

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ТЕОРИИ ПОДХОДА К РАСЧЕТУ НАГРУЗКИ НА ПРИБРЕЖНЫЕ СООРУЖЕНИЯ, ВЫЗЫВАЕМОЙ БОРОМ (ЦУНАМИ)

COMPARATIVE ANALYSIS IN THE THEORY OF APPROACH TO CALCULATING THE LOAD ON COASTAL STRUCTURES CAUSED BY BORON (TSUNAMI)

На сегодняшний день существует ряд экспериментальных данных, положивших основу выводам уравнений, связывающих параметры обрушившейся волны бора (цунами) и суммарную горизонтальную силу в момент времени, когда эта сила достигает своего наибольшего значения, поскольку именно она преимущественно является главной причиной аварий гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах. Рассмотрены три возможных подхода к определению суммарной горизонтальной силы, вызываемой бором (цунами): с помощью метода, изложенного в СП 292 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах»; с помощью метода, изложенного в EN 1991-1-6–2009 «Воздействия на конструкции», а также при помощи численного эксперимента, выполненного в программе Ansys 19.2. Такие особенности численного эксперимента, как вид сетки КЭ и граничные условия данного эксперимента, в данной статье не оговорены.

Ключевые слова: цунами, бор, численное моделирование, экстремальные нагрузки, особые нагрузки, нестационарные воздействия, вычислительная гидродинамика, моделирование физических процессов, моделирование цунами, методы определения нагрузок от бора (цунами).

To date, there are available numerous experimental data that have provided the basis for the derivation of equations linking the parameters of the collapsed boron wave (tsunami) and the total horizontal force at the time when this force reaches its greatest value, since it is this force which is predominantly the main cause of accidents taking place at hydraulic structures in tsunami-hazardous areas. The author considers three possible approaches to determining the total horizontal force caused by a boron (tsunami): using the method described in SP 292 «Buildings and structures in tsunami-prone areas»; using the method given in EN 1991-1-6–2009 «Impacts on structures», as well as by means of a numerical experiment performed in the Ansys 19.2 program. Such features of the numerical experiment as the form of the FE grid and the boundary conditions of this experiment are not specified in this article.

Keywords: tsunami, boron, numerical modeling, extreme loads, special loads, unsteady impacts, Computational Fluid Dynamics (CFD), modeling of physical processes, tsunami modeling, methods for determining loads from boron (tsunami).

На сегодняшний день в зависимости от продолжительности действия выделяют особый класс нагрузок как природного, так и техногенного характера, способных своим воздействием привести сооружение в аварийное состояние. К этим нагрузкам

также относится и цунами [4–6, 10, 12, 13, 15, 16].

С целью получения более достоверного значения нагрузки [1–3, 4, 8], вызываемой бором (цунами), существует несколько возможных способов расчета данной на-

грузки. В данной статье рассмотрено три возможных подхода к определению суммарной горизонтальной силы, вызываемой бором: с помощью метода, изложенного в СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах»; с помощью метода, изложенного в EN 1991-1-6-2009 «Воздействия на конструкции», а также при помощи численного эксперимента, выполненного в программе Ansys 19.2. Особенности численной модели (вид сетки КЭ, граничные условия данного эксперимента) представлены в нашей статье [8].

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2. На рисунках показаны общие виды и поперечные разрезы расчетных моделей, представляющих собой прибрежное гидротехническое сооружение (далее — ГТС) сквозного типа на опорах квадратного сечения (сечение опоры 5×5 м) и круглого сечения (сечение опоры диаметром 5 м), на которое воздействует волна цунами высотой 8 м над «спокойной» водой,

уровень которой достигает значения 5 м. На рис. 3 можно рассмотреть схему реального прибрежного ГТС, которое имеет ту же конструктивную схему, что и рассматриваемое в данной статье.

Расчет нагрузки выполняется на отдельно стоящую в воде опору [7–9, 11, 17], а значит, в расчетах не учтено влияние сближения соседних опор. Стоит также отметить, что для упрощения расчетов не учитывались податливость основания и жесткость самого сооружения.

1. В российских нормах (свод правил СП 292¹) методика определения нагрузки от бора (цунами) на отдельно стоящую опору приведена в разделе 7.2 «Нагрузка на обтекаемые и сквозные сооружения». Расчет производится по формуле

$$Q = c_x \rho U^2 S_0 / 2, \tag{1}$$

где c_x — коэффициент лобового сопротивления (табл. 7.2 СП 292); ρ — плотность воды; U — скорость волнового потока; S_0 — смоченная площадь миделева сечения сооружения, или площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения жидкости (бора). Значения параметров для расчета представлены в табл. 2.

В результате расчета, выполненного по формуле (1), значение суммарной горизонтальной силы для опоры квадратного

¹ СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. СПб., 2016. 69 с.

Таблица 1
Исходные данные для расчетной схемы

Название параметра	Значение, м
Размеры «квадратной» опоры ($a \times b \times h$)	$5 \times 5 \times 10$
Размеры «круглой» опоры ($d \times h$)	5×10
Уровень спокойной воды в лотке	5
Высота волны h_v	8

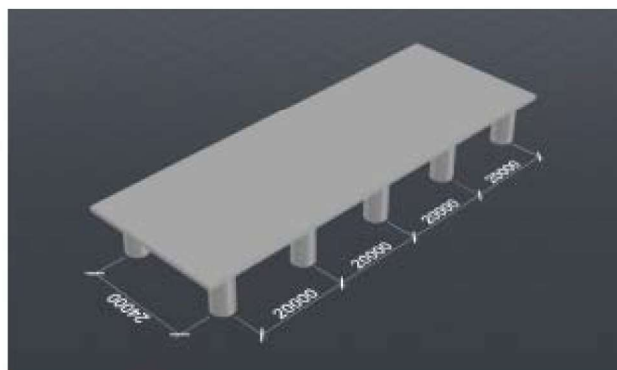
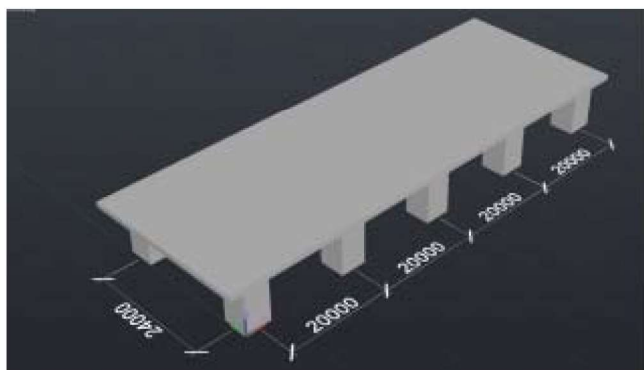


Рис. 1. Общий вид рассматриваемых в расчете ГТС: слева — ГТС на опорах квадратного сечения; справа — ГТС на опорах круглого сечения

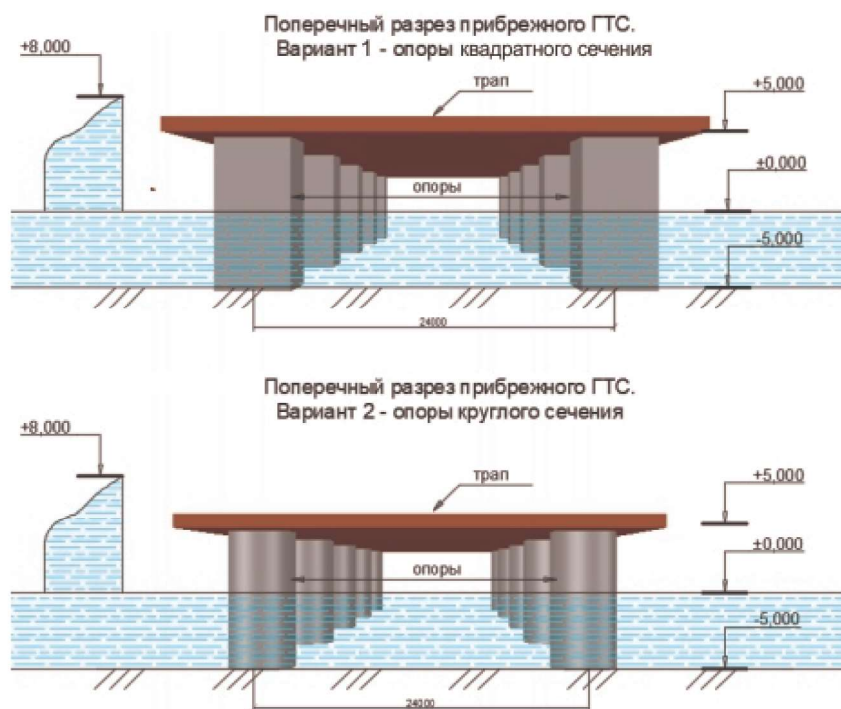


Рис. 2. Поперечные разрезы ГТС: сверху — ГТС на опорах квадратного сечения; снизу — ГТС на опорах круглого сечения

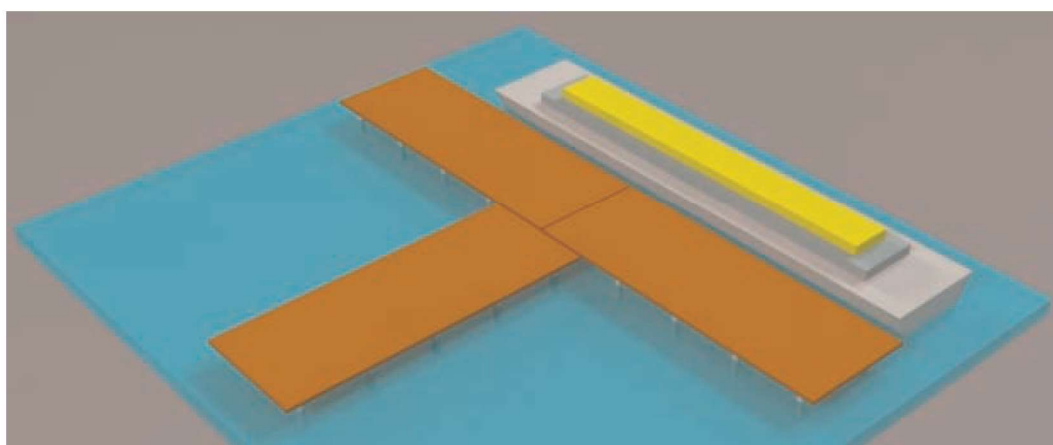


Рис. 3. Общий вид причала для круизных судов наподобие причала в городе Кириши

Таблица 2

Значения параметров к расчету нагрузки по формуле (1)

Параметр	Для опоры квадратного сечения	Для опоры круглого сечения
c_x	2	1,4
ρ	1 т/м ³	1 т/м ³
U	9,903 м/с	9,903 м/с
S_0	15 м ²	15 м ²

сечения составило $Q_1 = 1471$ т, для опоры круглого сечения — $Q_2 = 883$ т. Далее полученные значения необходимо умножить на коэффициент динамичности (определяемый по рис. 4). Если взять за основу статью [14] и принять значение периода собственного колебания (с учетом присоединенной массы воды) $t = 1$ с, а значение $t_0 = 1,4$ с, то отно-

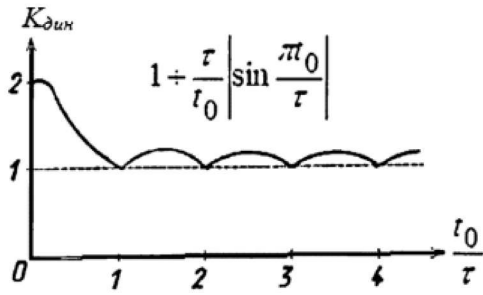


Рис. 4. Определение коэффициента динамичности

шение $t/2t_0$ составит 0,4. При этом значение коэффициента динамичности $K_{дин} = 1,6$. Тогда значения нагрузок с учетом коэффициента динамичности составят $Q_{1, tot} = 2354$ т, $Q_{2, tot} = 1412$ т.

2. Расчет нагрузки от бора произведем при помощи формулы (2), представленной в нормах Еврокода EN 1991-1-6. Согласно разделу 4.9 «Воздействия на конструкции, вызываемые водой», воздействия от воды, вызываемые цунами, на находящиеся в воде элементы конструкции следует рассматривать как воздействия перпендикулярно контактной поверхности. При этом значение нагрузки определяют относительно средней составляющей скорости течения, глубины воды и формы элемента конструкции, принимая во внимание фактическое состояние конструкций.

Величину общего горизонтального усилия (F_{wa}), возникающего при обтекании вертикальных поверхностей, определяют по формуле

$$F_{wa} = \frac{1}{2} k \rho_{wa} h_w b v_{wa}^2, \quad (2)$$

где ρ_{wa} — горизонтальные нагрузки на погруженные элементы, вызванные потоком воды; ρ_w — плотность воды; k — коэффициент формы сооружения; h_w — глубина воды; b — ширина погруженного элемента; v_{wa} — средняя скорость воды, м/с, усредненная по глубине воды. Значения параметров для расчета представлены в табл. 3.

В результате расчета, выполненного по формуле (2), значение суммарной горизонтальной силы для опоры квадратного сече-

ния составило $F_{wa,1} = 1765$ т, для опоры круглого сечения — $F_{wa,2} = 858$ т.

3. Выполним численный эксперимент по моделированию наката одиночной волны на препятствия (рис. 5, 6), представленные в виде отдельно стоящих опор.

Применяя встроенные функции программы Ansys 19.2, в результате выполненного численного эксперимента получим значение суммарной горизонтальной силы: для опоры квадратного сечения — 2510 т, круглого сечения — 1357 т.

4. Результаты расчета с применением трех различных методов представлены в табл. 4.

Таким образом, в результате определения суммарной горизонтальной силы на опоры прибрежных ГТС тремя способами можно выделить следующее:

1. Несмотря на то что значения нагрузок, найденные по нормам Еврокода, существенно меньше остальных значений примерно в 1,4 раза, тем не менее наблюдается схожесть результатов численного эксперимента и значений нагрузки, полученной по методу СП 292. При этом говорить о достоверности результатов численного эксперимента преждевременно. Для их уточнения необходимо проводить подобного рода эксперименты, но уже с учетом жесткости опор, податливости основания (заделки в грунт), а также влияния сближения с соседними опорами.

2. Сформулированная идея численного эксперимента — это хорошее дополнение

Таблица 3

Значения параметров к расчету нагрузки по формуле (2)

Параметр	Для опоры квадратного сечения	Для опоры круглого сечения
k	1,44	0,7
ρ_{wa}	1 т/м ³	1 т/м ³
v_w	9,903 м/с	9,903 м/с
h_w	5 м	5 м
b	5 м	5 м

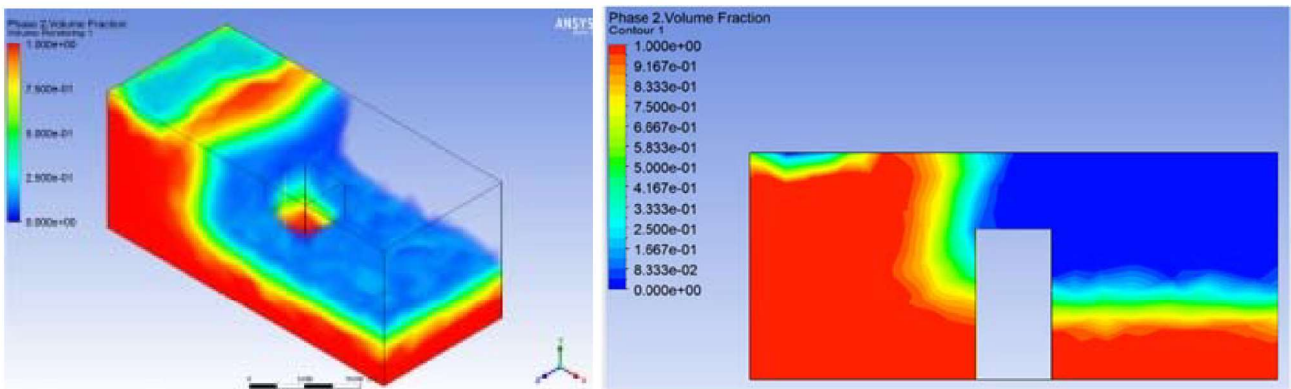


Рис. 5. Накат волны бора на одиночную опору квадратного сечения: слева — общий вид; справа — разрез вдоль действия цунами

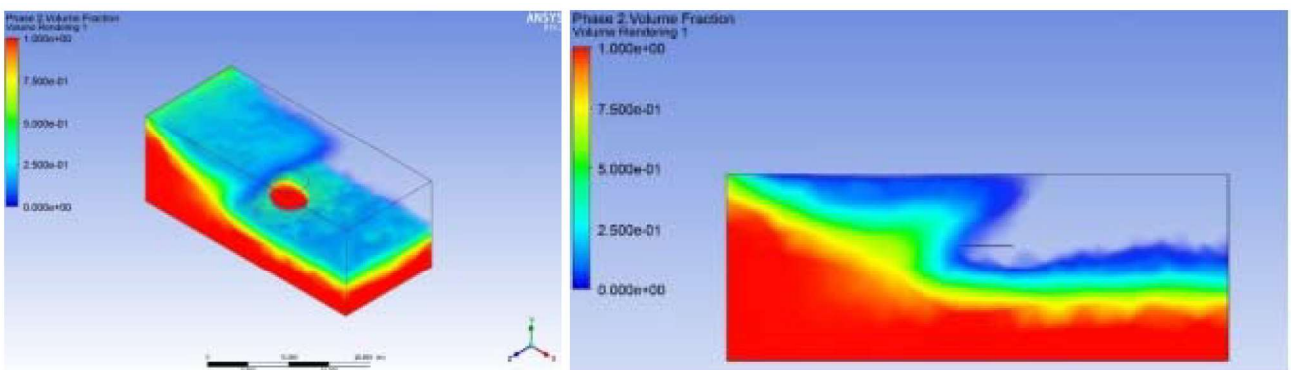


Рис. 6. Накат волны бора на одиночную опору круглого сечения: слева — общий вид; справа — разрез вдоль действия цунами

Таблица 4

Результаты расчетов

Поперечное сечение опоры	Суммарная горизонтальная сила, т		
	СП 292	EN 1991-1-6-20	Ansys 19.2
Квадратное	2354	1765	2510
Круглое	1412	858	1357

к применению существующих норм при расчетах нагрузки от бора на конструкции сложной геометрии.

Библиографический список

- Ghosh D., Mittal A. K., Bhattacharyya S. K. Multiphase modeling of tsunami impact on building with openings // The Journal of Computational Multiphase Flows. 2016. Vol. 8 (2). Pp. 85–94.
- Robertson I. N., Carden L. P., Chock G. Y. K. Case Study of Tsunami Bore Impact on RC Wall // Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE 2013. June 9–14, 2013, Nantes, France. 8 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/267607620_Case_Study_of_Tsunami_Bore_Impact_on_RC_Wall.

- Robertson I. N., Riggs H. R., Mohamed A. Experimental results of tsunami bore forces on structures // Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE2008. June 15–20, 2008, Estoril, Portugal. URL: <http://teri.hawaii.edu/pdf/OMAE2008Robertson>.

- Басов Б. И., Дорфман А. А., Левин Б. В., Харламов А. А. О возмущениях поверхности океана, возбуждаемых извержением подводного вулкана // Вулканология и сейсмология. 1981. № 1. С. 93–98.

- Бондаренко А. Л., Бычков В. С. Морские барические волны // Метеорология и гидрология. 1983. № 6. С. 86–91.

- Доценко С. Ф. Возбуждение волн цунами в непрерывно стратифицированном океане подвижкой участка дна // Исследования цунами. 1988. № 3. С. 7–17.

7. Дорфман А. А., Печенин С. А., Семенов К. К., Нуднер И. С., Максимов В. В. Воздействие волны цунами на морские гидротехнические сооружения и береговые объекты // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. № 10 (4). С. 16–30. DOI: 10.7868/S2073667317040025. ISSN: 2073-6673.

8. Кондаков Б. И. Численное моделирование воздействия цунами в программе Ansys 19.2 // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 1 (90). С. 24–28. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-1-24-28. ISSN 1999-5571.

9. Кульмач П. П., Филиппенок В. З. Воздействие цунами на морские гидротехнические сооружения. М.: Транспорт, 1984. 303 с.

10. Некрасов А. В. Об отражении приливных волн от зоны шельфа // *Океанология*. 1973. Т. 13. Вып. 2. С. 210–215.

11. Нуднер И. С., Максимов В. В. Воздействие волн цунами на морские гидротехнические сооружения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2008. № 2. С. 45–56. ISSN: 2782-5221.

12. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.

13. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 324 с.

14. Рутман Ю. Л., Фильков В. Ю. Определение коэффициента динамичности при воздействии бора на огражденное сооружение гравитационного типа // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 3. С. 91–96.

15. Соловьев С. Л., Го Ч. Н., Ким Х. С. Каталог цунами в Тихом океане, 1969–1982 гг. М.: Изд-во МПК АН СССР, 1986. 164 с.

16. Соловьев С. Л., Го Ч. Н., Ким Х. С., Соловьева О. Н., Щетников Н. А. Цунами в Средиземном море. М.: Научный мир, 1997. 139 с.

17. Яковлев А. Д. Об учете вертикальной нагрузки от цунами на мостовые сооружения // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 2. С. 86–92.

References

1. Ghosh D., Mittal A. K., Bhattacharyya S. K. Multiphase modeling of tsunami impact on building with openings. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2016, vol. 8 (2), pp. 85–94.

2. Robertson I. N., Carden L. P., Chock G. Y. K. Case study of tsunami bore impact on RC Wall. *Proceedings of the 32-nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2013*, June 9–14, 2013, Nantes, France, 8 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267607620_

3. Robertson I. N., Riggs H. R., Mohamed A. Experimental results of tsunami bore forces on structures. *Proceedings of the 27-th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2008*, June 15–20, 2008, Estoril, Portugal. Available at: <http://teri.hawaii.edu/pdf/OMAE2008Robertson>

4. Basov B. I., Dorfman A. A., Levin B. V., Kharlamov A. A. O *vozmushcheniyakh poverkhnosti okeana, vozbuzhdaemykh izverzheniem podvodnogo vulkana* [On perturbations of the ocean surface excited by underwater volcanic eruptions]. *Vulkanologiya i seysmologiya – Volcanology and seismology*, 1981, no. 1, pp. 93–98.

5. Bondarenko A. L., Bychkov V. S. *Morskie baricheskie volny* [Marine baric waves]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, 1983, no. 6, pp. 86–91.

6. Dotsenko S. F. *Vozbuzhdenie voln tsunami v nepreryvno stratifitsirovannom okeane podvizhkami uchastka dna* [Excitation of tsunami waves in a continuously stratified ocean by shifts of the bottom area]. *Issledovaniya tsunami – Tsunami Research*, 1988, no. 3, pp. 7–17.

7. Dorfman A. A., Pechenin S. A., Semenov K. K., Nudner I. S., Maksimov V. V. *Vozdeystvie volny tsunami na morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya i beregovye ob'ekty* [Impact of tsunami wave on marine hydraulic structures and coastal objects]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and applied hydrophysics*, 2017, no. 10 (4), pp. 16–30. DOI: 10.7868/S2073667317040025. ISSN: 2073-6673

8. Kondakov B. I. *Chislennoe modelirovanie vozdeystviya tsunami v programme Ansys 19.2* [Numerical simulation of tsunami impact in the Ansys 19.2 program]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 1 (90), pp. 24–28. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-24-28. ISSN 1999-5571

9. Kul'mach P. P., Filippenok V. Z. *Vozdeystvie tsunami na morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Impact of tsunami on marine hydraulic structures]. Moscow, Transport Publ., 1984, 303 p.

10. Nekrasov A. V. *Ob otrazhenii prilivnykh voln ot zony shel'fa* [On reflection of tidal waves from shelf zone]. *Okeanologiya – Oceanology*, 1973, vol. 13, iss. 2, pp. 210–215.

11. Nudner I. S., Maksimov V. V. *Vozdeystvie voln tsunami na morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Impact of tsunami waves on marine hydraulic structures]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2008, no. 2, pp. 45–56. ISSN: 2782-5221.

12. Puzyrev N. N. *Metody i ob'ekty seysmicheskikh issledovaniy. Vvedenie v obshchuyu seysmologiyu* [Methods and objects of seismic research. Introduction to general seismology]. Novosibirsk, SO RAN, NITs OIGGM Publ., 1997, 301 p.

13. Rabinovich A. B. *Dlinnye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izluchenie* [Long gravity waves in the ocean: capture, resonance, radiation]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993, 324 p.

14. Rutman Yu. L., Fil'kov V. Yu. *Opredelenie koeffitsienta dinamichnosti pri vozdeystvii bora na ograditel'noe sooruzhenie gravitatsionnogo tipa* [Determination of the dynamical coefficient under the influence of boron on a gravity-type enclosing structure]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and applied hydrophysics*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 91–96.

15. Solov'ev S. L., Go Ch. N., Kim Kh. S. *Katalog tsunami v Tikhom okeane, 1969–1982 gg.* [Catalogue of tsunamis in

the Pacific Ocean for the period of 1969–1982]. Moscow, MGK AN SSSR Publ., 1986, 164 p.

16. Solov'ev S. L., Go Ch. N., Kim Kh. S., Solov'eva O. N., Shchetnikov N. A. *Tsunami v Sredizemnom more* [Tsunami in the Mediterranean Sea]. Moscow, Nauchny mir Publ., 1997, 139 p.

17. Yakovlev A. D. *Ob uchete vertikal'noy nagruzki ot tsunami na mostovye sooruzheniya* [Taking into account the tsunami vertical load on bridge constructions]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic Construction. Safety of Structures*, 2021, no. 2, pp. 86–92.