ВЛИЯНИЕ ПОДХОДНОГО КАНАЛА НА ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ В АКВАТОРИИ ПОРТА

И.Г. Кантаржи, А.С. Аншаков

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Предмет исследования: подходные судоходные каналы и акватория порта. Многие из новых портов требуют строительства длинных и глубоких навигационных каналов через мелководье для обеспечения подхода к причалам крупнотоннажных судов. Глубокие каналы могут оказывать значительное влияние на распространение волн, важно рассмотреть это взаимодействие на ранней стадии проектирования для корректной оценки последствий волнового воздействия на акваторию порта.

Цели: выявление влияния судоходных каналов на волновой режим в акватории порта.

Материалы и методы: работа выполнена на основе наблюдений и опубликованных источников, методом теоретического изучения, анализа и обобщения материала.

Результаты: преломление и отражение волн на бровках канала могут потенциально привести к существенному фокусированию энергии волн, а также к возникновению областей уменьшенного волнового воздействия.

Выводы: выявлено, что расположение судоходных каналов значительно влияет на волновой режим в акватории порта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: судоходный канал, акватория порта, волновой режим, численное моделирование, критический угол, рефракция, дифракция, интерференция, волновая энергия, ARTEMIS, PHAROS, TOMAWAC, Mike 21, SWAN

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кантаржи И.Г., Аншаков А.С. Влияние подходного канала на волновой режим в акватории порта // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 1 (27). Ст. 8. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>.

INFLUENCE OF THE APPROACH NAVIGATION CHANNEL ON WAVE REGIME IN WATERBODY OF PORT'S AREA

I.G. Kantarzhi, A.S. Anshakov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse,
Moscow, 129337, Russian Federation*

Subject: approach navigation channels and waterbody of port's area. Many of the new ports require construction of long and deep navigation channels through shallow water to ensure the approach to the berths of large-capacity vessels. Deep channels can have a significant effect on wave propagation, and it is important to consider this interaction at early stages of design to adequately assess the effects of wave action on the waters of the port.

Research objectives: studying the influence of approach shipping channels on wave regime of port's water area.

Materials and methods: the work is performed based on observations and published sources, the method of theoretical study, analysis and generalization of the material.

Results: refraction and reflection of waves at the edges of the channel can potentially lead to a significant concentration of energy of waves, and also to a generation of areas of reduced wave action.

Conclusions: this work has provided examples which demonstrate that the location of navigation channels significantly affects the wave regime in waterbody of the port's area.

KEY WORDS: navigation channel, port's waterbody, wave regime, numerical simulation, critical angle, refraction, diffraction, interference, wave energy, ARTEMIS, PHAROS, TOMAWAC, Mike 21, SWAN

FOR CITATION: Kantarzhi I.G., Anshakov A.S. Vliyanie podkhodnogo kanala na volnovoy rezhim v akvatorii porta [Influence of the approach navigation channel on wave regime in waterbody of port's area]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2018, vol. 8, issue 1 (27), paper 8. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian).

ВВЕДЕНИЕ

Общемировая тенденция к увеличению размеров судов в последние годы приводит к тому, что значительное число современных портов в настоящее время имеют глубоководные подходные каналы. На протяжении последних десятилетий установлены эффекты преломления и внутреннего отражения волн от бровок навигационных каналов [1, 2]. По мере увеличения глубины подходных каналов эти эффекты становятся все более важными для выбора конструкции и конфигурации портовых сооружений, так как наличие канала может способствовать проникновению больших волн на акваторию. Важно понимать физическое воздействие на распространение волн в зоне навигационных каналов и иметь соответствующие технические инструменты для оценки этого эффекта в процессе проектирования.

В статье рассмотрены процессы распространения волн через профиль канала, влияние на процессы трансформации волн внутри и вокруг канала, а также использование численных волновых моделей для исследования взаимодействия волн и каналов. Использовались современные численные модели, такие как ARTEMIS, PHAROS, TOMAWAC, Mike 21BW, SWAN, на примере которых показано, как наличие навигационного канала существенно изменяет волновой режим в акватории порта. Сравнение численных результатов моделей ARTEMIS и TOMAWAC проведено на экспериментах для двух конфигураций порта Коччи (Индия) и для трех вариантов трассировки подходного канала [3]. Верификация волновых моделей ARTEMIS, PHAROS и SWAN проводилась данными физического моделирования для проектируемого порта Тамань (РФ) [4], а для модели Mike 21BW — данными натурных наблюдений в порту Зебрюгге (Бельгия) [5, 6].

Известно, что наличие канала может влиять на распространение волн в мелководной зоне. Влияние канала зависит как от периода волны, так и направления распространения волны относительно трассы канала. На движение волн в прибрежной зоне влияют процессы рефракции, дифракции, интерференции, диссипации волновой энергии и донное трение. Можно выделить три характерных сценария прохождения волн через канал (рис. 1):

1. Ось канала параллельна направлению волн. В этом случае будут наблюдаться процессы рефракции и интерференции волн. Высота волн в канале будет уменьшаться за счет увеличения глубины, примерно до 40 % [1]. Волны преломляются на бровках канала, в результате этого волновая энергия возрастает на бровках канала, а по оси канала она, напротив, уменьшается.

2. Ось канала перпендикулярна направлению волн. Волна пройдет через канал с трансформацией ее параметров. Высота волны также уменьшится за счет увеличения глубины.

3. Волны подходят под углом к оси канала. Автор работы [1] утверждает, что критическим является угол между лучом волны и осью канала (рис. 1) порядка 25° . Если этот угол больше, то волна проходит через канал, если меньше, то волна будет отражаться, и высота волны на входе в канал уменьшится. При достаточно маленьких углах подхода волны относительно оси канала может произойти «захват» волны на бровке канала. Под эффектом «захвата» волны подразумевается, что волны после преломления остаются на наветренной бровке канала и движутся по ней. В результате этого эффекта на наветренной бровке канала происходит увеличение волновой энергии, которая приводит к увеличению высоты волны. На подветренной бровке канала волновая энергия, наоборот, снижается, что приводит к уменьшению высоты волны.

Рис. 1. Сценарии прохождения волны через канал

Вышеупомянутые сценарии зависят от периода волн. Короткие волны подвержены преломлению меньше, чем длинные волны и для них критический угол меньше. Кроме того, если длина волны значительно больше, чем ширина канала, то волны «не замечают» канал и пройдут через него, а короткие волны в этом случае будут отражены. Физические испытания на модели также показывают концентрацию энергии волн на бровках канала (рис. 2). Такая волновая картина образуется в результате отражения волн от бровок канала. В этом случае интерференция волн может привести к небольшим районам значительного усиления высоты волны. Интерференционный узор также появляется и при использовании нелинейных численных моделей, таких как ARTEMIS, PHAROS, TOMAWAC, Mike 21BW, в виде полос (дорожек, перьев). Ширина полос зависит от направления волнения, но обычно составляет около половины длины отраженной

от бровки канала волны. Важно отметить, что эти эффекты лучше всего проявляются при моделировании монохроматического режима волны. Однако при использовании спектрального подхода интерференционные узоры сглаживаются, потому как различные компоненты спектра волн отражаются и преломляются по-разному.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По сложившейся в настоящее время технологии современного математического моделирования в задачах морской гидротехники и гидравлики (проектирования портов и берегозащитных сооружений) выделяются следующие основные этапы, связанные с использованием отдельных моделей и моделирующих комплексов:

1. Расчет климатических характеристик ветрового волнения в заданных точках на подходе к исследуемому объекту (порт, участок побережья) на основе нелинейных спектральных моделей ветрового волнения (наибольшее распространение получили модели WaveWatch III [7] и SWAN [8, 9], по полям ветрам ветра над морем за многолетний (30–50 лет) период на основе полей метеозлементов из реанализа метеополей (например, NCEP/NCAR или ERA-40) при их возможном даунскейлинге с использованием численных моделей прогноза погоды.

2. Расчет волнового режима прибрежной зоны или огражденной морской акватории на основе линейных рефракционно-дифракционных моделей уравнений пологих склонов [10–12] в стационарной эллиптической форме или нестационарной гипербо-

лической форме уравнений пологих склонов [13, 14]. Нелинейные волновые модели в задачах береговой гидротехники стали все активнее использоваться в последние десятилетия как в гидростатическом приближении — это уравнения мелкой воды, так и в негидростатическом приближении — нелинейно дисперсионные уравнения типа Буссинеска.

Модель ARTEMIS [15], как и модели PHAROS, TOMAWAC, основана на уравнениях пологих склонов [10, 12]. Модель описывает трансформацию волн в прибрежной зоне с учетом рефракционно-дифракционных процессов, диссипации за счет трения о дно и разрушения волн. Эллиптические уравнения пологих склонов решаются численно методом конечных элементов.

Модель Mike 21BW [16] из программного комплекса береговой инженерии MIKE 21 датского института «DHI Water&Environment» основана на уравнениях Буссинеска [17–19]. Модель учитывает рефракцию, дифракцию, обрушение волн, донное трение и отражение волн от препятствий. Она хорошо апробирована и является широко используемым инструментом для моделирования волн в прибрежной зоне и на акваториях береговых сооружений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В некоторых случаях эффекты преломления и отражения волн от бровок каналов могут быть потенциально выгодными с точки зрения достижения приемлемых волновых условий в местах стоянки судов. В качестве примера можно привести проект порта Коччи (Индия). На рис. 3 показаны вол-

Рис. 2. Отражение и интерференция волн от бровки канала на физической модели в волновом бассейне [1]

новые поля, рассчитанные моделями TOMAWAC и ARTEMIS для двух конфигураций порта [3].

Падающие волны отражаются от бровки канала, в результате высота волн у причалов не превышает значений 0,5 м для обеих конфигураций порта. На рис. 3 видны характерные для этого случая волновые поля, от наветренной бровки канала тянутся интерференционные полосы (дорожки). Наличие волнолома во второй конфигурации незначительно улучшает волновые условия на акватории и у причалов. Дальнейшие расчеты времени простоя судов у причалов показали, что время простоя при использовании второй конфигурации уменьшается менее чем на 5 %. В этом случае с точки зрения технической эффективности и объемов капиталовложений выбор в пользу первой конфигурации является очевидным.

На следующих примерах рассмотрим влияние трассировки канала на волновые условия в акватории порта [3]. Волновые поля рассчитывались

численными моделями TOMAWAC и ARTEMIS для трех конфигураций подходного канала.

На рис. 4 видно, что прямолинейный подходный канал способствует проникновению волн на акваторию порта, в частности увеличивается волновая нагрузка в районе головы оградительного мола. Конфигурация с углубленным карманом частично решает проблему с проникновением волн в акваторию. Однако следует отметить, что на маневровой акватории и по трассе канала для обеих конфигураций сохраняются неблагоприятные волновые условия. При использовании криволинейной трассы подходного канала улучшаются волновые условия как на акватории порта, так и на подходном канале. Это достигнуто оптимизацией трассы канала, который отражает волновую энергию от акватории порта, а в случаях конфигураций *a* и *б* канал, наоборот, ее фокусирует в акваторию порта. Следует учитывать, что использование криволинейной трассы канала может иметь последствия на навигационные

Рис. 3. Волновые поля, рассчитанные моделями TOMAWAC и ARTEMIS: *a* — порт с подходным каналом; *б* — порт с подходным каналом, прикрытый волноломом [3]

Рис. 4. Волновые поля, рассчитанные моделями TOMAWAC и ARTEMIS при трех различных конфигурациях подходного канала [3]: *a* — прямолинейная трассировка подходного канала; *б* — прямолинейная трассировка подходного канала с углубленным карманом; *в* — криволинейная трассировка подходного канала

условия для судов, поэтому такие проектные решения требуют специальных исследований и обоснований.

Для верификации расчетов, выполненных на численных моделях, необходимо сопоставить их с данными физического моделирования, а также с данными наблюдений, если они имеются. В качестве примера такой верификации результатов можно рассмотреть моделирование волновых полей в порту Зебрюгге (Бельгия) [5, 6] и в проектируемом порту Тамань (РФ).

При моделировании волновых полей в порту Тамань использовались следующие численные модели: ARTEMIS, PHAROS, SWAN [4]. Также были произведены физические испытания на модели в волновом бассейне. Результаты моделирования показаны на рис. 5 и сведены в табл. 1 для точки, расположенной между молами.

Сравнивая полученные результаты, можно заключить, что модели ARTEMIS и PHAROS показали примерно схожие значения в контрольной точке. На рис. 5 можно увидеть интерференционные полосы, полученные в результате многократного отражения волн от бровок канала и оградительных сооружений. Высоты волн, полученные численной моделью SWAN, получились ниже, в виду того, что

эта модель спектральная и дифракционные процессы в SWAN рассматриваются приближенно и не могут детально описывать волновые поля в районе взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями. Расхождение результатов численного и физического моделирования связано с тем, что на модели в волновом бассейне невозможно очень точно воссоздать батиметрию дна в окрестностях порта и подводный профиль подходного канала в выбранном масштабе моделирования. Очень часто батиметрия на модели оптимизируется для более корректной работы волнографов. Исходя из вышесказанного, на примере порта Зебрюгге, сравним данные полученные численным моделированием с натурными измерениями [5, 6].

При моделировании волновых полей использовались две модели: Mike 21BW, первая — длинноволновая модель, вторая — коротковолновая спектральная модель. Всего было промоделировано три сценария:

- 1) Длинноволновая модель Mike 21BW без подходного канала;
- 2) Коротковолновая спектральная модель Mike 21BW без подходного канала;
- 3) Коротковолновая спектральная модель Mike 21BW с подходным каналом.

Рис. 5. Волновые поля, рассчитанные моделями SWAN (а) и ARTEMIS (б) для порта Тамань (показана точка выдачи результатов 1)

Табл. 1. Результаты численного и физического моделирования волн для точки 1

Наименование модели	Элементы волн на подходе к сооружениям порта		Элементы волн в точке 1		Направление волнения, °
	H , м	T , с	H , м	T , с	
ARTEMIS	4,7	14,5	3,05	9,6	190
PHAROS	4,7	15,0	3,3	10,3	184
SWAN	4,7	15,0	2,7	6,2	184
Физическая модель в волновом бассейне	4,7	15,0	4,0	10,4	184

Табл. 2. Граничные условия для модели Mike 21BW

Наименование модели	Элементы волн на подходе к сооружениям порта		Ширина спектра, °	Направление волнения, °
	H , м	T , с		
Натурные измерения	2,4	8,3	—	337,5
Длинноволновая модель Mike 21BW без подходного канала	2,4	8,3	—	337,5
Коротковолновая спектральная модель Mike 21BW без подходного канала	2,4	8,3	20	337,5
Коротковолновая спектральная модель Mike 21BW с подходным каналом	2,4	8,3	20	337,5

В табл. 2 показаны граничные условия для этих моделей. На рис. 6, *а* показаны точки выдачи результатов, а на рис. 6, *б* показано сравнение результатов численного моделирования с данными натурных измерений. Относительная высота волны определяется как отношение высоты волны на акватории порта к высоте волны на подходе к порту.

Моделирование проводилось с использованием батиметрии с подходным каналом, а также и без него. При моделировании без навигационного канала (сценарии 1 и 2) модели показали между собой приемлемую сходимость. Однако введение навигационного канала привело к появлению большего числа различий между моделями. Это связано с нелинейным эффектом подходного канала. Последняя модель (сценарий 3) показала наилучшее соответствие с натурными измерениями, и это свидетельствует о том, что эффект направленного распространения волн (фокусировки волн) от подходного канала необходимо учитывать использованием спектральных волновых моделей.

ВЫВОДЫ

При определении волнового режима необходимо учитывать, что подходные каналы значительно влияют на волновые условия акватории порта. Способность волн пересечь канал зависит от следующих факторов:

- 1) отношения глубины внутри и снаружи канала (на мелководных побережьях эффекты отражения усиливаются);
- 2) направления подхода волны относительно главной оси канала;
- 3) периода падающих на канал волн (для коротких волн критический угол меньше);
- 4) заложения откосов бровок канала (при значении меньше 1:10 может проявиться эффект «захвата» волны на бровке канала, что приведет к локальным зонам увеличения высоты волн).

Преломление и отражение волн на бровках канала могут потенциально привести не только к серьезному фокусированию энергии волн, но также

а *б*

Рис. 6. Результаты численного моделирования: *а* — расположение точек выдачи результатов; *б* — сравнение результатов с данными натурных измерений [5, 6]

и к появлению областей уменьшенного волнового воздействия. Надо распознавать эти эффекты и использовать их для оптимизации проекта. Важно отметить, что использование спектральных волновых моделей позволяет добиться лучшей сходимости результатов с данными натурных измерений. Надлежащее применение численных и физических моделей позволя-

ет оценить диапазон волноопасных направлений на ранней стадии проектирования, чтобы оптимизировать проект с точки зрения стоимости и перспективы производительности. В статье представлены примеры, которые демонстрируют, что наличие подходного судоходного канала может улучшать или ухудшать волновые условия в акватории порта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zwamborn J.A., Grieve G. Wave attenuation and concentration associated with harbour approach channels // Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, 1974. Copenhagen, 1974. Pp. 2068–2085.
2. Beltrami G.M., De Girolamo P., Pellegrini G. Influence of dredged channels on wave penetration into harbors: The Malamocco Inlet case // Proceedings of the Conference on Coastal Structures. Portland, Oregon, 2003. Pp. 702–714.
3. Grey S.M., Cruickshank I.C., Beresford P.J., Tozer N.P. The impact of navigation channels on berth protection // Civil Engineering. January 2010. Vol. 163 (5). Pp. 49–54.
4. Dusseljee D.W., Kuiper C., Klopman G. Wave modelling in navigation channels // Proceedings of the 4th International Conference of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection — Coastlab12, Ghent, Belgium. Ghent, 2012. Pp. 465–474.
5. Wave measurements in the harbours of Nieuwpoort, Blankenberge en Zeebrugge. Commissioned by the Coastal Division. ref.: I/RA/11348/11.084/SDO, Antwerp, Belgium, 2011.
6. Wens F., Verbist F. Wave analysis Binnenrede Zeebrugge // WI. Report, MOD. 437-2. Flanders Hydraulics Research, Borgerhout, Belgium, 1985.
7. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. 2009. 194 p.
8. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007. 236 p.
9. Holthuijsen L., Booij N., Ris R. et al. SWAN Cycle III version 40. 51 User Manual. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, the Netherlands, 2009.
10. Berkhoff J.C. Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction. Delft Hydraulic laboratory, 1976.
11. Berkhoff J., Booij N., Radder A. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves // Coastal Engineering. 1982. No. 6. Pp. 253–279.
12. Berkhoff J.C. Computation of combined refraction-diffraction // 1972. Vol. 13: Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, Canada, 1972. Pp. 471–490.
13. Kantardgi I., Zheleznyak M., Demchenko R. et al. Modelling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas of the Black Sea by the chain of the proprietary and open source models // Proceedings of EGU. Vienna, 2014. Pp. 113–119.
14. Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Шахин В.М. Математическое моделирование береговых процессов Имеретинской низменности для обоснования берегозащитных мероприятий. // Гидротехническое строительство. 2011. № 10. С. 22–29.
15. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation // Transactions on the Built Environment. Vol. 27: Computer modelling of seas and coastal regions. III / J.R. Acinas and C.A. Brebbia (eds.), 1997. Pp. 343–352.
16. Mike 21 BW: Boussinesq waves module. Danish Hydraulic Institute, 2009.
17. Madsen P.A., Murray R., Sørensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristics // Coastal Engineering. 1991. Vol. 15. Pp. 371–388.
18. Madsen P.A.; Sørensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry // Coastal Engineering. 1992. Vol. 18. Pp. 183–204.
19. Madsen P.A., Larsen J. An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation // Coastal Engineering. 1987. Vol. 11. Pp. 329–351.

Поступила в редакцию 2 октября 2017 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2017 г.

Одобрена для публикации 29 февраля 2018 г.

О Б АВТОРАХ: **Кантаржи Игорь Григорьевич** — доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, kantardgi@yandex.ru; Orcid ID 0000-0002-0587-4722; Scopus Author ID 6602848417; Researcher ID A-1922-2014;

Аншаков Александр Сергеевич — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

INTRODUCTION

The worldwide trend towards increased size of vessels in recent years leads to the fact that a significant number of modern ports currently have deep-water access channels. Over the last decade, some effects of refraction and internal reflection of waves from the shelf edges of navigation channels have been established [1, 2]. As the depth of the access channels increases, these effects become more important in regard to choosing the design and construction of port facilities, since the presence of a channel could contribute to the penetration of large waves into the water area. It is important to realize the physical impact on the propagation of waves in the zone of navigation channels and have the appropriate technical tools for assessing this effect during the design process.

The article discusses the wave propagation processes through the cross-section of the channel, the influence on the transformation processes of waves inside and around the channel as well as the use of numerical wave models for studying the interaction of waves and channels. We used modern numerical models, such as ARTEMIS, PHAROS, TOMAWAC, Mike 21BW, SWAN, which illustrate how the presence of the navigation channel significantly changes the wave mode in the port area. We compared the results of the measurements of ARTEMIS and TOMAWAC models on the basis of experiments for two configurations of the Cochin Port (India) and for three variants of the access channel laying [3]. We verified ARTEMIS, PHAROS and SWAN wave models by physical modeling data for the port of Taman (RF) to be designed [4], and for the Mike 21BW model — by field observations in the Port of Zeebrugge (Belgium) [5, 6].

It is known that the presence of a channel can influence the propagation of waves in the shallow water zone. The influence of the canal depends both on the wave period and on the direction of wave propagation relative to the canal route. The movement of waves in the coastal zone is affected by refraction, diffraction, interference, the dissipation of wave energy and bottom friction. We can distinguish three case scenarios for passing of waves through a channel (Figure 1):

1. The axis of the channel is parallel to the wave direction. In this case, the refraction and interference of waves will be observed. The height of waves in the channel will decrease due to the increase in depth to about 40 % [1]. The waves are refracted on the shelf edges of the channel, as a consequence the wave energy increases on the shelf edges of the channel and decreases on the axis.

2. The axis of the channel is perpendicular to the wave direction. The wave will pass through the channel with its parameters transformed. The height of the wave will also decrease due to the increase in depth.

3. The waves are at an angle to the axis of the channel. The author of [1] claims that the angle between the wave direction and the axis of the channel (Figure 1) is around 25° . If this angle is greater, then the wave passes through the channel, if less, then the wave will be reflected, and the height of the wave at the entrance to the channel will decrease. With the angles of the wave approach small enough relative to the axis of the channel, a “capture” of the wave at the entrance of the channel can occur. The “capture” of the wave means that the waves after the refraction remain on the windward edge of the channel and move along it. As a result of this effect, an increase in the wave energy occurs on the windward edge of the channel, which leads to an increase in the wave height. On the windage side of the channel, the wave energy, on the contrary, decreases leading to decreasing in the wave height.

Figure 1. Scenarios for passing of waves through a channel

The above scenarios depend on the wave period. Short waves are subjected to refraction less than long waves and the critical angle is less for them. In addition, if the wavelength is much longer than the width of the channel, then the waves “will not notice” the channel and pass through it, and short waves would then be reflected. The physical tests with the model also show the concentration of wave energy on the shelf edge of

the channel (Figure 2). Such a wave pattern results from the reflection of waves from the shelf edges of channel. In this case, wave interference could lead to small areas of a significant increase in wave height. An interference pattern also appears when using nonlinear numerical models, such as ARTEMIS, PHAROS, TOMAWAC, Mike 21BW, in the form of stripes (paths, feathers). The width of the stripes depends on the direction of the wave, but is usually around half the length of the wave reflected from the channel. It is important to note that these effects are best manifested in modeling a mode of a monochromatic wave. However, when using a spectral method, interference patterns are smoothed, because various components of the wave spectrum are reflected and refracted in different ways.

MATERIALS AND METHODS

According to the current technology of modern mathematical modeling, the following basic stages are related to the use of individual models and modeling systems in terms of the tasks of marine hydraulics and hydraulic engineer (design of ports and coast-protection structures):

1. The calculation of the climatic characteristics of wind-induced waves at fixed points on the approach to the object under study (port, coastline) based on nonlinear spectral wind wave modelling (The most common models were WaveWatch III [7] and SWAN [8, 9], according to wind fields over the sea surface for a long (30–50 years) period on the basis of the fields of meteorological elements from meteorological reanalysis (for example, NCEP \ NCAR or ERA-40) with their possible downscaling using numerical weather prediction models.

2. The calculation of the wave mode of the coastal zone or enclosed sea area on the basis of linear refraction-diffraction models of shallow slopes equated (equation) [10–12] in the stable elliptical or unstable hyperbolic configuration (shape) of mild slopes equated (equation) [13, 14]. Nonlinear wave models in terms of coastal hydraulic engineering have become increasingly used in recent decades, both in hydrostatic approximation — that are the shallow water equations, and in non-hydrostatic approximation — that are Bussinesq-type nonlinear dispersion equations.

The ARTEMIS model [15], like the PHAROS and TOMAWAC models, is based on the mild slope equations [10, 12]. The model describes the transformation of waves in the coastal zone including refractive-diffractive processes, dissipation due to bottom friction and wave collapse. Elliptic mild-slope equations are solved numerically by a finite element method.

The Mike 21BW model [16] from the MIKE 21 coastal engineering software system of the “DHI Water & Environment” (Danish Hydraulic Institute) is based on the Boussinesq equations [17–19]. The model takes into account refraction, diffraction, wave collapse, bottom friction and reflection of waves from obstacles. It is well-tested and is a widely used tool for modeling waves in the coastal zone and in the water areas of coastal structures.

RESULTS

In some cases, the effects of refraction and reflection of waves from channel edges can potentially be beneficial from the point of view of achieving acceptable wave conditions in mooring sites. An example is the project of the Cochin Port (India). Figure 3 shows

Figure 2. Reflection and interference of waves from the channel edge on a physical model inside the wave basin

the wave fields computed with the TOMAWAC and ARTEMIS models for two port configurations [3].

Incident waves are reflected from the edge of the channel, as a result, the wave height near berths does not exceed 0.5 m for both of the port configurations. Fig. 3 shows the wave fields relevant to this case and interference fringes (bands) extend from the channel edge. A breakwater in the second configuration slightly improves the wave conditions in the water area and near the berths. Further calculations of the idle time of vessels berthed showed that the idle time using the second configuration is decreased by less than 5 %. In this case, in terms of technical efficiency and investment volumes, the choice in favor of the first configuration is obvious.

In the following examples, we will consider the effect of channel laying on the wave conditions in the port water area [3]. The wave fields were calculated by the TOMAWAC and ARTEMIS numerical models for the three configurations of the access channel.

Fig. 4 shows that the rectilinear access channel contributes to the penetration of waves into the port area, in particular, the wave load in the area of the head of the protective breakwater increases. The configuration with a recessed pocket partially solves the problem of penetration of waves into the water area. However, it should be noted that in the shunting area and along the channel path for both configurations, unfavorable wave conditions remain. When using the curvilinear path of the access channel, wave conditions are improved both in the water area of the port and on the access channel. This is achieved by optimizing the route of the channel, which reflects wave energy from the port area, and in cases of configurations *a* and *b* the channel, on the contrary, focuses it in the port area. It should be borne in mind that the use of a curvilinear channel route may have consequences for navigation conditions for vessels, therefore such design solutions require special studies and justifications.

Figure 3. Wave fields computed with TOMAWAC and ARTEMIS: *a* — port with an access channel; *b* — port with an access channel partly protected by breakwaters

Figure 4. Wave fields calculated by TOMAWAC and ARTEMIS for 3 different configurations of the access channel [3]: *a* — linear laying of the access channel; *b* — rectilinear laying of the access channel with a recessed pocket; *c* — curvilinear laying of the access channel

To verify the calculations performed by numerical models, it is necessary to compare them with the results of physical modeling, as well as with observational data, if any. An example of such verification of results is modeling of wave fields in the port of Zeebrugge (Belgium) [5, 6] and in the Port of Taman to be designed (RF).

When simulating wave fields in the Port of Taman, the following numerical models were used: ARTEMIS, PHAROS, SWAN [4]. There were also physical tests with the model in the wave basin. The simulation results are shown in Fig. 5 and summarized in Table. 1 for a point located between breakwaters.

By comparing the results, we can conclude that the ARTEMIS and PHAROS models showed approximately similar values at the reference point. In Figure 5, you can see interference fringes, obtained as a result of repeated reflection of waves from the edges of the channel and protected structures. The wave heights obtained by the numerical SWAN model turned out to be lower, in the view of the fact that this model is spectral and diffraction processes in SWAN are considered approximate and cannot describe in detail the wave fields in the region of wave interaction with hydraulic structures. The discrepancy between the results of numerical and physical modeling is due to the fact that it is impossible to reconstruct the bathymetry in the vicinity of the

port and the underwater profile of the access channel in the modeling scale chosen very accurately. Very often, bathymetry used for the model is optimized for more correct operation of wave-height recorder. In view of the foregoing, as an example of Zeebrugge Port, we will compare the data obtained from numerical modeling with field measurements [5, 6].

Two models were used to simulate wave fields: Mike 21BW, the first is a long-wave model, the second is a short-wave spectral model. In total, three scenarios were modeled:

- 1) Long-wave Mike 21BW model without an access channel;
- 2) Short-wave spectral Mike 21BW model without an access channel;
- 3) Short-wave spectral Mike 21BW model with an access channel.

Table. 2 shows the boundary conditions for these models. Figure 6, *a* shows the points of issue of results, and Figure 6, *b* shows a comparison of the results of numerical simulation with the data of field measurements. The relative wave height is defined as the ratio of the wave height in the port area to the wave height on the way to the port.

There was also numerical simulation conducted using bathymetry with an access channel and without it too. When modeling without a navigation channel (Scenarios

Figure 5. The wave fields calculated by the SWAN (*a*) and ARTEMIS (*b*) models for the Taman port (output of results 1 is shown)

Table 1. Results of numerical and physical modeling waves for point 1

Model name	Elements of waves on the way to port facilities		Elements of the wave in point 1		Wave direction, °
	<i>N</i> , m	<i>T</i> , s	<i>N</i> , m	<i>T</i> , s	
ARTEMIS	4,7	14,5	3,05	9,6	190
PHAROS	4,7	15,0	3,3	10,3	184
SWAN	4,7	15,0	2,7	6,2	184
Physical model inside the wave basin	4,7	15,0	4,0	10,4	184

1 and 2), the models showed acceptable convergence among themselves. However, the introduction of the navigation channel led to a greater number of differences between the models. This is due to the nonlinear effect of the access channel. The latest model (Scenario 3) showed the best correspondence with field measurements, which demonstrates that the effect of directional wave propagation (wave focalization) from the access channel must be taken into account with spectral wave models.

CONCLUSIONS

When determining the wave mode, it is necessary to take into account that the access channels significantly influence the wave conditions of the port area. The ability of waves to cross a channel depends on the following factors:

- 1) ratios of depth inside and outside the channel (on shallow coasts, reflection effects are enhanced);
- 2) directions of the approach of the wave relative to the main axis of the channel;

3) the period of the waves impinging on the channel (for short waves, the critical angle is smaller);

4) channel slope ratios (at value less than 1:10, the effect of “capture” of the wave on the edge of the channel may emerge, resulting in local zones of the increase in wave height).

Refraction and reflection of waves on the shelf of the channel can potentially lead not only to serious focusing of wave energy, but also to the appearance of areas of reduced wave action. We need to recognize these effects and use them to optimize the project. It is important to note that the use of spectral wave models makes it possible to achieve better coincidence of results with field measurements. The proper application of numerical and physical models allows us to evaluate the range of hazardous wave directions at an early stage in the design in order to optimize the project in terms of cost and productivity. The article presents examples demonstrating that the availability of an entrance channel can improve or degrade the wave conditions in the port area.

Table 2. Boundary conditions for the Mike 21BW model

Model name	Elements of waves on the way to port facilities		Spectrum width, °	Wave direction, °
	N , m	T , s		
Field measurements	2,4	8,3	—	337,5
Long-wave Mike 21BW model without an access channel	2,4	8,3	—	337,5
Short-wave spectral Mike 21BW model without an access channel	2,4	8,3	20	337,5
Short-wave spectral Mike 21BW model with an access channel	2,4	8,3	20	337,5

Figure 6. Results of numerical modeling: *a* — location of result points; *b* — comparison of the results with field measurements [5, 6]

REFERENCES

1. Zwamborn J.A., Grieve G. Wave attenuation and concentration associated with harbour approach channels. *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, 1974*. Copenhagen, 1974. Pp. 2068–2085.
2. Beltrami G.M., De Girolamo P., Pellegrini G. Influence of dredged channels on wave penetration into harbors: The Mal-amocco Inlet case. *Proceedings of the Conference on Coastal Structures*. Portland, Oregon, 2003. Pp. 702–714.
3. Grey S.M., Cruickshank I.C., Beresford P.J., Tozer N.P. The impact of navigation channels on berth protection. *Civil Engineering*. January 2010, vol. 163 (5), pp. 49–54.
4. Dusseljee D.W., Kuiper C., Klopman G. Wave modelling in navigation channels. *Proceedings of the 4th International Conference of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection – Coastlab12, Ghent, Belgium*. Ghent, 2012. Pp. 465–474.
5. *Wave measurements in the harbours of Nieuwpoort, Blankenberge en Zeebrugge*. Commissioned by the Coastal Division. ref.: I/RA/11348/11.084/SDO, Antwerp, Belgium, 2011. (In Dutch)
6. Wens F., Verbist F. *Wave analysis Binnenrede Zeebrugge*. WI. Report, MOD. 437-2. Flanders Hydraulics Research, Borgerhout, Belgium, 1985. (In Dutch)
7. Tolman H.L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14*. 2009. 194 p.
8. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007. 236 p.
9. Holthuijsen L., Booij N., Ris R. et al. *SWAN Cycle III version 40. 51 User Manual*. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands, 2009.
10. Berkhoff J.C. *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction*. Delft Hydraulic Laboratory, 1976.
11. Berkhoff J., Booy N., Radder A. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. *Coastal Engineering*. 1982, no. 6, pp. 253–279.
12. Berkhoff J.C. *Computation of combined refraction-diffraction*. 1972, vol. 13: Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, Canada, 1972. Pp. 471–490.
13. Kantardgi I., Zheleznyak M., Demchenko R. et al. Modelling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas of the Black Sea by the chain of the proprietary and open source models. *Proceedings of EGU*. Vienna, 2014. Pp. 113–119.
14. Zheleznyak M.I., Kantarzhi I.G., Shakhin V.M. Matematicheskoe modelirovanie beregovykh protsessov Imeretinskoy nizmennosti dlya obosnovaniya beregozashchitnykh meropriyatiy [Mathematical modeling of coastal processes of Imereti lowland for justification of bank protection measures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydro-engineering Construction]. 2011, no. 10, pp. 22–29. (In Russian)
15. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation. *Transactions on the Built Environment*, vol. 27: Computer modelling of seas and coastal regions. III. 1997. Pp. 343–352.
16. *Mike 21 BW: Boussinesq waves module*. Danish Hydraulic Institute, 2009.
17. Madsen P.A., Murray R., Sørensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristics. *Coastal Engineering*. 1991, vol. 15, pp. 371–388.
18. Madsen P.A., Sørensen O.R. A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry. *Coastal Engineering*. 1992, vol. 18, pp. 183–204.
19. Madsen P.A., Larsen J. An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation. *Coastal Engineering*. 1987, vol. 11, pp. 329–351.

Received October 2, 2017.

Adopted in final form on December 18, 2017.

Approved for publication on February 29, 2018.

About the authors: **Kantarzhi Igor' Grigor'evich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydraulic Engineering and Power Engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kantardgi@yandex.ru; Orcid ID 0000-0002-0587-4722; Scopus Author ID 6602848417; Researcher ID A-1922-2014;

Anshakov Aleksandr Sergeevich — postgraduate student, Department of Hydraulic Engineering and Power Engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.