

УДК627.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ЛЬДА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Рогачко С.И. (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса*)

В статье приведены методика и результаты экспериментальных исследований локального давления льда, а также рекомендации по его расчету.

Введение

Многолетний ряд гидрометеорологических наблюдений в Украине показывает, что в зимы редкой повторяемости акватории рек озёр и морей, омывающих южные границы государства, покрываются устойчивыми ледяными покровами. При этом толщина льда на реках и морях в зонах активных и пассивных припаев может достигать до 0,6м. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании гидротехнических сооружений и мостовых опор. Дрейфующий лед такой толщины будет оказывать существенное силовое воздействие на сооружения. Ледовая нагрузка будет значительно превышать совместную нагрузку от волн и течений. По этой причине она является определяющей при оценке общей устойчивости проектируемых сооружений. Действующие в ряде стран нормативные документы, содержат рекомендации по расчету равнодействующей ледовой нагрузки на сооружения от различных типов ледовых образований. Тем не менее, при проектировании ледостойких конструкций необходимо также располагать информацией и о локальном давлении льда в зоне контакта с сооружением.

Во всероссийском нормативном документе по определению нагрузок на гидротехнические сооружения /1/ отсутствуют рекомендации по расчету локального ледового давления. Рекомендации ведомственных норм /2/ представляются недостаточно обоснованными. Такая ситуация затрудняет проектирование гидротехнических сооружений, как морских, так и речных, которые подвергаются силовому воздействию различного рода дрейфующих ледовых образований. По этой причине в рамках международной программы INTAS были проведены экспериментальные исследования локальных ледовых нагрузок /3, 4/.

Методика экспериментальных исследований локального давления льда

Эксперименты по исследованию локального давления льда производились в естественных условиях на пресноводном озере в течение нескольких зимних периодов. В качестве ледовых образований использовались натуральный ледяной покров озера, а также модели консолидированной части торосов с различной пористостью.

Опыты по вдавливанию жесткого штампа в модели консолидированной части тороса с различной пористостью проводились на специально созданной передвижной экспериментальной установке, оснащенной грузоподъемным устройством. Общий вид установки представлен на рис. 1.

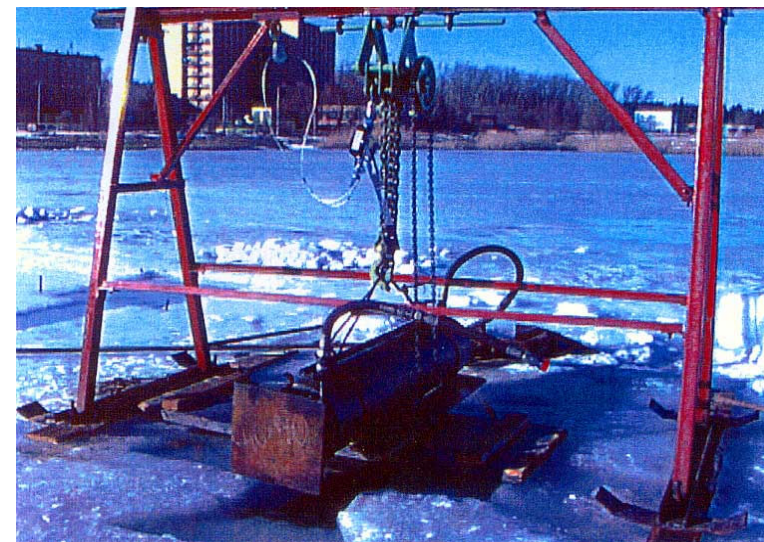


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Основным ее предназначением являлось перемещение и фиксация в исходное положение гидравлического цилиндра. Гидравлический цилиндр с помощью системы гибких шлангов высокого давления соединялся с электрогидравлической станцией. На штоке гидроцилиндра поочередно крепились жесткие штампы размером 0,1 × 0,1 м; 0,25 × 0,15 м и 0,4 × 0,4 м, а на торце упорная плита усиленной

жесткости. Её площадь в 2,5 раза превышала площадь внедряемого штампа. Жесткость штампов и упорной плиты исключала их деформации в процессе опытов.

Перед моделью тороса в естественном ледяном поле вырезалось сквозное отверстие прямоугольной формы для расположения в нем гидроцилиндра с жестким штампом на штоке и опорной плиты в торце. Передвижная экспериментальная установка с гидроцилиндром выставлялась над прорезью в требуемое, для каждого из опытов, плановое положение. Далее, с помощью грузоподъемного устройства гидроцилиндр, с зафиксированным на его штоке, жестким штампом и опорной плитой в торце, погружался в воду, юстировался в необходимое планово-высотное положение. Предварительный распор гидроцилиндра производился так, чтобы лицевая часть жесткого штампа непосредственно соприкасалась с моделью тороса, а тыловая опорная плита с торцом прорези в ровном ледяном поле.

В процессе каждого из опытов регистрировались равнодействующая ледовой нагрузки на штамп, а также его линейное перемещение во времени. Процесс проведения опытов фиксировался видео и фото камерами. Аналогичным образом производились опыты и в естественном ледяном поле.

После опытов по внедрению жесткого штампа в модели торосов и в естественный ледяной покров производились серии испытаний соответствующих образцов льда на одноосное сжатие.

Результаты экспериментальных исследований

В течение трех зимних периодов были осуществлены опыты по внедрению жестких металлических штампов различной площади ($10 \times 10 \text{ см}^2$; $40 \times 40 \text{ см}^2$ и $15 \times 25 \text{ см}^2$) в ровный естественный ледяной покров озера, а также в модели консолидированной части торосов.

Сначала были реализованы две серии опытов по внедрению жесткого металлического штампа площадью $0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$. В первой серии опытов штамп внедрялся в модели консолидированной части торосов с нулевой пористостью. Средняя скорость внедрения штампа в лед, зафиксированная в опытах, равнялась $29,7 \times 10^{-2} \text{ мм/с}$. Максимальное давление льда по площади штампа по результатам опытов достигало 10,21 МПа, а минимальное - 9,55 МПа. Отклонение отдельных значений от среднего не превышало 11%, что является весьма удовлетворительным при проведении экспериментальных исследований в ледотехнике. Следует отметить, что глубина внедрения

штампа в торос колебалась от 90 мм до 100 мм. Непосредственно перед штампом наблюдалось смятие и дробление льда.

По аналогичной методике были проведены опыты второй серии по внедрению штампа в естественный ледяной покров озера. Максимальное давление льда в этих опытах достигало почти 11 МПа, а минимальное - 10,3 МПа. Отклонение отдельных величин ледового давления от среднего значения не превышало $\pm 6\%$. Средняя скорость внедрения штампа в лед равнялась $30 \times 10^{-2} \text{ мм/с}$. Как и в предыдущей серии опытов, в процессе внедрения штампа в лед происходило горизонтальное скалывание, расположенной над верхней кромкой штампа части льда, которое также сопровождалось возникновением и развитием сети трещин. Результаты обеих серий опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты опытов при внедрении металлического штампа в лед

№ п/п	тип льда	площадь контакта, мм ²	h _d , мм	Нагрузка на штамп F _{max} , кН	давление под штампом		10 ⁻² e, мм/с	t _i , °С
					в опыте P _i , МПа	Среднее P _i , МПа		
1	Тор. №1	100×100	115	73,3	7,33	10,21	33	-11
2	тор. №2	100×100	135	126,5	12,65		28	
3	тор. №3	100×100	130	106,6	10,66	28		
4	ровное	100×100	130	115,6	11,56	10,94	32	
5	поле	100×100	135	103,2	10,32	28		

Как видно из данных таблицы 1, разница в значениях ледового давления и нагрузки на штамп от ровных ледяных полей и средней части моделей полей торосения находилась в пределах точности измерений.

В течение января следующего зимнего сезона в естественном ледяном покрове озера, толщина которого равнялась более 0,4 м, были изготовлены пять моделей торосов с нулевой пористостью и пять моделей торосов со средней пористостью 16%. В первой серии экспериментов жесткий штамп внедрялся в естественный ледяной покров. Несмотря на то, что площадь лицевой поверхности жесткого штампа составляла $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$, вследствие того, что в каждом из опытов проводилась коррекция высотного положения штампа, его полезная площадь контакта с ледовым образованием изменялась

незначительно. Так, в опытах с ровным ледяным полем, она составляла $0,4 \times 0,345 \text{ м}^2$. Результаты данной серии опытов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты опытов при внедрении металлического штампа в естественное ровное ледяное поле

№ п/п	тип льда	площадь контакта, мм ²	h _д , мм	Нагрузка на штамп F _{max} , кН	давление под штампом		V, мм/с	-t _i , °С
					в опыте	Среднее		
					P _i , МПа	P̄ _i , МПа		
1	ровное ледяное поле	400×345	560	532,68	3,86	3,82	54	-1
2		400×345	560	636,18	4,61			
3		400×345	560	414,00	3,00			
4		400×345	560	517,50	3,75			
5		400×345	560	532,68	3,86			

Реализация ледовой нагрузки, зарегистрированная в опытах, характерна для хрупкого разрушения льда. Максимальное осредненное давление по площади штампа не превышало 4,61 МПа, а минимальное 3,00 МПа. Глубина внедрения штампа в ровное поле составляла 0,63 м, а средняя скорость внедрения равнялась примерно 54 мм/с. В процессе внедрения происходило дробление льда, сопровождавшееся сколом поверхностной части льда над верхней и нижней кромками жесткого штампа. Опытные данные с моделями торосов с нулевой пористостью представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты опытов при внедрении металлического штампа в модель тороса с нулевой пористостью

№ п/п	тип льда	площадь контакта мм ²	h _д , мм	нагрузка на штамп	давление под штампом		V, мм/с	-t _i , °С
					в опыте	Среднее		
					P _i , МПа	P̄ _i , МПа		
1	тор. № 1	400×335	530	402,00	3,00	3,09	57	0
2	тор. № 2	400×300	530	511,20	4,26			
3	тор. № 3	400×370	530	364,08	2,46			
4	тор. № 4	400×340	530	359,04	2,64			

Среднее максимальное давление по поверхности штампа достигало 4,26 МПа, среднее минимальное не превышало 2,46 МПа, а среднее опытное составило 3,12 МПа. Скорость внедрения штампа в консолидированную часть модели тороса в среднем равнялась 57 мм/с. Как и в предыдущей серии опытов, в процессе разрушения модели консолидированной части тороса, происходило горизонтальное скалывание пластин льда над верхней и нижней кромками штампа, сопровождавшееся развитием сети трещин. Кроме этого, непосредственно у фронтальной плоскости штампа, происходило разрушение льда дроблением и смятием (рис. 2). Следует заметить, что подобный тип разрушения пресноводного ледяного поля, зафиксированный в лабораторных условиях, отмечен и в работах других исследователей /5, 6/.

Аналогичным образом были проведены опыты по внедрению жесткого штампа в пористую модель консолидированной части тороса. Как показали результаты обработки опытов, в среднем их пористость составляла 16%.

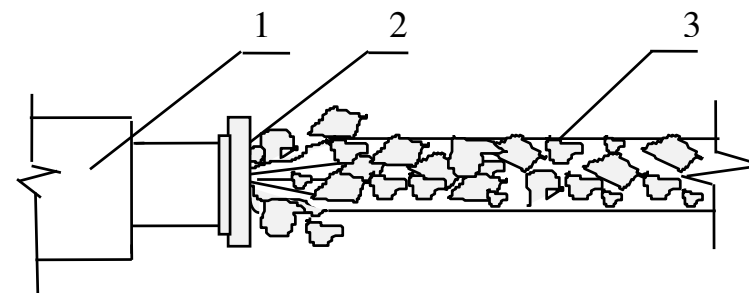


Рис. 2. Схема разрушения консолидированной части поля торосения с нулевой пористостью

1 – гидравлический цилиндр; 2 – индентор; 3 – консолидированная часть поля торосения.

Благодаря такому существенному наличию пор в консолидированной части тороса характер разрушения в этих экспериментах несколько отличался. Это отличие заключалось в том, что развитие трещин происходило по пустотам между обломками льда, расположенным хаотично в теле модели. Перед штампом, в процессе его движения, зафиксировано выпучивание обломков льда. Тем не менее, после остановки штампа, как и в предыдущих сериях опытов,

наблюдался клиновидный скол льда. Скорость внедрения штампа в торос в этих опытах в среднем равнялась 108 мм/с. Результаты испытаний с моделями торосов с пористостью представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты опытов при внедрении металлического штампа в модель тороса с 16 %-ной пористостью

№ п/п	тип льда	площадь контакта, мм ²	h _d , мм	Нагрузка на штамп F _{max} , кН	давление под штампом		V, мм/с	- t _i , °С
					в опыте	Среднее		
					P _i , МПа	P̄ _i , МПа		
1	тор. № 1	400×400	520	363,2	2,27	2,255	108	0
2	тор. № 2	400×400	530	358,4	2,24			0

На основании анализа опытных данных, представленных в таблице 4, было установлено, что среднее максимальное значение локального давления по поверхности штампа не превышало 2,27 МПа. Сравнение осредненных значений ледовых давлений под штампом показало, что в опытах с моделями торосов с нулевой пористостью оно почти в 1,4 раза больше по сравнению с моделями торосов с 16% пористостью.

В заключительных экспериментальных исследованиях, проведенных в третьем зимнем сезоне, жесткий металлический штамп размером 15 × 25 см внедрялся в ровное ледяное поле и в модель средней части тороса с 0% пористостью. Результаты опытов представлены в таблице 5.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований на озере сравнивались с опытными данными, обобщенными Сандерсоном /7, 8/. Опытные значения среднего локального давления под жесткими штампами, в зависимости от площади контакта, были сравнены с известной функциональной зависимостью (рис. 3).

Сравнение показало, что среднее локальное давление под штампами уменьшается соответственно с увеличением его площади, что не противоречит опытными данным аналогичных исследований, выполненных другими исследователями /7, 8/.

Результаты опытов по внедрению металлического штампа в ровное ледяное поле и в консолидированную часть модели тороса

№ п/п	тип ледового образования	размеры штампа, мм	площадь контакта, м ²	усилие на штамп F _{max} , кН	давление под штампом P _i , МПа	\bar{P}_i , МПа	δ , %	Скорость внедрения V, мм/с	t _i , °С
1 2 3 4	ровное ледяное поле	250×150	0,0375	202,52 172,64 212,48 205,80	5,40 4,60 5,67 5,49	5,29	±14	2,4	- 1
5 6 7	торос с нулевой пористостью	250×150	0,0375	185,92 182,60 175,96	4,96 4,87 4,69	4,84	±5	2,3	- 1

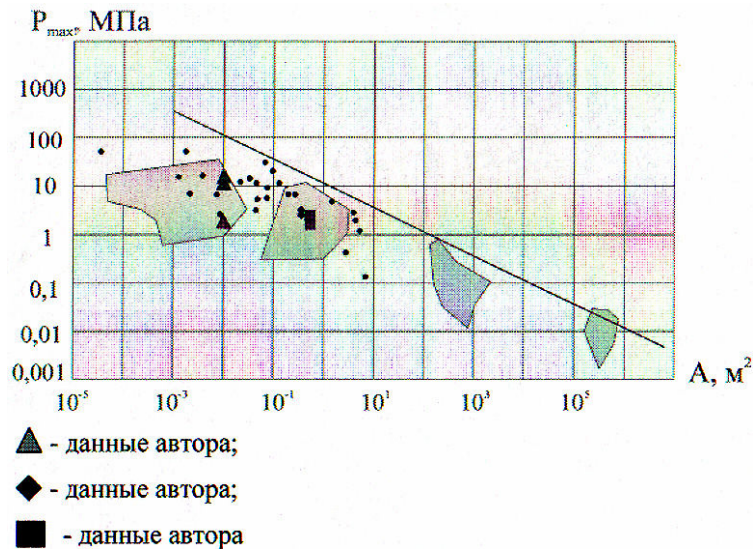


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных автора с обобщенными данными Сандерсона

Используя экспериментальные значения ледовой нагрузки на штампы различной площади, при их внедрении в естественный ледяной покров и в модели консолидированной части торосов, были определены опытные значения коэффициентов смятия. Для этой цели использовалась известная классическая зависимость [1, 9], согласно которой суммарная ледовая нагрузка на вертикальную преграду при внедрении в лед, определяется из следующего выражения:

$$F = b \cdot h_d \cdot R_c \cdot I, \quad (1)$$

где b – ширина преграды; h_d – толщина льда; R_c – прочность образцов льда из ледового образования, ориентированных параллельно плоскости намерзания, на одноосное сжатие; I – коэффициент смятия, зависящий от относительной ширины преграды b/h_d .

Тогда:

$$I = F / (b \cdot h_d \cdot R_c), \quad (2)$$

где $F / (b \cdot h_d)$ – эффективное давление льда по площади штампа P_1 .

В конечном итоге:

$$I = P_1 / R_c. \quad (3)$$

С целью итогового анализа экспериментальных исследований, осредненные значения локального ледового давления, при внедрении штампов различной площади в ровные ледяные поля и в консолидированные части моделей полей торосения, включены в сводную таблицу 6.

На основании анализа результатов опытов было установлено, что с уменьшением площади контакта увеличивается эффективное давление льда на штамп. Так для ровного ледяного поля, при площади контакта меньше 1600 cm^2 ($S = h_i^2$), давление, при котором происходит разрушение льда, возрастает с $3,82 \text{ МПа}$ до $10,94 \text{ МПа}$ (в $2,86$ раза). В случае внедрения штампа в консолидированную среднюю часть торосов с нулевой пористостью давление льда возрастает с $3,04 \text{ МПа}$ ($S = h_i^2$) до $10,21 \text{ МПа}$ ($S = 0,06h_i^2$), то есть в $3,36$ раза. Это обстоятельство объясняется тем, что при площади $S = 1600 \text{ cm}^2$ контакт штампа с ледовым образованием происходит по всей его толщине (h_i), а это значит, что в ледовом поле, в контактной зоне имеет место плоское напряженное состояние. Во втором случае, при площади штампа $S = 100 \text{ cm}^2$, силовое воздействие на ледовое образование осуществляется не по всей его высоте, а лишь по ее части ($h = 0,31h_i$ – для ровного поля и $h = 0,25h_i$ – для торосов). По этой причине лед в зоне контакта находится в стесненных условиях и поэтому испытывает объемное напряженное состояние.

Анализ результатов опытов, приведенных в таблице 6, позволил установить, что при одной и той же относительной ширине контактной зоны ($b/h_i = 1,0$), но различной относительной высоте $h/h_i = 1,0$ (для штампа $40 \times 40 \text{ см}$) и $h/h_i = 0,6$ (для штампа $25 \times 15 \text{ см}$), эффективное локальное давление возрастает с $3,82$ до $5,29 \text{ МПа}$ (в $1,38$ раза) для ровного поля и в $1,74$ раза в случае консолидированной части тороса с нулевой пористостью. Таким образом, в экспериментах был зафиксирован рост локального давления льда при уменьшении высот штампов одинаковой ширины. Это важное обстоятельство необходимо учитывать при расчетах местной прочности на конструктивные элементы опорных частей гидротехнических сооружений сложных форм. На основании аппроксимации опытных данных таблицы 6, была получена эмпирическая зависимость для определения коэффициента смятия (индентации) I :

Результаты экспериментальных исследований локального давления льда

Типы ледовых образований	штамп $b \times h$, мм	h_i , мм	b/h_i	h/h_i	bh/h_i^2	\bar{P}_i , МПа	$I = \bar{P}_i/R_c$	$I_{расч}$
Ровное поле	100 × 100	320	0,31	0,31	0,10	10,94	5,28	5,49
	250 × 150	250	1,00	0,60	0,60	5,29	3,39	2,98
	400 × 400	400	1,00	1,00	1,00	3,82	2,53	2,56
Консолидированная часть модели поля торошения с нулевой пористостью	100 × 100	400	0,25	0,25	0,06	10,21	6,81	6,06
	250 × 150	350	0,71	0,43	0,31	4,84	3,72	3,70
	400 × 400	400	1,00	1,00	1,00	3,04	2,74	2,56

$$I = \left(\frac{1}{\sqrt[4]{(b/h_i)(h/h_i)}} + 0,5 \right)^2 + 0,31, \quad (4)$$

которая в графическом виде представлена на рис. 4.

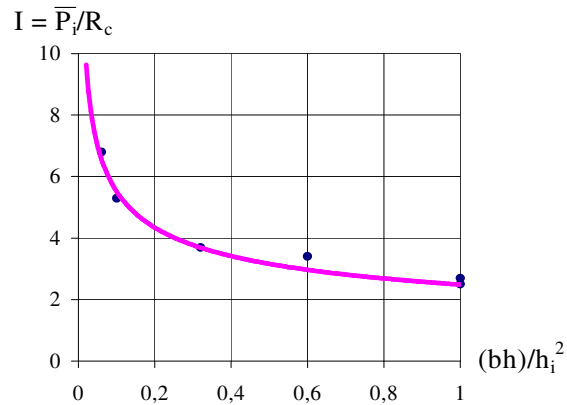


Рис. 4. Зависимость коэффициента смятия от относительной площади контактной зоны

В пространственных координатах коэффициент смятия I представляет собой поверхность. Так, на рис. 5 графически продемонстрировано изменение коэффициента I и, соответственно, локального давления льда в зависимости от относительной ширины (b/h_i) и высоты (h/h_i) контактной зоны. Давление льда стремится к увеличению при площадях контакта менее $0,25h_i^2$.

На рис. 5 это соответствует той области поверхности, которая располагается выше кривой, представленной на рис. 4. Далее, на величину локального давления начинает оказывать значительное влияние также и стесненность поперечных деформаций по толщине льда /3, 4/. Таким образом, прочность льда в локальной контактной зоне начинает определяться объемным напряженным состоянием в тех случаях, когда высота контактной зоны в 2 раза меньше толщины льда, а не в $4 \div 5$ раз, как утверждает Кру D.R. /10/. Кроме того, в опытах

было зафиксировано, что наиболее интенсивный рост локального давления льда отмечался при площадях контакта менее $0,12h_i^2$.

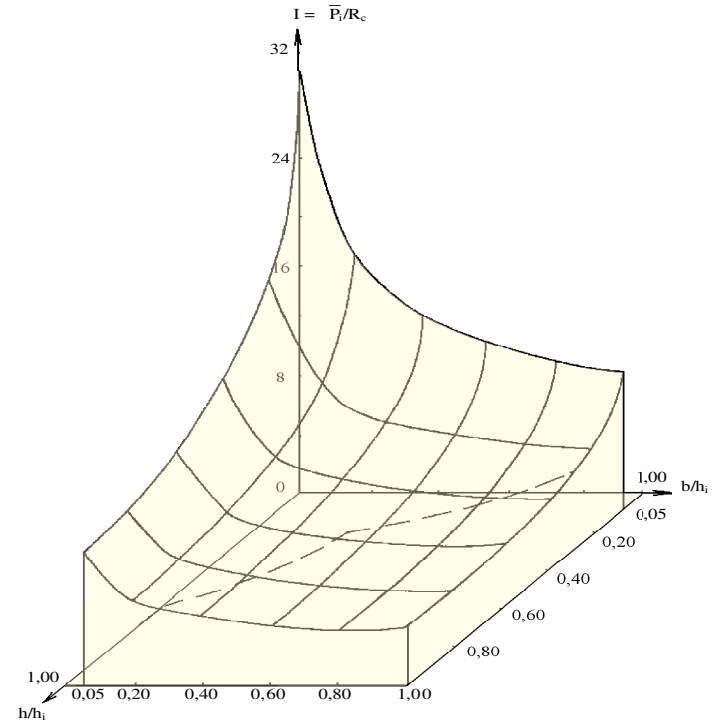


Рис. 5. Коэффициент смятия в пространственных координатах

С учетом статистической обработки и анализа результатов опытов, нормативное локальное давление от ровных ледяных полей можно определять, используя следующую эмпирическую зависимость:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= k_v \cdot I \cdot R_c (1 + \chi v) \\ I &= \left(\frac{1}{\sqrt[4]{bh/h_i^2}} + 0,5 \right)^2 + 0,31, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где k_v – коэффициент, учитывающий скорость деформирования льда (при $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/сек}$, $k_v = 1, /1/$);

I – коэффициент смятия (индентации) при локальном давлении;

R_c – среднеарифметическое значение прочности образцов льда при одноосном сжатии, ориентированных параллельно плоскости намерзания ровного ледяного поля;

χ – число стандартов;

v – коэффициент вариации прочности льда.

Результаты расчетов локальных ледовых давлений, полученных с помощью, предлагаемой в настоящей работе эмпирической зависимости (5), сравнивались с расчетными данными по рекомендациям других авторов /11, 12, 13, 14/. Расчеты производились для условий, когда толщина ровного ледяного поля h_1 была принята равной 2 м, а прочность льда на одноосное сжатие – 2 МПа. Ровное ледяное поле воздействовало на сооружение в виде вертикальной стенки. При этом максимальная ширина контактной зоны была ограничена величиной соответствующей $3h_1$ (6 м).

Результаты расчетов локальных ледовых давлений, полученных с помощью, предлагаемой в настоящей работе эмпирической зависимости (5), сравнивались с расчетными данными по рекомендациям других авторов /11, 12, 13, 14/. Расчеты производились для условий, когда толщина ровного ледяного поля h_1 была принята равной 2 м, а прочность льда на одноосное сжатие – 2 МПа. Ровное ледяное поле воздействовало на сооружение в виде вертикальной стенки. При этом максимальная ширина контактной зоны была ограничена величиной соответствующей $3h_1$ (6 м).

Сравнение результатов расчета в графическом виде проиллюстрировано на рис. 6.

Так, значения локального ледового давления, рассчитанные по методикам, представленным в работах /11, 12, 14/, находятся в доверительном интервале $\bar{P}_1 \pm 2\sigma$.

При площадях контакта, находящихся в пределах $0,75 \leq S \leq 12 \text{ м}^2$, локальное ледовое давление, рассчитанное по предложению В.П. Афанасьева /14/, практически совпадает со среднеарифметическими значениями, полученными по эмпирической зависимости (5). С уменьшением площади контакта до $0,1 \text{ м}^2$ расхождения в расчетных локальных давлениях льда увеличиваются примерно в 2,4 раза.

Значения локального ледового давления по рекомендациям работы /4/ при площадях контакта $0,3 < S \leq 12 \text{ м}^2$ тяготеют к нижней границе

доверительного интервала, а при $S \geq 0,3 \text{ м}^2$ стремятся к верхней его границе. Расчетные значения локального ледового давления по рекомендациям работы /2/ находятся за пределами нижней границы, рассматриваемого доверительного интервала.

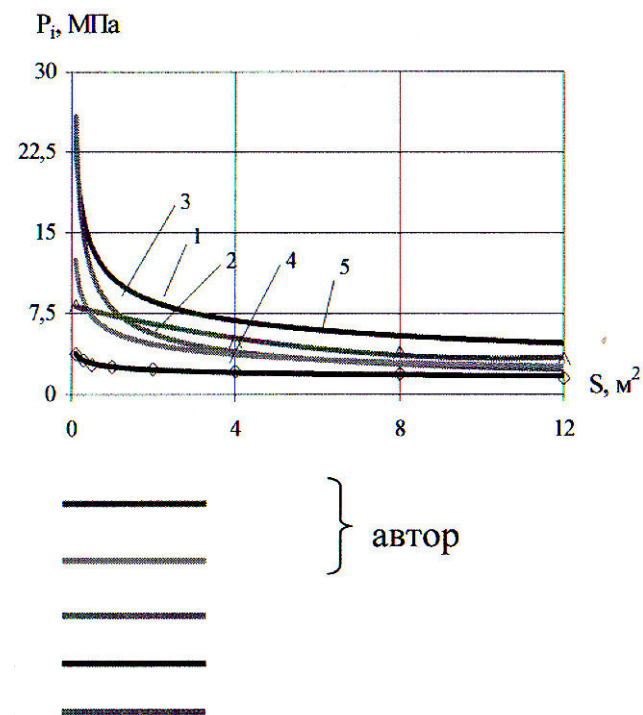


Рис. 6. Зависимость величины локального ледового давления от площади контактной зоны

Так, значения локального ледового давления, рассчитанные по методикам, представленным в работах /11, 12, 14/, находятся в доверительном интервале $\bar{P}_1 \pm 2\sigma$.

При площадях контакта, находящихся в пределах $0,75 \leq S \leq 12 \text{ м}^2$, локальное ледовое давление, рассчитанное по предложению В.П. Афанасьева /14/, практически совпадает со среднеарифметическими значениями, полученными по эмпирической зависимости (5). С

уменьшением площади контакта до $0,1 \text{ м}^2$ расхождения в расчетных локальных давлениях льда увеличиваются примерно в 2,4 раза.

Значения локального ледового давления по рекомендациям работы /4/ при площадях контакта $0,3 < S \leq 12 \text{ м}^2$ тяготеют к нижней границе доверительного интервала, а при $S \geq 0,3 \text{ м}^2$ стремятся к верхней его границе. Расчетные значения локального ледового давления по рекомендациям работы /2/ находятся за пределами нижней границы, рассматриваемого доверительного интервала.

Полученная в настоящей работе эмпирическая зависимость (5) позволяет производить более достоверные расчеты локального давления льда на проектируемые гидротехнические сооружения с учетом площади контакта, толщины и прочности льда, а также скорости его деформирования. Следует также отметить, что другие исследователи не принимали во внимание изменение относительной высоты площади контакта и скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ ледовых образований в процессе их взаимодействия с конструкциями опорных частей сооружений.

Рекомендации по расчету локального давления льда

На основании анализа результатов экспериментальных исследований локальных ледовых давлений, а также сопоставительных расчетов с использованием различных методик в нормативные документы /1/ были сформулированы рекомендации по определению максимальных значений локального давления льда.

Так основная расчетная зависимость (5), с целью удобства применения в проектной практике, была преобразована в традиционную, для нормативных документов, форму:

$$P_i = k \cdot k_v \cdot I \cdot R_c, \quad (6)$$

где k – коэффициент /1/, учитывающий тип льда: для пресноводного льда принимается равным 1; для морского льда равным 1,164;

k_v – коэффициент, учитывающий эффективную скорость деформации льда, принимается в соответствии с данными таблицы 31 СНиП 2.06.04-82* /1/;

I – эмпирический коэффициент, учитывающий сложное напряженно-деформированное состояние льда в зоне контакта с сооружением, для максимальных значений локальных ледовых давлений, определяется по формуле:

$$I = \left(\frac{1,12}{\sqrt[4]{S/h_d^2}} + 0,56 \right)^2 + 0,93, \quad (7)$$

где S – площадь контакта ровного ледяного поля или консолидированной части поля торошения, с сооружением, м^2 ;

h_d – расчетная толщина ровного ледяного поля, м;

R_c – нормативная прочность льда на одноосное сжатие, МПа, определяется опытным путем, при отсутствии опытных данных R_c рекомендуется определять по формулам (5.3, 5.4) /1/.

Выявленная в настоящей работе закономерность снижения интегральной прочности торосов от их пористости, позволяет использовать зависимость (8) для определения максимальных значений локальных ледовых давлений на гидротехнические сооружения не только от воздействия ровных ледяных полей, но и от полей торошения. Очевидным является тот факт, что наибольшие локальные давления при этом, будут проявляться на сооружениях в зонах контакта со средней консолидированной частью одиночного тороса или поля торошения. При определении максимальных значений локальных давлений от воздействия средней консолидированной части полей торошения в расчетную зависимость (8) необходимо ввести параметр, характеризующий ее интегральную прочность:

$$P_m = k \cdot k_v \cdot I_m \cdot R_m, \quad (8)$$

$$R_m = R_{cm} \cdot k_p, \quad (9)$$

где R_m – интегральная прочность средней части поля торошения;

k_p – коэффициент, учитывающий снижение интегральной прочности средней части тороса R_m в зависимости от ее пористости p_m .

Следует отметить, что при определении параметра I_m в расчетную зависимость (9) вместо толщины ровного ледяного поля h_d вводится толщина средней консолидированной части торосистого образования h_m .

Заключение

Настоящие рекомендации включены в ведомственный документ Департамента Морского транспорта Министерства Транспорта РФ /17/.

Литература

1. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и взаимодействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)/Минстрой России. - М.: ГП ЦПП, 1995. 48 с.
2. ВСН 41.88. Проектирование ледостойких стационарных платформ. Миннефтепром СССР, М., 1988, 138 с.
3. Исследование силового воздействия полей торошения. Отчет о НИР, INTAS Report "CHOICE OF OFFSHORE STRUCTURES FOR ARCTIC REGIONS", М., 1996.
4. Определение влияния пористости на характеристики льда. Отчет о НИР. INTAS Report "CHOICE OF OFFSHORE STRUCTURES FOR ARCTIC REGIONS", М., 1996.
5. Muhonen A., Karna T., Eranti E., Riska K., Jarvinen E. and Lehmus E. Laboratory indentation tests with thick freshwater ice. vol. 1. Techn. Res. Centre of Finland. Espoo, 1992, 198 p.
6. Timco G.W. Indentation and penetration of edge-loaded freshwater ice sheets in the brittle range. Proc. of the fifth OMAE-1986 Symp., vol 4, p. 444-452.
7. Iyer S.H. A state of the art review of local ice loads for the design of offshore structures. Proc. IAHR Ice Symp., Sapporo, Japan, 1988, p. 509-566.
8. Sanderson T.J. A Pressure Area Curve for Ice. Proc. of IAHR Symposium, Iowa City, Iowa, 1986.
9. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения. –Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962, 224 с.
10. Kry D.R. Ice Forces on wide Structures. Third Canadian geotechnical colloquim, Can. Geotech. J., 1980, vol. 17, p. 97-113.
11. Masterson D.M., Johnson R., Nevel D., Kenny J. and Spencer P.A. Pressure vs. area relationships from medium scale field in impact tests. IAHR (11th International Ice Symposium, Banff.), 1992.
12. Masterson D.M. and Frederking R.M.W. Local contact pressures in ship/ice and structure/ice interactions. Cold Regions Science and Technology, Amsterdam, 1993, vol. 21, p. 169-185.
13. Hysing T. and Bach-Gansmo O. Loads on Offshore Structures due to Multi – Years Ridges. Marine Structures and Ships in Ice. Report No. 8-07, 1981.
14. Афанасьев В.П., Никитин В.А., Смирнов В.Н. Об определении локальных ледовых нагрузок. Труды пятой международной конференции "Освоение шельфа арктических морей России", Санкт-Петербург, 2001.
15. CSA (Canadian Standards Association). General Requirements, Design Criteria, the Environment, and Loads. Canada, 1992.
16. API (American Petroleum Institute). Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions. American Petroleum Institute Recommended Practice 2N, Dallas, TX, USA, 1994.
17. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. Р 31.3.07-01, М., 2001. Дополнение и уточнение СНиП 2.06.04–82* "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов), М., 1995.