

В.Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е.В. АНДРЕЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет» РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА С ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМ СООРУЖЕНИЕМ

При проектировании гидротехнических сооружений рассматривают несколько воздействий от ледового покрова: либо от движущегося ледового покрова, либо от вмерзания льда в гидротехническое сооружение. Воздействия от ледового покрова на гидротехнические объекты рассматривают как нагрузку взаимодействия. Подвижный ледовый покров, накопив определённое количество кинетической энергии при приближении к гидротехническому объекту, или разрушается, или врежется в тело сооружения. В процессе движения ледового покрова вся нагрузка распределена по фронтальной части гидротехнического сооружения. При этом обычно рассматривают влияние на сооружение квазистатических нагрузок от ледовых полей – не учитываются инерционные силы. В этом варианте оценивается влияние максимальной нагрузки на контактной поверхности льда с сооружением. По мере увеличения скорости ледяного покрова локальное нагружение на отдельные элементы сооружения возрастает. Но эта нагрузка не является равномерной во всех точках контактной поверхности при высоких скоростях ледяного покрова. Исходя из этого, общая нагрузка на гидротехническое сооружение как совокупность локальных нагрузок, действующих в один период времени, принимает максимальные значения при относительно невысоких скоростях движения ледяного покрова. В настоящее время прогнозирование ледовых нагрузок находится не на высоком уровне и лежит в диапазоне 25...40%, и это считается хорошим результатом при проведении экспериментов. Поэтому различия в подходах проектирования и учёта ледовых нагрузок имеют право на существование как равноправные методы оценки влияния таких нагрузок на гидротехнические объекты.

Гидротехнические сооружения, ледовая нагрузка, прочность льда, воздействие на сооружение, нагрузка на ледяной покров, строение ледового поля, контактная поверхность, ледовое поле, торосы.

Введение. Воздействия от ледового покрова на гидротехнические сооружения можно рассматривать как нагрузку взаимодействия. Как правило, подвижный ледовый покров, накопив определённое количество кинетической энергии при приближении к гидротехническому сооружению, либо разрушается, либо врежется в тело плотины. При этом процессе нагрузка, которая передаётся на сооружение, определяется прочностными характеристиками льда. Прочность ледового покрова зависит от многих показателей:

- размеров и типа ледовых образований;
- физико-механических показателей льда (прочность льда меняется в зависимости от температуры и его солёности);

- скорости движения ледового покрова;
- типа взаимодействия льда с гидротехническим сооружением;
- геометрии контактных плоскостей сооружения.

Как правило, в процессе проектирования гидротехнических сооружений рассматривают несколько воздействий от ледового покрова. К таким воздействиям можно отнести нагрузку от движущегося ледового покрова, либо вмерзание льда в гидротехническое сооружение [1, 2].

В процессе проектирования обычно рассматривают влияние на сооружение квазистатических нагрузок от ледовых полей, то есть не учитываются инерционные силы.

В этом варианте рассматривается влияние максимальной нагрузки на контактной поверхности льда с сооружением, которая достигает максимального значения, характеризующего прочностью льда. В процессе движения ледового покрова вся нагрузка распределена по фронтальной части гидротехнического сооружения. Целесообразно разделить местное давление от движущегося льда, которое принимается во внимание при расчёте локальных конструктивных элементов, и воздействие общей ледовой нагрузки, которая учитывается в общем итоговом статическом расчёте. Следует помнить, что по мере увеличения скорости ледяного покрова локальное нагружение на отдельные элементы возрастает. Но эта нагрузка не является равномерной во всех точках контактной поверхности при высоких скоростях ледяного покрова. Исходя из этого, общая нагрузка на гидротехническое сооружение как совокупность локальных нагрузок, действующих в один период времени, принимает максимальные значения при относительно невысоких скоростях движения ледяного покрова.

Геометрические показатели сечения контактной площадки играют заметную роль при сборе глобальных нагрузок, потому как движение льда направлено в сторону заострённой части ледолома, если это касается рек. В водоёмах с более широкой линзой движение ледяного поля обусловлено такими факторами, как ветер, который в зависимости от времени года может менять направление и, соответственно, приводить в движение ледяные массы. В таких условиях эффективность ледолома может быть не столь очевидной [3].

Вообще воздействие ледовых нагрузок на морские и портовые сооружения отличается от воздействия льда на речные сооружения по нескольким причинам:

- в зависимости от площади ледяного поля возможны вибрации;
- в морских сооружениях нагрузки на ледяное поле от ветра и течений собираются с больших площадей;
- скорость движения ледяного покрова на реках значительно превышает аналогичную на крупных озёрах и морях, а размеры льдин заметно меньше, что в свою очередь снижает нагрузку на контактные площадки сооружений;
- движение в русле рек строго определены и направлены, что делает мероприятия по снижению влияния нагрузок наиболее

простыми в отличие от акваторий с разным направлением движения ледяного покрова;

- на реках не образуются такие ледовые образования, как торосы, которые, в свою очередь, из всех прочих представляют наибольшую опасность для гидротехнических сооружений.

Этими различиями и нормами проектирования объясняется несоответствие подходов при расчётах гидротехнических сооружений на ледовые нагрузки. В настоящее время прогнозирование ледовых нагрузок находится не на высоком уровне и лежит в диапазоне 25...40%, и это считается хорошим результатом при проведении экспериментов. Поэтому различия в подходах проектирования и учёта ледовых нагрузок имеют право на существование как равноправные методы оценки влияния нагрузок на гидротехнические сооружения [4].

Материалы и методы исследований.

При определении и сборе эксплуатационных нагрузок на гидротехнические сооружения в основном рассматривают такие основные ледовые образования, как ровный лёд, торосы и наслоённый лёд. Как правило, для рек более характерны ледовые образования с ровным льдом, в то время как для морских акваторий более выражено образование сложных ледовых образований. Образование торосов и наслоённого льда происходит при движении ледовых полей, т.е. при наплывании тонких участков ледяного покрова друг на друга они спрессовываются и образуется наслоённый участок льда. Число слоёв в таком пакете может достигать десятка и более, что увеличивает его вес и, соответственно, нагрузку на сооружение. При таком же процессе наслаивания, но более толстых полей спрессованные пакеты называют торосами, отношение высоты надводной части таких образований к подводной лежит в диапазоне от 1:2 до 1:7 и может по абсолютной высоте достигать более 20 метров. Такие дрейфующие образования, оседая на мели в некоторых участках акваторий или сталкиваясь с препятствием в виде заглубленных элементов гидротехнических сооружений, создают стамухи. Как правило, при движении и таянии ледового покрова, могут возникать области разрушенного льда, хотя для северных морей возникновение таких областей компенсируется достаточно быстрым смерзанием, такие сморози могут достигать достаточно внушительных площадей. Массивные ледовые

образования из консолидированного льда, которые возникают при разрушении стамух, влияют на образование несяк, которые можно классифицировать как большие торосы или группу торосов. Они могут выглядеть как отдельные льдины, дрейфующие в разных направлениях, и достигать до 6 метров

в высоту относительно уровня моря. Сплочённость льда можно охарактеризовать балльностью в соответствии с таблицей 1. В этой системе каждому баллу соответствует приращение сплочённости на 0,1 (0 баллов – лёд отсутствует, 10 баллов – вся поверхность акватории покрыта льдом) [5, 6].

Таблица 1

Балльная система сплоченности льда

Балл	Наименование	Доля поверхности, покрытая льдами, %
0	Льда нет	0
1	Разреженный лёд	10
2		20
3		30
4		40
5	Редкий лёд	50
6		60
7		70
8	Сплочённый лёд	80
9		90
10	Сплошной лёд	100

Аналогичная оценка существует и для торосистости льда, представленная в таблице 2, её можно охарактеризовать

по пятибалльной системе (0 баллов – гладкий лёд, 5 баллов – сплошной торосистый лёд) [6].

Таблица 2

Балльная система торосистости

0 баллов	1 балл	2 балла	3 балла	4 балла	5 баллов
Гладкий лёд					Сплошной торосистый лёд

Кристаллографическое исследование (по толщине образцов) позволяет определить такие характеристики льда, как форму, взаимное расположение, размеры кристаллов отобранных образцов и сделать вывод о строении и величине воздействия ледяного поля на гидротехнические сооружения. По размеру кристаллов льда их подразделяют на мелкозернистые, среднезернистые и крупнозернистые.

По составу лёд классифицируют на равнозернистый и неравнозернистый.

По форме кристалла лёд классифицируют на аллотриоморфный (неправильной формы), параллельно-волокнистый, призматический и волокнистый.

В случае невозможности проведения кристаллографических исследований допускается принимать, что:

- ледяной покров морей и устьевых участков рек, которые впадают в моря, состоит из зернистого и волокнистого льда;

- ледяной покров озёр, водохранилищ и крупных речных артерий состоит из зернистого и призматического льда;

- толщина слоя зернистого льда, располагающегося в верхней части ледяного поля, составляет $0,25h_d$, а толщина слоя призматического или волокнистого льда – $0,75h_d$, (h_d – расчётная толщина льда).

Помимо ледовых образований на гидротехнические сооружения могут оказывать воздействие зажоры, это скопления так называемой шуги – рыхлого льда, перемещающегося в водной толще или по поверхности водной глади, с включениями мелкобитого льда, а также заторы, образованные скоплением льдин в руслах водотоков в период ледохода.

Результаты исследований. Существует зависимость прочностных характеристик льда от его структуры, температуры, солёности и направления деформации. В пресноводных водоёмах лёд приобретает кристаллическую структуру, создающую

заметную анизотропию прочностных свойств, когда прочность образцов, вырезанных перпендикулярно поверхности льда почти в 3 раза выше прочности ледового покрова в направлении плоскости ледового поля. Большое влияние на прочность льда оказывает его температура, которая не является постоянной величиной в зависимости от его толщины, поэтому при расчёте обычно принимают среднюю величину его прочности, которая определяется средней температурой. Если по ледовому покрову толщина льда не выше полуметра, то для расчёта принимают среднее значение температуры трёх последних суток, при толщине льда более полуметра принимают значение осреднённой температуры за шесть последних суток.

Прочностные показатели ледяного покрова определяются при проведении лабораторных исследований отобранных образцов, которые отбираются из определённого количества слоёв ледяного поля таким образом, чтобы керн был перпендикулярен направлению роста кристаллов. При этом количество отобранных образцов должно быть больше трёх.

По рекомендациям [6] образцы отобранного льда изготавливают в виде призм квадратного сечения или цилиндров круглого сечения с отношением длины к высоте, равным 2,5. Ширина отобранного

образца должна не менее чем в десять раз превышать средний поперечный размер кристалла, который можно определить, проведя кристаллографическое исследование. Исследования отобранных образцов происходят при температуре t_i , и постоянной скорости деформации, принимаемой для пресноводного льда равной $\dot{\epsilon}_c = 3 \cdot 10^{-4}$, 1/с, а для образцов, образованных в морских акваториях, по таблице 3 [6].

Напряжение, при котором начнётся разрушение образцов при их сжатии, т.е. предел прочности для каждого из них C_i , рассчитывается по формуле

$$C_i = (P_{max})_j / \psi, \quad (1)$$

где $(P_{max})_j$ – максимальная нагрузка для конкретного отобранного образца, которую можно определить по диаграмме (рис. 1); ψ – площадь первоначального сечения отобранного образца.

За результат испытания определённого количества образцов исследуемого слоя принимается величина

$$C \pm \Delta, \quad (2)$$

где C – среднее арифметическое значение параллельных определений предела прочности при сжатии; Δ_i – доверительная величина, граница погрешности определений образцов C_i , определяемая методами математической статистики при заданных значениях доверительной вероятности α и числе испытанных образцов n .

Таблица 3

Температура и постоянная скорость деформации для морского льда

Температура льда в i -м слое t_i	-2°C	-10°C	-15°C	-23°C и ниже
Значение $\dot{\epsilon}_n \cdot 10^4, c^{-1}$	0,5	1,5	2,0	3,0

Прочностные характеристики ледового поля при сжатии R_c и изгибе R_f являются основными показателями, которые определяют значение ледовой нагрузки, и в соответствии с [6] определяются по следующим выражениям

$$R_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N (C_i + \Delta_i)^2 / N}, \quad (3)$$

$$R_f = 0,4(C_b + \Delta_b), \quad (4)$$

где C_b и Δ_b – среднее арифметическое значение предела прочности ледового покрова и доверительный предел случайной погрешности для нижнего слоя исследуемого ледяного поля при температуре t_b .

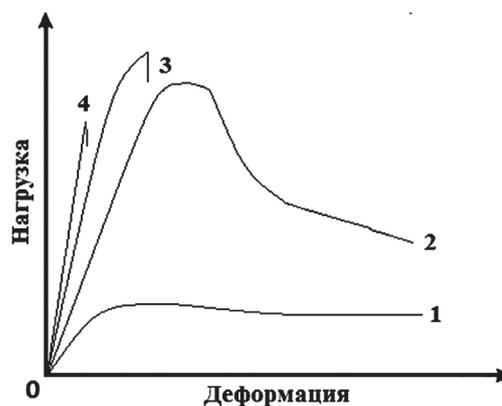


Рис. Диаграммы «нагрузка-деформация» льда при различных скоростях деформации: $\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2 < \dot{\epsilon}_3 < \dot{\epsilon}_4$

В случае отсутствия натуральных наблюдений нормы [6] допускают принятие значений $C_i + \Delta_i$ для акваторий с пресной водой по таблице 4 [6] в зависимости от того, какая будет температура у i -го слоя исследуемого льда, которая определяется по формуле:

$$t_i = t_u z_u, \quad (5)$$

где t_u - температура льда на границе лёд-воздух или снег-лёд, °С, определяемая по данным о температуре воздуха, толщине снежного покрова и скорости ветра в исследуемом районе (при весеннем ледоходе допускается принимать значение $t_u = 0^\circ\text{C}$).

Для акваторий с солёной водой ($C_i \pm \Delta_i$) определяется по таблице 5 [6] в зависимости от количества жидкой фазы в i -ом слое

ледяного поля $v_i\%$, определяемого по «Океанографическим таблицам» [7] при заданных значениях температуры и солёности льда. Выборка из [7] приведена в таблице 6.

Все нагрузки от ледового покрова на гидротехнические сооружения определяются на основе статистических данных о гидрометеорологических и ледовых условиях в районе обследуемого гидротехнического сооружения в период наибольшего влияния ледового покрова, при этом период натуральных наблюдений должен составлять не менее пяти лет. На основе данных таких наблюдений устанавливается значение $h_{1\%}$ наибольшей за зимний период толщины ледового покрова обеспеченностью 1%.

Таблица 4

Значения $C_i + \Delta_i$ для акваторий с пресной водой

Тип кристаллической структуры	Температура льда в i -ом слое ледяного поля $t_i, ^\circ\text{C}$			
	0	-3	-15	-30
	Значения $C_i \pm \Delta_i$, МПа (при $\alpha = 0,95$, $n = 5$)			
Зернистый (снежный)	1,2±0,1	3,1±0,2	4,8±0,5	5,8±0,4
Призматический (столбчатый)	1,5±0,2	3,5±0,3	5,3±0,4	6,5±0,5
Волокнистый (шестовато-игольчатый)	0,8±0,1	2,0±0,2	3,2±0,3	3,8±0,5

Таблица 5

Значения $C_i + \Delta_i$ для акваторий с солёной водой

Тип кристаллической структуры	Количество жидкой фазы в i -ом слое ледяного поля $v_i\%$					
	1	10	25	50	100	200
	Значения $C_i \pm \Delta_i$, МПа (при $\alpha = 0,95$, $n = 5$)					
Зернистый	8,4±0,5	3,1±0,2	4,8±0,5	5,8±0,4	1,0±0,2	0,8±0,2
Волокнистый	6,0±0,2	3,9±0,4	1,9±0,2	0,7±0,1	0,4±0,1	0,3±0,1

Таблица 6

Выборка из океанографической таблицы

Солёность льда $S, \%$	Количество жидкой фазы в i -ом слое ледяного поля $v_i\%$								
	-2	-4	-6	-8	-10	-15	-20	-25	-30
2	56	29	20	16	13	10	8	4	2
4	112	58	40	32	27	20	16	8	4
6	16	87	60	48	41	30	25	12	7
8	224	116	80	63	54	40	33	16	9

Расчётная толщина ровного льда h_d , м, принимается равной:

- $0,8 h_{1\%}$ – для акваторий с пресной водой Европейской части СНГ и в районах Сибири, расположенных южнее 65° северной широты;

- $0,9 h_{1\%}$ – для районов Азиатской части СНГ, расположенных между 65° и 70° северной широты;

- $h_{1\%}$ – для районов Азиатской части СНГ, расположенных севернее 70° северной широты, а также для морского льда.

В зимний период в случае смерзания гидротехнического сооружения с ледяным полем, расчётная толщина ледяного покрова на границе контактной плоскости сооружения со льдом принимается по результатам натуральных наблюдений,

а при отсутствии допускается толщину примёрзшего к сооружению льда считать равной $1,5h_d$.

Выводы

Прочностные характеристики ледового покрова зависят от следующих показателей:

- размеров и типа ледовых образований;
- физико-механических показателей льда (прочность льда меняется в зависимости от температуры и его солёности);
- скорости движения ледового покрова;
- типа взаимодействия льда с гидротехническим сооружением;
- геометрии контактных плоскостей сооружения.

Воздействие ледовых нагрузок на морские и портовые сооружения отличается от воздействия льда на речные сооружения по следующим причинам:

- в зависимости от площади ледяного поля возможны вибрации;
- в морских сооружениях нагрузки на ледяное поле от ветра и течений собираются с больших площадей;
- скорость движения ледяного покрова на реках значительно превышает аналогичную на крупных озёрах и морях, а размеры льдин заметно меньше, что в свою очередь снижает нагрузку на контактные площадки сооружений;
- движение в русле рек строго определены и направлены, что делает мероприятия по снижению влияния нагрузок наиболее простыми в отличие от акваторий с разным направлением движения ледяного покрова;
- на реках не образуются такие ледовые образования, как торосы, которые, в свою очередь, из всех прочих представляют наибольшую опасность для гидротехнических сооружений.

V.YA. ZHARNITSKY, E.V. ANDREEV

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

ANALYSIS OF THE INTERACTION OF THE ICE COVER WITH HYDRO TECHNICAL STRUCTURE

When designing hydraulic structures, several impacts from ice cover are considered: either from moving ice cover or ice freezing into the hydraulic structure. Impacts from ice cover on hydraulic facilities are considered as load of interaction. The movable ice cover, having accumulated a certain amount of kinetic energy when approaching the hydro technical object

Библиографический список

1. ГОСТ 27.410-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
2. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа: Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1986. – 288 с.
3. Morison J.R., O'Brien M.P., Johnson J.W., Shaaf S.A. The forces exerted by surface waves on piles // Petroleum Transaction American Institute of Mining Engineering, 1950. – Vol. 189. – P. 149-154.
4. Ралстон Т. Анализ ледовых нагрузок на конические конструкции в рамках теории предельного равновесия // Сб. Физика и механика льда. – М.: Мир, 1983. – С. 282-297.
5. Скоков Р.Н. Прочность льда в прибрежной зоне моря / Труды ДВНИИ, Вып. 125: Вопросы океанографии. – Л.: Гидрометеопиздат, 1986. – С. 84-91.
6. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (Волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04. – 82*. <http://docs.cntd.ru/document/1200095522>
7. Океанографические таблицы. – Л.: Гидрометеопиздат, 1975. – 478 с.

Материал поступил в редакцию 02.09.2019 г.

Сведения об авторах

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44; e-mail: zharnitskiy@mail.ru

Андреев Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44; e-mail: andreev-rf@mail.ru

breaks down or crashes into the body of the structure. During the ice cover movement the entire load is distributed on the front part of the hydraulic structure. At the same time, the influence of quasi-static loads from ice fields on construction is usually considered – inertial forces are not taken into account. In this case the effect of the maximum load on the contact ice surface with the structure is assessed. As the speed of the ice cover increases, local loading on certain elements increases. However, this load is not uniform at all points of the contact surface at high ice cover speeds. Based on this, the total load on the hydraulic structure, as a set of local loads acting in one period of time takes maximum values at relatively low speeds of the ice cover movement. Currently, the prediction of ice loads is not at a high level and ranges from 25... to 40% and this is considered as a good result when conducting experiments. Therefore, differences in the design and accounting approaches of ice loads have the right to exist as equal methods of assessing the impact of such loads on hydro technical objects.

Hydro technical structures, ice load, ice strength, impact on the structure, load on ice cover, ice field structure, contact surface, ice field.

References

1. GOST 27.410-89. Nadezhnost v tehnikе. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. – M.: Izd-vo standartov, 1990. – 37 s.
2. **Douson T.** Proektirovanie sooruzhenij morskogo shelfa: Per. S angl. – L.: Sudostroenie. – 1986. – 288 s.
3. **Morison J.R. O Brien M.P., Johnson J.W., Shaaf S.A.** The forces exerted by surface waves on piles // Petroleum Transaction American Institute of Mining Engineering, 1950. – Vol. 189. – P. 149-154.
4. **Ralston T.** Analiz ledovyh nagruzok na konicheskie konstruktsii v ramkah teorii predelnogo ravnovesiya // Fizika i mehanika l'jda. – M.: Mir, 1983. – S. 282-297.
5. **Skokov R.N.** Prochnost l'jda v pribrezhnoj zone moray / Trudy DVNII, vyp. 125: Voprosy okeanografii. – L.: Gidrometeoizdat, 1986. – S. 84-91.
6. SP 38.13330.2012 Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehicheskie sooruzheniya (Volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya

redaktsiya SNiP 2.06.04. – 82*. <http://docs.cntd.ru/document/1200095522>

7. Okeanograficheskie tablitsy. – L.: Gidrometeoizdat, 1975. – 478 s.

The material was received at the editorial office
02.09.2019 g.

Information about the authors

Zharnitsky Valerij Yakovlevich, doctor of technical sciences, head of the department «Bases and foundations, building and expertise of estate realty objects», FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Bolshaya Academiceskaya, 44; e-mail: zharnitskiy@mail.ru

Andreev Evgenij Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Bases and foundations, building and expertise of estate realty objects», FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Bolshaya Academiceskaya, 44; e-mail: andreev-rf@mail.ru