

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.22:627.231.037:627.52

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.95-107

Нормативные методы и численное моделирование при определении параметров расчетных волн для портовых гидротехнических сооружений

Измаил Григорьевич Кантаржи¹, Александр Григорьевич Гогин²,
Жанна Ивановна Нагорнова¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Указывается важность использования композитного моделирования при проектировании волновых нагрузок и воздействий на портовые гидротехнические сооружения, а именно определения параметров расчетных волн. В нормативных документах, предназначенных для вычисления допустимых значений элементов волн для безопасного обслуживания судов у причала, отмечаются некоторые недостатки, часть из которых описывается в данной статье.

Материалы и методы. В качестве примеров рассматриваются два объекта: Западный транспортно-логистический узел, проектируемый в Кольском заливе Баренцева моря (где для численного моделирования применялись модель расчета ветровых волн SWAN и модель течений и уровней воды COASTOX-CUR, вычисления аналитическим методом осуществлены по СП 38.13330.2018), и Многофункциональный грузовой район, расположенный в заливе Терпения Охотского моря (вычисления выполнялись в модели ветровых волн SWAN и длинноволновой модели SWASH). Для первого случая использовались значения волн в контрольных точках. Во втором примере — две расчетные модели для определения влияния судна на волновое поле: численная и аналитическая.

Результаты. Для первого примера выполнен анализ различий значений параметров волн с отражением и без аналитическим методом. Для второго представлены результаты моделирования — изополя значительных высот волн для стенки с судном и без него, с таблицей значений параметров волн в контрольных точках. Моделирование судна в причальном кармане показано через картины мгновенных отметок взволнованной поверхности и изополя значительных высот с выводом значений в контрольных точках. Представлен анализ полученных величин высот волн в полях с судном и без него.

Выводы. Анализ двух сценариев показал, что определение допустимых элементов волн у причала для безопасного обслуживания судов, выполненных по актуальным нормативным документам, может приводить к противоречиям, а именно между исходными данными для расчетов и значительным изменением полей волн акватории порта при взаимодействии волны с ошвартованным судном. Как следствие, это влияет на окончательное заключение о безопасном взаимодействии судов с причальными сооружениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, отражение волны, композитное моделирование, Западный транспортный логистический узел, Кольский залив, Многофункциональный грузовой район, залив Терпения, условия швартовки судна, поле волн

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кантаржи И.Г., Гогин А.Г., Нагорнова Ж.И. Нормативные методы и численное моделирование при определении параметров расчетных волн для портовых гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 95–107. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.95-107

Автор, ответственный за переписку: Жанна Ивановна Нагорнова, nagornova_zhanna10@mail.ru.

Normative methods and numerical modelling in determining the design waves for port hydraulic structures

Izmail G. Kantarzhi¹, Alexander G. Gogin², Zhanna I. Nagornova¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Engineering and construction company “ISTOK”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The importance of using composite modelling in the design of wave loads and impacts on port hydraulic structures, namely determining the parameters of design waves, is pointed out. The regulatory documents intended to calculate the permissible values of wave elements for the safe servicing of ships at the berth, some shortcomings are noted, some of which are described in this paper.

Materials and methods. Two objects are used as examples: the Western transport and logistics hub, designed in the Kola Bay of the Barents Sea (where the SWAN wind wave model and the COASTOX-CUR model of currents and water levels were used for numerical modelling, calculations by the analytical method were performed according to SR 38.13330.2018) and the Multifunctional Cargo Area located in the Terpeniya Bay of the Sea of Okhotsk (where calculations were carried out in the SWAN wind wave model and the SWASH long-wave model). For the first case, wave values at control points were used. In the second case, two calculation models were used to determine the influence of the vessel on the wave field — simplified and numerical ones.

Results. For the first example, the differences in the values of waves with and without reflection were analyzed using the analytical method. For the second, the modelling results are presented — the field of significant wave heights for a simplified wall with and without a vessel with a table of control point values. Modelling of a vessel in a mooring pocket is shown through pictures of instantaneous marks of the rough surface and the field of significant heights with the output of control point values. An analysis of the obtained height values in paintings with and without a vessel was performed.

Conclusions. Analysis of two problems showed that the determination of acceptable wave elements at the berth for the safe servicing of ships, carried out in accordance with current regulatory documents, can lead to contradictions, namely the initial data for calculations and a significant change in the wave fields of the port water area when the wave interacts with the moored vessel. As a consequence, this affects the final conclusion about the safe interaction of ships with berth structures.

KEYWORDS: numerical modelling, wave reflection, composite modelling, Western transport and logistics hub, Kola Bay, Multifunctional cargo area, Terpeniya Bay, conditions for mooring vessel, wave field

FOR CITATION: Kantarzi I.G., Gogin A.G., Nagornova Zh.I. Normative methods and numerical modelling in determining the design waves for port hydraulic structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):95-107. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.95-107 (rus.).

Corresponding author: Zhanna I. Nagornova, nagornova_zhanna10@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении предпроектных исследований волновых нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (ГТС) сегодня часто используется метод композитного моделирования [1, 2]. Этот метод интегрирует натурные измерения, расчетные методы, в том числе включенные в нормативные документы, физическое и численное моделирование. Метод композитного моделирования развивается, приемы разрабатываются. В работах [3–15] рассматриваются некоторые проблемы комбинированного моделирования, а именно задачи, решенные с помощью численных методов [3, 4] и авторских моделей, моделей открытого доступа [5–21].

В настоящей статье проводится сравнение аналитических методов, которые позволяют определить параметры расчетных волн у сооружения в контрольных точках, и численных методов, которые в дополнение к этому дают возможность установить поле волн в окрестности сооружения. Совместное использование аналитических методов и численного моделирования может приводить к сложностям и противоречиям. Эти вопросы обсуждаются в данном исследовании на примере проектирования условий безопасной швартовки судов у причальных набережных.

Подобные проблемы проанализированы для швартовки оснований гравитационного типа (ОГТ) у достроечной причальной набережной в Кольском заливе [3, 4]. ОГТ условно можно рассматривать как суда, однако это уникальные плавучие сооружения [5], отличающиеся большой массой и невозможностью отвода от причала в штормовых условиях. В настоящей работе также исследуется швартовка крупных судов — танкеров у причалов проектируемого портового комплекса «Многофункциональный грузовой район»

(МГР), расположенного на западном побережье залива Терпения Охотского моря южнее с. Новое.

Важной частью проектирования порта является оценка безопасных условий обслуживания судов у причальных сооружений. Для этого на данный момент среди действующих отечественных нормативных документов существуют: указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские ГТС (актуализированные в 2013 г.)¹, рекомендации по учету гидрометеорологического режима при проектировании недостаточно защищенных от волнения причалов² и рекомендации по определению допустимых ветро-волновых условий при проектировании морских портов (актуализированные в 2021 г.)³. Все три документа имеют примерно одинаковые методики выполнения оценки безопасных условий швартовки. Однако нет четких указаний условий использования отдельных документов.

В статье рассматриваются отличия результатов оценки безопасных условий обслуживания судов при разных подходах. В ходе выполнения расчетов также обнаружились моменты, которые не указываются или не уточняются в имеющихся нормативных документах: исходные данные параметров волнения (результаты численного моделирования или аналитических расчетов, учет волны без или с отражением

¹ Р 31.3.07–01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения: дополнение и уточнение СНиП 2.06.04–82*. М., 2001.

² РД 31.33.10–87. Рекомендации по учету гидрометеорологического режима при проектировании недостаточно защищенных от волнения причалов. М., 1987.

³ РД 31.33.03–88. Рекомендации по определению допустимых ветро-волновых условий при проектировании морских портов. М., 1989.

от сооружения), влияние судна на поле волн у причала. Таким образом, анализируются задачи на примере условий реальных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ни в одном из упомянутых нормативных документов не отмечается, следует ли принимать расчетную волну у причала в расчетах условий швартовки с учетом отражения волн от причала или принимать подходящую волну без учета отражения. Параметры расчетной волны по СП 38.13330.2018 определяются с учетом ее отражения от сооружений и преград, но других, расположенных поодаль от исследуемого сооружения. Учитывать ли отражение волн в расчетах условий швартовки от стенки, к которой пришвартовано судно? На этот счет в нормах ясности

нет. А в расчетах волновых нагрузок непосредственно на сооружение отражение волн входит в формулы расчета нагрузок.

Установлена возможная разница в результатах оценки безопасных условий швартовки судов у причалов на примере проектируемого сегодня морского терминала, предназначенного для обработки контейнеровозов и расположенного в Кольском заливе Баренцева моря. В рамках сопровождения проектирования по объекту авторами выполнялись научно-исследовательские работы по определению параметров ветрового волнения у гидротехнических сооружений. Местоположение терминала показано на спутниковом снимке (рис. 1).

В качестве исходных материалов для оценки использовались результаты численного моделиро-



Рис. 1. Спутниковый снимок Кольского залива с указанием местоположения терминала

Fig. 1. Satellite image of the Kola Bay indicating the position of the terminal

вания и результаты аналитического расчета волн. Результаты расчета волн выполнены согласно СП 38.13330.2018⁴. Для численного моделирования применялась модель расчета ветровых волн SWAN^{5, 6}.

Алгоритм использования численных моделей предполагает первоначальное моделирование ветровых волн с помощью спектральной волновой модели с получением данных о волновых напряжениях в расчетной области. Затем инициализируется модель течений и уровней воды, в которую, помимо прочего, на вход задаются волновые напряжения. Следующий этап — пересчет режима ветровых волн с учетом развивающихся на акватории течений.

Спектральная модель ветрового волнения SWAN. В настоящее время в мировой практике для расчета волновой обстановки применяется подход, основанный на получении режимных параметров путем расчетов по гидродинамическим численным моделям [6, 7]. Возможность его использования оправдана тем, что имеются большие массивы входных данных для расчетов волнения, а модели, описывающие зарождение, распространение и затухание волн, позволяют определять различные статистические ха-

рактеристики волнения с приемлемой точностью. Применяемые гидродинамические модели волнения базируются на решении уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме, а волновая обстановка на основе результатов такого моделирования является спектральным волновым климатом. Переход от спектров волнения к видимым элементам волн (высотам, периодам и т.д.) осуществляется по простым соотношениям через спектральные моменты.

Для данной работы был использован программный пакет SWAN. Выбор этого комплекса основан на ключевом преимуществе SWAN — нерегулярной сетке конечных элементов, которая обеспечивает более точное представление об исследуемой области. А применение 2D-модели считается достаточно точным для получения области построения.

Модель SWAN Делфтского технического университета, распространяемая в открытых кодах, в последнее десятилетие стала общепринятым в мировой практике береговой инженерии инструментом для расчета трансформации ветровых волн из зон глубоководья в прибрежную зону. Модель основана на уравнении баланса плотности волнового действия (или баланса энергии волн при отсутствии течений) с источниками и стоками.

Оценка безопасных условий взаимодействия судна с причальным сооружением проводилась для причала № 1, причала № 2 и причала портофлота с расчетными судами для направлений расчетных штормов пяти румбов: С, СВ, В, ЮВ и Ю повторяемостью один раз в год. Для определения условий швартовки

⁴ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
⁵ Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007.
⁶ SWAN team. Swan cycle III version 41.10AB. Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2017.

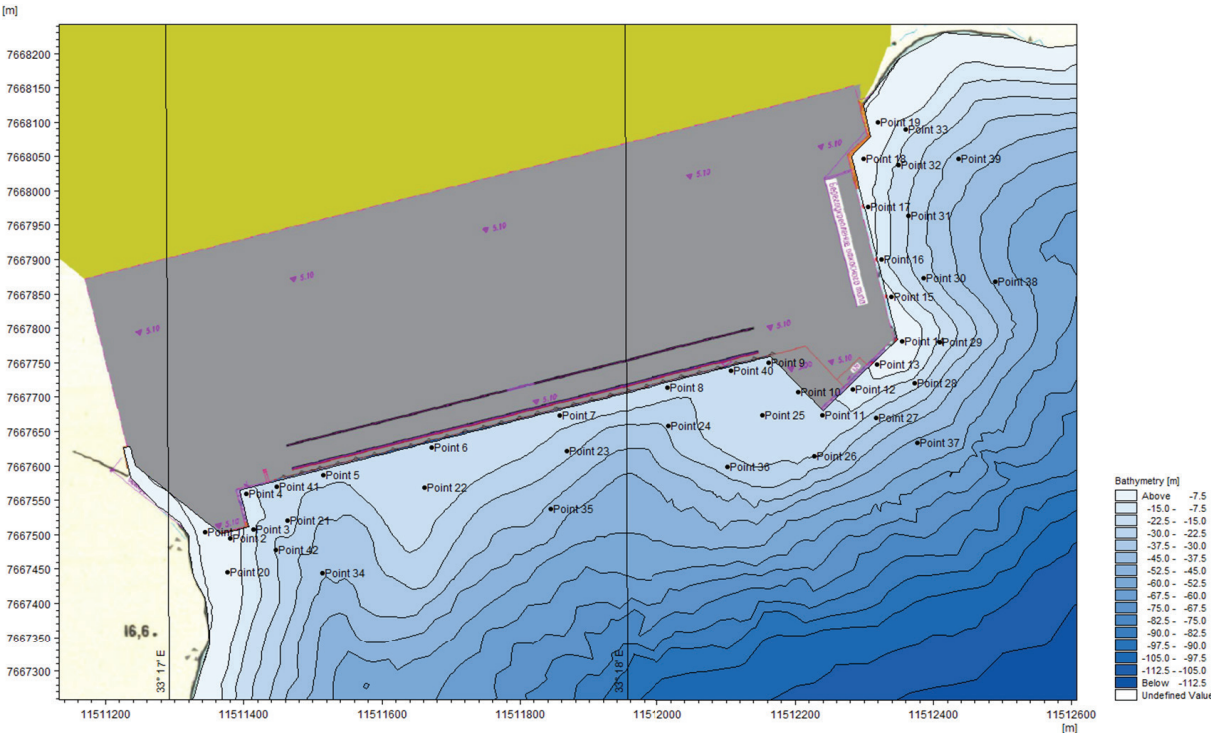


Рис. 2. Батиметрия акватории терминала с указанием контрольных точек выдачи результатов

Fig. 2. Bathymetry of the terminal with reference points for output results

используются высоты волн 5%-ной обеспеченности согласно действующей нормативной документации. Параметры волнения по СП 38.13330.2018 рассчитывались для расчетных штормов четырех направлений румбов: СВ, В, ЮВ и Ю. Не рассматривался С шторм, как и различное воздействие на причалы № 1 и 2 и причал портофлота.

Далее представлены параметры волнения, полученные в результате математического моделирования программой SWAN у причала № 1 (контрольные точки 5, 6 и 22), причала № 2 (контрольные точки 7, 8, 40, 23 и 24) и причала портофлота (контрольная точка 10) (табл. 1). Контрольные точки представлены на рис. 2.

В табл. 1 применяются следующие условные обозначения: $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны повторяемости один раз в год, м; $\bar{T}$ — средний период волны повторяемости один раз в год, с; $\bar{h}$ — средняя высота волны повторяемости один раз в год, м; $h_{5\%}$ — высота 5%-ной обеспеченности повторяемости один раз в год, м.

В результате анализа данных табл. 1 можно сделать вывод: отражение увеличивает высоты волн у причала (в нашем случае в виде вертикальной стенки) на 30–35 %, а в точках, отдаленных от причальной стенки на ширину расчетного судна, величина превышения отраженных волн и волн без отражения достигает 45–48 %.

Табл. 1. Параметры волн у причалов № 1, 2 и причала портофлота терминала, рассчитанные моделью SWAN и по СП 38.13330.2018 для волн различных направлений повторяемостью один раз в год, обеспеченностью 5 %

Table 1. Parameters of waves at the berths No. 1, 2 and the berth of the terminal’s port fleet calculated by the SWAN model and according to SR 38.13330.2018 for waves of different directions with repeatability 1 time per year with probability of exceedance of 5 %

Параметры без отражения / Parameters without reflection										СП 38.13330.2018 (аналитический метод) SR 38.13330.2018 (analytical method)
Направление подхода волн The direction of the wave approach	точка (т.) 5 point p. 5	т. 6 p. 6	т. 22 p. 22	т. 7 p. 7	т. 8 p. 8	т. 40 p. 40	т. 23 p. 23	т. 24 p. 24	т. 10 p. 10	
	$\bar{\lambda}$, м / m									
С / N	0,10	0,10	0,70	0,10	0,10	0,10	0,60	0,30	0,10	–
СВ / NE	7,10	7,00	6,80	6,30	3,90	1,30	6,30	6,00	0,50	5,81
В / E	6,10	6,00	6,10	5,80	5,00	3,80	6,00	5,90	3,50	7,57
ЮВ / SE	5,40	5,40	5,50	5,30	5,00	4,50	5,40	5,30	4,40	9,35
Ю / S	7,60	7,90	7,90	8,20	8,30	7,10	8,20	8,30	8,40	13,11
	$\bar{T}$, с / s									
С / N	0,30	0,30	0,70	0,20	0,30	0,30	0,60	0,40	0,30	–
СВ / NE	2,10	2,10	2,10	2,00	1,60	0,90	2,00	2,00	0,60	1,93
В / E	2,00	2,00	2,00	1,90	1,80	1,60	2,00	2,00	1,50	2,20
ЮВ / SE	1,90	1,90	1,90	1,80	1,80	1,70	1,90	1,80	1,70	2,45
Ю / S	2,20	2,20	2,20	2,30	2,30	2,10	2,30	2,30	2,30	2,90
	$\bar{h}$, м / m									
С / N	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	–
СВ / NE	0,16	0,16	0,19	0,14	0,10	0,05	0,18	0,17	0,03	0,26
В / E	0,20	0,19	0,21	0,18	0,15	0,11	0,20	0,19	0,08	0,30
ЮВ / SE	0,21	0,21	0,21	0,21	0,19	0,17	0,21	0,21	0,15	0,32
Ю / S	0,33	0,35	0,35	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,56
	$h_{5\%}$, м / m									
С / N	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	–
СВ / NE	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,49
В / E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,56
ЮВ / SE	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,59
Ю / S	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,98

Параметры с отражением / Parameters with reflectio									
Направление подхода волн The direction of the wave approach	точка (т.) 5 point p. 5	т. 6 p. 6	т. 22 p. 22	т. 7 p. 7	т. 8 p. 8	т. 40 p. 40	т. 23 p. 23	т. 24 p. 24	т. 10 p. 10
	$\bar{\lambda}, \text{ м / m}$								
C / N	0,10	0,10	0,80	0,10	0,10	0,10	0,60	0,30	0,10
CB / NE	11,50	10,80	10,70	10,10	8,10	1,30	10,20	9,00	0,50
B / E	7,50	6,80	7,20	6,40	5,90	5,00	6,80	6,40	4,80
IOB / SE	5,80	5,50	5,60	5,30	5,10	4,80	5,40	5,20	4,80
Ю / S	8,20	8,50	8,00	8,50	8,40	8,50	8,30	8,50	9,10
	$\bar{T}, \text{ с / s}$								
C / N	0,30	0,30	0,80	0,20	0,30	0,30	0,60	0,40	0,30
CB / NE	2,70	2,60	2,60	2,50	2,30	0,90	2,60	2,40	0,60
B / E	2,20	2,10	2,00	2,00	1,90	1,80	2,10	2,20	1,80
IOB / SE	1,90	1,90	1,90	1,80	1,80	1,70	1,90	1,80	1,80
Ю / S	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,40
	$\bar{h}, \text{ м / m}$								
C / N	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,05	0,03	0,01
CB / NE	0,31	0,22	0,27	0,19	0,13	0,06	0,21	0,17	0,03
B / E	0,33	0,26	0,29	0,24	0,20	0,14	0,25	0,22	0,09
IOB / SE	0,29	0,27	0,27	0,26	0,25	0,25	0,27	0,26	0,2
Ю / S	0,44	0,46	0,42	0,46	0,46	0,48	0,44	0,46	0,51
	$h_{5\%}, \text{ м / m}$								
C / N	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02	0,02	0,08	0,05	0,03
CB / NE	0,54	0,40	0,48	0,34	0,24	0,10	0,37	0,30	0,06
B / E	0,58	0,47	0,52	0,42	0,36	0,26	0,49	0,39	0,16
IOB / SE	0,51	0,47	0,48	0,46	0,45	0,43	0,47	0,46	0,36
Ю / S	0,78	0,80	0,74	0,80	0,81	0,84	0,78	0,81	0,9

Следует отметить, что используемая в работе спектральная волновая модель, основанная на уравнении баланса волнового действия, не рассматривает фазу отдельных волн, что делает ее непригодной для точного расчета дифракции и отражения волн от стенок ГТС. Область применения спектральных волновых моделей не включает области, где отражение волн от сооружений имеет когерентный характер. Иными словами, где есть вероятность возникновения стоячих волн. На практике энергетические волновые модели при полном отражении волн «сглаживают» высоты интерферируемых волн перед сооружением и дают увеличение высоты волн примерно в 1,4 раза. Тогда как перед сооружением в реальности будут наблюдаться узлы и пучности стоячих волн, а высота стоячих волн будет в 2 раза больше высоты подходящих волн (на расстоянии до одной длины волн от сооружения). Тем не менее в статье рассматривается припричальная акватория с ошвартованными судами, что исключает возможность появления стоячих волн на акватории. Кроме этого, область постановки судов зачастую оказывалась шире одной длины под-

ходящих волн. Таким образом, увеличение высот волн в 1,4 раза, обусловленное повышением общей энергии волнения на прилегающей к причалам акватории, может быть с достаточной точностью определено с помощью спектральной волновой модели.

Следуя общей идее статьи, рассмотрим степень влияния зашвартованного судна на поле волн у причала. Вопрос следующий: нужно ли учитывать влияние судна на волны у причала при оценке безопасности швартовых операций.

Задача влияния судна на поле волн у причала решается на примере объекта, расположенного на западном побережье залива Терпения Охотского моря южнее с. Новое. Местоположение объекта на спутниковом снимке показано на рис. 3.

Проанализируем два варианта: судно, зашвартованное у основного причала (рис. 4), и судно, зашвартованное в защищенном «кармане» причальных сооружений (рис. 5). Первая часть задачи влияния судна на поле волн у причала решается в той же батиметрии, что и МГР, но с упрощенным рассмотрением взаимодействия причальной стенки (основной причал) с за-

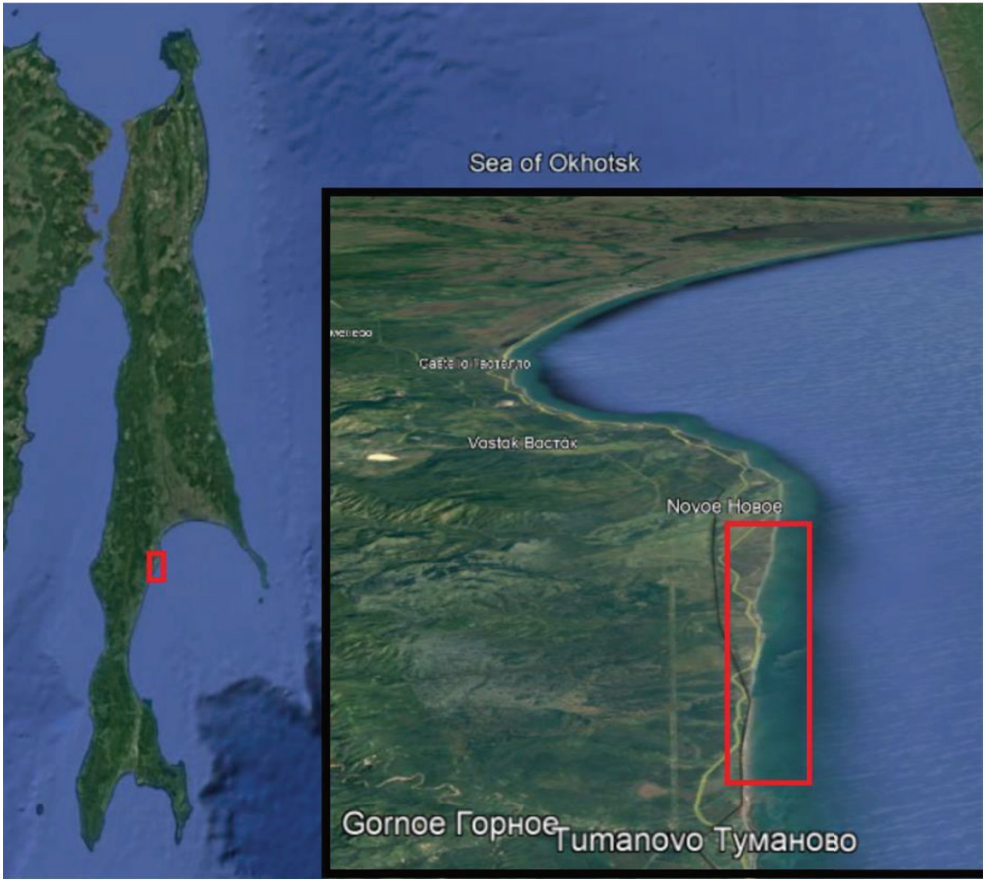


Рис. 3. Спутниковый снимок залива Терпения Сахалинской области с указанием местоположения объекта
Fig. 3. Satellite image of the Terpeniya Bay of the Sakhalin region indicating the location of the facility

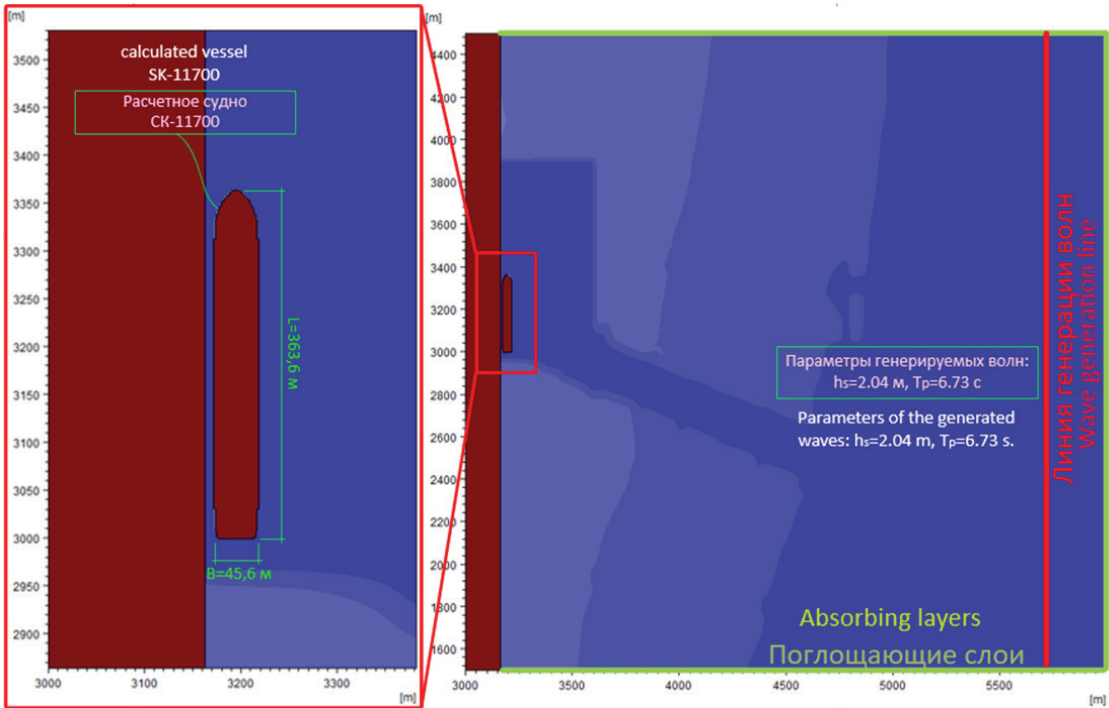


Рис. 4. Расчетная модель с указанием распределения глубин, расположения поглощающих и отражающих слоев численной модели, линии генерации волн, параметры генерируемых волн
Fig. 4. Calculation model with indication of depth distribution, arrangement of the absorption and reflection layers of the numerical model, wave generation lines, parameters of generated waves

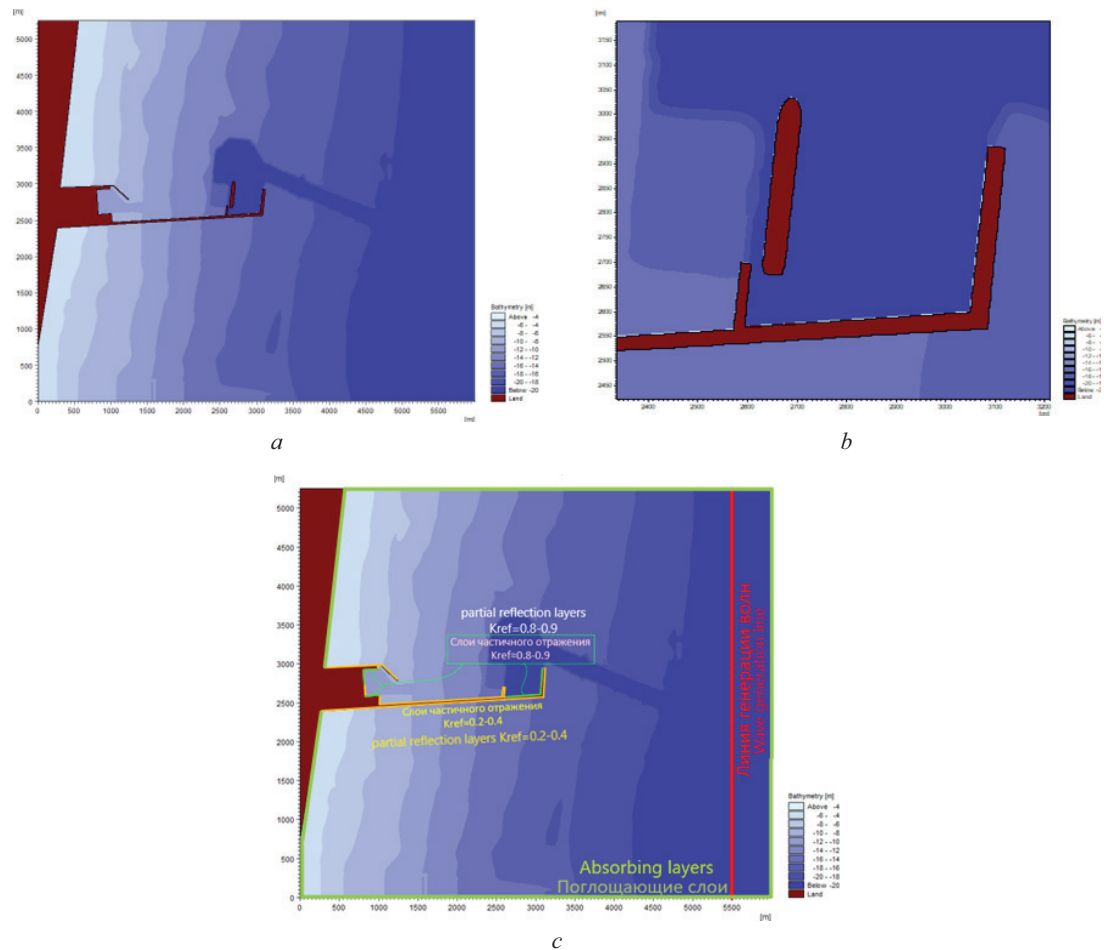


Рис. 5. Расчетная модель В шторм (с ошвартованным судном) (а, б); с указанием распределения глубин, расположения поглощающих и отражающих слоев, линии генерации волн (без ошвартованного судна) (с)

Fig. 5. Calculation model E (East) storm (with the moored vessel) (a, b); with indication of the depth distribution, arrangement of absorption and reflection layers, wave generation lines (without the moored vessel) (c)

швартованным судном (фронт рассматриваемой волны (расчетный шторм В (восточного) румба) параллелен линии кордона и диаметральной плоскости судна). В качестве расчетного судна взято СК-11700, наибольшая ширина — 45,61 м; общая длина — 363,57 м; осадка в балласте и грузу — 9,0/15,0 м соответственно; водоизмещение — 178,29 тыс. т. Параметры расчетной волны взяты из моделирования волнения на объекте МГР. Расчетная модель первой части представлена на рис. 4. Влияние объектов, расположенных до основного причала, не рассматривается.

Вторая часть задачи о влиянии судна на поле волн у причала, защищенного от волнения В румба, решается в батиметрии и плане сооружений объекта МГР. В этом случае рассматривается взаимодействие причальных сооружений определенной конфигурации, зашвартованного танкера большого водоизмещения и принимаемой ими волны (фронт практически параллелен диаметральной плоскости судна и линии кордона). Вторая часть задачи должна раскрыть последствие отражения волн в большей степени от судна, а далее их взаимодействия с причалом, защищенным от рассматриваемого волнения.

С целью моделирования использовались программы SWAN и SWASH⁷. Для численного моделирования волнового режима на небольшой акватории непосредственно у ГТС порта применяется современная негидростатическая волновая модель SWASH.

Волновая модель SWASH. Недавно разработанная длинноволновая модель SWASH основана на уравнениях нелинейной теории мелкой воды, включающих в отличие от общепринятой гидростатической версии интеграл давления по вертикали, расчет которого проводится на каждом временном шаге, что позволяет описывать негидростатическое распределение давления по глубине. Таким образом, численная реализация модели близка к многослойным вариантам моделей, основанных на уравнениях Буссинеска, обеспечивая дисперсионное соотношение модели SWASH, в линеаризованном случае близкое к точному дисперсионному соотношению линейной волновой теории [14–16].

⁷ SWASH. URL: <http://swash.sourceforge.net>

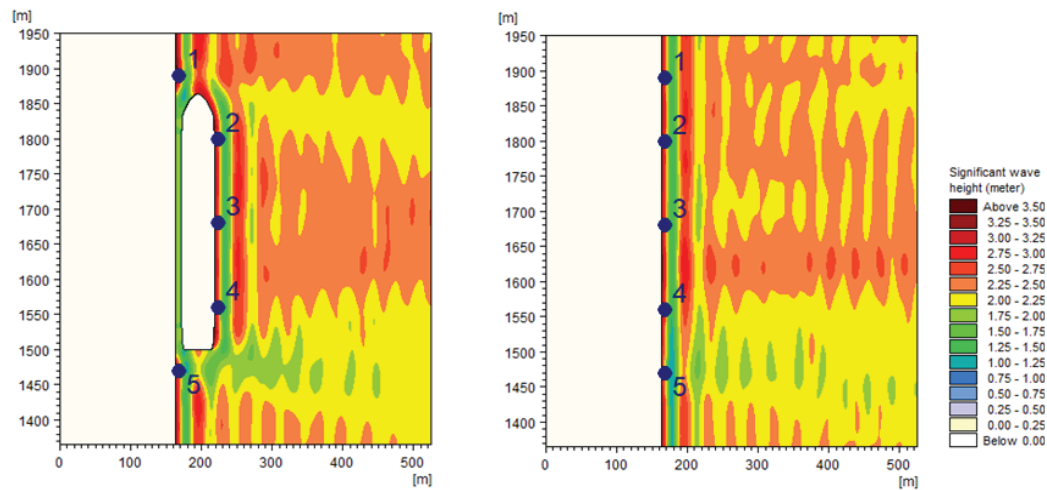


Рис. 6. Изополя значительных высот волн

Fig. 6. Isofield significant wave heights

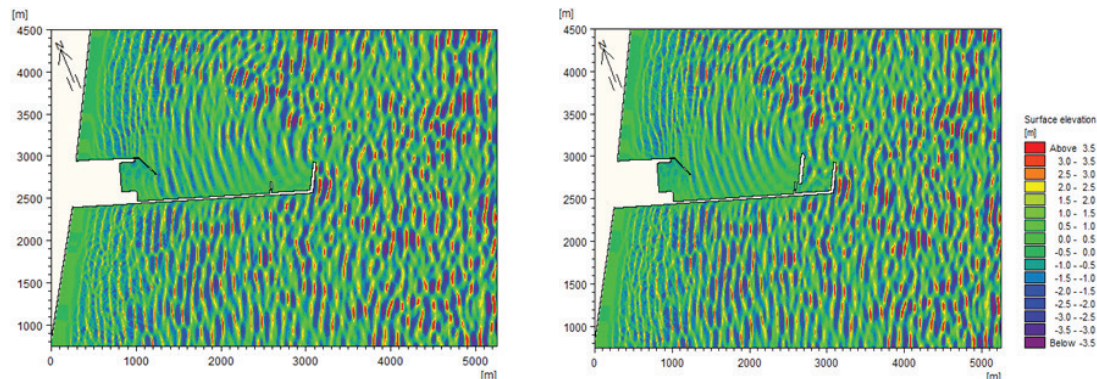
Модель активно развивается в последние годы в приложении к различным задачам волновой гидродинамики прибрежной зоны, в том числе к задачам генерации длинных инфрагравитационных волн ветровыми волнами в прибрежной зоне, учитывает обрушение волн, формирование вдольбереговых течений, переформирования берегов. Модель становится альтернативным конкурентным инструментом по отношению к моделям, основанным на уравнениях типа Буссинеска, для моделирования негидростатических, длинноволновых процессов (т.е. диспергирующих волн) в прибрежной зоне шельфа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 6 и в табл. 2 представлены результаты численного моделирования поля волн для судна, пришвартованного у основного причала.

Табл. 2. Высота волн в расчетных точках у основного причала

С судном / With vessel						Без судна / Without vessel					
Номер точки Number point	1	2	3	4	5	Номер точки Number point	1	2	3	4	5
$h_{13\%}$, м / m	3,26	2,82	2,76	2,75	2,74	$h_{13\%}$, м / m	2,85	2,83	2,70	2,71	2,32



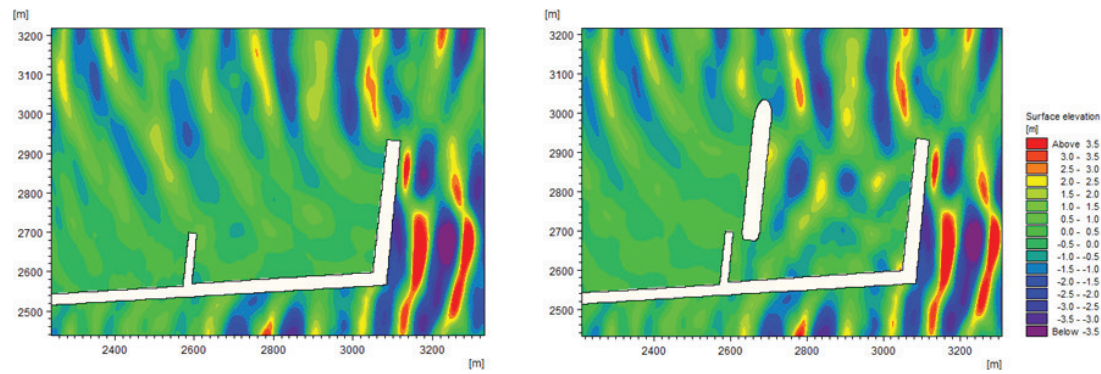


Рис. 7. Мгновенные отметки взволнованной поверхности при шторме В румба повторяемостью один раз в 25 лет
Fig. 7. Instant marks of excited surface in a storm E rumba with repeatability 1 time for 25 years

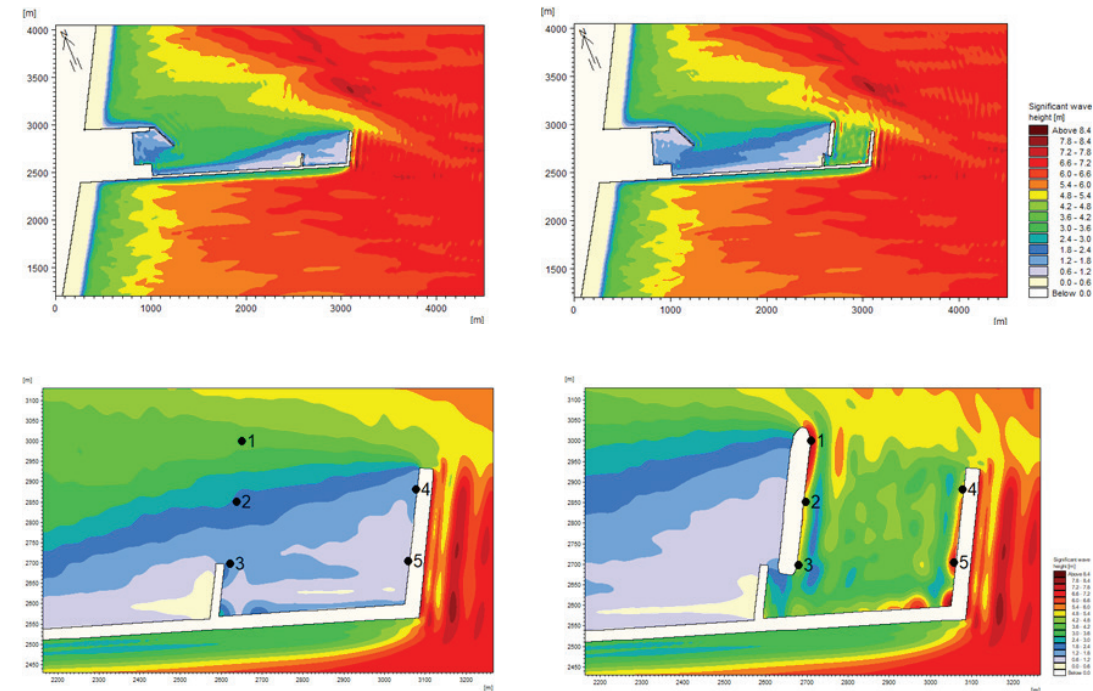


Рис. 8. Изополя значительных высот волн при шторме В румба повторяемостью один раз в 25 лет
Fig. 8. Isofield significant wave heights in a storm E rumba with repeatability 1 time for 25 years

Табл. 3. Высота волн в расчетных точках
Table 3. Wave height at calculation points

Без судна / Without vessel						С судном / With vessel					
Номер точки Number point	1	2	3	4	5	Номер точки Number point	1	2	3	4	5
$h_{13\%}$, м / m	8,12	5,16	4,76	5,03	6,91	$h_{13\%}$, м / m	3,81	2,32	1,64	1,57	0,87

Теперь обратимся ко второй части задачи — влияние судна на поле волн при его расположении внутри причального кармана. Результаты моделирования показаны на рис. 7, 8 и в табл. 3 в точках выдачи. В этом случае влияние зашвартованного судна на волны значительное. При рассмотрении изменений в высотах волн видно, что заметно уменьшение высоты у кормы и увеличение у носа при том, что основной фронт волн принимает на себя именно

нос судна. Часть волн, которые не уходят в направлении носа, отражаются от борта и уходят обратно, повышая значение высот волн у причала напротив, защищенного от В румба волнения, после чего опять возвращаются обратно к судну и гасятся только на откосе подходного мола. Увеличение высот волн к носу судна составляет более чем в два раза, с 3,81 до 8,12 м, у середины борта и кормы — тоже более чем в два раза. Большая часть

отраженной волны приходится на угол между причалом напротив и откосным молом — увеличение высоты на 6 м, т.е. волна активно нарастает и концентрируется в самом не тронутом до стоянки судна месте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что определение допустимых высот волн у причала в соответствии с актуальными нормативными документами может приводить к противоречиям. А именно, нормативные документы требуют использовать волны у причала, но не нормируют, следует ли учитывать отражение волн от причала и влияние зашвартованного судна на поле волн в причальной акватории. Согласно полученным результатам, учет отражения волн от причала, к которому пришвартовано судно, может увеличить

их высоту на 48 %, что в дальнейшем в значительной степени влияет на общие выводы о защищенности акватории от ветровых волн и прогнозируемое время работы причалов по метеоусловиям.

Приведенные примеры реальных условий проектируемых портовых комплексов показывают, что влияние рассмотренных факторов, отражение и корпус судна могут приводить к изменению высот волн в окрестности ошвартованного судна в разы. Взаимодействие зашвартованного судна с причальными сооружениями и волнением приводит к значительному изменению высот волн у защищенных от этого волнения причалов. Также это влечет изменения соответствующего заключения о безопасности швартовки.

Требуется дальнейшее уточнение нормативных методов расчета в рассмотренном направлении и развитие численных методов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gerritsen H., Sutherland J., Deigaard R., Sumer M., Fortes C.J.E.M., Sierra J.P. et al. Composite modelling of interactions between beaches and structures // Journal of Hydraulic Research. 2011. Vol. 49. Issue sup1. Pp. 2–14. DOI: 10.1080/00221686.2011.589134
2. Gerritsen H., Sutherland J., Santos J.A., Boo-gaard H., Caires S., Deigaard R. et al. Composite modeling // Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network. 2011.
3. Kantarzi I., Anshakov A. Interactive numerical model of hydrometeorologic factors in Kola Bay // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 03016. DOI: 10.1051/e3sconf/202126303016
4. Анишаков А.С., Кантаржи И.Г. Верификация численной гидродинамической модели Кольского залива // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 473–485. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.473-485. EDN WFGZVW.
5. Афремов А.Ш., Куликова А.Н., Смолина Н.А. Обеспечение безопасности стоянки пришвартованного крупнотоннажного судна в условиях ветра и волнения // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2011. № 59 (343). С. 109–122. EDN NQYKWJ.
6. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/cbo9780511618536
7. Booij N., Haagsma I.J., Holthuijsen L., Kieftenburg A., Ris R., van der Westhuysen A. et al. SWAN Cycle III version 40.51: user manual. 2004.
8. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe. 1973. No. 12. 95 p.
9. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation // Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III. 1997. Vol. 30. Pp. 343–352. DOI: 10.2495/CE970331
10. Berkhoff J.C.W. Computation of combined refraction — diffraction // Coastal Engineering 1972. 1972. Pp. 471–490. DOI: 10.1061/9780872620490.027
11. Berkhoff J.C. Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction. Delft, Hydraulic Laboratory, 1976. 102 p.
12. Hervouet J.M. TELEMAC, a hydroinformatic system // La Houille Blanche. 1999. Vol. 85. Issue 3–4. Pp. 21–28. DOI: 10.1051/lhb/1999029
13. Kofoed-Hansen H., Sloth P., Sørensen O.R., Fuchs J. Combined numerical and physical modelling of seiching in exposed new marina // Coastal Engineering 2000. 2001. Pp. 3600–3614. DOI: 10.1061/40549(276)281
14. Smit P., Stelling G., Zijlema M. Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin // ACOMEN 2011. 2011.
15. Rijnsdorp D.P., Smit P.B., Zijlema M. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH // Coastal Engineering Proceedings. 2012. Issue 33. P. 27. DOI: 10.9753/icce.v33.currents.27
16. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58. Issue 10. Pp. 992–1012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.015
17. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б. Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. № 4. С. 5–16. EDN NCCVAV.
18. Дикий П.В., Дзюба Н.Н., Железняк М.И., Соколкин М.В. Моделирование волнового режима побережья Имеретинской низменности // International

Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Т. 7. № 2. С. 54–63. EDN PZEXEN.

19. Галенин Б.Г., Кузнецов В.В. Моделирование трансформации волн в прибрежной зоне // Водные ресурсы. 1980. Т. 1. С. 156–165.

20. Warner J.C., Geyer W.R., Lerczak J.A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assess-

ment // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2005. Vol. 110. Issue C5. DOI: 10.1029/2004JC002691

21. Warner J.C., Geyer W.R., Arango H.G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36. Issue 7. Pp. 921–935. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.008

Поступила в редакцию 5 июля 2024 г.

Принята в доработанном виде 17 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 17 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Измаил Григорьевич Кантаржи** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kantardgi@yandex.ru;

Александр Григорьевич Гогин — кандидат технических наук, ведущий специалист; **Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК»**; 115230, г. Москва, Варшавское ш., д. 46; alex.gogin@bk.ru;

Жанна Ивановна Нагорнова — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nagornova_zhanna10@mail.ru.

Вклад авторов:

Кантаржи И.Г. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Гогин А.Г. — вычисления в программных комплексах SWAN, COASTOX и SWASH.

Нагорнова Ж.И. — написание исходного текста, оформление статьи, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gerritsen H., Sutherland J., Deigaard R., Sumner M., Fortes C.J.E.M., Sierra J.P. et al. Composite modelling of interactions between beaches and structures. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(sup1):2-14. DOI: 10.1080/00221686.2011.589134

2. Gerritsen H., Sutherland J., Santos J.A., Boogaard H., Caires S., Deigaard R. et al. Composite modelling. *Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*. 2011.

3. Kantarzh I., Anshakov A. Interactive numerical model of hydrometeorologic factors in Kola Bay. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:03016. DOI: 10.1051/e3sconf/202126303016

4. Anshakov A.S., Kantarzh I.G. Verification of the numerical hydrodynamic model of the Kola bay. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):473-485. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.473-485. EDN WFGZVW. (rus.).

5. Afremov A.S., Kulikova A.N., Smolina N.A. Ensuring the safety of moored large-tonnage vessel parking in conditions of wind and waves. *Transactions of the Krylov Shipbuilding Research Institute*. 2011; 59(343):109-122. EDN NQYKWJ. (rus.).

6. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/cbo9780511618536

7. Booij N., Haagsma I.J., Holthuijsen L., Kieftenburg A., Ris R., van der Westhuysen A. et al. *SWAN Cycle III version 40.51: user manual*. 2004.

8. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*. 1973; 12:95.

9. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation. *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III*. 1997; 30:343-352. DOI: 10.2495/CE970331

10. Berkhoff J.C.W. Computation of combined refraction — diffraction. *Coastal Engineering* 1972. 1972; 471-490. DOI: 10.1061/9780872620490.027

11. Berkhoff J.C. *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction*. Delft, Hydraulic Laboratory, 1976; 102.

12. Hervouet J.M. TELEMAC, a hydroinformatic system. *La Houille Blanche*. 1999; 85(3-4):21-28. DOI: 10.1051/lhb/1999029

13. Kofoed-Hansen H., Sloth P., Sørensen O.R., Fuchs J. Combined numerical and physical modelling of seiche in exposed new marina. *Coastal Engineering* 2000. 2001; 3600-3614. DOI: 10.1061/40549(276)281

14. Smit P., Stelling G., Zijlema M. *Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin*. ACOMEN 2011. 2011.
15. Rijnsdorp D.P., Smit P.B., Zijlema M. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH. *Coastal Engineering Proceedings*. 2012; 33:27. DOI: 10.9753/icce.v33.currents.27
16. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*. 2011; 58(10):992-1012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.015
17. Divinsky B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.B. Parameters of wind waves on the protected water areas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2010; 3(4):5-16. EDN NCCVAV. (rus.).
18. Dikiy P.V., Dzyuba N.N., Zheleznyak M.I., Sorokin M.V. Modeling of wave climate of Imeretinsky lowland coast. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011; 7(2):54-63. EDN PZEXEN. (rus.).
19. Galenin B.G., Kuznecov V.V. Modeling of wave transformation in the coastal zone. *Water Resources*. 1980; 1:156-165. (rus.).
20. Warner J.C., Geyer W.R., Lerczak J.A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005; 110(C5). DOI: 10.1029/2004JC002691
21. Warner J.C., Geyer W.R., Arango H.G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time. *Computers & Geosciences*. 2010; 36(7):921-935. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.008

Received July 5, 2024.

Adopted in revised form on October 17, 2024.

Approved for publication on October 17, 2024.

B I O N O T E S: **Izmail G. Kantarzh** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kantardgi@yandex.ru;

Alexander G. Gogin — Candidate of Technical Sciences, leading specialist; **Engineering and construction company “ISTOK”**; 46 Varshavskoe shosse, Moscow, 115230, Russian Federation; alex.gogin@bk.ru;

Zhanna I. Nagornova — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nagornova_zhanna10@mail.ru.

Contribution of the authors:

Izmail G. Kantarzh — scientific guidance, finalization of the text, final conclusions.

Alexander G. Gogin — calculations in software complexes SWAN, COASTOX and SWASH.

Zhanna I. Nagornova — writing the source text, design of the article, finalization of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.