

Секция 1. Ледовая механика

Section 1. Ice Mechanics

УДК 551.326.7+626

Определение основных расчетных параметров торося при помощи численного моделирования с целью уточнения ледовой нагрузки на ГТС

**Альхименко Александр Иванович¹,
Ксенофонтова Дарья Андреевна²**

¹д.т.н., профессор, кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
e-mail: a.alhimenko@mail.ru

²инженер, *Морстройтехнология*. 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21, корп. 2, лит. А (аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого),
e-mail: dariaksen28@gmail.com

Аннотация: Для гидротехнических сооружений (ГТС) в зоне Северного морского пути ледовые нагрузки от торосястых образований являются лимитирующими. При выполнении расчетов важно правильно принять толщину консолидированного слоя, высоту паруса и глубину киля торося. Ошибка в значении этих параметров может привести к неоправданному увеличению стоимости сооружения или к его повреждению. Методика, предложенная в СП 38.13330.2012, приводит к широкому диапазону результатов. В представленном докладе предложен дополнительный способ определения расчетных параметров торося при помощи численного моделирования на базе программного комплекса COMSOL Multiphysics. На основе уравнений теплообмена и задания переменных граничных условий был смоделирован дрейф торося от берегов Земли Короля Карла до о. Медвежий. *Ключевые слова:* ГТС, ледовая нагрузка, консолидированный слой, торося, численное моделирование, COMSOL Multiphysics.

Введение

Ключевыми факторами, оказывающими влияние на надежную эксплуатацию гидротехнических сооружений (ГТС) в зоне Северного морского пути, являются низкие температуры воздуха, сильные ветра и наличие ледяного покрова на акваториях морей. Последний фактор имеет наибольшее значение при проектировании оградительных, портовых и шельфовых сооружений.

Руководящим нормативным документом в области определения ледовых нагрузок на ГТС в России является СП 38.13330.2012 [1]. Согласно данному нормативу нагрузка на сооружение от движущего торося (F_r) должна определяться по формуле (1) [1].

$$F_r = F_u + F_c + F_k. \quad (1)$$

Здесь F_u – нагрузка от надводной части торося, МН; F_c – нагрузка от консолидированной части торося, МН; F_k – нагрузка от кия торося, МН.

Все составляющие ледовой нагрузки (F_r) определяются множеством параметров, величины которых при отсутствии опытных данных или специальных исследований рекомендуется принимать из предложенного промежутка значений. Такой метод приводит к неточному определению нагрузки, так как никаких рекомендаций по выбору значений из промежутка нет.

В данном докладе особое внимание уделено определению нагрузки от кия и консолидированного слоя торося. Основными расчетными параметрами для значений этих нагрузок являются глубина и пористость кия, а также толщина консолидированной части торося.

Глубину кия (h_k) норматив [1] рекомендует определять по формуле (2) [1].

$$h_u / h_k = 2 - 6. \quad (2)$$

В формуле (2), вероятно, имеет место опечатка, и значение глубины кия должно стоять в числителе.

Здесь h_u – расчетная высота паруса, определяемая по натурным данным или в зависимости от толщины льда (h_l) на момент образования торося по формуле (3):

$$h_u = 9,1 \cdot h_l^{0,4}. \quad (3)$$

При толщине льда 0,2 м глубина кия составит 9,6...28,7 м, при толщине льда 0,3 м – 11,2...33,7 м. Однако согласно полевым исследованиям торося с осадкой кия более 15 метров в зоне Северного морского пути встречаются не часто. Кроме того, в процессе дрейфа под действием турбулентных потоков киль торося тает и уменьшается в размерах.

Место и время формирования торося определить достаточно трудно, поэтому значение толщины льда в момент образования и как следствие высота паруса носят приблизительный характер. Предлагаемый диапазон

значений при вычислении глубины кия, как видно, вносит еще большую неточность в определение величины ледовой нагрузки. Никаких рекомендаций по выбору значений из промежутка в нормативном документе не приводится.

Пористость кия показывает степень его консолидации и является важным параметром при определении ледовой нагрузки. Согласно указаниям [1] этот параметр необходимо определять по опытным данным или принимать равным 0,3...0,4. Определение пористости тороса экспериментальным методом не дает точного результата, так как пустоты в теле ледяного образования расположены хаотично. Пористость кия тороса меняется в процессе его дрейфа и консолидации. Имея представления о величине пористости в момент образования тороса, аналитическим путем весьма затруднительно определить данный параметр на любой интересующий нас момент времени. Требуется учет метеорологических данных, а также температуры воды и траектории дрейфа, что приводит к необходимости решения системы уравнений с множеством неизвестных. Согласно многочисленным работам по исследованию морфометрии ледяных образований пористость кия тороса лежит в пределах 0,15...0,30 [2–4].

Консолидированный слой тороса является его монолитной и самой прочной частью. Толщина слоя во многом служит определяющим параметром при вычислении ледовой нагрузки. Согласно [1] толщина консолидированного слоя вычисляется по формуле (4) [1].

$$h_c = (1,8 - 2,0) \cdot h_d. \quad (4)$$

Здесь h_d – толщина ровного льда в районе ГТС на момент его контакта с ледяным образованием. Значение данного параметра рекомендуется определять на основе статистических данных о гидрометеорологических и ледовых условиях. Однако формула (4) не учитывает температурный режим, скорость ветра и прочие характеристики, соответствующие траектории дрейфа тороса и влияющие на формирование консолидированного слоя. Также для формулы (4) отсутствуют рекомендации по выбору значений из предложенного диапазона.

Все вышперечисленные неточности и вариативность решений приводят к широкому диапазону результатов. Для уточнения основных расчетных параметров целесообразно дополнительно проводить численное моделирование, сопоставительный анализ полученных результатов с расчетами по [1] и при необходимости выполнять их корректировку.

Создание трехмерной модели однолетнего тороса

Исследования морфометрических характеристик гряд торосов отражены во многих работах. В 2007–2010 гг. в юго-западной части Карского моря было проанализировано 27 гряд торосов [5]. В работе [6] авторы ис-

пользовали для статистического анализа данные о 112 однолетних торосах, полученные в различных арктических экспедициях, и вывели уравнения, описывающие соотношения основных элементов тороса.

Значения пористости кия тороса, как уже отмечалось выше, приведены во многих работах [3, 4], согласно которым этот параметр варьируется для однолетних торосов в пределах $0,15 \dots 0,30$.

С учетом всех вышеизложенных характеристик в программной среде AutoCAD была смоделирована двухмерная модель тороса, представленная на рис. 1.

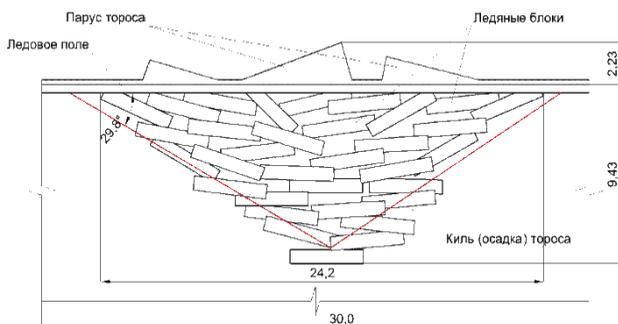


Рисунок 1: Модель среднестатистического однолетнего тороса

Отношение глубины кия к глубине паруса и значение макроскопической пористости составили 4,23 и 0,20 соответственно. Киль тороса при моделировании может быть сформирован из блоков любой толщины.

Трехмерная модель тороса создавалась в среде COMSOL Multiphysics. Каждый блок был произвольно повернут в плоскости XY. Ширина модели составила 5,5 м, глубина под ровным льдом – 11 м. Модель является вертикальным элементом гряды тороса. Разбивка модели на конечные элементы представлена на рис. 2.

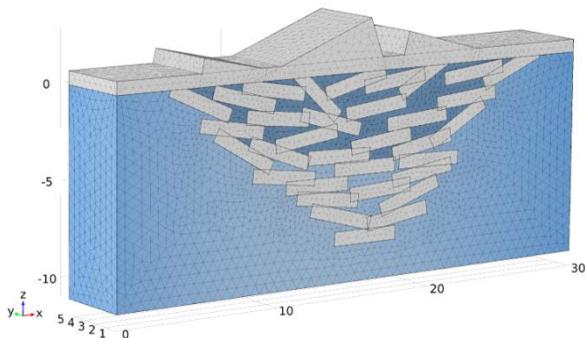


Рисунок 2: Сетка конечных элементов модели

Численное моделирование в COMSOL Multiphysics

Программный комплекс COMSOL Multiphysics позволяет моделировать любые физические процессы, представленные системой дифференциальных уравнений в частных производных, и решать их методом конечных элементов [7]. Программная среда обеспечивает все этапы моделирования – определение геометрических параметров, описание физики и визуализацию.

При моделировании элемент гряды тороса рассматривался как трехкомпонентная среда. На рис. 2 серым, голубым и синим цветом обозначены лед, вода и шуга соответственно.

Теплообмен между ледяными блоками и водой вокруг кыля тороса, а также движение фазовой границы между этими средами описывались при моделировании уравнением (5) [8].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T), \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right). \quad (5)$$

В формуле (5) ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; T – температура, °C; t – время, с; u – поле скоростей, м/с; k – теплопроводность, Вт/м·°C; x , z – горизонтальная и вертикальная координата соответственно, м.

Шуга представляет собой смесь воды (рассола) с ледяными кристаллами. Принято считать, что компоненты шуги находятся в состоянии термодинамического равновесия, поэтому температура рассола всегда равна температуре точки замерзания. Согласно уравнению солевого баланса [2] соленость шуги – величина, не зависящая от времени, а вот соленость рассола с течением времени может меняться. По мере образования или таяния льда она будет увеличиваться или уменьшаться соответственно.

Степень консолидации шуги в пространствах между блоками тороса можно выразить значением микроскопической пористости шуги (p) – объемом рассола, содержащимся в единичном объеме шуги [2]. Существует некое критическое значение пористости шуги, которое указывает на изменение реологического состояния. Согласно недавним исследованиям [2, 9], это значение может быть принято равным 0,3.

Изменения пористости шуги во времени, энергозатраты на переход из одной фазы в другую, а также теплообмен в шуге при моделировании описывались согласно формуле (6) [2]:

$$\left(\rho c + \rho_i L \frac{\rho_0 T_0}{T^2} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \rho c = p \rho_w c_w + (1 - p) \rho_i c_i. \quad (6)$$

В формуле (6) p – микроскопическая пористость шуги; p_0 – начальное значение пористости шуги; T_0 – начальная температура шуги, °C, L – скрытая теплота плавления, кДж/кг.

Начальные значения температуры льда, воды и шуги были приняты равными $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Начальное значение микроскопической пористости шуги составило 0,8.

Дрейф тороса в большей степени обуславливает морфометрические изменения в киле. Задание траекторий дрейфа льда способствует более точному численному моделированию и расширяет область для расчетов ледовой нагрузки.

В данном докладе использовались две модельные траектории дрейфа льда от берегов Земли Короля Карла (арх. Шпицберген) до о. Медвежий, воссозданные по данным дрейфующих буев (рис. 3) [4, 10].

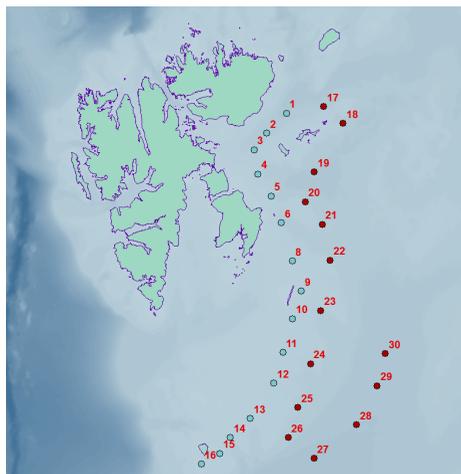


Рисунок 3: Модельные траектории дрейфа льда

Вдоль каждой из них было смоделировано движение тороса. Продолжительность дрейфа вдоль первой траектории, обозначенной голубыми точками, составила 57 дней, вдоль второй, обозначенной красными точками, – 79 дней.

Согласно выбранным траекториям нижней границе модели была задана переменная температура [11] в виде интерполяционной функции для каждого дня дрейфа тороса. На поверхность модели также при помощи интерполяционной функции был задан тепловой поток [12], зависящий от скорости ветра, температуры воздуха [13] и его физических характеристик.

Всем боковым граням модели была задана тепловая изоляция. Течения и турбулентные потоки воды вокруг киля тороса, образующиеся во время его дрейфа, учитывались при моделировании путем присвоения воде турбулентной теплопроводности.

Анализ результатов моделирования

На рис. 4 и рис. 5 представлены результаты моделирования в конечный момент дрейфа тороса вдоль первой и второй траектории соответственно. Голубая линия соответствует значению микроскопической пористости шуги равному 0,3, т.е. условно показывает границу консолидированного слоя. Синяя и красная линии соответствуют температуре $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, следовательно, красная линия является границей раздела между льдом и водой.

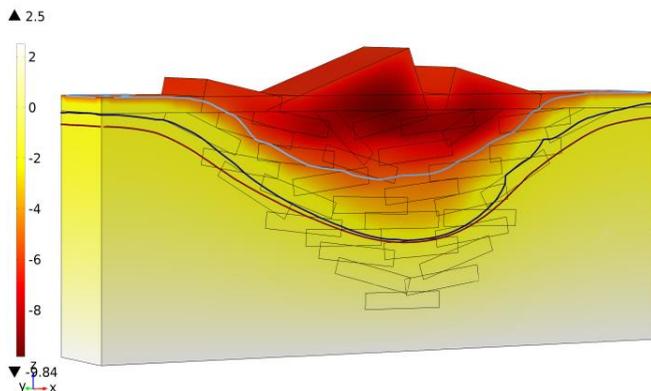


Рисунок 4: Результат моделирования дрейфа торося вдоль I траектории

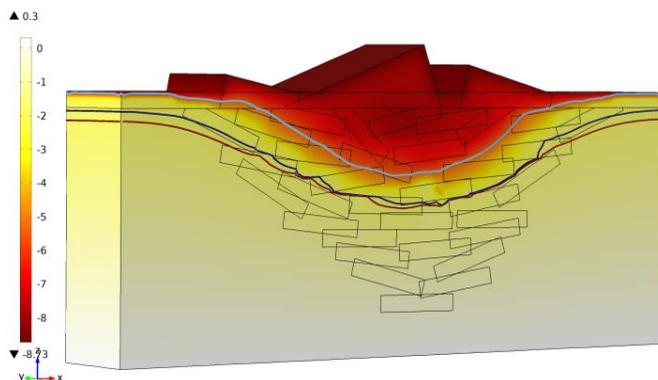


Рисунок 5: Результат моделирования дрейфа торося вдоль II траектории

На рисунках хорошо видно, что в результате дрейфа торося на юг растаяла примерно треть кия в первом случае и больше половины высоты кия – во втором. Искомые расчетные параметры на конечный момент времени были определены для обоих случаев и приведены в таблице.

Основные расчетные параметры по результатам моделирования

| Параметр | I траектория | II траектория |
|-----------------------------------------------------------|--------------|---------------|
| Максимальная толщина консолидированного слоя (h_c), м | 3,00 | 3,00 |
| Глубина кия (h_k), м | 6,00 | 4,00 |
| Толщина льда на момент формирования торося (h_t), м | 0,60 | 0,60 |
| Толщина льда в конечный момент времени (h_d), м | 1,00 | 1,00 |
| h_c/h_d | 3,00 | 3,00 |
| Пористость кия в конечный момент времени | 0,25 | 0,32 |

При моделировании не учитывался снежный покров, который благодаря своей низкой теплопроводности и высокой отражающей способности хорошо изолирует холод и может способствовать очень медленному росту консолидированного слоя. Поэтому толщина консолидированного слоя по результатам моделирования может быть несколько завышена.

Выводы

1. Результаты численного моделирования сопоставимы с натурными исследованиями. Моделирование возможно для различных арктических регионов, где проведение натурных исследований невозможно или нецелесообразно.
2. Для более точных результатов необходимо учитывать снежный покров на поверхности тороса.
3. Возможно моделирование движения тороса вдоль любых траекторий путем задания переменных граничных условий. Учитывается температурный режим воды и воздуха вдоль траектории дрейфа.
4. Моделирование позволяет задавать любые начальные значения толщины льда (h_i) и блоков, пористости и габаритных размеров тороса.
5. Численное моделирование позволяет в любой интересующий нас момент времени оценить распределение температур в теле тороса, толщину консолидированного слоя и ровного льда, пористость кила и его глубину.
6. Полученные величины могут использоваться для уточнения основных расчетных параметров ледовой нагрузки на ГТС и как следствие ее окончательного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*, Минрегион России, М., 2014.
- [2] Marchenko A.V. Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 2008, **52**, pp. 278–301.
- [3] Timco G.W., Croasdale K., Wright B. An Overview of First-Year Sea Ice Ridges. Technical Report HYD-TR-047. Canadian Hydraulic Centre, 2000, 160 p.
- [4] Marchenko A.V. et al. Consolidation of Drifting Ice Rubble in the North-West Barents Sea. *23rd IAHR Intern. Symposium on Ice*. 2016.
- [5] Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3(89). С. 49–61.

- [6] Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shapes of sea ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, pp. 65–77.
- [7] COMSOL Multiphysics: Ресурсный центр. URL: <http://cc.spbu.ru/ru/content/COMSOL-multiphysics>
- [8] Heat transfer module user's guide. URL: <http://goo.gl/yk27hk>
- [9] Hoyland K.V. Simulation of the consolidation process in first-year ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 2002, **34**, pp. 143–158.
- [10] Marchenko N.A., Marchenko A.V. Sea Currents and Ice Drift in Western Part of Barents Sea. A Comparison of Data from Floating and Fixed on Ice Buoys. *Proceeding of the 23rd Intern. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Norway, 2015.
- [11] Атлас Баренцева моря – ААНИ: электронное справочное пособие по океанографическим характеристикам Баренцева моря. URL:<http://www.alari.ru>
- [12] Makshtas A.P., The Heat Budget of Arctic Ice in the Winter. International Glaciological Society. Cambridge, 1991, 77 p.
- [13] Earth System Research Laboratory, Physical Science Division. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <http://goo.gl/gA3Ggi>

|||||

Determination of Major Design Parameters of an Ice Ridge Using Numerical Simulation in View of Adjustment of Ice Loads on the Hydraulic Engineering Structures

Aleksandr Alhimenko¹, Daria Ksenofontova²

¹Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Water Management and Hydraulic Engineering.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29, Polytechnicheskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 195251,

e-mail: a.alhimenko@mail.ru

²Engineer, *Morstroytechnology.*

21/2, liter A, Gzatskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 195220,

(Postgraduate, *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*),

e-mail: dariaksen28@gmail.com

Abstract: During the construction of hydraulic structures in the area of the Northern Sea Route and in the presence of severe ice conditions, the reliability of the operation of these facilities is an important problem. The key factors that

affect the safe operation of hydraulic structures are low temperatures, strong winds and presence of ice on the seawater area. The last factories very important in design of protecting, port and offshore structures. Ice loads, particularly from ice ridges, are limitative – they directly influence on safety, structural solutions and cons of a project. While calculating of loads from an ice ridge it is important to identify correctly the thickness of its consolidated layer, sail and keel. A mistake in those parameters can lead to incorrect calculation of loads and so increase of structure cost or conversely its damage. A technique that is proposed by SP 38.13330.2012 determine major dimensions of an ice ridge in dependence of the thickness of surrounding sea ice. This technique does not consider conditions of formation and drifting of an ice ridge, which can significantly affect the results of calculations of the structures stability. In this article, an alternative method for determining design parameters of an ice ridge is proposed, which takes into account thermodynamic processes while its drift to the future construction spot. A 3D finite element model of an ice ridge was created in software package COM-SOLE Multiphysics, morphometric characteristics of which met field observations. Based on using heat-transport equations and establishing variable finite conditions a drift on an ice ridge was simulated from Kong Karls Land (Svalbard archipelago) to Bear Island. The results of the simulation is data of the thickness of consolidated layer, the depth of keel, the height of sail, temperature distribution inside of the ice ridge and its porosity at any moment of time. Authors offer to compare the results taken from the simulation with the calculation made by the technique from SP 38.13330.2012 and make adjustments if needed. Currently there is no information in literature about 3D modelling of ice ridges thermodynamic consolidation and its practical application.

Keywords: hydraulic structure, ice loads, consolidated layer, ice ridge, numerical simulation, COMSOL Multiphysics.