

УДК 627

А.М. Вакуленко

МЕТОДОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАЗРУШАЮЩЕЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ КИЛЯ ТОРОСА

A.M. Vakulenko

METHODOLOGY OF NUMERICAL CALCULATION OF BREAKING LOAD FROM ICE RIDGE KEEL

Рассматриваются моделирование численным методом разрушающей ледовой нагрузки от килля тороса при взаимодействии с гидротехническими сооружениями и сравнение полученных результатов с аналитическим методом. Изложена методология подобного численного расчета для гидротехнических сооружений произвольной формы. Показано, что результаты численного моделирования и аналитического решения для вертикального сооружения находятся в хорошем соответствии между собой.

КИЛЬ ТОРОСА; PLAXIS 2D; МКЭ; МОДЕЛЬ КУЛОНА-МОРА.

Presented herein are the results of numerical modeling of the breaking load from ice ridge keel interaction with a hydraulic structure, and the comparison of the last with analytical solution. The paper describes the methodology of the numerical calculations of the ice loads on arbitrary shape hydraulic structures. The results obtained from the numerical and analytical solutions for vertical structures are in a good correlation.

RIDGE KEEL; PLAXIS 2D; FEM; MOHR-COULOMB MODEL.

Арктика становится важным местом решения технических задач. В первую очередь это обусловлено открытием больших запасов нефти и газа, которые находятся на шельфе, для которого характерно наличие ледяного покрова. Наиболее часто встречающаяся опасность (риск), представляющая угрозу для гидротехнических сооружений (ГТС), — это взаимодействие с ледовыми образованиями [1–3]. Торос — ледовая формация, состоящая из ледяных блоков-обломков, образовавшихся в результате сжимающих или сдвиговых процессов в ледяном поле [3].

Ледяные образования, в том числе и торосистые льды, постоянно перемещаются под действием ветра и течения, препятствуют навигации и оказывают значительные нагрузки на ГТС [4], что необходимо учитывать при проектировании.

Торос состоит из большого числа произвольно расположенных блоков-обломков льда различных размеров и формы. Торос принято разделять на три части: парус, консолидированный слой и киль тороса. В расчетах поперечное се-

чение тороса представляют симметричным, в виде перевернутой трапеции [5].

В нормативных документах нагрузку, создаваемую торосом, определяют от каждой части в отдельности [5–7]. Существующие методы расчета сил от воздействия льда на сооружения в основном представляют собой аналитические, эмпирические и полуэмпирические формулы. Расчетные формулы ограничены в использовании, они в основном определяют нагрузки от килля тороса на вертикальное сооружение. В российских нормативных документах [6, 7] формулы для расчета нагрузки от килля тороса на наклонные сооружения позволяют определить нагрузку при ограниченном диапазоне углов наклона сооружения.

Объектом исследования является взаимодействие килля тороса с ГТС.

Предмет исследования — оценка численным и аналитическим методами разрушающих ледовых нагрузок в киле тороса на контакте с вертикальным сооружением.

Цель — разработка методологии численного расчета разрушающей нагрузки в киле тороса от взаимодействия льда с сооружениями произвольной формы с применением программного комплекса PLAXIS 2D.

Киль — подводная часть тороса, расположенная ниже его консолидированного слоя [6]. Осадка тороса может достигать более 25 м [3]. Теории разрушения килля тороса или его блоков-обломков основаны на идеях методов механики грунтов [8]. Согласно результатам наблюдений разрушение в результате сдвига является доминирующей моделью разрушения неконсолидированных или частично консолидированных обломков льда. Лед представляет собой зернистый материал со структурой, напоминающий песчаный грунт, поэтому для его описания можно использовать модель Кулона-Мора с прочностью на сдвиг τ [10]. Сцепление c , угол внутреннего трения ϕ и эффективное нормальное давление δ' — это параметры, контролирующие прочность на сдвиг неконсолидированных или частично консолидированных слоев согласно формуле

$$\tau = c + \delta' \operatorname{tg} \phi. \quad (1)$$

Практическая ценность результатов численного моделирования зависит от нескольких факторов, а именно от адекватности континуальной модели льда и способа разрушения реальной системы ледяного образования перед сооружением. В частности, МКЭ может быть эффективным средством для изучения влияния граничных условий, геометрии и толщины ледяного образования и других физико-механических параметров. Континуальное предположение об использовании МКЭ может быть подвергнуто критике, так как размер ледяных блоков-обломков значителен по сравнению с зернистой структурой льда. Тем не менее некоторые авторы считают, что континуальное предположение применимо для решения разных задач [10, 11]. На основании анализа натурных опытов на продавливание килей однолетних торосов в Ботническом заливе Балтийского моря J. Heinonen в 2004 году предложил зависимость между сцеплением и углом внутреннего трения килля тороса для континуальной модели в соответствии с рис. 1 [9].

Механизм разрушения килля тороса моделируется в рамках теории сдвиговой прочности Кулона-Мора. Расчетные схемы представляют

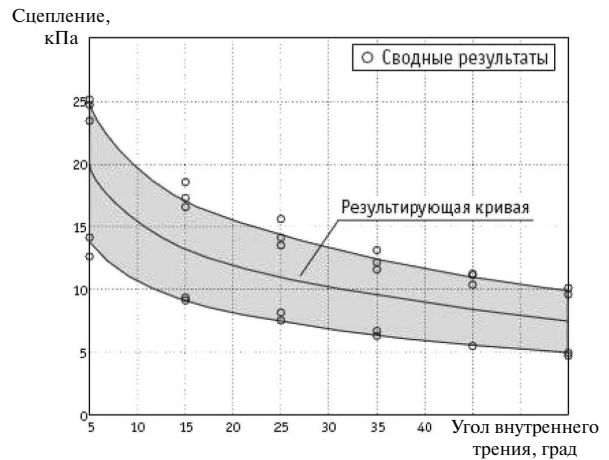


Рис. 1. Зависимость между сцеплением и углом внутреннего трения килля тороса, J. Heinonen (2004)

собой геометрические области, включающие киль тороса и внедряемое сооружение.

Для килля тороса и контактных элементов была принята упругоидеальнопластическая модель (с ограничением области растяжения), для сооружения — модель линейной упругости. В основу модели линейной упругости положен закон Гука об изотропном линейноупругом материале под нагрузкой. Закон Гука для изотропной линейной упругости может быть представлен в виде простейшей зависимости между напряжениями и деформациями. Эта зависимость содержит только два входных параметра — модуль Юнга и коэффициент Пуассона. В основном эта модель используется при моделировании таких материалов, как бетон, железобетон, металл, скальные породы. Упругоидеальнопластическая модель Кулона-Мора основана на параметрах грунта, которые хорошо известны в инженерной практике: модуле Юнга, коэффициенте Пуассона, сцеплении, угле внутреннего трения и угле дилатансии. Модель Кулона-Мора рекомендуется использовать, например, при определении предельных нагрузок.

Схема взаимодействия вертикального сооружения и килля тороса назначалась заданием глобального угла α_k килля тороса в соответствии с рис. 2.

Конечно-элементные сетки образованы 15-тиузловыми треугольными элементами.

Зоны контакта сооружения со льдом моделируются специальными контактными элементами



Рис. 2. Схема взаимодействия килля тороса с сооружением

(интерфейсы), в которых параметры прочности могут быть снижены, чтобы соответствовать условию взаимодействия льда и контактного материала.

При воздействии килля тороса с сооружением на границах расчетных областей принимаются следующие граничные условия: на нижней горизонтальной границе внедряемого сооружения — условие скользящей заделки (ненулевые горизонтальные и нулевые вертикальные перемещения), на задней границе килля тороса — условие жесткой заделки (горизонтальные и вертикальные перемещения отсутствуют) [12]. На границе между килем тороса и консолидированной частью зацеп ледяного образования моделируется сцеплением, которое в расчете согласно нормативному документу [6] принято равным 0,003 МПа.

Киль тороса принимается намного длиннее, чем можно было бы предположить, чтобы избе-

жать влияния граничных условий на результат. На первом этапе к киллю тороса применяются только силы плавучести. Плавучесть моделируется силой гравитации. Поскольку блоки-обломки килля тороса легче воды, то киль тороса для получения природного давления по глубине в его массиве моделируется перевернутым. Коэффициент гравитации рассчитывается таким образом, что при умножении на плотность килля тороса результат будет равен силе его плавучести. На рис. 3 представлена геометрическая модель в PLAXIS 2D.

Коэффициент гравитации g' определяется по формуле

$$g' = g \left(\frac{\rho}{\rho_r} - 1 \right), \quad (2)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; ρ_r — плотность килля тороса, кг/м^3 ; ρ — плотность воды, кг/м^3 .

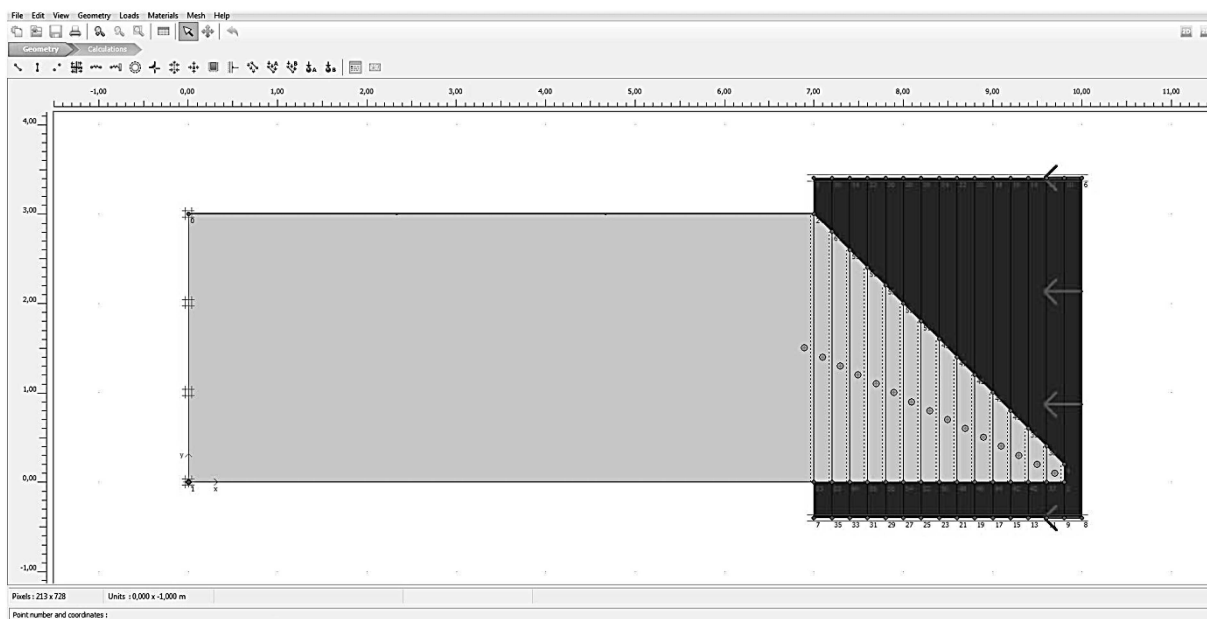


Рис. 3. Геометрическая модель в PLAXIS 2D

Удельная сила плавучести кия тороса (удельная архимедова сила) будет равна

$$\gamma_r = \rho_r g' \quad (3)$$

Плотность кия тороса определяется по следующей формуле:

$$\rho_r = (1 - \psi_k) \rho_i \quad (4)$$

где ρ_i — плотность льда, кг/м³; ψ_k — пористость кия тороса, %.

Для моделирования процесса внедрения сооружения в киль тороса с учетом изменяемой площади контактной зоны использована процедура наращивания расчетной области кия тороса по мере внедрения сооружения. Этот прием предполагает создание общей конечно-элементной схемы, отвечающей условиям задаваемого максимального внедрения сооружения в киль тороса.

На первом этапе расчетов моделируется ситуация касания сооружением поверхности кия тороса с помощью деактивирования (исключения) соответствующих зон общей расчетной области и рассчитывается напряженно-деформированное состояние системы «киль тороса — сооружение» по задаваемому на этом этапе перемещению сооружения, соответствующему предельному. На последующих этапах расчетов активируется (включается) зона, глубина которой подбирается по глубине разрушения кия на предыдущем этапе, и вновь рассчитывается напряженно-деформированное состояние, соответствующее предельному перемещению. В процессе поэтапного активирования таких зон требуется обнуление полученных на предыдущем этапе значений перемещений системы «киль тороса — сооружение», в то время как компоненты вектора напряжений суммируются от этапа к этапу, определяя тем самым последовательное развитие реактивного сопротивления кия тороса в процессе постепенного внедрения сооружения.

В расчетах взаимодействия сооружения с килем тороса скопление разрушенных блоков-обломков кия тороса не учитывается, предполагается, что они свободно перемещаются за пределы сооружения. Сооружение моделируется невесомым, чтобы избежать влияния на разрушающую нагрузку от кия тороса. Взаимодействие кия тороса с сооружением моделируется по напряжениям, а не по деформациям.

Ниже представлены физико-механические и геометрические характеристики кия тороса; одни параметры рассчитаны согласно формулам (2)–(4), другие приняты согласно нормативным документам [6]. Сцепление и угол внутреннего трения кия тороса приняты в соответствии с рис. 1. Характеристики кия тороса следующие:

h_k	3,0 м
ψ_k	30 %
α_k	45 град
ρ_i	900 кг/м ³
ρ	1000 кг/м ³
ρ_r	630 кг/м ³

Расчетные характеристики кия тороса и сооружения:

	Киль тороса/Сооружение (металл)
Объемный вес γ , кН/м ³	3,63/0,0
Модуль деформации E , кН/м ²	$8,3 \times 10^7 / 2,1 \times 10^{11}$
Коэффициент Пуассона ν	0,3/0,15
Сцепление c , кН/м ²	10/—
Угол внутреннего трения, ϕ , град.....	20/—

На рис. 4 приведен графический материал, иллюстрирующий развитие напряженно-деформированного состояния кия тороса, соответствует приращению внедрения сооружения в киль тороса на глубине этого внедрения, равном 1,6 м. Рис. 4 отчетливо показывает, что разрушение кия тороса происходит в результате сдвига.

На рис. 5 представлен график горизонтальной разрушающей нагрузки кия тороса при взаимодействии с вертикальным сооружением в PLAXIS 2D.

Для сравнения с численными результатами, полученными в PLAXIS 2D, нагрузки от кия тороса были также рассчитаны по формулам нормативного документа [6].

Согласно [6] горизонтальная составляющая нагрузки $F_{k,h}$, МН, от подводной части ледяного образования вычисляется по формуле

$$F_{k,h} = 0,5 \left[10^{-6} (\rho - \rho_i) g (1 - \psi_k) (h_k - h_c)^2 k_k + c_k \operatorname{ctg} \phi_k (k_k - 1) (h_k - h_c) \right] b_k \quad (5)$$

где ρ — плотность воды, кг/м³; ψ_k — пористость (пустотелость) ледяного образования, определяемая по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать $\psi_k = 0,3-0,4$; h_k — расчетная глубина ледяного образования, м; h_c —

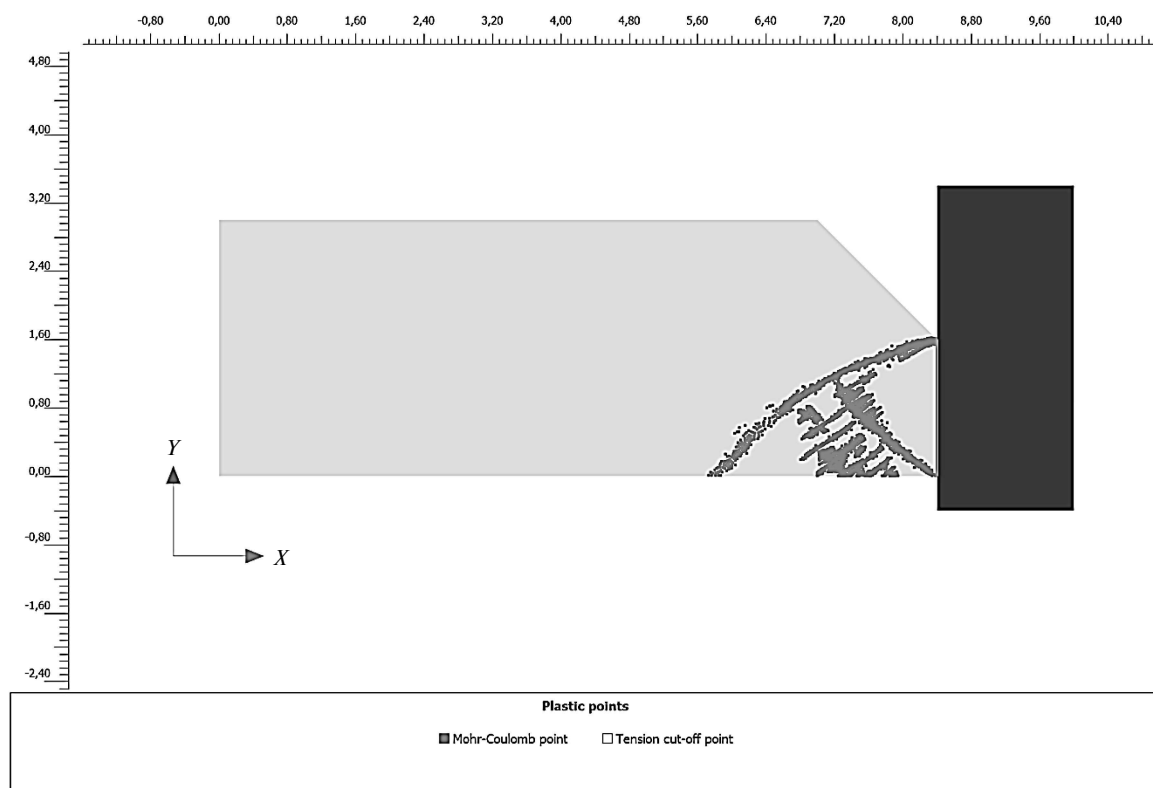


Рис. 4. Зоны пластических деформаций в PLAXIS 2D (темный кубик (точка Кулона-Мора) показывает, что напряжения имеют место на поверхности огибающей разрушения Кулона)

расчетная толщина консолидированной части, м; b_k — средняя ширина преграды по фронту в зоне действия ледяного образования, м; c_k — сцепление (с учетом зацепа) ледяного образования, МПа, определяемое по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать $c_k = 0,003-0,005$ МПа; φ_k — угол внутреннего трения ледяного образования, град., определяемый по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать $\varphi_k = 15-20^\circ$; k_k — коэффициент горизонтальной составляющей пассивного давления нагромождения обломков льда, вычисляемый по формулам

$$k_k = \left[\frac{\cos(\varphi_k + 90 - \beta)}{\cos(90 - \beta) [1 - \sqrt{k_4}]^2} \right]^2; \quad (6)$$

$$k_4 = \frac{\sin(\varphi_k + \alpha_f) \sin \varphi_k}{\cos(90 - \beta - \alpha_f) \cos(90 - \beta)}. \quad (7)$$

Здесь β — угол наклона образующей конуса (передней грани сооружения откосного профиля)

к горизонту, град. (нагрузка на сооружение вертикального профиля определяется при $\beta = 90^\circ$); α_f — угол трения между льдом и сооружением, град.;

$$\alpha_f = \arctg f, \quad (8)$$

где f — коэффициент трения между льдом и сооружением, определяемый по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать для бетонных конструкций $f=0,12$, а для стальных — $f=0,1-0,2$.

В таблице сопоставлены результаты расчетов при взаимодействии с вертикальными сооружениями при различных значениях эффективной ширины сооружения D и коэффициенте трения между льдом и сооружением, равному $f=0,18$.

Как видим, результаты численного и аналитического решения имеют хорошее соответствие между собой для вертикальных сооружений. Следовательно, численный метод можно считать приемлемым для расчета ледовой нагрузки от килля торося на ГТС.

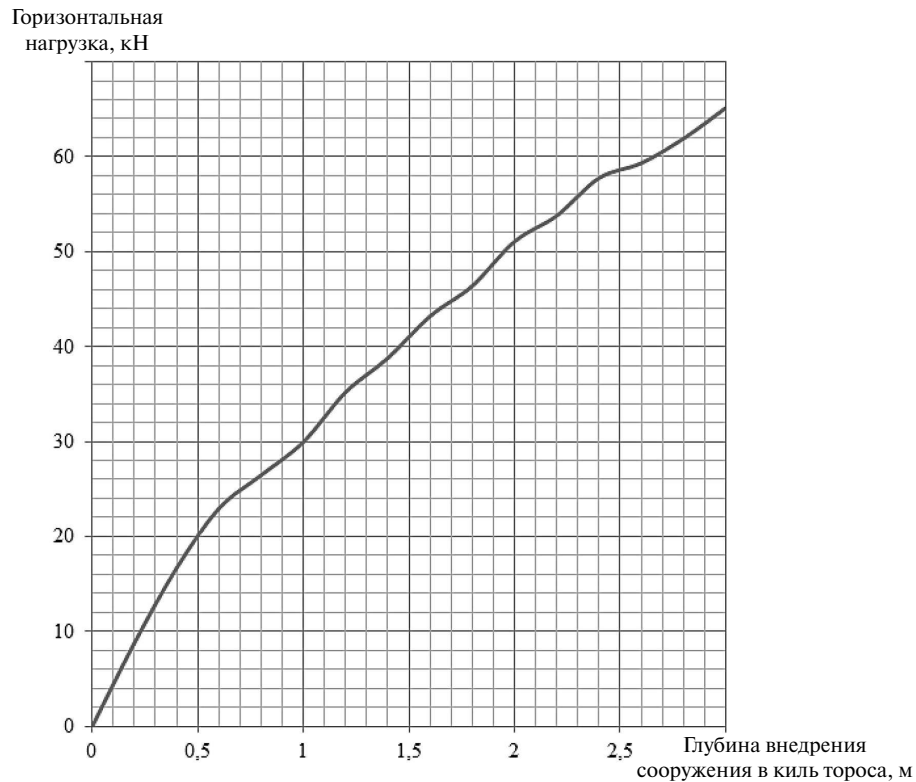


Рис. 5. График горизонтальной разрушающей нагрузки кия тороса при взаимодействии с вертикальным сооружением (моделирование в PLAXIS 2D)

Сводная таблица результатов

Способ получения результата	Максимальная горизонтальная нагрузка, МН			
	$D = 1\text{ м}$	$D = 10\text{ м}$	$D = 50\text{ м}$	$D = 100\text{ м}$
Аналитическое решение [6]	0,074	0,743	3,716	7,433
PLAXIS 2D	0,065	0,650	3,250	6,500

На основании выполненных серийных расчетов взаимодействия кия тороса с сооружениями с помощью PLAXIS 2D определены напряженно-деформированное состояние кия тороса при взаимодействии с вертикальным сооружением и максимальные силы от воздействия кия тороса в процессе этого взаимодействия; произведено сравнение с аналитическим решением. По результатам оценки установлено, что наиболее важными параметрами при моделировании являются свойства материала, граничные условия, геометрия кия тороса и сооружения, а так же трение между льдом и сооружением.

Результатом стала разработка методологии численного моделирования взаимодействия кия тороса с сооружениями произвольной формы в PLAXIS 2D. Произведено сравнение результата численного расчета **составляющей нагрузки от кия тороса на вертикальное сооружение** с требованиями нормативного документа [6]. Ценность данной работы заключается в том, что предложенная автором методология позволяет поэтапно определять значение и точку приложения максимальной разрушающей нагрузки от кия тороса при взаимодействии с сооружениями произвольной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коржавин К.Н.** Воздействие льда на инженерные сооружения. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. 203 с.
2. **Tsinker G.** Marine Structures Engineering: Specialized Applications. Edition 1. Springer, 1995. 570 p.
3. **Лосет С., Шхинек К.Н., Гудместадт О., Хойланд К.** Воздействие льда на морские и береговые сооружения: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 272 с.
4. **Sanderson T.J.O.** Ice Mechanics. Risk to offshore structures. Graham and Trotman, 1988. 253 p.
5. **ISO/FDIS 19906**, 2010. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures; **ISO TC 67/SC 7**. Final Draft International Standard. / International Standardization organization. Geneva, Switzerland. 434 p.
6. **Свод правил СП 38.13330.2012.** Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). / Министерство регионального развития Российской Федерации. Москва, 2013.
7. **ВСН—41.88.** Проектирование ледостойких стационарных платформ / Миннефтепром. Москва, 1988.
8. **Иванов П.Л.** Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учеб. для гидротехн. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 447 с.
9. **Heinonen J.** Constitutive modeling of ice rubble in first-year ridge keel: PhD Thesis. / Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland. Mode of access: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2004/P536.pdf>.
10. **Timco G.W., Croasdale K., Wright B.** An overview of first-year sea ice ridges. Technical Report HYD-TR-047. PERD/CHC Report 5—112. August 2000. Mode of access: ftp://ftp2.chc.nrc.ca/CRTReports/PERD/Ridge_00.pdf.
11. **Serré N., Liferov P.** Loads from ice ridge keels — experimental vs. numerical vs. analytical // Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice. Lahti, Finland, 2010.
12. PLAXIS. 2D, V.11. Руководство пользователя.

REFERENCES

1. **KorzHAVIN K.N.** Action of ice on engineering structures. USSR Academic Science Siberian Branch, CRREL, Draft Translation No. 260. Hannover, 1971. (rus.)
2. **Tsinker G.** Marine Structures Engineering: Specialized Applications. Edition 1. Springer, 1995. 570 p.
3. **Loset S., ShkhineK K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V.** Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. St. Petersburg: Lan', 2010. 272 p. (rus.)
4. **Sanderson T.J.O.** Ice Mechanics. Risk to offshore structures. Graham and Trotman, 1988. 253 p.
5. **ISO/FDIS 19906**, 2010. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures; **ISO TC 67/SC 7**. Final Draft International Standard, International Standardization organization. Geneva, Switzerland, 434 p.
6. **Set of rules SR 38.13330.2012.** Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships) / Ministry of Regional Development. Moscow, 2013. (rus.)
7. **VSN—41.88.** The design of ice-resistant stationary platform / Minnefteprom. Moscow, 1988. (rus.)
8. **Ivanov P.L.** Soils and bases of hydraulic structures. Mechanics of soils. Moscow. Higherschool, 1991. 447 p. (rus.)
9. **Heinonen J.** Constitutive modeling of ice rubble in first-year ridge keel: PhD Thesis. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland. Mode of access: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2004/P536.pdf>.
10. **Timco G.W., Croasdale K., Wright B.** An overview of first-year sea ice ridges. Technical Report HYD-TR-047. PERD/CHC Report 5—112. August 2000. Mode of access: ftp://ftp2.chc.nrc.ca/CRTReports/PERD/Ridge_00.pdf.
11. **Serré N., Liferov P.** Loads from ice ridge keels — experimental vs. numerical vs. analytical. *Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice*, Lahti, Finland, 2010.
12. PLAXIS. 2D, V.11. User's Guide.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ВАКУЛЕНКО Алексей Михайлович — аспирант кафедры водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: aleksejvakulenko@yandex.ru

AUTHORS

VAKULENKO Aleksei M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: aleksejvakulenko@yandex.ru