

sooruzhenij // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. – 2018. – № 11. – S. 35-41.

7. Razvitie melioratsii zemelsel skokho-zyajstvennogo naznacheniya v Rossii / A.V. Kolganov, N.V. Sukhoi, V.N. Shkura i dr.; pod red. V.N. Shchedrina. – Novocherkassk: RosNIIPM, 2016. – 222 s.

8. **Snezhko V.L., Sidorova S.A., Simonovich O.S.** Prognoz urovnya bezopasnosti nizkonapornyh gruntovyh plotin// Prirodobustrojstvo. – 2019. – № 2. – S. 72-80.

9. Nadezhnost i bezopasnost gidrotehnicheskikh sooruzhenij meliorativnogo naznacheniya. Nauchny obzor / V.N. Shchedrin, Yu.M. Kosichenko, E.I. Shkulanov i dr. – Novocherkassk: 2011. – 105 s.

10. **Pronikov A.S.** Parametricheskaya nadezhnost mashin. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002. – 560 s.

The material was received at the editorial office
15.01.2020

Information about the authors

Simonovich Olga Sergeevna, senior lecturer the chair «Information technologies in construction», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., 44 e-mail: VL_Snejko@mail.ru

Snezhko Vera Leonidovna, doctor of technical sciences, professor, head of the chair «Information technologies in construction», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., 44 e-mail: VL_Snejko@mail.ru

Dmitry Vyacheslavovich Kozlov, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of Hydraulics and hydraulic engineering, National research Moscow state University of civil engineering, 26 Yaroslavskoeshosse; Moscow, 129337: e-mail: kozlovdv@mail.ru

УДК 502/504: 627.82.034.93

DOI 10.34677/1997-6011/2020-1-65-71

В.Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е.В. АНДРЕЕВ

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

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗОК ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Гидротехнические сооружения, эксплуатируемые в зоне влияния отрицательных температур, подвержены влиянию движущегося льда. Поэтому для максимально эффективного восприятия гидротехническим сооружением нагрузок от движущегося ледового покрова и минимизации отрицательных последствий важная роль отводится подбору геометрии контактных плоскостей. Нагрузки на гидротехнические объекты от ледовых полей представляются в двух вариантах: влияние разрушенного льда, как правило, представляется в форме взаимодействия сооружения с сыпучей поверхностью Кулона или как влияние консолидированного льда. Как правило, расчётными нагрузками считаются воздействия от сплошного ледового поля, и в основном на них направлены нормы проектирования гидротехнических сооружений. Существенно снизить влияние нагрузок от движущегося ледового покрова на гидротехническое сооружение возможно с помощью придания элементам сооружения определённого наклона в вертикальной плоскости, так как лёд разрушается в большей степени не от сжатия, а от изгиба. Это свойство льда объясняет и тот факт, что нагрузки на наклонные сооружения ниже, чем на вертикальные. В выводах представлена многофакторность степени воздействия ледовых покровов на контактные площадки опор и откосов гидротехнических сооружений.

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

Введение. При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений и природно-климатические условия, оказывающие непосредственное влияние, как

на отдельные конструкции, так и на объект в целом. Гидротехнические сооружения, эксплуатируемые в зоне влияния отрицательных температур, подвержены влиянию движущегося льда. Такое влияние можно подразделить на местное давление, которое принимается в расчёт при оценке прочности отдельных элементов гидротехнического сооружения, и общую нагрузку от ледового покрова, которая учитывается в общем статическом расчёте. Аналогично можно выделить закономерность возрастания локальных нагрузок при увеличении скорости движения ледового поля.

Такие нагрузки действуют неодновременно в различных точках приложения к контактной поверхности сооружения при больших скоростях, из чего в расчёте общая нагрузка, которая вычисляется как сумма локальных нагрузок, действующих в один и тот же момент времени, имеет максимальное значение при достаточно низких скоростях движения льда [1].

Поэтому для максимально эффективного восприятия гидротехническим сооружением нагрузок от движущегося ледового покрова и минимизации отрицательных последствий важная роль отводится выбору (подбору) геометрии контактных плоскостей.

Нагрузки на гидротехнические сооружения от ледовых полей можно представить в двух вариантах:

- влияние разрушенного льда, как правило, представляется в форме взаимодействия сооружения с сыпучей поверхностью Кулона;
- влияние консолидированного льда, то есть предельное влияние при определённой схеме разрушения ледового покрова.

В данном случае по фронту круглого сооружения в плане (рис. 1), образовывается две зоны:

- зона движущегося ледового покрова;
- зона нагромождения непосредственно на контакте с сооружением.

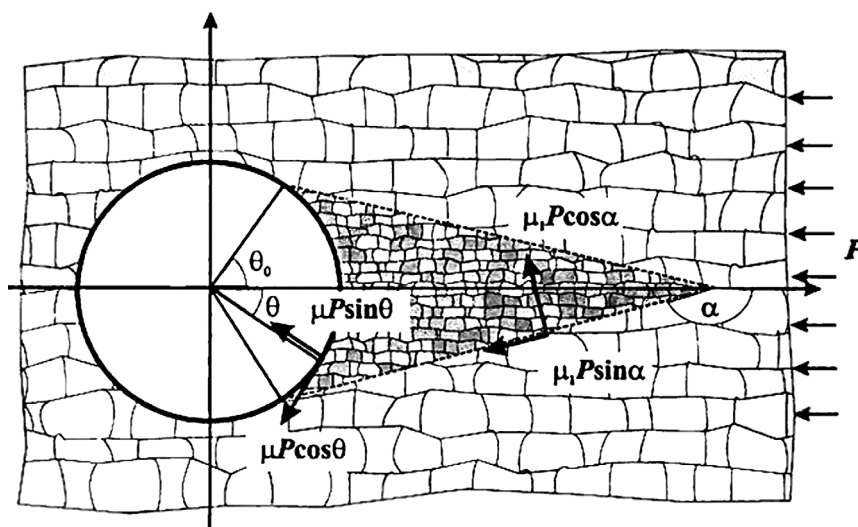


Рис. 1. Схема взаимодействия круглого в плане элемента гидротехнического сооружения с разрушающим ледовым покровом

Предполагается, что сооружение окружено неконсолидированным ледовым массивом, граница которого определяется углом $\theta_0 = \arctg \mu$, где μ – коэффициент трения ледового покрова о гидротехническое сооружение. Определённая часть разрушенного ледового покрова не движется в русле реки, создавая тем самым скопления обломков льда. Границы такой зоны зависят от коэффициента трения ледяных обломков друг о друга μ_1 . Нагрузкой от движущегося ледового покрова и его обломков можно считать сумму от движущегося

ледяного поля и его отдельных скоплений [2].

Как правило, расчётными нагрузками считаются воздействия от сплоченного ледового поля, и в основном на них направлены нормы проектирования и строительства ГТС.

Согласно действующим нормативным документам сила от подвижной ледовой массы на гидротехническое сооружение с вертикальной контактной площадкой определяется:

$$F_{c,p} = 0,04vh_d \sqrt{mAk_b k_u R_c \operatorname{tg} \gamma}, \quad (1)$$

от влияния ледового покрова на протяжённые ГТС:

$$F_{c,w} = 0,07vh_d\sqrt{Ak_vR_c}, \quad (2)$$

где v – скорость движения ледяного покрова, м/с, определяемая по данным натурных наблюдений, в случае отсутствия таких данных допустимо применение следующего образом:

- для приливных участков морей и рек – скорость течения воды;
- для морей и водохранилищ – 3% от показателя скорости ветрового потока

1%-й обеспеченности во время движения ледовой массы;

m – коэффициент (определяется по табл. 1);

A – наибольшая площадь ледового поля 1%-ой обеспеченности, м², которая определяется в результате замеров исследуемого места;

k_b – коэффициент (определяется по табл. 2);

k_v – коэффициент, определяемый по таблице 3 и зависящий от скорости деформирования ледовой массы в области контакта с гидротехническим сооружением, 1/с, определяемой по формуле $\varepsilon_c = v / 4b$;

γ – 0,5 угла заострения носовой части контактной площадки ГТС, град.

Влияние силы $F_{c,p}$ определяется по (1) и не может быть больше, чем значение силы $F_{b,p}$, МН, определяемой по формуле:

$$F_{b,p} = mk_bk_vR_ch_d, \quad (3)$$

Значение силы $F_{c,w}$ не должно превосходить значение силы $F_{b,p}$, МН, определяемой следующим образом

$$F_{b,w} = kk_vR_ch_d, \quad (4)$$

где k – коэффициент, определяемый по данным таблицы 4.

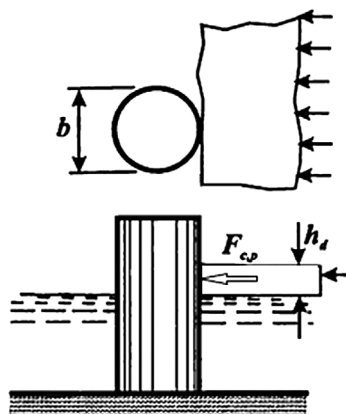


Рис. 2. Принципиальная схема воздействия нагрузок от подвижной ледовой массы на отдельно стоящую опору гидротехнического сооружения круглого сечения

Таблица 1

Значение коэффициента m в зависимости от формы опоры

Коэффициент формы опоры гидротехнического сооружения	Вид носовых частей опор						
	Треугольника и углом заострения 2γ , град					Многогранника	Прямоугольника
	45	60	75	90	120		
m	0,41	0,47	0,52	0,58	0,71	0,83	1

Примечание. При движении ледовой массы вмёрзшей в опоры гидротехнического сооружения, для опор с носовыми частями в виде с треугольника, прямоугольникам $m = 1,26$.

Таблица 2

Значение коэффициента k_b в зависимости от разновидности ледового покрова

Значение b/h_d		0,3 и менее	1	3	10	20	30 и более
Коэффициент k_b	для пресноводного льда	5,3	3,1	2,5	1,9	1,8	1,5
	для морского льда	5,7	3,6	3,0	2,3	1,9	1,5

b – ширина опоры ГТС, по фронту на уровне приложения ледовой массы, м.

Таблица 3

Значение ε_c в зависимости от коэффициента k_v и разновидности ледового поля

Значение ε_c , 1/с	10^{-7} и менее	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2} и более
Коэффициент k_v	0,1	0,9	1,0	0,8	0,5	0,3

Таблица 4

Значение коэффициента k

Значения b/h_d	0,3 и менее	1	3	10	20	30 и более
Коэффициент k	1	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4

В нормах проектирования мостов фигурируют иные данные, которые рекомендуют определять величину нагрузения от подвижной ледяной массы

на опоры мостовых сооружений по наименьшему значению:

- в случае прорезания опорой льда

$$F_1 = \psi_1 R_{zn} bt; \quad (5)$$

- в случае остановки ледяного покрова у опоры

$$\left\{ \begin{aligned} F_2 &= 1,253 \nu h_d \sqrt{\psi_2 AR_{zn}} \\ (F_2 &= 0,4 \nu h_d \sqrt{\psi_2 AR_{zn}}) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где ψ_1 и ψ_2 – коэффициенты формы, определяемые по таблице 5; R_{zn} – сопротивление ледяного покрова разламыванию.

Значение силы F_p от движения ледяной массы и соприкосновения с вертикаль-

ными опорами ГТС, регламентировано определять из выражения

$$F_p = n_1 k_2 F_{b,p} (0,83 + 0,17 n_1^{-1/2}), \quad (7)$$

где n_1 – общее количество опор в гидротехническом сооружении; k_2 – коэффициент, принимаемый по таблице 6.

Материалы и методы исследований.

Существенно снизить влияние нагрузки от движущегося ледяного покрова на гидротехническое сооружение возможно с помощью придания опорам определённого наклона в вертикальной плоскости, так как лёд разрушается в большей степени не от сжатия, а от изгиба. Это свойство льда объясняет так же и тот факт, что нагрузки на наклонные контактные поверхности ниже, чем на устроенные под прямым углом.

Таблица 5

Значение коэффициентов ψ_1 и ψ_2

Коэффициент	Коэффициент формы для опор с носовой частью, имеющей в плане форму							
	многоугольника	прямоугольника	Треугольника с углом заострения в плане					
			45°	60°	75°	90°	120°	150°
ψ_1	0,9	1,0	0,54	0,59	0,64	0,69	0,77	1,0
ψ_2	2,4	2,7	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3	2,7

Таблица 6

Значение коэффициента k_2

Значение b/a	0,1 и менее	0,5	1
Коэффициент k_2	1	$0,55 + 0,45 k_n / k$	k_n / k

a – шаг опор в метрах; k_n – коэффициент, определяемый по данным таблицы 4 при использовании аргумента $(n_\nu b)/h_d$; n_ν – число опорных площадок во фронтальном ряду ГТС.

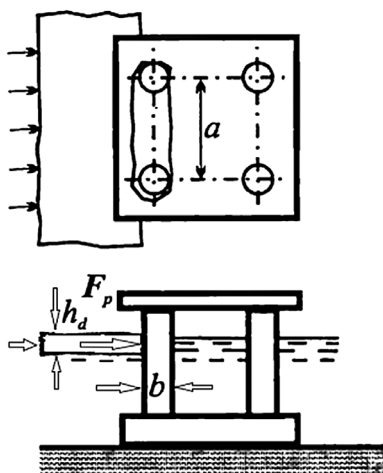


Рис. 3. Схема воздействия нагружений от движущегося ледяной массы на вертикальные опоры ГТС

Задачи о влиянии ледяного поля на конические преграды решались во многих работах в частности из теории предельного

равновесия ледяного покрова и с предположением, что ледяной покров подчиняется закону текучести Треска [3]. Такое решение с некоторыми доработками и уточнениями представлено в нормах проектирования, в соответствии с которыми силу от воздействия движущегося ледяного покрова на отдельно стоящую коническую опору ГТС (рис. 4) или ледорез рассчитывается:

- показатель горизонтальной составляющей силы F_{ph}

$$F_{ph} = [k_{h1} R_{\psi} h_d^2 + k_{h2} \rho g h_d^2 + k_{h3} \rho g h_d (d^2 - d_1^2)] k_{h4}; \quad (8)$$

- показатель вертикальной составляющей силы F_{vp}

$$F_{vp} k_{v1} F_{hd} + k_{v2} \rho g h_d (d^2 - d_1^2). \quad (9)$$

При этом на секцию откосного профиля или отдельно стоящую опору

прямоугольного сечения с наклонной контактной площадкой:

- показатель горизонтальной составляющей силы F_h

$$F_h = 0,1R_{\psi}bh_d \operatorname{tg}\delta; \quad (10)$$

- показатель вертикальной составляющей силы F_v

$$F_v = F_h \operatorname{ctg}\delta, \quad (11)$$

где k_{h1} и k_{h2} коэффициенты, определяемые по данным таблицы 7; k_{h3} , k_{h4} , k_{v1} , k_{v2} – коэффициенты, определяемые по данным таблицы 8; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; d – диаметр конуса по обрезу водной поверхности; d_1 – верхний диаметр конуса.

В трудах [4] представлены исследования на предмет сопоставления нагрузок на разрушающих конусах, которые в свою очередь имеют ориентацию: конусом вверх и конусом вниз. Анализ выполнялся с учётом

основных показателей силы сопротивления, и его результаты отображены на рисунке 5.

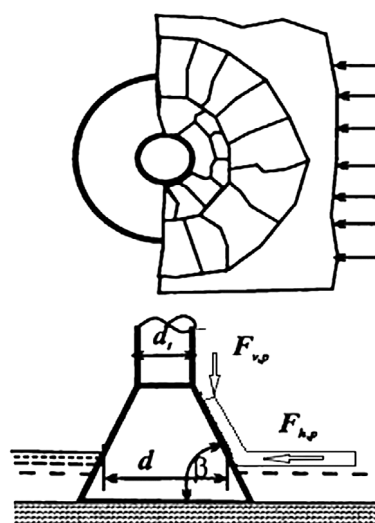


Рис. 4. Схема приложения нагрузок от подвижного ледяного покрова на отдельно стоящую коническую опору гидротехнического сооружения

Таблица 7

Значение коэффициентов k_{h1} и k_{h2}

Значение $\rho g d^2 / R_{\psi} h_d$	0,1	0,5	1	5	10	25	50	100
Коэффициенты:								
k_{h1}	1,6	1,6	1,7	1,9	2,1	2,5	2,9	3,5
k_{h2}	0,31	0,24	0,21	0,11	0,08	0,05	0,02	0,02

Таблица 8

Значение коэффициентов k_{h3} , k_{h4} , k_{v1} , k_{v2}

Значение δ , град	20	30	40	50	60	70
Коэффициенты:						
k_{h3}	0,25	0,27	0,31	0,36	0,46	0,67
k_{h4}	0,7	0,9	1,3	1,8	2,6	5,3
k_{v1}	2,2	1,6	1,1	0,8	0,5	0,3
k_{v2}	0,041	0,042	0,039	0,034	0,026	0,017

Из данного рисунка видно, что от 30 до 50% нагрузки на контактной поверхности конуса с ледовым покровом, создаётся за счёт трения льда, скользящего по данной поверхности, а нагрузки от разрушения ледяного поля от образования круговой трещины [5, 6]. Для вариантов опор гидротехнических сооружений, где конус опоры был ориентирован вниз, отмечались значительно меньшие нагрузки, хотя такие достоинства конструкции могут быть нивелированы на мелководье, за счёт образования наслоений и скопления обломков льда под конусом опоры [7].

В нормах проектирования рекомендуется определять давление ледяного поля

на опоры гидротехнических сооружений, имеющих в качестве контактной поверхности наклонную плоскость:

- горизонтальная составляющая F_x по наименьшему показателю, определённому по зависимости (5), и по формуле

$$F_x = 0,7\psi R_{zn} h_d^2 \operatorname{tg}\delta; \quad (12)$$

- вертикальную составляющую F_z – по следующей формуле

$$F_z = F_x / \operatorname{tg}\delta, \quad (13)$$

где ψ – коэффициент – $0,2 b/h_d$, но не ниже 1.

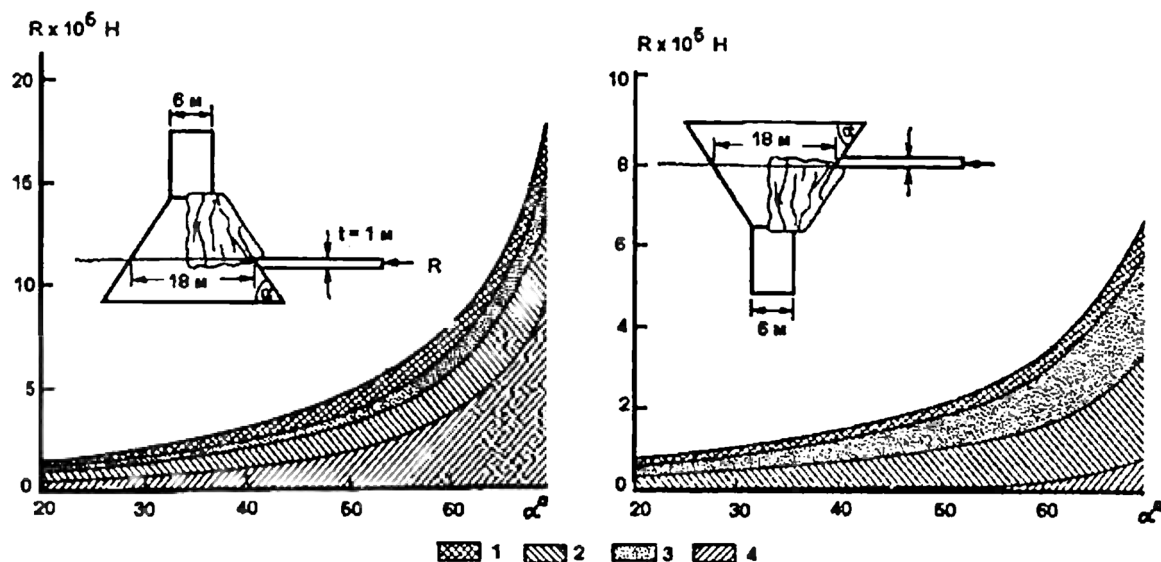


Рис. 5. Составляющие от воздействия нагружения подвижного ледового покрова: 1 – вклад реакции сооружения; 2 – вклад круговой трещины; 3 – вклад радиальных трещин; 4 – вклад сил трения

Выводы

Прочностные характеристики ледяного поля зависят от:

- объемов и типов ледовых образований;
- физико-механических характеристик ледового покрова;
- скоростей перемещения ледового покрова;
- степени взаимодействия ледяных осколков с гидротехническими сооружениями;
- геометрии контактных плоскостей сооружения.

Влияние движущегося ледяного поля на сооружения, находящиеся в морских акваториях отличаются от влияния на аналогичные объекты в пресноводных акваториях по следующим признакам:

- возможно образование вибраций в зависимости от увеличения площади ледяного поля;
- в морских акваториях сбор нагрузок от ветра и подводных течений на ледяной покров производится с больших площадей;
- степень воздействия на контактные площадки опор и откосов гидротехнических сооружений зависит от скорости движения ледяного поля: на реках скорость движения выше, но в тоже время толщина льда меньше;
- в русле рек легче предусмотреть мероприятия по снижению влияния ледяного покрова на гидротехнические сооружения, так как скорости и направления движений строго определены, в отличие от открытых акваторий, где скорость и направление движения ледяного поля могут меняться
- в речных акваториях не образуются торосы, которые оказывают наиболее губительное влияние на гидротехнические сооружения.

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 / 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.: Гидрометеоиздат, 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.: Гидрометеоиздат, 1975. – 478 с.

Материал поступил в редакцию 28.11.2019 г.

Сведения об авторах

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, кафедра «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости», ФГБОУ

ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. 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, Б. Академическая, 44; e-mail: andreev-rf@mail.ru

V.YA. ZHARNITSKIY, E.V. ANDREEV

Federal state budgetary educational institution of higher education Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

LOADS IMPACT OF THE MOVING ICE COVER ON HYDRAULIC STRUCTURES

hydraulic engineering structures operated in the zone of negative temperature influence are subject to the influence of moving ice. Therefore, for the maximum effective perception of loads from the moving ice cover by hydraulic structure and minimization of negative consequences, an important role is assigned to the selection of contact plane geometry. Loads on hydraulic objects from ice fields are presented in two variants: the influence of broken ice is usually presented in the form of interaction of the structure with the loose surface of Coulomb or as an influence of consolidated ice. As a rule, the design loads are considered to be the effects from the loose ice field, and the design norms of hydraulic structures are mainly directed to them. It is possible to significantly reduce the impact of loads from the moving ice cover on the hydraulic structure by giving the structure elements a certain inclination in the vertical plane as ice breaks to a greater extent not from compression but from bending. Loads on inclined structures are lower than on vertical ones. It is possible to significantly reduce the influence of loads from the moving ice cover on the hydraulic structure by giving the supports a certain inclination in the vertical plane as the ice breaks to a greater extent not from compression but from bending. This property of ice also explains the fact that loads on inclined structures are lower than on vertical structures. The conclusions present a multi-factor of ice cover impact on contact areas of supports and slopes of hydraulic structures.

Ice load, hydraulic structures, ice field structure, contact surface, ice field, hummocks, ice strength, impact on the structure, load on ice cover.

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'da. – M.: Mir, 1983. – S. 282-297.
5. **Skokov R.N.** Prochnost l'da v pribrezhnoj zone moray / Trudy DVNII, vyp. 125: Voprosy okeanografii. – L.: Gidrometeoizdat, 1986. – S. 84-91.
6. SP 38.13330.2012 Nagruzka vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzheniya (Volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya

redaktsiya SNIIP 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
28.11.2019

Information about the authors

Zharnitskiy Valerij Yakovlevich, doctor of technical sciences, head of the department «Bases and foundations, building and expertise of objects of real estate», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., 44; e-mail: zharnitskiy@mail.ru

Andreev Evgenij Vladimirovich, candidate of technical sciences, head of the department «Bases and foundations, building and expertise of objects of real estate», FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., 44; e-mail: andreev-rf@mail.ru