

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-60-66>  
УДК 551.326.3



МНЕНИЕ

OPINION

## К ВОПРОСУ О ПОРИСТОСТИ КИЛЯ ТОРОСА (ПО ПОВОДУ СТАТЬИ В.В. ХАРИТОНОВА)

К.Е. САЗОНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> — *Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup> — *Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
Санкт-Петербург, Россия*

*kirsaz@rambler.ru*

### Резюме

Обсуждается возможность применения модели сыпучей среды для анализа физических процессов в киле тороса. Высказано мнение, что для ряда задач, таких как эволюция киля тороса, такая модель не подходит. Также высказано мнение о том, что уменьшение пористости киля тороса во времени обусловлено в первую очередь термодинамическими факторами.

**Ключевые слова:** киль тороса, нарастание льда, пористость, тепловое сопротивление.

**Для цитирования:** *Сазонов К.Е.* К вопросу о пористости киля тороса (по поводу статьи В.В. Харитонова) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 1. С. 60–66. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-60-66>.

Поступила 24.11.2020

После переработки 19.01.2021

Принята 21.01.2021

## ON THE POROSITY OF RIDGE KEEL (WITH REFERENCE TO VICTOR V. KHARITONOV'S PAPER)

KIRILL E. SAZONOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> — *Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> — *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia*

*kirsaz@rambler.ru*

### Summary

The article discusses whether the model of loose granular medium is applicable to the analysis of physical processes in the ridge keel. It is argued that the model is not valid for dealing with a number of problems such

as the evolution of the ridge keel. It is also suggested that the decrease in keel porosity in time is primarily caused by thermodynamic factors.

**Keywords:** ice buildup, porosity, ridge keel, thermal resistance.

**For Citation:** Sazonov K.E. On the porosity of ridge keel (with reference to V.V. Kharitonov's paper). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (1): 60–66. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-60-66>.

Received 24.11.2020

Revised 19.01.2021

Accepted 21.01.2021

## ВВЕДЕНИЕ

В этом номере журнала опубликована статья В.В. Харитоновой «Распределение пористости неконсолидированной части киля торосов». Автор статьи выражает мне благодарность «за принципиальную позицию и непримиримость в отстаивании истины, которые вынудили автора признать ошибки и переработать статью». На мой взгляд, статья в ходе ее переработок была существенно улучшена, поэтому мною в итоге была дана положительная рецензия. Тем не менее остался ряд вопросов, которые, по моему мнению, являются предметом научной дискуссии, а не причиной отклонения статьи. Поэтому, воспользовавшись любезным предложением редколлегии журнала, я решил в этой краткой статье обсудить указанные вопросы. Необходимо сразу отметить, что рассуждения, приводимые ниже, носят качественный характер и сводятся к обсуждению возможных физических сценариев происходящих процессов.

Пористость  $n$  или коэффициент заполнения льдом  $\kappa_R = 1 - n$  киля тороса является важной физической характеристикой этого ледяного образования. От этой величины во многом зависит характер эволюции тороса во времени [1]. В практических приложениях пористость киля тороса играет важную роль при расчете ледовых нагрузок на суда [2] и инженерные сооружения [3, 4, 5] при их взаимодействии с такими ледяными образованиями. Поэтому актуальность и практическая значимость работ по изучению этой характеристики не вызывает сомнения. Изучению пористости киля тороса посвящено достаточно большое количество исследований [6, 7, 8 и др.].

Необходимо отметить, что в последнее время помимо киля тороса активно изучается еще один объект, свойства которого во многом совпадают со свойствами торосистых образований. Речь идет о ледяных каналах [9, 10] и акваториях, заполненных тертым льдом. Многие протекающие во времени физические процессы в таких каналах аналогичны процессам, которые наблюдаются в киле тороса. Например, в таких ледяных каналах происходит формирование консолидированного слоя льда, при этом пористость слоя тертого льда играет важнейшую роль в этом процессе [11, 12, 13 и др.].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ, МОДЕЛЬ СРЕДЫ

По определению пористостью называется отношение объема полостей  $V_{cav}$ , содержащихся в некотором выделенном объеме материала  $V$ , к этому объему:

$$n = V_{cav}/V. \quad (1)$$

Таким образом, пористость является объемной (интегральной) величиной.

В работе В.В. Харитонова применяется следующая методология определения «пористости». По результатам термобурения торосов для каждой скважины определяется положение по вертикали зон залегания полостей в киле тороса. Далее, используя весь массив данных по скважинам всех исследованных торосов региона, автор определяет для каждого горизонта с шагом 1 см следующую величину:

$$m = N_{cav}/N, \quad (2)$$

где  $N_{cav}$  — число измерений, в которых на рассматриваемом горизонте наблюдалась полость;  $N$  — общее число измерений на рассматриваемом горизонте.

В.В. Харитонов отождествляет полученную величину  $m$  с пористостью кила тороса  $n$ . Если строго следовать определению пористости, то величина  $m$  представляет собой некоторую величину, в какой-то мере аналогичную пористости  $n'$ , которая задается следующим выражением:

$$n' = \frac{4\pi N_{cav} d^2 \Delta z}{4\pi N d^2 \Delta z} = \frac{N_{cav}}{N}, \quad (3)$$

где  $d \approx const$  — диаметр скважины,  $\Delta z = 1$  см — шаг осреднения данных.

Строго пористость группы из  $k$  торосов на некотором горизонте  $z$  должна определяться по формуле:

$$n|_{z=z^*} = \frac{\sum_i S_{cav_i} \Delta z}{\sum_k S_{h_i} \Delta z}, \quad (4)$$

где  $\sum_i S_{cav_i}$  — сумма площадей всех полостей в  $k$  торосах на рассматриваемом горизонте;  $\sum_k S_{h_i} \Delta z$  — сумма площадей горизонтальных сечений  $k$  торосов на заданном горизонте.

Очевидно, что может быть только случайное совпадение результатов расчетов по формулам (3) и (4).

В.В. Харитонов указывает, что для описания кила тороса им применяются подходы механики сыпучей среды. В большинстве работ по морской ледотехнике для описания характеристик кила тороса и параметров его воздействия на инженерные сооружения используется аппарат механики сыпучей среды. Однако использование этого аппарата обусловлено не тем, что он идеально подходит для рассматриваемого объекта, а отсутствием каких-либо других моделей, которые хотя бы приближенно могли бы описать столь сложный объект исследования. Из этого следует, что применять подходы и аппарат механики сыпучей среды к описанию различных процессов, происходящих в киле тороса, следует с большой осторожностью. Базовым предположением механики сплошной среды, в том числе и механики сыпучей среды, является малость структурного элемента среды. Именно это требование нарушается для кила тороса. В некоторых прикладных задачах, например, при изучении воздействия кила тороса на инженерное сооружение или корпус судна, подход механики сыпучей среды можно применять для получения приближенных оценок, учитывая существенное превышение характерными размерами взаимодействующих с килем тороса объектов по сравнению с размерами обломков льда, слагающих киль. В других задачах приближение сыпучей среды не работает. К таким задачам относятся, по мнению автора заметки, задачи изучения пористости и эволюции торосистых

образований. Необходимо отметить, что более обоснованным является применение методов механики сыпучей среды при рассмотрении различных физических процессов, происходящих в набитых тертым льдом каналах из-за существенно меньшего характерного размера структурных элементов этого образования.

Результаты бурения торосов показывают, что фиксируемые в скважине размеры полостей сопоставимы с характерным размером обломков льда, составляющих киль. Тогда формулу (2) необходимо трактовать как вероятность нахождения полости на некотором заданном горизонте. Но для построения математической модели некоторого среднего тороса, представленной в статье, этой информации недостаточно. В самом деле, если с помощью полученного В.В. Харитоновым распределения попытаться воссоздать некий средний торос, то, делая это, например, каким-либо вариантом метода Монте-Карло, получим некоторую мозаичную картину распределения пористости по объему кия тороса, что явно не соответствует действительности. Такая ситуация возникает из-за того, что используется только вероятность обнаружения полости на заданном горизонте. Данные по морфологии торосов показывают, если в какой-либо точке кия тороса обнаружена полость, то вероятность обнаружения полости в соседней с ней точке близка к 1. Для того чтобы создать адекватную картину тороса, необходимо по данным их бурения определить характер распределения длины полостей, а также их распределение по глубине тороса.

#### **ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ГЛУБИНЫ КИЛЯ ТОРОСА**

В статье В.В. Харитонова в качестве основной причины изменения пористости кия тороса рассматривается его уплотнение под действием сил плавучести. По мнению автора заметки, с таким объяснением наблюдаемых фактов нельзя согласиться. Сразу необходимо сказать, что процессы уплотнения кия тороса под действием сил плавучести льда, несомненно, происходят. Однако их влияние на изменение пористости крайне мало. Это утверждение вытекает из рассмотрения морфологических особенностей кия тороса. Как хорошо известно, киль тороса сложен из хаотично расположенных блоков льда. При хаотичном расположении блоков льда размер полостей между ними имеет примерно одинаковый порядок величины с их характерными размерами. Само же нагромождение хаотических блоков самопроизвольно создает достаточно устойчивую конструкцию, иначе бы она неизбежно распалась при достаточно сильных внешних воздействиях, сопровождающих процесс торосообразования. Представляется маловероятным, что такая, достаточно жесткая, конструкция может существенно уплотниться.

В вопросе об уплотняемости кия тороса, как и при определении пористости, В.В. Харитонов считает киль тороса классической сыпучей средой. Поэтому он использует полученные для нее соотношения. Как уже было сказано выше, использовать представления механики сыпучей среды возможно только для определенного класса задач. Используемая в разбираемой статье формула М.Н. Скачкова справедлива при выполнении вполне определенных соотношений между пористостью и действующими в сыпучей среде напряжениями [14]. Выполнимость этого требования в работе не рассмотрена.

По мнению автора, основной причиной изменения пористости кия тороса во времени являются термодинамические эффекты. При образовании торосистого образования большое количество находившегося на поверхности льда попадает под

воду, слагая его киль. При этом попавшие под воду льдины обладают некоторым «запасом холода»  $Q = \rho_l V_l c_l \bar{T}_l$ , где  $\rho_l$  — плотность льда,  $V_l$  — объем обломка льда,  $c_l$  — теплоемкость обломка льда,  $\bar{T}_l$  — средняя температура обломка льда. С этого момента в киле начинают протекать довольно сложные термодинамические процессы. Во-первых, будут происходить процессы нарастания льда за счет «запаса холода». Интенсивность этих процессов будет спадать со временем по экспоненциальному закону, но практически никогда не прекратится, т. к. полное равновесие достигается за бесконечное время. В работе [13] была предпринята попытка учета этого явления при рассмотрении эволюции канала, заполненного тертым льдом. Однако в этой работе предполагалось, что нарастание льда за счет «запаса холода» происходит мгновенно, после чего авторы упоминаемой работы вводили полученную поправку в пористость тертого льда в канале.

Во-вторых, выделяемое при замерзании льда тепло будет инициировать режеляционные процессы в местах концентрации напряжений на стыках льдин. Это приведет к снижению уровня локальных напряжений и упрочнению зон контакта между льдинами и, соответственно, всего «жесткого» каркаса кия тороса.

Наличие «жесткого» каркаса кия тороса подразумевает существование «температурных мостиков». Иными словами, практически каждая точка, находящаяся внутри ледяного каркаса кия, связана с его внешней границей. Из этого следует, что эта точка может обмениваться теплом с внешней границей за счет теплопроводности. Интенсивность этих процессов будет определяться только величиной термического сопротивления, величина которого будет зависеть от конфигурации «температурных мостиков». Поэтому существует возможность протекания процессов нарастания льда в любой точке кия тороса в течение всего времени его существования. При этом основной фронт кристаллизации проходит по границе формирования консолидированного слоя.

Возможность некоторого уплотнения кия тороса, особенно в центральной его части, допускает О.М. Андреев [1]. Он указывает, что уплотнение «связано с действием архимедовых сил, которые позволяют небольшим блокам или их обломкам всплывать в промежутках между крупными блоками на начальном этапе формирования тороса» (С. 550). Автор заметки полностью согласен с приведенным описанием. Однако возникает вопрос. Если указанные «небольшие блоки и их обломки» после всплытия не смерзлись, то при бурении такие участки будут, скорее всего, идентифицироваться как полости, заполненные рыхлым льдом. С большой вероятностью эти участки будут регистрироваться при определении пористости. Описанный выше термодинамический подход снимает указанное противоречие за счет допущения, что большая часть всплывших «небольших блоков и их обломков» замерзнет и, таким образом, снизит вероятность обнаружения полости на рассматриваемом горизонте.

Приведенное выше качественное описание термодинамических процессов, происходящих в киле тороса, позволяет естественным образом, без привлечения довольно сильных допущений о возможности применения модели сыпучей среды для описания кия торосов, объяснить изменение частоты появления полостей в киле по мере приближения по вертикали к консолидированному слою. Поэтому построение обобщенных зависимостей, например частоты появления полости в зависимости от параметров кия тороса, необходимо выполнять в функции от безразмерных термодинамических параметров.

Автор выражает надежду, что приведенные в его краткой статье рассуждения будут способствовать серьезному научному обсуждению затронутых вопросов и продолжению научных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев О.М. Учет внутренней структуры кия тороса при термодинамических расчетах эволюции консолидированного слоя // Лед и снег. 2020. Т. 60 (4). С. 547–556.
2. Сазонов К.Е. Расчет максимального усилия, действующего на судно при взаимодействии с торосами // Судостроение. 2013. № 5. С. 30–32.
3. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 360 с.
4. Palmer A., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. Singapore [etc.]: World Scientific Publ., 2013. 357 p.
5. Лосет С., Шхинек К.Н., Гудмestad О., Хойланд К. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. СПб.: «Лань», 2010. 272 с.
6. Грищенко В.Д. Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Труды ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 46–55.
7. Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: «Прогресс-Погода», 1997. 197 с.
8. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
9. Kannari P. Measurements of characteristics and propulsion performance of a ship in old ice-clogged channels // Proc. of the 7 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-83, Espoo, Finland. V.II. Technical Research Centre of Finland, 1983. P. 600–619.
10. Nortala-Hoikkanen A. Development of brash ice channels navigated by ship // Proc. of the 15 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions. POAC-99, Espoo, Finland. Technical Research Centre of Finland, 1999. P. 620–630.
11. Klyachkin S.V., Frolov S.V., Drabkin V.V. The peculiarities of ice navigation along the broken channel in fast ice // 17th Int. Conf. OMAE'99. Rio-de-Janeiro. 1999. P. 10.
12. Сазонов К.Е. Влияние смерзаемости ледяного канала в припайном льду на ледовую ходкость судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 88 (372). С. 159–168.
13. Karulin E.B., Karulina M.M., Tarovik O.V. Analytical investigation of navigation channel evolution in severe ice conditions // Proceedings of Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-2018. Sapporo, Japan. 10–15 June 2018. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018. P. 1591–1598.
14. Олейников А.И., Скачков М.Н. Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения // Информатика и системы управления. 2011. № 4 (30). С. 48–57.

#### REFERENCES

1. Andreev O.M. Accounting of the internal structure of the ice hummock keel in thermodynamic calculations of the evolution of the consolidated layer. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (4): 547–556. [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673420040059>
2. Sazonov K.E. Calculation of the maximum force acting on the vessel when interacting with hummocks. *Sudostroenie. Shipbuilding*. 2013, 5: 30–32. [In Russian].
3. Alekseev Yu.N., Afanasyev V.P., Litonov O.E., Mansurov M.N., Truskov P.A. *Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniya morskikh mestorozhdenij nefii i gaza*. Ice-technical aspects of the development of offshore oil and gas fields. St. Petersburg: Hidrometeoizdat, 2001, 360 p. [In Russian].

4. *Palmer A., Croasdale K.* Arctic Offshore Engineering. Singapore [etc.]: World Scientific Publ., 2013: 357 p.
5. *Loset S., Shkhinek K.N., Gudmestad O., Hoyland K.* *Vozdejstvie l'da na morskije i beregovyje sooruzheniya.* Impact of ice on offshore and onshore structures. St. Petersburg: "Lan", 2010: 272 p. [In Russian].
6. *Grishchenko V.D.* Morphometric characteristics of ridges of hummocks on the ice of the Arctic basin. *Trudy AANII.* Proceedings of the AARI. 1988, 401: 46–55. [In Russian].
7. *Astafiev V.N., Surkov G.A., Truskov P.A.* *Torosy i stamuhi Ohotskogo moray.* Hummocks and stamukhas of the Sea of Okhotsk. St. Petersburg: "Progress-Weather", 1997: 197 p. [In Russian].
8. *Ledyanye obrazovaniya morej Zapadnoj Arktiki.* Ice formations of the seas of the Western Arctic. Ed. G.K. Zubakin. St. Petersburg: AANII, 2006: 272 p. [In Russian].
9. *Kannari P.* Measurements of characteristics and propulsion performance of a ship in old ice-clogged channels. Proc. of the 7 Int. Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-83, Espoo, Finland. V.II Technical Research Centre of Finland, 1983: 600–619.
10. *Nortala-Hoikkanen A.* Development of brash ice channels navigated by ship. Proc. of the 15 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-99, Espoo, Finland. Technical Research Centre of Finland, 1999: 620–630.
11. *Klyachkin S.V., Frolov S.V., Drabkin V.V.* The peculiarities of ice navigation along the broken channel in fast ice. 17th Int. Conf. OMAE'99. Rio-de-Janeiro, 1999: 10 p.
12. *Sazonov K.E.* Influence of freezing of the ice channel in fast ice on the ice performance of the vessel. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2015, 88 (372): 159–168. [In Russian].
13. *Karulin E.B., Karulina M.M., Tarovik O.V.* Analytical investigation of navigation channel evolution in severe ice conditions. Proceedings of Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-2018, Sapporo, Japan, 10–15 June 2018. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018: 1591–1598.
14. *Oleinikov A.I., Skachkov M.N.* Model of compacted bulk solids and some of its applications. *Informatika i sistemy upravleniya.* Informatics and Control Systems. 2011, 4 (30): 48–57. [In Russian].