

## ОСОБЕННОСТИ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РОВНЫХ ЛЕДЯНЫХ ПОЛЕЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Рогачко С.И., д.т.н., профессор,  
Одесский национальный морской университет  
rostasice@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5201-5368

**Аннотация.** За период срока службы в зимние периоды года все типы гидротехнических сооружений подвергаются силовому воздействию дрейфующих ровных ледяных полей. В настоящей статье на основании анализа реализаций ледовой нагрузки, полученных опытным путем, показано, что равнодействующая ледовой нагрузки при прорезании ровных ледяных полей опорными частями гидротехнических сооружений меняет свою точку приложения и направление в пространстве во времени. Это обстоятельство следует учитывать при оценке напряженно-деформируемого состояния грунтового основания под фундаментами гидротехнических сооружений гравитационного типа.

**Ключевые слова:** ровные ледяные поля, равнодействующая ледовой нагрузки, точка приложения равнодействующей ледовой нагрузки, физико-механические характеристики ровных ледяных полей, гидротехнические сооружения.

**Введение.** Украина является морской страной. Построенные и эксплуатируемые в настоящее время морские гидротехнические сооружения относятся к портовым и берегозащитным. Тем не менее, еще во времена бывшего СССР на шельфе морей, принадлежавшем нашей стране, были разведаны перспективные запасы углеводородов. Обустройство и разработка таких месторождений позволит существенным образом снизить энергетическую зависимость нашего государства. Реализация такой важной народнохозяйственной задачи потребует разработки, проектирования и строительства морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений различных конструкций в зависимости от целого ряда природных условий. Основными природными силовыми факторами, действующими на гидротехнические сооружения, являются волновые и ледовые нагрузки от различных типов ледовых образований, а также сейсмические воздействия. При расчетах волновых нагрузок учитывают параметры волн 1% обеспеченности в системе расчетного шторма той или иной повторяемости в зависимости от класса ответственности проектируемых сооружений. Ледовые нагрузки на проектируемые сооружения определяют от различного типа дрейфующих ледовых образований таких, как ровные ледяные поля, одиночные торосы и поля торшения, которые формируются на акваториях Черного и Азовского морей, особенно в суровые зимы редкой повторяемости. Следует отметить, что согласно данным гидрометеорологических наблюдений, такие зимы в Украине наблюдаются примерно один раз в течение 10-15 лет. Наиболее часто ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения различного назначения реализуются от воздействия ровных ледяных полей, толщина которых может превышать, в зависимости от суровости зимы, 0,6м. Рекомендации нормативных документов различных стран мира, при их использовании в расчетах с одинаковыми исходными данными, приводят к существенному разбросу. При этом полагается, что ледовой нагрузке присущ статический характер. Совершенствование методов расчета ледовых нагрузок на проектируемые гидротехнические сооружения на базе исследований природы разрушения ледовых образований представляется весьма актуальной задачей.

**Анализ проблемы.** Ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения являются преобладающими по сравнению с волновыми. По этой причине в процессе проектирования

таких сооружений расчеты ледовых воздействий представляют одну из важнейших задач, успешное решение которой обеспечит безаварийную работу объектов в течение их проектного срока службы. Точность расчетов ледовых нагрузок, прежде всего, зависит от исходных данных, которые назначаются с учетом класса ответственности проектируемых сооружений [1, 2], а также на основании анализа результатов инженерных изысканий и данных многолетних гидрометеорологических наблюдений в районе будущего строительства. К ним относятся: размеры расчетных ровных ледяных полей (толщина и площадь); прочностные характеристики (прочность льда на одноосное сжатие –  $R_c$ , МПа и изгиб –  $R_f$ , МПа); скорость дрейфа и другие факторы. Кроме этого на стадиях проектирования важно учесть все возможные сценарии взаимодействия ровных ледяных полей с проектируемыми сооружениями в тех конкретных условиях, в которых они будут эксплуатироваться. При взаимодействии ровных ледяных полей с опорными частями гидротехнических сооружений проявляется так называемая глобальная нагрузка, зависящая от исходных параметров расчетного ледяного поля и ширины преграды, локальное ледовое давление в момент изначального контакта льдины с сооружением, а также истирающее ледовое воздействие. Интенсивность последнего зависит от количества ровных ледяных полей, воздействующих на сооружение в течение его срока службы.

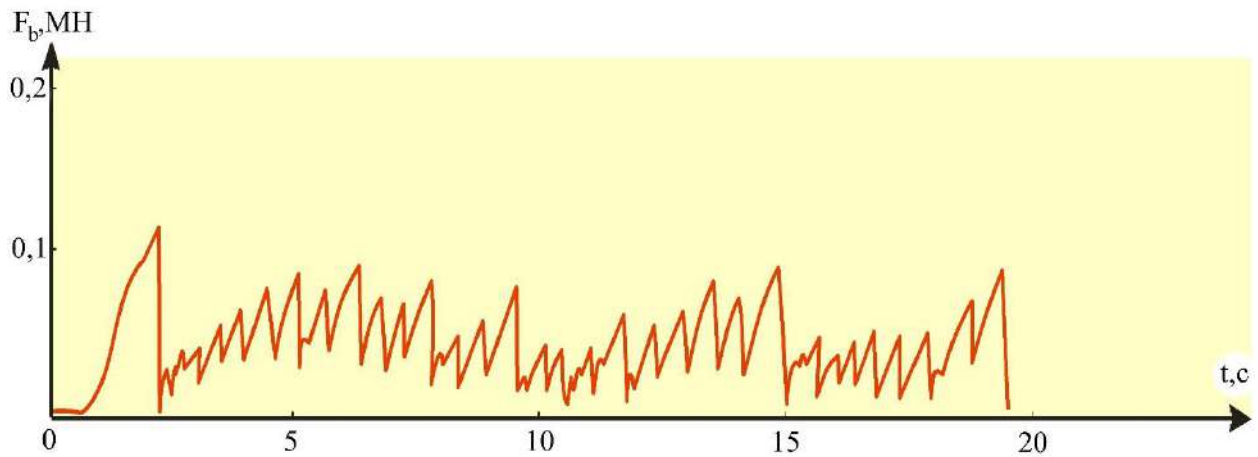
**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является изучение характера разрушения ровных ледяных полей при их взаимодействии с вертикальными цилиндрическими преградами и поведения равнодействующей ледовой нагрузки во времени.

**Материалы и методика исследования.** При проведении экспериментальных исследований в натуральных условиях в ровном ледяном поле выпиливались майны размером  $6 \times 8$  м в плане. На этой площади под воздействием естественных температур намораживалось ровное ледяное поле толщиной от 8 до 12 см. С помощью экспериментальной установки ровные ледяные поля прорезались цилиндрическими преградами различных диаметров. В процессе экспериментов фиксировались равнодействующая ледовой нагрузки на цилиндрические преграды и перемещения в ледяном поле во времени.

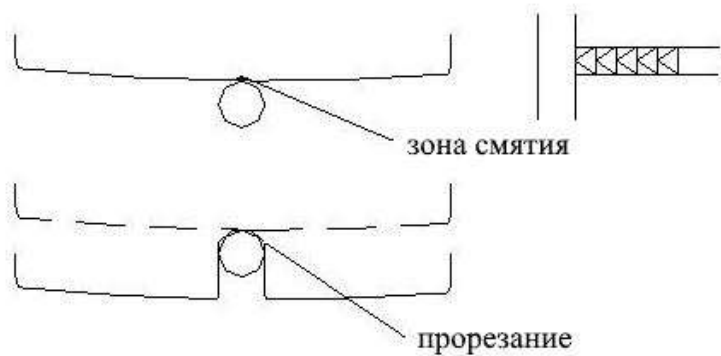
**Научные результаты.** Известным является тот факт, что характер реализации ледовых нагрузок зависит от картины разрушения ровных ледяных полей перед сооружениями [3]. Так, чем меньше отношение ширины преграды  $b$  к толщине льда  $h_d$ , тем сложнее механизм разрушения ровных ледяных полей, который происходит за счет смятия и дробления. На рис. 1 представлена реализация ледовой нагрузки при прорезании ровного ледяного поля жесткой вертикальной цилиндрической преградой, а также схема разрушения ровного ледяного поля [4] при проведении крупномасштабных экспериментов в натуральных условиях (рис. 2).

Такая картина разрушения всегда реализуется при  $\frac{b}{h_d} \leq 3$ . Чередование максимальных и минимальных значений ледовых нагрузок происходит за очень короткие промежутки времени, а пик ледовой нагрузки проявляется в начальный момент воздействия ровного ледяного поля на вертикальную преграду. При таком сценарии локальное ледовое давление, а также истирающее воздействие льда максимальны.

В тех же случаях, когда  $\frac{b}{h_d} \geq 20$  картина разрушения при воздействии ровных ледяных полей на одиночные вертикальные преграды большого диаметра (например, на морские нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения островного типа или на секцию сооружения большой протяженности) существенным образом меняется. После начального контакта с преградой и по мере внедрения ровного ледяного поля изначально образуются радиальные, а затем и кольцевые трещины (рис. 3).



а – реализация ледовой нагрузки от ровного ледяного поля на одиночную опору



б – схема разрушения ровного ледяного поля

Рис.1. Тип разрушения ровного льда при  $\frac{b}{h_d} \leq 3$

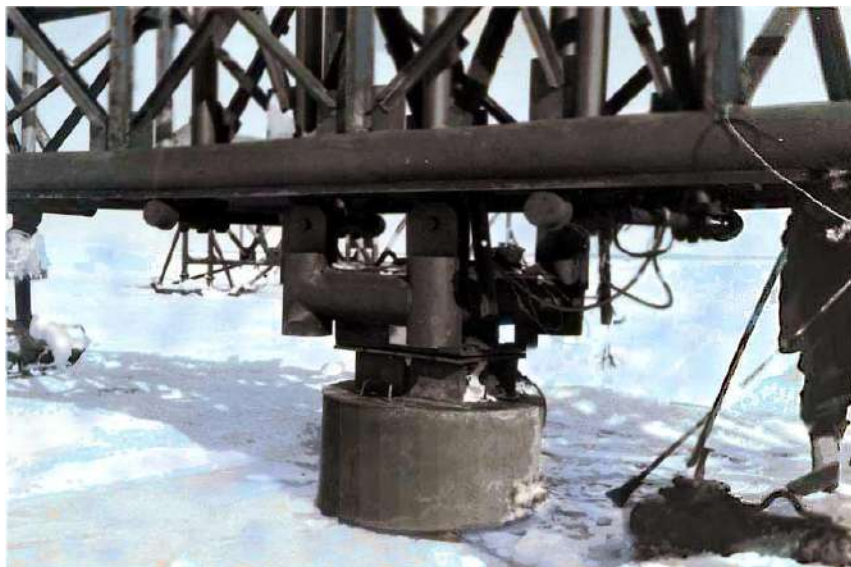


Рис. 2. Экспериментальная установка

Ледовые поля разрушаются на клинообразные обломки. Между максимальными и минимальными значениями ледовых нагрузок увеличивается временной интервал, что в целом облегчает работу сооружения. При этом снижается истирающее воздействие ровных ледяных полей, а также локальное давление льда. В действующем нормативном документе [2] увеличение ширины преград учитывается коэффициентом смятия  $k_b$ .

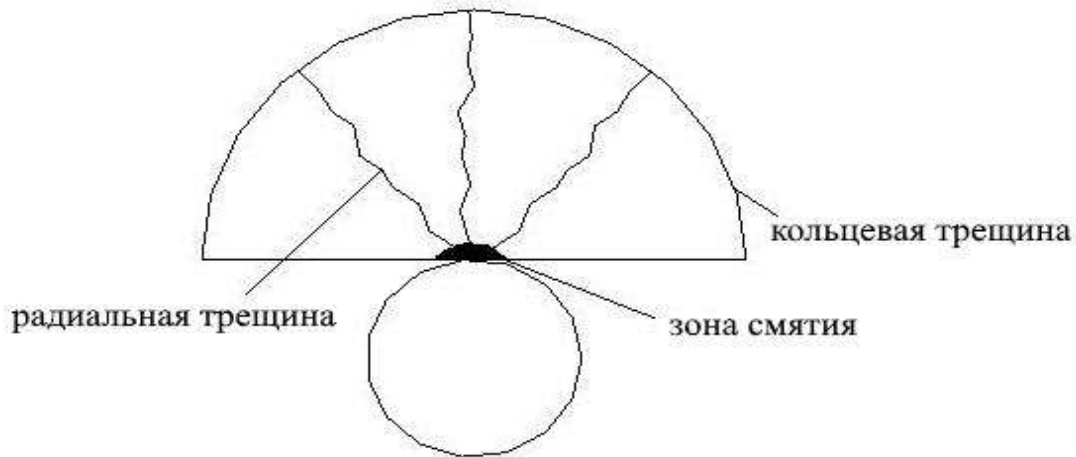


Рис. 3. Тип разрушения ровного льда при  $\frac{b}{h_d} \geq 20$

Третий сценарий является промежуточным между первым и вторым. Он реализуется при  $3 \leq \frac{b}{h_d} \leq 20$ . В зависимости от этого соотношения могут частично проявляться все виды разрушения льда. Так в начальный момент контакта ровного ледяного поля с вертикальной цилиндрической преградой образуется зона смятия льда, а затем, в зависимости от соотношения целого ряда факторов, может происходить потеря устойчивости ледяного поля. Ледяные поля могут разрушаться за счет выпучивания перед преградами без предварительного образования радиальных трещин. Такой вид разрушения западными специалистами был назван баклингом (buckling), (рис. 4).

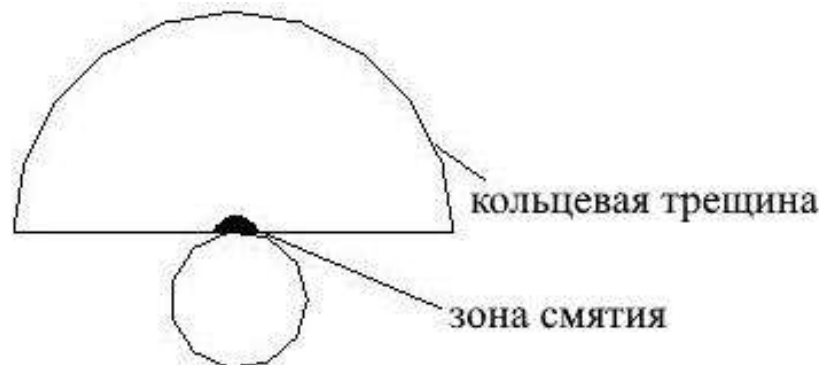


Рис.4. Тип разрушения льда при  $3 \leq \frac{b}{h_d} \leq 20$

При этом сценарии взаимодействия ровных ледяных полей с цилиндрическими преградами локальное давление льда будет минимальным, поскольку наряду с горизонтальной составляющей ледовой нагрузки будет возникать и вертикальная составляющая, изменяющаяся во времени. Значительно меньшим будет и истирающее воздействие ровных ледяных полей.

В соответствии с рекомендациями норм [2], полагается, что при расчетах ледовых нагрузок на проектируемые сооружения вертикального профиля при различных сценариях воздействия на них ровных ледяных полей, равнодействующая ледовой нагрузки всегда будет горизонтальной, а ее точка приложения постоянной. Исходя из этого, с учетом собственного веса сооружений и расчетных значений ледовых нагрузок, в инженерной проектной практике определяются и напряжения в грунтовом основании под фундаментной частью, а также величины опрокидывающих моментов. Такое предположение было бы вполне оправданным, если бы лед не содержал бы никаких включений и был бы идеально

изотропным материалом, который не меняет своих прочностных свойств по толщине и площади. Из-за включений частиц флоры и пузырьков воздуха, природный лед является анизотропным материалом и к тому же имеет градиент температуры по толщине. Диапазон отрицательных температур воздуха достаточно широк, а положительная температура примыкающего к нижней кромке льда слоя воды колеблется в пределах от 1 до 2С<sup>0</sup>. В процессе многочисленных опытов по изучению прочностных свойств ровных ледяных полей в Охотском, Карском и Баренцевом морях при участии автора, была выявлена прочностная анизотропия и по толщине, и по площади ровных ледяных полей, находящихся либо в припае, либо в состоянии дрейфа [5-7].

Таким образом, с учетом этих обстоятельств можно утверждать, что равнодействующая ледовой нагрузки в процессе воздействия ровных ледяных полей на вертикальные цилиндрические преграды будет менять во времени точку приложения как по толщине льда, так и в плане со стороны дрейфа, а также направление в пространстве. Диапазон этих изменений будет зависеть от отношения ширины преграды к толщине ровных ледяных полей их структуры, текстуры и физико-механических свойств по толщине. Это значит, что величина опрокидывающего момента также не будет постоянной, и будет менять свою величину и ориентацию в пространстве. Следует также отметить, что к тому же в условиях открытого моря направление дрейфа ровных ледяных полей носит случайный характер.

### **Выводы.**

1. Лед является анизотропным природным материалом и по этой причине, как показали результаты многочисленных исследований в различных морях, прочностные характеристики ровных ледяных полей изменчивы по их толщине и по площади.

2. В процессе силового воздействия дрейфующих ровных ледяных полей на гидротехнические сооружения вертикального профиля происходит изменение точки приложения и направления в пространстве равнодействующей ледовой нагрузки во времени.

3. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке напряженно-деформированного состояния грунтового основания, а, соответственно и при прогнозировании осадок под фундаментами проектируемых гидротехнических сооружений, которые в процессе эксплуатации будут подвергаться силовому воздействию ровных ледяных полей с различных направлений.

### **Литература**

1. ДБН В.2.4–3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 3 с.
2. СНиП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Стройиздат, 1995. – С. 70-74, 89.
3. Palmer A.C. Fracture and Its Role in Depending Ice Forces on Offshore Structures / A.C. Palmer, D.I. Goodman, M.F. Ashby, A.G. Evans, J.W. Hutchinson and A.R.S. Ponter // *Annals of Glaciology*, 1983. – Vol. 4. – pp. 216-221.
4. Исследование взаимодействия торосистых образований и ледостойких опор применительно к условиям Охотского моря. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МИСИ им. В.В. Куйбышева. – М., 1983. – Ч.1. – 150 с.
5. Рогачко С.И. Исследование физико-механических свойств льда Байдарацкой губы. Тезисы доклада на II Всероссийской конференции “Комплексное освоение нефтегазовых ресурсов континентального шельфа СССР” / С.И. Рогачко, Г.Н. Евдокимов, А.М. Шимберников. – М., 1990. – С. 49-50.
6. Rogachko S.I. Physical and mechanical properties study of flat ice of the Okhotsk Sea / S.I. Rogachko, G.N. Smirnov, G.N. Evdokimov // *Proceedings of the First Pacific Asia Offshore mechanics Symposium*. – Seoul, Korea, 1990. – pp. 45-48.

7. Rogachko S.I. The determination of ice strength to stretch in real conditions / S.I. Rogachko, M.V. Melnicov // The 8 International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice. Mombetsu, Hokkaido, Japen, 1993. – pp. 83-86.

### References

1. DBN B.2.4–3:2010. Hidrotehniczni sporudi. Osnovni polozhennya [Hydraulic Structures]. Kiev: Minregionbud of Ukraine, 2010.
2. SNiP 2.06.04-82\*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehicheskie sooruzheniya (volnovyie, ledovyie i ot sudov) [Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships)]. Moscow, Stroyizdat, pp. 70-74, 89, 1995.
3. Palmer A.C., Goodman D.I., Ashby M.F., Evans A.G., Hutchinson J.W. and Ponter A.R.S. Fracture and Its Role in Depending Ice Forces on Offshore Structures. *Annals of Glaciology*. Vol. 4, pp. 216-221, 1983.
4. Issledovanie vzaimodeystviya torosistiyh obrazovaniy i ledostoykih opor primenitelno k usloviyam Ohotskogo morya [Research of interaction of hammock formation to support parts of offshore structures in relation to the conditions of the Okhotsk sea]. Report ONIL MNGS MISI Part 1, Moscow, pp. 1-150, 1983.
5. Rogachko S.I., Evdokimov G.N., Shimbernikov A.M. Issledovanie fiziko-mehaniicheskikh svoystv lda Baydaratskoy gubyi [Research of physic-mechanical properties of ice of Baydaratskaya Bay]. Abstracts of the report at the 2<sup>nd</sup> All-Russian Conference “Integrated Development of Oil and Gas Resources on the cjtinental Shelf of the USSR”, Moscow, pp. 49-50, 1990.
6. Rogachko S.I., Smirnov G.N., Evdokimov G.N. Physical and mechanical properties study of flat ice of the Okhotsk Sea. *Proceedings of the First Pacific Asia Offshore mechanics Symposium*, Seoul, Korea, pp. 45-48, 1990.
7. Rogachko S.I., Melnicov M.V. The determination of ice strength to stretch in real conditions. The 8 International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice. Mombetsu, Hokkaido, Japen, pp. 83-86, 1993.

### ОСОБЛИВОСТІ СИЛОВОГО ВПЛИВУ РІВНИХ ЛЬДОВИХ ПОЛІВ НА ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ

**Рогачко С.І.**, д.т.н., професор,

*Одеський національний морський університет*  
rostasice@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5201-5368

**Анотація.** Україна є морською державою. Порти України розташовані на Чорному та Азовському морях. Ще за часів Радянського Союзу на континентальному шельфі, що належить нашій країні, були розвідані перспективні на розробку запаси вуглеводнів. Щоб стати енергонезалежною державою, необхідно в теперішній час розробляти концептуальні проекти різноманітних типів морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд, в залежності від глибин води, природно-кліматичних та інженерно-геологічних умов. Основними природними силовими факторами, що діють на всі типи гідротехнічних споруд, є вітрові хвилі, дрейфуючі льодові утворення (рівні крижані поля, поодинокі тороси та торошені поля). В безльодові періоди року вони будуть піддаватися впливу штормових хвиль. А в зимові періоди року всі типи гідротехнічних споруд піддаються силовому впливу дрейфуючих рівних крижаних полів та торосів, особливо в суворі зими рідкісної повторюваності. Відповідно статистиці сейсмічні впливи можуть проявлятися у будь який період року. Априорі, очевидно, що льодові навантаження будуть переважаючими в порівнянні з хвильовими. Вони проявляються у вигляді глобального льодового

навантаження, локального тиску та льодового тертя. Всі типи навантажень на гідротехнічні споруди гравітаційного типу трансформуються, з урахуванням власної ваги споруди, в напругу на ґрунтову основу під фундаментами частинами. У цій статті на підставі аналізу реалізацій льодового навантаження, отриманих дослідним шляхом у великомасштабних експериментальних дослідженнях в натурних умовах, показано, що рівнодіюча льодового навантаження при прорізуванні рівних крижаних полів опорними частинами гідротехнічних споруд змінює свою точку прикладення і направлення в просторі та часі. Цю обставину слід враховувати при оцінці напружено-деформованого стану ґрунтової основи під фундаментами гідротехнічних споруд гравітаційного типу.

**Ключові слова:** рівні крижані поля, рівнодіюча льодового навантаження, точка прикладення рівнодіючої льодового навантаження, фізико-механічні характеристики рівних крижаних полів, гідротехнічні споруди.

### PECULIARITIES OF THE STRENGTH EFFECTS OF LEVEL ICE FIELDS ON HYDROTECHNICAL STRUCTURES

**Rogachko S.I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
*Odessa National Maritime University*  
rostasice@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5201-5368

**Abstract.** Ukraine is a maritime state. Ports of Ukraine are located on the Black and Azov seas. During the time of former Soviet Union on the continental shelf belonging to our country prospects for the development of hydrocarbon reserves were explored. To become an energy independent state, it is necessary at the present time to develop conceptual projects of various types of offshore structures, depending on the depths of water, natural and climatic and engineering-geological conditions. All types of hydraulic structures are subject to the force action of drifting level ice fields during the term of exploitation in the winter periods of the year. The ice loads considerably exceed the wave loads and are actually the main ones. In the process of designing hydraulic structures when calculating ice loads, it is necessary to take into account the thickness and area of level ice fields, as well as their physical-mechanical characteristics. The recommendations of the norm on the calculation of ice loads from level ice operating in our country a priori assume, that the summary ice load on the designed structures does not change the point of application and direction in space and is considered as static load. Numerous large-scale experimental studies on the cutting of level ice fields by cylindrical obstacles of various diameters have shown that the process of ice destroying is variable. In this article, based on the analysis of ice load implementations obtained experimentally, it is shown that the resultant ice load when cutting out level ice by supporting parts of hydraulic structures changes its point of application and direction in space in time. This circumstance should be taken into account when assessing the stress-strain state of the soil foundation under the foundations of hydraulic structures of the gravitational type.

**Keywords:** level ice fields, summary ice load, point of application of the resultant ice load, physical-mechanical characteristics of ice, hydraulic structures.

Стаття надійшла 6.09.2018