – № 2. – P. 22-28. – DOI 10.26897/1997-6011/2018-2-22-28]
9. Васильева, Е. В. Конструктивные решения волногасящих элементов для предотвращения наводнения и обеспечения безопасной и надёжной работы водных объектов / Е. В. Васильева, Е. А. Яковенко // Российская наука в современном мире : Сборник статей XXV международной научно-практической конференции, Москва, 15 октября 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2019. – С. 35-37. [Vasilyeva E.V., Yakovenko E.A. Design solutions of wave damping elements to prevent flooding and ensure safe and reliable operation of water bodies // Russian Science in the Modern World: Proceedings of XXV International Scientific-Practical conference, Research and Publishing Center "Relevance RF", Moscow, Russia October, 15, 2019]
10. Rogachko, S. I. Scientific Support of Projects of Offshore Hydraulic Structures / S. I. Rogachko, N. V. Shunko // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 56, No. 1. – P. 1-5. – DOI 10.1007/s10749-023-01461-8. – EDN WYFJQM.
11. Парамонова, И. Е. Защита земляного полотна от размыва / И. Е. Парамонова, Н. С. Цветков, Е. С. Данильянц // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2023. – Т. 1. – С. 459-462. [Paramonova I.E., Tsvetkov N.S., Danilyants E.S. Protection of the earth bed from scouring // Scientific, Technical and Economic Cooperation of The Asia-Pacific Countries in XXI Century. – 2023. – Vol. 1. – P. 459-462.]
12. Кантаржи, И. Г. Экспериментальные исследования защитной наброски откосов портовых сооружений / И. Г. Кантаржи, Н. В. Шунько // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 10. – С. 10-18. [Kantarzhi I., Shunko N. Experimental studies of the protective outline of the slopes of port facilities // Power Technology and Engineering. – 2016. – № 10. – P. 10-18.]
13. Тлявлиная, Г. В. Экспериментальные исследования устойчивости волногасящих откосов для защиты мостовых опор от волнового воздействия / Г. В. Тлявлиная // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 37-50. – DOI 10.15593/2224-9826/2023.3.04. [Tlyavlina G.V. Experimental studies of the stability of wave-damping slopes to protect bridge supports from wave action. Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14. No. 3. P. 37-50. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.04]
14. Некоторые вопросы проектирования морских гидротехнических сооружений / А. А. Горлова, А. Н. Иваненко, Н. А. Иваненко [и др.]. – Сочи: Сочинский государственный университет, 2015. – 230 с. [Gorlova A.A., Ivanenko A.N.I., Ivanenko N.A. et al. Some questions of designing of marine hydraulic structures. – Sochi: Sochi State University, 2015. – 230 p.]
15. Шарп Д.Д. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984. – 280 с. [Sharp D.D. Hydraulic modelling. - Moscow, Mir, 1984. – 280 p.]
16. 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.
17. 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. Issue 3. P. 1567-1580. DOI: 10.5194/hess-2018-484.
18. 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. – P. 42-51.
19. 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. – P. 259-281. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_11.
 20. Zuev, N. D. Physical Modeling of the Projected Marine Terminal of the Nakhodka Mineral Fertilizer Plant / N. D. Zuev, A. S. Shunko, N. V. Shunko // *Power Technology and Engineering*. – 2022. – Vol. 56, No. 2. – P. 186-189. – DOI 10.1007/s10749-023-01512-0. – EDN WOOCMQ.
 21. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости. Пер.с англ. – М.: Энергия, 1971 – 480 с. [Daily J., Harleman D. Fluid dynamics. - Moscow, Energy, 1971, 480 p.]
 22. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. – М.: Изд-во МГУ, 1985 – 298с. [Kononkova G.E., Pokazeev K.V. Dynamics of sea waves. -Moscow, MGU Publishing House, 1985, 298 p.]
 23. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. Пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1981 – 598 с. [Lighthill J. Waves in fluids. - Moscow, Mir, 1981, 598 p.]
 24. 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: <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022900>.
 25. 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.
 26. Lishishin I.V., Tlyavlin R.M., Tlyavlina G.V. Physical model experiment of defence stability of bridge crossing slopes on Russkiy Island across The Bosphorus (the East) // *Proceedings on the Third International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (Coastlab 10), 28th-30th, September & October, 1st, 2010. Barcelona, Spain*.

Информация об авторах

Тлявлиная Галина Вячеславовна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, Российская Федерация; докторант кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: TlyavlinaGV@Tsnis.com, ORCID: 0000-0003-4083-9014

Макаров Константин Николаевич, доктор технических наук, академик Академии транспорта РФ, профессор кафедры Строительства и сервиса ФГБОУ ВО «Сочинский Государственный Университет (СГУ)», г. Сочи, Российская Федерация.

E-mail: ktk99@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6175-3618

Тлявлин Роман Маратович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО ЦНИИТС – руководитель ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, Российская Федерация

E-mail: TlyavlinRM@Tsnis.com, ORCID: 0000-0002-8648-0492

Емельянова Галина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: ga_emel@mail.ru, ORCID: 0009-0006-0696-1592

Information about the authors

Galina V. Tlyavlina, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Modeling, Calculations and Standardization in Hydraulic Engineering, Joint Stock Company “Central research institute of Transport Construction”, R&D Centre “Sea shores”, Sochi, Russian Federation; doctoral student of Bridge and Tunnels Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation.

E-mail: TlyavlinaGV@Tsnii.com, ORCID: 0000-0003-4083-9014

Konstantin N. Makarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction; Sochi State University, Sochi, Russian Federation.

E-mail: ktk99@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6175-3618

Roman M. Tlyavlin, Candidate of Technical Sciences, Head of the R&D Centre “Sea shores”, Joint Stock Company “Central research institute of Transport Construction”, Sochi, Russian Federation.

E-mail: TlyavlinRM@Tsnii.com, ORCID: 0000-0002-8648-0492

Galina A. Emelianova, Doctor of Technical Sciences, Professor of Bridge and Tunnels Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation.

E-mail: ga_emel@mail.ru, ORCID: 0009-0006-0696-1592