

**ИЗМЕРЕНИЕ И НОРМИРОВАНИЕ ФОРМЫ ЛЕДОВОГО ВОРОТНИКА
В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

© 2023 Д.А. Шарапов, Ю.С. Клочков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(национальный исследовательский университет), г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 20.06.2023

В регионах с холодным климатом, водно-транспортное сообщение часто играет важную роль. Сезонный завоз товаров и продовольствия осуществляется по льду или водным путем. Гидротехнические сооружения, порты, причалы в данных регионах играют особо важную роль. При проектировании причалов и других объектов акватории необходимо принимать во внимание большое количество ледовых воздействий, которое может быть оказано на конструкцию. Некоторая часть возможных ледовых воздействий, до сих пор, не отражена в нормативной документации. При вморзании сооружений без значимых колебаний уровня воды, вокруг сооружения возможно образование ледового воротника, то есть утолщение льда на контакте с сооружением. Данные образования могут увеличивать нагрузку, передаваемую льдом на сооружение, однако, не описаны должным образом в нормативной документации. Измерение ледовых воротников и их нормирование, является важным шагом к разработке нормативной документации, содержащей методы учета влияния ледовых воротников на сооружения.

Ключевые слова: ледовый воротник, вморзание в лед, измерение, нормирование формы, размер ледового воротника

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-71-78

EDN: PXCMQE

*Исследование выполнено в рамках проекта FSEG-2020-0021***ВВЕДЕНИЕ**

Вокруг некоторых гидротехнических конструкций Арктики при отрицательных температурах воздуха может образовываться утолщение льда, называемое ледовым воротником [1, 2]. Ледовые воротники влияют на нагрузки на сооружение со стороны ледового покрова, поэтому оценка их влияния представляется важной задачей [3, 4]. Для оценки влияния ледового воротника на нагрузки от льда необходимо оценить размеры и форму ледового воротника.

Оценка размеров и формы ледового воротника необходима для фактической оценки их влияния на конкретное сооружение и для сбора статистической информации с целью формирования общих правил по учету данного явления. Размеры ледового воротника можно получить математическим моделированием [5-10], задав предварительно необходимые характеристики льда [11-18], однако, для верификации результатов потребуются физические эксперименты и их измерения. Таким образом цель измерения

можно сформулировать как определение размеров ледового воротника для известных внешних условий или заданных условий проведения эксперимента. Методика выполнения измерений (МВИ) – совокупность операций и правил, выполнение которых позволяет получить результаты измерений с установленной погрешностью (неопределенностью). Таким образом методика измерения размеров - измерительная процедура, которой приписаны показатели точности измерений. Согласно требованиями стандартов ИСО серии 9000 все процедуры должны быть документированы, таким образом измерительные процедуры документально оформляются.

Для измерения размеров и формы ледовых воротников в 2009 году была разработана специальная методика измерения ледовых воротников. Измерения могут проводиться как в условиях холодной лаборатории, так и в условиях естественного водоема или открытого бассейна. Размеры некоторых ледовых воротников позволяют провести их измерения в лабораторном бассейне, в отличие от многих ледовых образований, например от ледовых бастлов [8, 9] или торосов [19-22]. Пример экспериментального бассейна, позволяющего проводить модельные опыты по намораживанию льда, представлен на рис. 1. Данный экспериментальный бассейн расположен внутри холодной лаборатории (лабора-

Шарапов Дмитрий Андреевич, кандидат наук, доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства. E-mail: sharov@bk.ru

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, проректор по научно-организационной деятельности. E-mail: y.kloch@gmail.com



Рис. 1. Пример лабораторного мини-бассейна (лаборатория ЮНИС)

тория университетского центра на Свальбарде - UNIS), поэтому в нем возможно поддерживать заданный температурный режим. Данный бассейн возможно использовать при определении размеров модельных ледовых воротников.

ИЗМЕРЕНИЯ ЛЕДОВЫХ ВОРОТНИКОВ

Измерение размеров ледового воротника и фиксация условий его образования включает:

1. Размеры ледового воротника:

- Толщина ледового воротника (L).
- Ширина ледового воротника (b).
- Толщина ровного льда (h).
- Угол примыкания ледового воротника (α).

2. Условия фиксируемые при формировании/измерении ледового воротника:

- Продолжительность образования ледового воротника ($days$).
- Подневная средняя температура, при которой образовывался ледовый воротник (T_i).
- Толщина льда до начала образования ледового воротника (h_0).
- Толщина снега до начала образования ледового воротника (h_s).
- Соленость воды (S).
- Наличие циркуляции воды (K_w).
- Теплопроводность материала погруженной опоры (K_s).
- Толщина стальной стенки погруженной опоры или характеристики, определяющие величину теплового тока (t_{steel}).

Порядок подготовки экспериментальных ледовых воротников отличается в зависимости от наличия контролируемых условий холодной лаборатории или случайных условий внешней среды.

При подготовке экспериментального ледового воротника основными шагами будут:

Согласовать проведение работ в холодной лаборатории или на открытой местности с ответственным за технику безопасности.

Наполнить бассейн водой с заданными параметрами (или проверить параметры имеющегося бассейна).

Провести измерение температуры воды, температуры воздуха, солёности, и факта циркуляции воды в момент начала эксперимента. Подготовить таблицы для фиксации средних значений температуры воздуха в течении всего периода образования ледового воротника (процесс может быть автоматизирован, при наличии оборудования).

Погрузить в экспериментальный бассейн конструкцию известной формы (рекомендуется цилиндрическая или линейная форма) из материала с известными свойствами теплопроводности и известными размерами. Зафиксировать геометрические размеры погруженной конструкции и материал (его свойств), а также отметки погружения и уровней. Возможно использование имеющейся конструкции с известными параметрами, в случае использования естественного открытого водоема.

При наличии начального слоя льда (и/или снега) произвести измерение толщины слоя и зафиксировать значение.

Фиксировать время образования ледового воротника и температуру, при которой происходит образование ледового воротника. При изменении температуры необходимо фиксировать средние значения для интервалов времени. Интервалы времени принимать не менее 10 минут

для намораживания в течение суток и не более 24 часов, при продолжительности намораживания более одной недели.

По окончании периода образования ледового воротника (намораживания льда) произвести измерение его размеров.

Измерение размеров может быть произведено различными путями, в зависимости от вида эксперимента. При наличии возможности извлечения ледового воротника для непосредственного измерения, данный способ будет предпочтителен. Однако, есть опасность разрушения ледового воротника при извлечении, а также, в некоторых случаях, большие размеры замерзшего льда не позволяют извлечь искомый ледовый воротник.

При проведении измерений необходимо в первую очередь согласовать проведение работ в холодной лаборатории или на открытой местности с ответственным за технику безопасности. Далее провести измерение: температуры воды, температуры воздуха, солёности воды.

1. *Случай извлечения ледового воротника.*

В случае если есть возможность сделать пропил вокруг конструкции и извлечь ледовый воротник (в том числе возможность с точки зрения техники безопасности):

Сделать замкнутый пропил льда вокруг вмерзшей конструкции на достаточном расстоянии.

Извлечь вмерзшую конструкцию вместе с окружающим льдом (в границах пропила льда).

Произвести фотофиксацию на фоне размерной линейки (или аналога, позволяющего установить размер).

Измерить толщину ровного льда.

Измерить толщину ледового воротника - максимальное расстояние контакта льда с конструкцией вдоль вертикальной оси конструкции.

Измерить ширину ледового воротника - расстояние от поверхности конструкции до точки, где толщина наростшего льда становится равной толщине ровного льда.

В случае, если форма ледового воротника существенно отличается от линейной, зафиксировать промежуточные точки.

Произвести фотофиксацию на фоне размерной линейки (или аналога, позволяющего установить размер).

2. *Случай невозможности или нецелесообразности извлечения ледового воротника.*

В случае, если лед достиг значительной толщины, силы адгезии льда и конструкции велики, когда извлечение ледового воротника представляется невозможным или нецелесообразным:

Необходимо пробурить ряд отверстий через толщу льда, начиная от минимального расстояния до конструкции и продолжая удаляться

по радиусу дальше от конструкции до момента, когда толщина льда перестанет уменьшаться. Также рекомендуется пробурить отверстие на некотором расстоянии, допускающим спуск фотоаппаратуры и проведение фотофиксации.

Измерения рекомендуется проводить щупом с загнутым Г-образным концом. Щуп опускается в пробуренное отверстие и при обратном движении фиксируется его зацеп за нижнюю границу льда, фиксируется глубина погружения щупа, снимаются линейные размеры.

Измерить толщину ровного льда (толщина на удалении от конструкции).

Измерить толщину ледового воротника - максимальное расстояние около контакта льда с конструкцией вдоль вертикальной оси конструкции.

Измерить ширину ледового воротника - расстояние от поверхности конструкции до точки, где толщина наростшего льда становится равной толщине ровного льда.

Для случая измерения через пробуренные отверстия рекомендуется фиксировать размеры в каждой пробуренной точке.

Рекомендуется произвести фотофиксацию из-под толщи льда, направив фотокамеру на конструкцию с предварительно-нанесенными цветными размерными линиями.

Результаты измерений должны оформляться.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРАВИЛ ИЗМЕРЕНИЯ ЛЕДОВЫХ ВОРОТНИКОВ

В процессе измерения размеров и формы ледовых воротников возникали ошибки измерения. Среди всего массива ошибок были выделены типичные ошибки, для которых сформированы дополнения в правила измерения, с целью избежания повторений ошибок.

На основании рассмотренных типичных ошибок при измерении размеров ледовых воротников, предложены дополнения в правила, включающие:

1. Проверка работоспособности оборудования до начала эксперимента.
2. Периодическая проверка функционирования оборудования (частота зависит от продолжительности эксперимента).
3. Проверка температуры независимым термометром.
4. Периодическая визуальная проверка хода проведения эксперимента.
5. Контроль доступа посторонних лиц.
6. Проверка наличия незаполненных ячеек протокола до начала эксперимента.
7. Проверка заполнения протокола в процессе проведения эксперимента.

8. Проверка угла установки сооружения/ опоры до и после эксперимента.
9. Измерение толщин ледового воротника в нескольких местах.
10. Контроль наличия повреждений льда.
11. Дополнительный контроль толщины льда на удалении от ледового воротника.
12. Проверка отсутствия воздействия солнечной радиации и/или установка защитных конструкций.
13. Контроль наличия циркуляции водных масс (до, в процессе и после окончания эксперимента).
14. Проверка используемых материалов на предмет соответствия ожидаемым характеристикам (например, проверка металла на ферромагнитные свойства).
15. Предварительный сбор информации по экспериментальной площадке.
16. Запись данных по уровню воды и его колебаниях в протокол.
17. Подготовка основного и резервного инструмента фото- и видео- фиксации.
18. Проверка возможности использовать источники питания при отрицательных температурах в течение необходимого времени.
19. Проведение фотофиксации всех результатов, независимо от требований.
20. Рекомендуется предварительная фотофиксация из подводного состояния любых возможных размеров, позволяющих восстановить форму ледового воротника.
21. Отражение данных о возможном дрейфе льда в протоколе.
22. Фиксация данных о механических подвижках конструкции или льда в протоколе.

НОРМИРОВАНИЕ ФОРМЫ ЛЕДОВЫХ ВОРОТНИКОВ

Для записи размеров ледового воротника необходимо ввести характерные размеры ледового воротника. Ледовый воротник представляет собой утолщение льда на контакте конструкция-вода. Типичная форма ледового воротника и его аппроксимация представлены на рис. 2.

В ходе физических экспериментов в лабораторных условиях и условиях открытого водоема было установлено, что наклонная образующая внешней поверхности ледового воротника (граница вода-лед) стремится к линейной форме. Во всех проведенных экспериментах искривление фактической поверхности от предполагаемой линейной аппроксимации не превышает нескольких процентов, что является пренебрежимо-малым значением для целей данной работы.

Стоит отметить, что рассматривается образование ледового воротника термодинамическим способом, то есть путем намерзания льда за счет разности температур воды и холодного воздуха. Таким образом, в общем случае, будет прослеживаться зависимость между толщиной образованного на акватории (или опытном бассейне) льда h и толщиной ледового воротника L , так как толщина намерзшего ровного льда и ледового воротника зависят от одних и тех же параметров (градиента температуры). Данный факт можно использовать для описания толщины ледового воротника L через коэффициент отношения толщины ледового воротника k , к толщине окружающего ровного льда h . На рис. 2 справа представлен пример характерных размеров ледового воротника вокруг погруженной

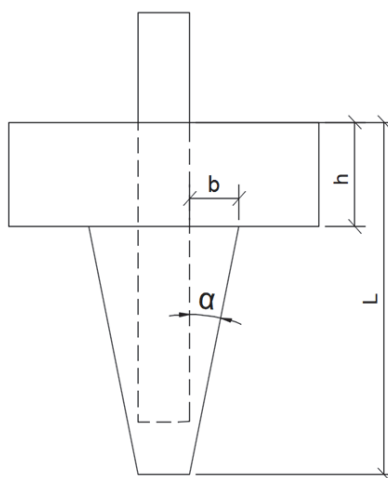


Рис. 2. Пример ледового воротника
(слева – физический эксперимент,
справа – схема формы ледового воротника и характерные размеры: h , L , b , α)

в воду цилиндрической опоры. Данные о погоде и толщинах льда могут быть найдены в архивах хранилищах Главной Геофизической Обсерватории [23] и Государственного Гидрологического Института [24], и, таким образом параметры ледового воротника связанные с толщиной ровного льда могут быть сопоставлены с ожидаемыми результатами расчетных оценок.

Кроме толщины ледового воротника (вертикальный размер), необходимо зафиксировать горизонтальный размер ледового воротника. В силу линейной аппроксимации формы ледового воротника, для целей описания формы, удобно использовать угол α , так как в результате экспериментов было обнаружено, что его изменения для фиксированной относительной толщины ледового воротника минимальны (рис. 4). Между тем, для практической фиксации размеров ледового воротника, при измерении результатов полевых и лабораторных экспериментов, удобно измерять линейный, а не угловые размеры, то есть удобно измерять горизонтальный размер b (рисунок 2).

На рисунке 3 представлена схема линейной аппроксимации ледового воротника.

Горизонтальный размер ледового воротника может быть записан как:

$$b = (L - h) \cdot \operatorname{tg}(\alpha). \quad (1)$$

Вертикальный размер ледового воротника может быть записан как:

$$L = h \cdot k, \quad (2)$$

где L – толщина ледового воротника (вертикальный размер);

h – толщина окружающего ровного льда;

α – угол наклона образующей ледового воротника к вертикали;

k – коэффициент размера ледового воротника (отношение толщины ледового воротника к толщине окружающего ровного льда).

Для автоматизации расчетов, связанных с ледовыми воротниками, возможно применение специализированного программного обеспечения [25].

ВЫВОДЫ

Оценка размеров и формы ледового воротника необходима для фактической оценки их влияния на конкретное сооружение и для сбора статистической информации с целью формирования общих правил по учету данного явления, разработки стандартов и норм, верификации расчетных моделей.

При измерении ледовых воротников обнаружены некоторые систематические ошибки. Некоторые ошибки допускают исправления, некоторые ошибки не позволяют использовать результаты эксперимента. Таким образом необходимо ознакомиться с типичными ошибками проведения измерения результатов эксперимента до его проведения. Для оценки размеров и формы ледовых воротников предложены дополнения в правила измерения, позволяющие исключить некоторые типичные ошибки измерения.

Подготовка модельных ледовых воротников возможна как в естественных условиях, так и в условиях холодной лаборатории. Необходимо учитывать специфику каждого способа и уделять внимание не только особенностям измерения в каждом случае, но и особенностям техники безопасности.

Получена линейная модель нормирования формы ледового воротника. Данная модель включает только два параметра и при этом достаточно точно позволяет описать размер и форму ледового воротника.

В силу линейной аппроксимации формы ледового воротника, для целей описания формы, удобно использовать угол α , так как в результате экспериментов было обнаружено, что его изменения для фиксированной относительной толщины ледового воротника минимальны.

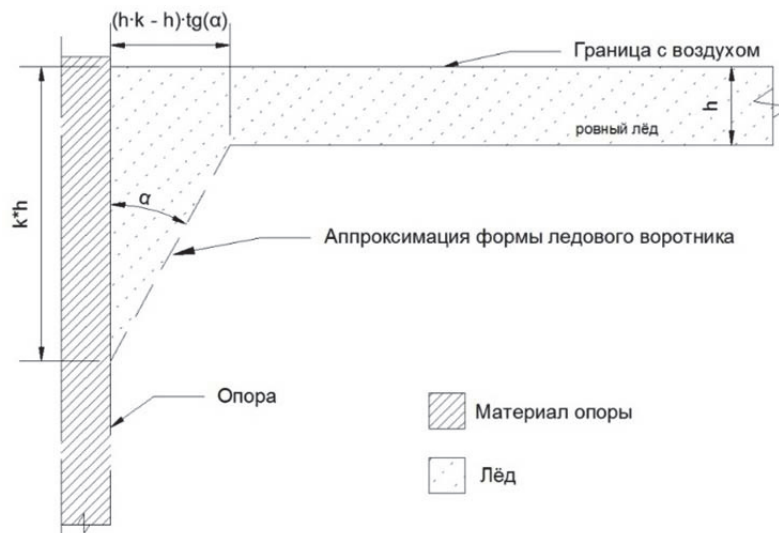


Рис. 3. Пример аппроксимации формы ледового воротника

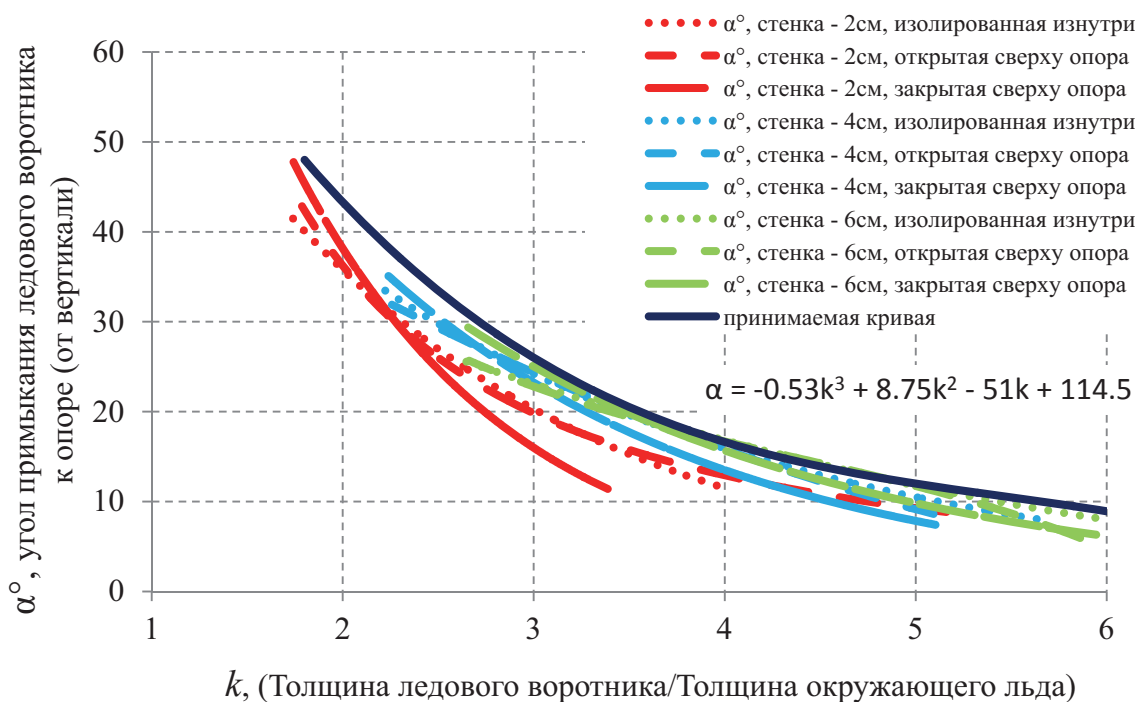


Рис. 4. Характерный размер ледового воротника – угол α при заданном значении коэффициента k , в интервале от 1.5 до 6.0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharapov D., Shkhinek K., DelValls T. A. Ice collars, development and effects // Ocean Engineering. – 2016. – Т. 115. – С. 189-195.
2. Шаратов, Д.А. Численная оценка необходимой энергии для предотвращения образования воротников на морских причалах Арктики / Д.А. Шаратов, А.С. Большев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2016. – Т. 44-45. – С. 20-25.
3. Шаратов, Д.А. Гидротехническое строительство. Лед и его свойства для сооружений Арктики: учеб. пособие. / Д.А. Шаратов, А.С. Большев – СПб: Политех-Пресс, 2023. – 89 с.
4. Шаратов, Д.А. Нагрузки от льда на вмёрзшие вертикальные стальные сооружения при горизонтальных подвижках ледового покрова / Д.А. Шаратов, К.Н. Шхинек // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2016. – Т. 282. – С. 99-107.
5. Sharapov D., Shkhinek K. Numerical calculation of the ice grow and empirical calculation results // Advanced Materials Research, Proceedings of 3rd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology (ICMPMT 2013), September 25-26, Changsha, China. – 2013.
6. Salva N., Tarzia D. Explicit solution for a Stefan problem with variable latent heat and constant heat flux boundary conditions // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2011. – Т. 379, № 1. – С. 240-244.
7. Gurtner A., Bjerkas M., Forsberg J., Hilding D. Numerical modeling of a full scale event // Proceedings of the IAHR Conference 2010. – 2010.
8. Loset S., Marchenko A. Field studies and numerical simulations of ice bustles on vertical piles // Cold Regions Science and Technology. – 2009. – Т. 58, № 1-2. – С. 15-28.
9. Løset S., Marchenko A. Ice bustles: field studies and numerical simulations // Proceedings of 19th IAHR International Symposium on Ice “Using New Technology to Understand Water-Ice Interaction”. Vancouver, DC, Canada. – 2008. – С. 909-920.
10. Asaithambi A. Numerical solution of Stefan problems using automatic differentiation // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – Т. 189, № 1. – С. 943-948.
11. Karulina M., Karulin E., Marchenko A. Field investigations of first year ice mechanical properties in North-West Barents Sea // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2013. – 2013.
12. Strub-Klein L., Høyland K.V. Spatial and temporal distributions of level ice properties: Experiments and thermo-mechanical analysis // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – Т. 71, № 0. – С. 11-22.
13. Shkhinek K., Jilenkov A., Blanchet D., Thomas G. Causes and Influence of the Ice Heterogeneity on Loads on Offshore Structures // Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - 2008, Vol 3. – 2008. – С. 965-970.
14. Shkhinek K., Blanchet D., Jilenkov A., Shafrova S., Yue Q., Ji S. Ice loads dependence on the field heterogeneity // Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions, Vols 1 and 2, Proceedings. – 2007. – С. 245-255.
15. Lainey L., Tinawi R. The mechanical properties of sea ice - a compilation of available data // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1984. – Т. 11. – С. 119-127.
16. Weeks W. F., Ackley S. F. The Growth, Structure, and Properties of Sea Ice // CRREL Monograph 82-1. – 1982.
17. Vaundrey K. Ice engineering – study of related

- properties of floating sea ice sheets and summary of elastic and viscoelastic analysis: Rep. TR860 // Port Huenem, CA: U.S. Naval Civil Engineering Lab. – 1977.
18. Schwerdtfeger P. The thermal properties of sea ice // *J. Glac.* – 1963. – Т. 4. – С. 789–807.
 19. *Ervik Å., Nord T. S., Høyland K. V., Samardzija I., Li H.* Ice-ridge interactions with the Norströmsgrund lighthouse: Global forces and interaction modes // *Cold Regions Science and Technology.* – 2019. – Т. 158.
 20. *Shafrova S., Høyland K.* The freeze-bond strength in first-year ice ridges. Small-scale field and laboratory experiments // *Cold Regions Science and Technology* – 2008. – Т. 54, № 1. – С. 54-71.
 21. *Marchenko A.* Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges // *Cold Regions Science and Technology.* – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 278-301.
 22. *Timco G.W., Burden R.P.* An analysis of the shape of sea ice ridges // *Cold Regions Science and Technology.* – 1997. – С. 65-77.
 23. Архивные данные по температуре // Справочник по климату СССР, Омская и Тюменская области за период с 1955 по 1976 год, Главная Геофизическая Обсерватория. – 1976.
 24. Архивные данные по толщине льда // Гидрологический ежегодник станции Новый порт бассейна Карского моря за период с 1955 по 1976 год, Государственный гидрологический институт. – 1976.
 25. Гидротехническое строительство – ледовые воротники, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023615858, 20.03.2023. ЗАЯВКА № 2023613926 ОТ 22.02.2023./ Шарاپов Д.А., 2023.

ICE COLLAR MEASUREMENT AND SHAPE APPROXIMATION FOR HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

© 2023 D.A. Sharapov, Yu.S. Klochkov

St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great
(National Research University), St. Petersburg, Russia

A water-transport constructions are important ones for Arctic cold climate regions. Ports and waterways in Arctic are used for seasonal delivery of goods and food. Hydraulic structures, such as ports and harbors, play a particularly important role in these regions. When designing berths and other objects in this area, it is necessary to take into account the large amount of the actions, which can be taken from the side of ice. Some of the possible ice impacts are still not reflected in the normative documentation., Ice collar may form around the structure when structures freeze without significant fluctuations in the water level. Ice collar is thicker ice around the structure. This formation can increase the load transferred by the level ice to the structure. However, ice collars are not properly described in the normative documents. Measurement of ice collars and their standardization is an important step towards the development of regulatory documentation containing methods for taking into account the impact of ice collars on structures.

Keywords: ice collar, freezing into ice, measurement, shape approximation, ice collar size

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-71-78

EDN: PXC MQE

REFERENCES

1. *Sharapov D., Shkhinek K., DelValls T. A.* Ice collars, development and effects // *Ocean Engineering.* – 2016. – Т. 115. – С. 189-195.
2. *Sharapov, D.A.* Chislennaya ocenka neobhodimoy energii dlya predotvrashcheniya obrazovaniya vorotnikov na morskikh prichalah Arktiki / D.A. Sharapov, A.S. Bol'shev // *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva.* – 2016. – Т. 44-45. – С. 20-25.
3. *Sharapov, D.A.* Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. Led i ego svojstva dlya sooruzhenij Arktiki: ucheb. posobie. / D.A. Sharapov, A.S. Bol'shev – SPb: Politekh-Press, 2023. – 89 s.
4. *Sharapov, D.A.* Nagruzki ot l'da na vmyorzshie vertikal'nye stal'nye sooruzheniya pri gorizonta'nyh podvizhkah ledovogo pokrova / D.A. Sharapov, K.N. SHkhinek // *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva.* – 2016. – Т. 282. – С. 99-107.
5. *Sharapov D., Shkhinek K.* Numerical calculation of the ice grow and empirical calculation results // *Advanced Materials Research, Proceedings of 3rd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology (ICMPMT 2013),* September 25-26, Changsha, China. – 2013.
6. *Salva N., Tarzia D.* Explicit solution for a Stefan problem with variable latent heat and constant heat flux boundary conditions // *Journal of Mathematical Analysis and Applications.* – 2011. – Т. 379, № 1. – С. 240-244.
7. *Gurtner A., Bjerkas M., Forsberg J., Hilding D.* Numerical modeling of a full scale event // *Proceedings of the IAHR Conference 2010.* – 2010.
8. *Loset S., Marchenko A.* Field studies and numerical simulations of ice bustles on vertical piles // *Cold Regions Science and Technology.* – 2009. – Т. 58, № 1-2. – С. 15-28.
9. *Loset S., Marchenko A.* Ice bustles: field studies and numerical simulations // *Proceedings of 19th IAHR International Symposium on Ice "Using New Technology to Understand Water-Ice Interaction".* Vancouver, DC, Canada. – 2008. – С. 909-920.
10. *Asaithambi A.* Numerical solution of Stefan problems using automatic differentiation // *Applied*

- Mathematics and Computation. – 2007. – Т. 189, № 1. – С. 943-948.
11. Karulina M., Karulin E., Marchenko A. Field investigations of first year ice mechanical properties in North-West Barents Sea // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2013. – 2013.
 12. Strub-Klein L., Hoyland K. V. Spatial and temporal distributions of level ice properties: Experiments and thermo-mechanical analysis // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – Т. 71, № 0. – С. 11-22.
 13. Shkhinek K., Jilenkov A., Blanchet D., Thomas G. Causes and Influence of the Ice Heterogeneity on Loads on Offshore Structures // Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - 2008, Vol 3. – 2008. – С. 965-970.
 14. Shkhinek K., Blanchet D., Jilenkov A., Shafrova S., Yue Q., Ji S. Ice loads dependence on the field heterogeneity // Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions, Vols 1 and 2, Proceedings. – 2007. – С. 245-255.
 15. Lainey L., Tinawi R. The mechanical properties of sea ice - a compilation of available data // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1984. – Т. 11. – С. 119-127.
 16. Weeks W.F., Ackley S.F. The Growth, Structure, and Properties of Sea Ice // CRREL Monograph 82-1. – 1982.
 17. Vaundrey K. Ice engineering – study of related properties of floating sea ice sheets and summary of elastic and viscoelastic analysis: Rep. TR860 // Port Huenem, CA: U.S. Naval Civil Engineering Lab. – 1977.
 18. Schwerdtfeger P. The thermal properties of sea ice // J. Glac. – 1963. – Т. 4. – С. 789-807.
 19. Ervik A., Nord T. S., Hoyland K. V., Samardzija I., Li H. Ice-ridge interactions with the Norstromsgrund lighthouse: Global forces and interaction modes // Cold Regions Science and Technology. – 2019. – Т. 158.
 20. Shafrova S., Hoyland K. The freeze-bond strength in first-year ice ridges. Small-scale field and laboratory experiments // Cold Regions Science and Technology – 2008. – Т. 54, № 1. – С. 54-71.
 21. Marchenko A. Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges // Cold Regions Science and Technology. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 278-301.
 22. Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shape of sea ice ridges // Cold Regions Science and Technology. – 1997. – С. 65-77.
 23. Arhivnye dannye po temperature // Spravochnik po klimatu SSSR, Omskaya i Tyumenskaya oblasti za period s 1955 po 1976 god, Glavnaya Geofizicheskaya Observatoriya. – 1976.
 24. Arhivnye dannye po tolshchine l'da // Gidrologicheskij ezhegodnik stancii Novyj port bassejna Karskogo morya za period s 1955 po 1976 god, Gosudarstvennyj gidrologicheskij institut. – 1976.
 25. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo - ledovye vorotniki, svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RU 2023615858, 20.03.2023. ZAYAVKA № 2023613926 OT 22.02.2023. / Sharapov D. A., 2023.

Dmitry Sharapov, PhD, Associate Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction.

E-mail: sharapov@bk.ru

Yury Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific and Organizational Activities. E-mail: y.kloch@gmail.com