

УДК 658.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ 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

Ледовые нагрузки в силу своей величины и многообразия являются одними из основополагающих при расчете арктических гидротехнических сооружений. Стоимость проектируемого сооружения может измениться в несколько раз при изменении расчетной ледовой нагрузки; поэтому определение ледовой нагрузки заданной обеспеченности является наиважнейшей задачей. Некоторые ледовые образования могут существенно изменять величину ледовой нагрузки, но при этом отсутствуют или недостаточно подробно отражены в нормативных документах. Ледовые воротники – утолщение льда вокруг теплопроводящих сооружений, могут приводить к увеличению нагрузок на гидротехнические сооружения, при этом метод оценки влияния ледовых воротников на нагрузки не приводится в действующих нормативных документах. Утолщение льда в месте контакта с сооружением ведет к увеличению площади контакта и может приводить к изменению механизма разрушения льда. В известных случаях наличие ледового воротника ведет к увеличению горизонтальной ледовой нагрузки от ровного льда, передаваемой на сооружение. Для решения задачи влияния ледового воротника рассмотрена постановка методом дискретных элементов для точного описания всего процесса разрушения ледового воротника во времени. Используются плоские постановки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Получены зависимости относительной нагрузки от толщины льда и морозоградусодней.

Ключевые слова: ледовый воротник, вмержание в лед, ледовая нагрузка, метод дискретных элементов, математическое моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-79-86

EDN: QDFZGW

Исследование выполнено в рамках проекта FSEG-2020-0021

ВВЕДЕНИЕ

Задача о влиянии ледовых воротников на нагрузки трудно поддается аналитическому решению, поэтому целесообразно применение численного моделирования. Классический набор моделей в программных комплексах сильно ограничен, обычно используется статическая постановка и ближайшая стандартная модель льда [1]. Предлагаемая модель основана на методе дискретных элементов. Преимущество данной модели состоит в возможности описания процесса разрушения льда [2-5]. При использовании метода конечных элементов (КЭ) и конечных разностей (КР) имеется существенная проблема, заключающаяся в том, что разрушенный материал не участвует в дальнейшем взаимодействии, что не является точным подходом. Если для получения результатов достаточно статической постановки и только одного макси-

мального значения нагрузки, то возможно применение методов КЭ и КР, однако, для описания всего процесса разрушения метод дискретных элементов (ДЭ) будет иметь преимущество [6-9].

По методу ДЭ в плоском случае ледовая область моделируется дисками разных диаметров. Эта модель широко используется при моделировании поведения гео-материалов при сжатию. Все параметры среды (прочность при сжатию, сдвиге, отрыве) определяются определенными константами, найденными из сопоставления модельного образца льда с натурным. Сдвиговая прочность определяется законом Кулона-Мора. На рис. 1 представлен пример с дисками

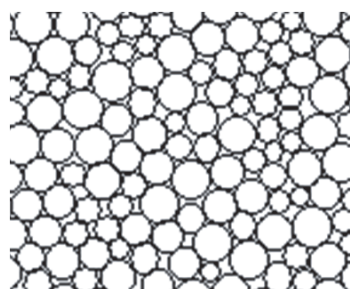


Рис. 1. Лёд, моделируемый дисками разного диаметра

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

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

разного диаметра. Преимущество этого метода по сравнению с другими методами состоит в возможности рассмотрения последовательного разрушения среды.

До начала моделирования происходит заполнение заданной области дисками, и их упаковка до достижения заданной плотности льда. Ледовые характеристики принимались как на основании известных физических экспериментов, так и на основании статей и справочных данных [10-20]. Для расчетов был использован случайный фактор формирования заполнения, вследствие чего результат является стохастическим. Смежные элементы, в пределах заданного предела, образуют единый материал. Для получения достоверных оценок производилось несколько экспериментов при одних входных параметрах. Количество повторных моделирований определяется требуемой относительной ошибкой результата. Обычно, пять запусков позволяет получить результат с относительной ошибкой, не превышающей нескольких процентов.

В процессе моделирования происходит смещение образованной ледовой структуры в сторону сооружения. Фиксируется ледовая нагрузка в разные моменты времени. Материал считается разрушенным при расхождении элементов (дисков) на расстояние больше заданного, то есть, когда физический контакт нарушается, и элементы перестают взаимодействовать. Отколовшийся элемент может взаимодействовать с другими только оказывая сжимающее или сдвигающее напряжение.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В двумерном случае рассматривается вертикальная неподвижная стенка, к которой примыкает ровный лёд с образовавшимся ледовым воротником. Для ровного льда задается начальная толщина, соответствующая определенному количеству морозоградусодней (МГД). Размеры ледового воротника принимались в соответствии с результатами термодинамического моделирования [21-24]. На рис. 2 приведен пример возможной формы ледового воротника для целей моделирования методом ДЭ.

Лёд движется в направлении неподвижной стенки и разрушается. Ледовая нагрузка меняется во времени вследствие образования трещин и разрушения льда. Часто происходит откол фрагмента, как показано на рис. 3. Для дальнейшего рассмотрения представляет интерес максимальная нагрузка, соответствующая разрушению ледового воротника, полученная в опыте.

Фиксируются значения нагрузки от времени, и отбирается релевантный максимум, то есть тот, когда происходит разрушение ледового воротника. На рис. 4 представлен пример графика зависимости ледовой нагрузки от времени для случая ледового воротника толщиной 1.5 м от поверхности и шириной 1.5 м от поверхности сооружения (лёд толщиной 1 м).

Для оценки изменения нагрузки на вмерзшую в лед цилиндрическую опору, при наличии ледовых воротников, рассмотрена следующая задача (рис. 5). Опора расположена в ледовом

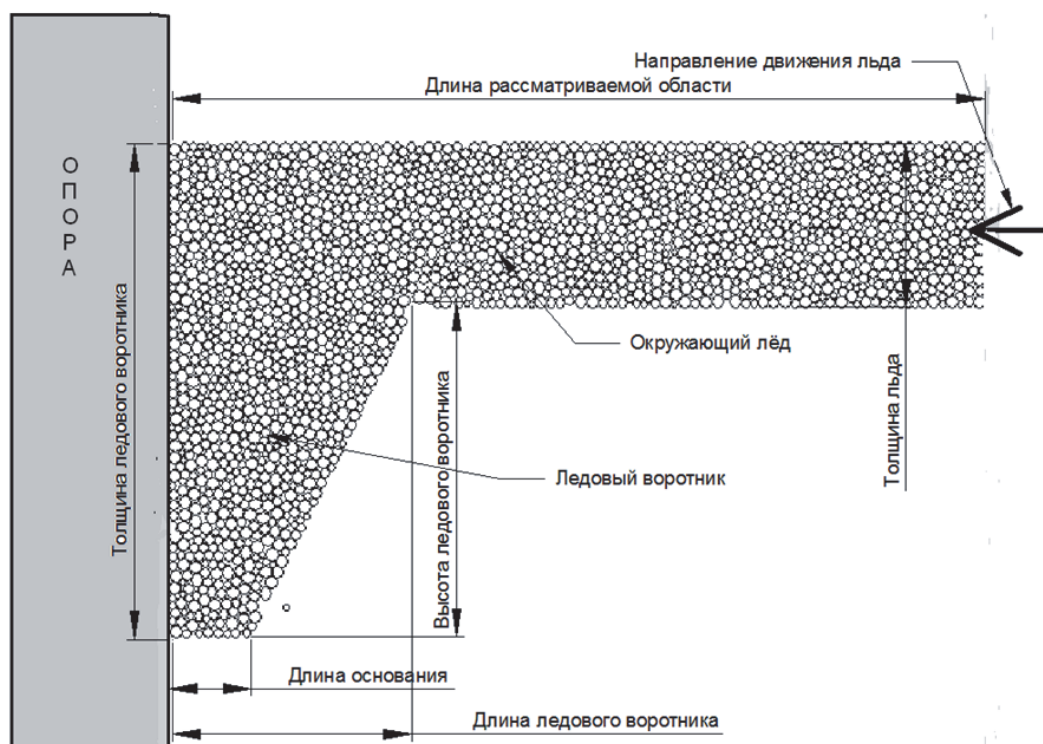


Рис. 2. Расчетная схема в вертикальной плоскости

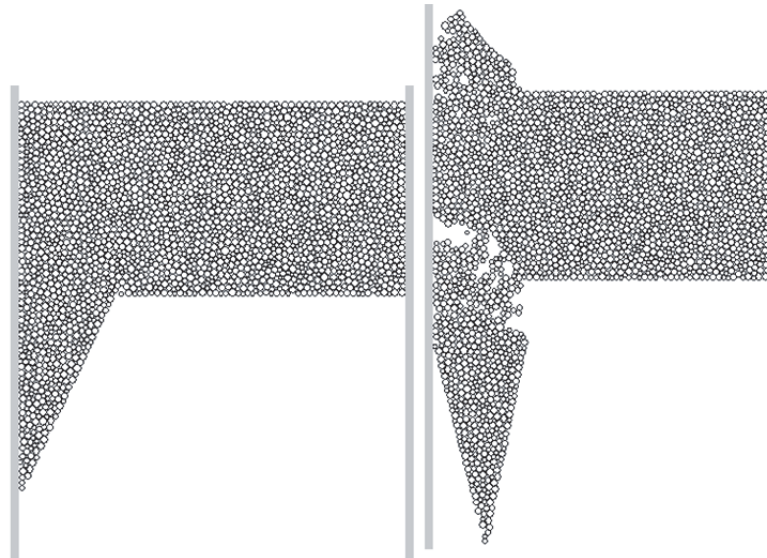


Рис. 3. Иллюстрация причины резкого снижения уровня ледовой нагрузки (откол фрагмента): слева – до начала взаимодействия, справа – после взаимодействия



Рис. 4. Зависимость ледовой нагрузки от времени в ходе моделирования; показан максимум, используемый для дальнейших оценок

поле. Материал вокруг опоры (зона ледового воротника) имеет прочность, отличную от прочности окружающего льда. Начальная ширина зоны, включающая материал с другими свойствами, может варьироваться в заданных пределах.

В начальный момент времени поле начинает двигаться с заданной скоростью и нагрузки, действующие на опору, регистрируются. Задача решается в двумерной постановке в плоскости льда, поэтому размеры воротника и его влияние на нагрузки должно быть оценено специальным образом. Было принято, что зона материала с другими свойствами простирается до сечения, где толщина воротника совпадает с шириной ровного льда (на рис. 5 темная в центре). Протяженность области вокруг опоры можно определить исходя из следующей зависимости:

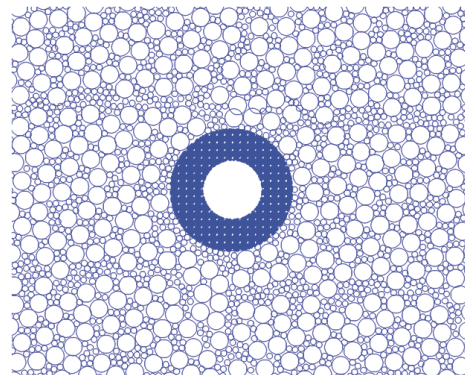


Рис. 5. Схема расчетного случая в горизонтальной плоскости (опора, зона с прочностью льда отличной от прочности окружающего льда вокруг опоры, окружающий лёд)

$$X_{\text{области}} = (h_{\text{льда}} \cdot k - h_{\text{льда}}) \cdot \text{tg}(\alpha), \quad (1)$$

где:

$X_{\text{области}}$ – искомая протяженность зоны, принимаемой вокруг опоры, м;

$h_{\text{льда}}$ – толщина окружающего льда, м;

k – коэффициент формы ледового воротника, показывающий во сколько раз толщина ледового воротника на опоре больше толщины окружающего льда;

α – угол, характеризующий форму ледового воротника (угол примыкания к опоре, отсчитываемый от вертикали).

Тогда эффективная прочность льда вокруг опоры, моделирующая ледовый воротник может быть определена по формуле:

$$\frac{C_{R(\text{области})}}{C_{R(\text{льда})}} = \frac{F}{F_{1m}}, \quad (2)$$

где:

$\frac{C_{R(\text{области})}}{C_{R(\text{льда})}}$ – показывает во сколько раз ко-

эффициент прочности зоны вокруг опоры превышает рассматриваемый коэффициент прочности окружающего льда;

$C_{R(\text{области})}$ – коэффициент прочности зоны вокруг опоры, МПа;

$C_{R(\text{льда})}$ – коэффициент прочности льда, МПа (по ИСО 19906 [25]);

$\frac{F}{F_{1m}}$ – относительная нагрузка, получаемая

при рассмотрении двумерного случая взаимодействия плоской стенки со льдом и ледовым воротником; (F – абсолютная нагрузка ото льда и ледового воротника; F_{1m} – абсолютная нагрузка от ровного льда).

Эффективная прочность при сжатии льда в этой зоне определена из условия передачи на опору (при рассмотрении процесса в вертикаль-

ной плоскости) той же нагрузки, что и передается при наличии ледового воротника. Таким образом, вычисленная окончательно нагрузка учитывает сумму явлений, проходящих в вертикальной (рис. 2) и горизонтальной (рис. 5) плоскостях. Значение, соответствующее разрушению ледового воротника, фиксируется для дальнейшей статистической обработки. Поведение нагрузки от времени аналогично представленному на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В качестве исходных данных рассмотрены массивы данных с различными входными параметрами: формы ледовых воротников и толщины льда, зависящие от морозоградусодней (МГД).

Количество экспериментов, для определения влияния на нагрузку, выбиралось из условия, чтобы относительная ошибка результата для каждой серии экспериментов не превышала 10%. В большинстве случаев фактическая относительная ошибка не превышает нескольких процентов.

Принята следующая последовательность вычислений: фиксируется несколько значений МГД, для них находится соответствующая толщина льда. Для определенной толщины льда, по полученным ранее зависимостям, определяются параметры ледового воротника k и α . Таким образом определяется значение нагрузки в зависимости от количества МГД. Нагрузка приводится к относительным значениям путем отнесения к нагрузке при соответствующей толщине ровного льда $F/F_{\text{лёд}}$. На рис. 6 представлен график зависимости относительной нагрузки $F/F_{\text{лёд}}$ от количества МГД.

F – нагрузка на вертикальную стенку, вмержшую в лёд, при наличии ледового воротника.

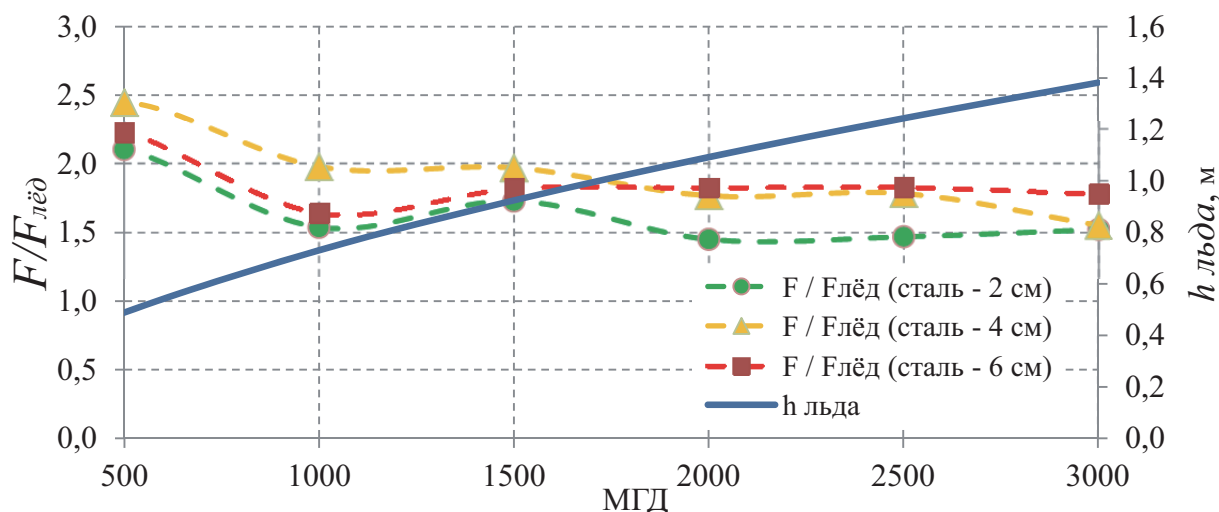


Рис. 6. Зависимость относительной нагрузки $F/F_{\text{лёд}}$ и толщины льда $h_{\text{лёд}}$ от количества МГД

$F_{\text{лёд}}$ – нагрузка на вертикальную стенку от ровного льда заданной толщины.

Нагрузка на вертикальные цилиндрические опоры при наличии ледовых воротников определялась относительно случая прорезания льда опорой $F_{\text{вв}}/F_{\text{д}}$. $F_{\text{вв}}$ – нагрузка на цилиндрическое сооружение, вмёрзшее в лёд, при наличии ледового воротника; $F_{\text{д}}$ – нагрузка на цилиндрическое сооружение в дрейфующем льде (за опорой образуется канал вследствие прорезания льда);

На рис. 7 представлены зависимости нагрузки на опору при наличии ледового воротника по отношению к случаю прорезания опоры через

лёд, для различных диаметров опоры в зависимости от количества МГД.

Данные, представленные на рисунках выше, были получены путём задания диаметра сооружения и дальнейшего изменения всех связанных параметров в зависимости от МГД. При изменении МГД меняется также и толщина ровного льда. Для некоторых целей может представлять интерес зависимость нагрузки от отношения диаметра сооружения к толщине льда. На рис. 8 представлены графики зависимости относительной нагрузки $F_{\text{вв}}/F_{\text{д}}$ для разной толщины стали в зависимости от отношения диаметра опоры к толщине ровного окружающего льда $D/h_{\text{льда}}$.

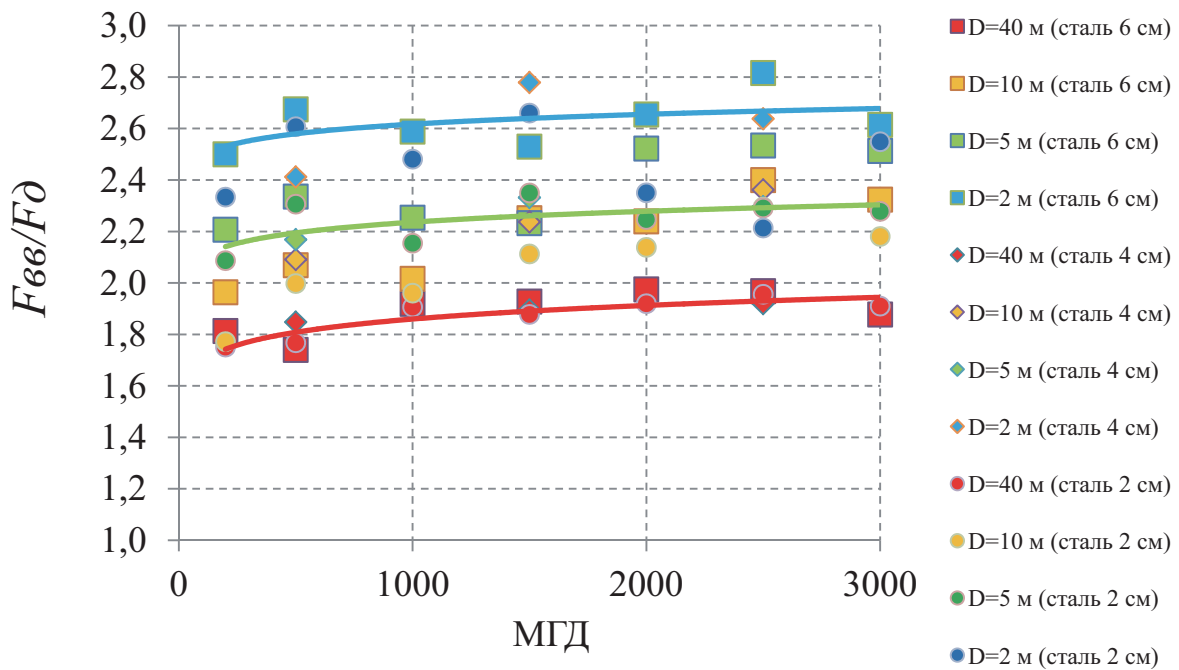


Рис. 7. Зависимость относительной нагрузки на опору $F_{\text{вв}}/F_{\text{д}}$ от МГД для различных диаметров опоры (на легенде)

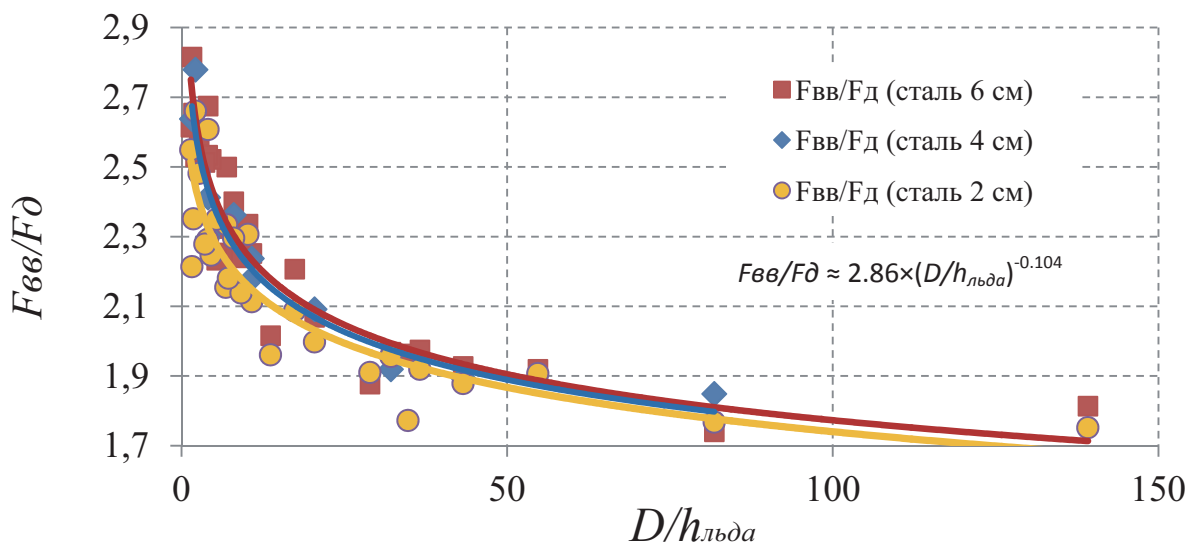


Рис. 8. Зависимость относительной нагрузки на опору $F_{\text{вв}}/F_{\text{д}}$ от отношения диаметра опоры к толщине ровного льда $D/h_{\text{льда}}$ (для разных толщин стали)

ВЫВОДЫ

В ходе проделанных экспериментов было установлено, то уменьшение диаметра опор, приводит к увеличению относительного влияния ледового воротника.

При малом диаметре опоры наличие воротника может увеличить нагрузку до полутора раз по сравнению со случаем, когда воротника нет. Нагрузка при наличии ледового воротника может превзойти нагрузку от дрейфующего льда более чем в два раза.

При больших диаметрах сооружений влияние воротника существенно меньше (10-12%) по сравнению со случаем отсутствия воротника. Однако различие в нагрузках характерных для дрейфующего льда остается большим.

Влияние морозоградусодней на нагрузку составляет около 10-15% от общего увеличения.

Прослеживается довольно четкая зависимость от отношения диаметра опоры к толщине ровного льда, образовавшегося в тех же условиях, что и воротник.

При дальнейшем увеличении диаметра сооружения (более 20 м) нагрузки мало меняются по сравнению с нагрузкой на опору диаметром 40 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарапов, Д.А. Устойчивость каменной наброски к подвижкам льда методом КЭ / Д.А. Шарапов, А.С. Сумцова // Гидротехническое строительство. – 2023. – Т. 2. – С. 2-7.
2. Шхинек, К.Н. Результаты моделирования сценариев взаимодействия айсбергов с морскими нефтегазодобывающими комплексами / К.Н. Шхинек, О.А. Гасников, А.С. Большев, К.Г. Ставров // Навигация и картография, СПб, изд. Гос. научно-исследовательского навигационно-гидрографического института. – 2015. – Т. 39. – С. 25-32.
3. Шхинек, К.Н. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда / / К.Н. Шхинек // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – Т. 10 4(2014). – С. 63-71.
4. Шхинек, К. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда / К.Н. Шхинек // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – Т. 4. – С. 63-71.
5. Шхинек, К.Н. Вероятностное моделирование ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа для анализа их надежности и долговечности / К.Н. Шхинек, А.С. Большев, С.А. Фролов, Е.В. Уварова // Сборник трудов конференции “Освоение арктического шельфа России”. – 1999. – Т. 2. – С. 247-254.
6. Bergan P., Cammaert G., Skeie G. On the potential of computational methods and numerical simulation in ice mechanics // Materials Science and Engineering. – 2010. – Т. 10.
7. Liferov P., Shkhinek K., Vitali L., Serre N., Yue Q., Ji S. Ice gouging study - Actions and action effects // Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions, Vols 1 and 2, Proceedings. – 2007. – С. 774-786.
8. Kärnä T., Kamesaki K., Tsukuda H. A numerical model for dynamic ice-structure interaction // Computers & Structures. – 1999. – Т. 72, № 4-5. – С. 645-658.
9. Cundall P. A., Starck O. D. L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies // Geotechnique. – 1979. – Т. 29. – С. 47-65.
10. Гидротехническое строительство. Лед и его свойства для сооружений Арктики: учеб. пособие / Шарапов Д. А., Большев А. С. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 89 с.
11. Архивные данные по температуре // Справочник по климату СССР, Омская и Тюменская области за период с 1955 по 1976 год, Главная Геофизическая Обсерватория. – 1976.
12. Архивные данные по толщине льда // Гидрологический ежегодник станции Новый порт бассейна Карского моря за период с 1955 по 1976 год, Государственный Гидрологический Институт. – 1976.
13. Strub-Klein L., Nøyland 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.
14. 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.
15. 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.
16. Schulson E.M. Brittle failure of ice // Engineering Fracture Mechanics. – 2001. – Т. 68, № 17-18. – С. 1839-1887.
17. 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.
18. Weeks W. F., Ackley S. F. The Growth, Structure, and Properties of Sea Ice // CRREL Monograph 82-1. – 1982.
19. 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.
20. Jellinek H. H. G. Adhesive properties of ice // Journal of Colloid Science. – 1959. – Т. 14, № 3. – С. 268-280.
21. 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.
22. Sharapov D., Shkhinek K., DelValls T. A. Ice collars, development and effects // Ocean Engineering. – 2016. – Т. 115. – С. 189-195.
23. Шарапов, Д.А. Численная оценка необходимой энергии для предотвращения образования воротников на морских причалах Арктики // Д.А. Шарапов, А.С. Большев / Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2016. – Т. 44-45. – С. 20-25.
24. Гидротехническое строительство - ледовые воротники, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023615858, 20.03.2023. ЗАЯВКА № 2023613926 ОТ 22.02.2023. / Шарапов Д.А., 2023.
25. DS/ISO 19906-2019 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Organization for Standardization, 2010.

ICE COLLAR EFFECT ON THE LOAD ON HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

© 2023 D.A. Sharapov, Yu.S. Klochkov

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

Ice loads, due to large absolute values and diversity, are most important for the calculation of Arctic marine and river structures. The cost of the structure being designed may change several times with a change in the design ice load; therefore, determining the ice load of a given probability is an important task. Some ice formations can significantly change the value of the ice load, but they are not present in the normative documents and standards. Ice collars can be described as thicker ice around heat-conducting structures, which can lead to an increase in loads. However, there is not any method for calculation of ice collar influence on the loads present in the current documents. Ice collar is the reason for thicker ice at the structure-ice contact surface, which lead to an increase in the contact area and can lead to a change in the mechanism of ice failure. In some cases, the presence of an ice collar leads to an increase in the horizontal ice load from the level ice on the structure. The method of discrete elements is considered to solve the problem of the influence of the ice collar on the ice loads. This method allows a time-dependent description of the entire process of destruction of the ice collar. Two-dimension settings are used in vertical and horizontal planes. The relative ice load depending on the thickness of the ice and freezing-degree-days are obtained.

Keywords: ice collar, freezing into ice, ice load, discrete element method, mathematical modelling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-79-86

EDN: QDFZGW

REFERENCES

1. *Sharapov, D.A.* Ustojchivost' kamennoj nabroski k podvzhkam l'da metodom KE / D.A. SHarapov, A.S. Sumcova // *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo.* – 2023. – T. 2. – C. 2-7.
2. *Shkhinek, K.N.* Rezul'taty modelirovaniya scenarijev vzaimodejstviya ajsbergov s morskimi neftegazodobyvayushchimi kompleksami / K.N. Shkhinek, O.A. Gasnikov, A.S. Bol'shev, K.G. Ctavrov // *Navigaciya i kartografiya, SPb, izd. Gos. nauchno-issledovatel'skogo navigacionno-gidrograficheskogo instituta.* – 2015. – T. 39. – C. 25-32.
3. *Shkhinek, K.N.* Vibraciya sooruzhenij, vyzvannaya dejstviem morskogo l'da / / K.N. Shkhinek // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal.* – 2014. ? T. No 4(2014). – C. 63-71.
4. *Shkhinek, K.* Vibraciya sooruzhenij, vyzvannaya dejstviem morskogo l'da / K.N. SHkhinek // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal.* – 2014. – T. 4. – C. 63-71.
5. *Shkhinek, K.N.* Veroyatnostnoe modelirovanie ledovyh nagruzok na sooruzheniya kontinental'nogo shel'fa dlya analiza ih nadezhnosti i dolgovechnosti / K.N. Shkhinek, A.S. Bol'shev, S.A. Frolov, E.V. Uvarova // *Sbornik trudov konferencii "Osvoenie arkticheskogo shel'fa Rossii".* – 1999. – T. 2. – C. 247-254.
6. *Bergan R., Cammaert G., Skeie G.* On the potential of computational methods and numerical simulation in ice mechanics // *Materials Science and Engineering.* – 2010. – T. 10.
7. *Liferov P., Shkhinek K., Vitali L., Serre N., Yue Q., Ji S.* Ice gouging study - Actions and action effects // *Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions, Vols 1 and 2, Proceedings.* ? 2007. – C. 774-786.
8. *Karna T., Kamesaki K., Tsukuda H.* A numerical model for dynamic ice-structure interaction // *Computers & Structures.* – 1999. – T. 72, № 4-5. – C. 645-658.
9. *Cundall P. A., Starck O. D. L.* A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies // *Geotechnique.* – 1979. – T. 29. – C. 47-65.
10. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. Led i ego svojstva dlya sooruzhenij Arktiki: ucheb. posobie / Sharapov D. A., Bol'shev A. S.* – Spb: POLITEKH-PRESS, 2023. – 89 s.
11. *Arhivnye dannye po temperature // Spravochnik po klimatu SSSR, Omskaya i Tyumenskaya oblasti za period s 1955 po 1976 god, Glavnaya Geofizicheskaya Observatoriya.* – 1976.
12. *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.
13. *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. – T. 71, № 0. – C. 11-22.
14. *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. – C. 965-970.
15. *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. – C. 245-255.
16. *Schulson E.M.* Brittle failure of ice // *Engineering Fracture Mechanics.* – 2001. – T. 68, № 17-18. – C. 1839-1887.
17. *Lainey L., Tinawi R.* The mechanical properties of sea ice - a compilation of available data // *Canadian Journal of Civil Engineering.* – 1984. – T. 11. – C. 119-127.

18. Weeks W. F., Ackley S. F. The Growth, Structure, and Properties of Sea Ice // CRREL Monograph 82-1. – 1982.
19. 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.
20. Jellinek H. H. G. Adhesive properties of ice // Journal of Colloid Science. – 1959. – T. 14, № 3. – С. 268-280.
21. 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.
22. Sharapov D., Shkhinek K., DelValls T. A. Ice collars, development and effects // Ocean Engineering. – 2016. – T. 115. – С. 189-195.
23. 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. – T. 44-45. – С. 20-25.
24. 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.
25. DS/ISO 19906-2019 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Organization for Standardization, 2010.

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