

с учетом циклической неустойчивости и одностороннего накопления пластических деформаций. Результат такого расчёта для  $\sigma_{max} = 638\text{МПа}$  и  $R_\sigma = -1,0$  показан на рисунке 6.

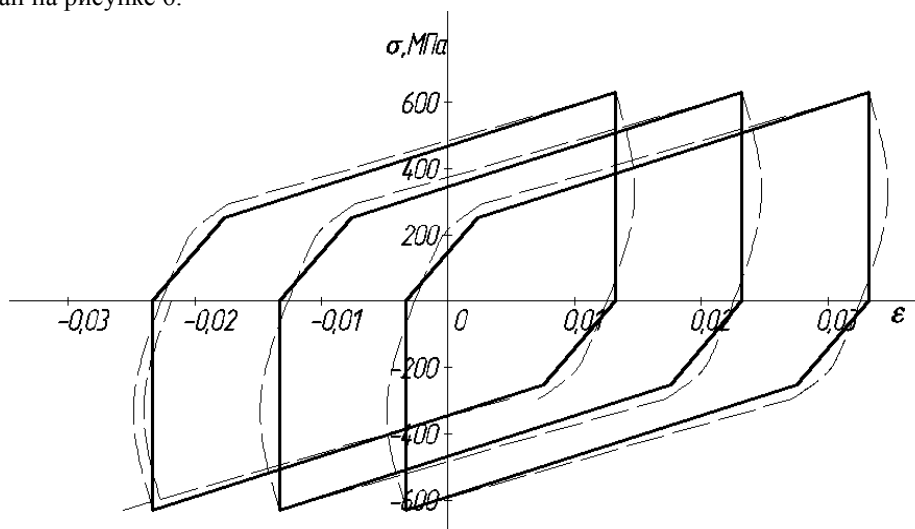


Рисунок 6 – Диаграмма циклического деформирования

Задачей дальнейших исследований является прогнозирование долговечности малоциклового усталости с помощью расчётных диаграмм малоциклового усталости.

#### Список литературы

1. Павлов П.А. Механические состояния и прочность материалов.-Л.:Изд.ЛГУ,1980-175С.
2. Пенкин А.Н. Построение диаграмм малоциклового деформирования при расчётах на малоцикловую усталость в условиях сложного напряженного состояния//Известия вузов. Машиностроение. 1989.№12.С11-14.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА НА ИЗГИБ ВДОЛЬ ПОБЕРЕЖЬЯ БОХАЙСКОГО ЗАЛИВА. СРАВНЕНИЕ С ПРЕДЕЛОМ ПРОЧНОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА НА ИЗГИБ МОРЕЙ РУССКОЙ АРКТИКИ.

Ли Шуньин, Пэн Чэн, Пяткин В.А.

#### АННОТАЦИЯ:

В процессе данного исследования в натуральных и лабораторных условиях были измерены показатели сопротивления образцов морского льда изгибу, собранные в девяти точках вдоль береговой линии Бохайского залива. В ходе экспериментов также были измерены солёность и температура морского льда, величины, которых оказывают влияние на предел прочности льда при изгибе. Анализ характеристик, влияющих на прочность льда, проводился в заливе Лайчжоу, на западном и восточном побережье Ляодунского залива. Также в исследовании рассмотрено влияние объема рассола (температуры и солёности) и скорости нагружения на характеристики сопротивления морского льда изгибу. Выполненные исследования сопоставлены с результатами исследований прочностных характеристик льда Арктических морей России. А так же даны рекомендации по использованию строительных и проектировочных норм и правил, используемых в России для проектирования морских сооружений в Бохайском заливе.

**Ключевые слова:** Бохайский залив; морской лёд; предел прочности при изгибе; экспериментальные испытания

Ледовая нагрузка является одним из главных факторов внешнего воздействия, значение которого необходимо учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации морских сооружений, предназначенных для работы в районах с ледовыми условиями. Наряду с тем, что величина и вид ледовой нагрузки связаны с формой и габаритами морского сооружения, также на их значения

оказывают влияние физико-механические свойства льда.

При взаимодействии льда с морскими ледостойкими платформами конической формы, искусственными островами с наклонными боковыми гранями и другими морскими сооружениями основное разрушения льда происходит за счет изгиба. При этом величина ледовой нагрузки зависит от предела

прочности льда на изгиб. Помимо этого, на значение предела прочности оказывают влияние трещинообразование и нагромождение обломков льда, вызванных действием волн, а так же несущая способность ледяного покрова.

Прочность льда на изгиб определяется тремя основными методами:

- по разрушению балок вырезанных из льда, свободно лежащих на опорах;
- по разрушению консолей (клавишей);
- по разрушению круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре, ледяной пластины, нагружаемой в центре.

Для первого способа вырезается из ледяного покрова прямоугольная балка, устанавливается на двух поперечных опорах (призматических либо цилиндрических) и нагружается посередине между опорами. Величина  $\sigma$  и вычисляется по формуле:

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{PL_0}{bh^2} \quad (1)$$

где: P - разрушающая нагрузка;  $L_0$  - расстояние между опорами; b - ширина балки; h - толщина (высота) балки.

Второй способ используется в двух вариантах. В первом варианте из льда вырезается прямоугольная балка и один конец закрепляется в испытательном устройстве, второй - нагружается. Величина  $\sigma$  определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{6PL_0}{bh^2} \quad (2)$$

где: P - разрушающая нагрузка;  $L_0$  - расстояние между опорами; b - ширина балки; h - толщина (высота) балки.

Во втором варианте консоль вырезается непосредственно в ледяном покрове и остается скрепленной с ним одним из своих концов. Такую консоль зачастую называют клавишей. Нагрузка на свободный конец консоли осуществляется как снизу вверх (из воды в воздух), так и сверху вниз. При анализе результатов испытаний обычно отмечается, что направление действия нагрузки принципиального значения не имеет.

Значение  $\sigma$  и также определяется по выражению (2).

Третий способ (разрушение круглых пластин на кольцевой опоре) получил распространение в связи с простотой технологии выпиливания образцов из кернов, вырезанных кольцевым буром. Величина  $\sigma$  в этом способе определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{2\pi mh^2} \left[ m + (m + 1) \ln \frac{r}{r_0} - (m - 1) \frac{r_0}{4r^2} \right] \quad (3)$$

где m - величина, обратная коэффициенту Пуассона ( $m \gg 3$ ); h - толщина пластины; r - рабочий радиус пластины (внутренний радиус кольцевой опоры);  $r_0$  - радиус распределения нагрузки ("пятна" нагружения).

Размеры кристаллов, расположение, температура, соленость, направление и скорость нагрузки, размеры образцов и другие критерии существенно влияют на значение предела прочности на изгиб. В работе [1], имеются обобщенные данные по экспериментам, проводимым разными исследователями в натуральных и лабораторных условиях, в результате дополнительных испытаний было выявлено наличие отрицательной экспоненциальной зависимости предела прочности льда на изгиб от квадратного корня из значения объема рассола. В результате натуральных и лабораторных исследований морского льда Бохайского залива в Китае была получена линейная зависимость предела прочности льда на изгиб от квадратного корня из значения объема рассола. В процессе испытания на одноосное сжатие было выявлено влияние скорости нагружения на предел прочности льда. Более того, при разных скоростях нагружения проявились очевидные пластичные и хрупкие свойства изменения структуры льда. Однако предыдущие исследования показали, что предел прочности льда на изгиб не зависит от скорости нагружения. В [1] выдвигалось предположение, что это может быть связано с недостаточным количеством образцов для испытаний. В дальнейшем, результаты испытаний, проводимых в [11], показали, что сопротивление морского льда изгибу усиливается с увеличением скорости нагружения. Кроме того, в процессе испытаний физико-механических свойств льда Бохайского залива в начале 90-х гг. изучался фактор влияния скорости нагружения на предел прочности морского льда на изгиб, в результате чего была выявлена закономерность, заключающаяся в следующем: с ростом скорости нагружения предел прочности на изгиб сначала увеличивается, а затем уменьшается. Для выяснения проявляются ли такие же пластичные и хрупкие свойства в процессе разрушения морского льда на изгиб наряду с аналогичным разрушением при сжатии необходимо проводить дополнительные испытания. Поэтому для последующего анализа влияния скорости нагружения на сопротивление морского льда изгибу требуются, новые экспериментальные исследования.

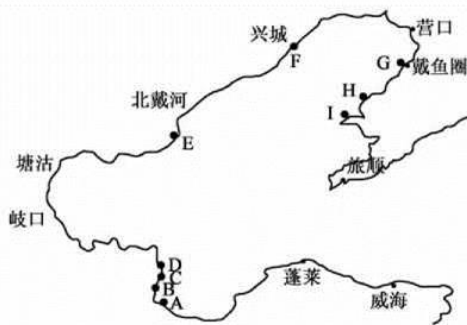


Рисунок 1 – Места проведения испытаний по исследованию прочности морского льда на изгиб вдоль побережья Бохайского залива

1. Сбор образцов для лабораторных испытаний.

За два зимних сезона 2008-2010 гг. были проведены системные исследования физико-механических свойств морского льда вдоль береговой линии Бохайского залива. Были выполнены натурные испытания и сбор образцов для проведения лабораторных испытаний. Расположение мест проведения испытаний и точек сбора образцов льда представлено на Рисунке 1.

Исследование, освещенное в настоящей статье, соответствует нормам китайских и международных стандартов проведения испытаний, а также учитывает показатели состояния морского льда, характерные для региона Бохайского залива.

Для проведения измерений предела прочности морского льда Бохайского залива в качестве образцов для испытаний был выбран неподвижный лед, из которого вырезались прямоугольные параллелепипеды с размерами  $b = 75$  мм,  $h = 75$  мм,  $L = 700$  мм. В процессе сбора образцов одновременно измерялись температура воздуха и соленость по сечению ледяного покрова. Всего за две зимы по побережью Бохайского залива для измерения предела прочности льда на изгиб было взято 155 образцов льда, при этом в лабораторных условиях испытания проводились с 81 образцом.

2. Методика проведения измерений предела прочности морского льда вдоль Бохайского залива на изгиб.

Для определения сопротивления морского льда изгибу в девяти точках измерения по периметру береговой линии Бохайского залива за две зимы в лабораторных условиях применялась методика трехточечного изгиба. В Таблице 1 представлены данные по сбору образцов льда. Способ приложения нагрузки представлен на Рисунке 2, где  $L$  – длина образца льда,  $L_0$  – расстояние между двумя

точками нагружения,  $h$  – толщина образца льда,  $b$  – ширина образца льда. Поскольку в природных условиях морской лед подвержен процессам таяния и влиянию окружающей среды, то его характеристики солености и кристаллической структуры в вертикальном сечении могут существенно отличаться друг от друга, что приводит к различиям и в механических свойствах льда. В ходе измерений прочности льда на изгиб определяющим фактором было растягивающее напряжение, возникшее в нижней части испытываемых образцов. В связи с этим разные способы размещения образцов льда при исследовании их предела прочности на изгиб приводят к разным результатам измерений.

Приложение нагрузки осуществлялось при разных скоростях нагружения, что в конечном итоге привело к разрушению образцов от изгиба, при этом были зафиксированы величины нагрузки с разным временем приложения.

Исходя из особенностей несущей способности свободно плавающей ледяной балки, нормальное напряжение на поперечное сечение образца морского льда рассчитывается по формуле (1).

На Рисунке 3 продемонстрирована кривая зависимости нагрузки на изгиб  $\sigma$  и времени ее приложения в процессе измерений прочности морского льда. При разрушении образца от изгиба нормальное напряжение достигает максимального значения  $\sigma_{\max}$  так, что для предела прочности морского льда на изгиб выполняется равенство  $\sigma_f = \sigma_{\max}$ . На основе данных Рисунка 3 можно определить значение скорости изменения нагрузки на лед  $\sigma'$ , которое является углом наклона касательной к кривой изменения нагрузки, не включая значения точки максимального значения  $\sigma_{\max}$ . В результате проведенных испытаний предел прочности на изгиб составил  $\sigma_f = 1,16$  МПа, скорость нагрузки –  $\sigma' = 0,37$  МПа/с, при температуре льда –  $-8,6^\circ\text{C}$ .

Таблица 1 – Измерения в натуральных и лабораторных условиях предела прочности морского льда на изгиб вдоль побережья Бохайского залива

	Точка сбора образцов		Дата сбора образцов	Количество образцов	Толщина льда, см	Температура, °С	Соленость льда, ‰
Залив Лайчжоу	A	порт Хайхун	23-01-2009 22-01-2010	6 27	20 17	-11,1 -4,5	6,3 4,7
	B	эстакада Гуаньхай	21-01-2009	21	15	-6,5	5,6
	C	причал Хунгуан	20-01-2009 22-01-2010	8 24	11 20	-2,0 -3,3	5,6 5,3
	D	р. Сяодао	21-01-2010	22	33	-5,5	4,1
Ляодунский залив, западное побережье	E	дер. Наньбао	23-01-2010	12	32	-5,4	5,8
	F	городской уезд Синчэн	01-02-2009	15	15	-5,0	4,4
Ляодунский залив, Восточное побережье	G	Баюйцюань	12-02-2009	5	28	-9,0	4,8
	H	Дацзуйцзы	02-02-2009	5	30	-1,5	4,3
	I	о. Чансин	02-02-2009	11	18	-1,5	4,1

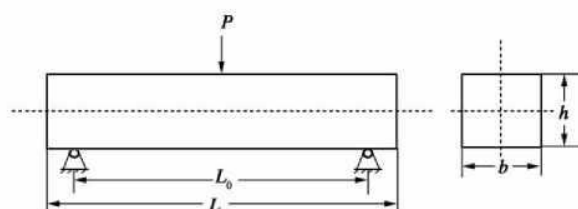


Рисунок 2 – Схема применения методики трехточечного изгиба для определения предела прочности морского льда при изгибе

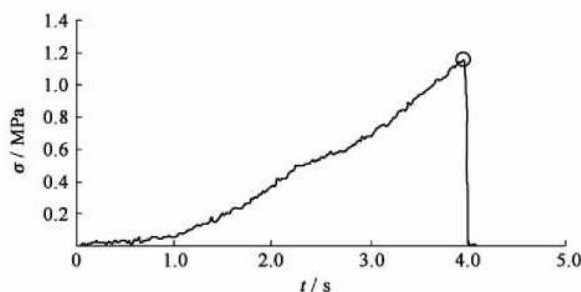


Рисунок 3 – Кривая зависимости времени нагрузки при испытаниях предела прочности морского льда на изгиб

### 3. Анализ результатов исследования

Методика трехточечного изгиба применялась для определения сопротивления морского льда изгибу в девяти точках измерения по периметру береговой линии Бохайского залива за две зимы в натуральных и лабораторных условиях. В Таблице 1 представлены данные по сбору образцов льда. Средние значения температуры, солености, объема рассола и скорости нагружения в ходе испытаний приве-

дены в Таблице 2. Также в Таблице 2 указаны максимальные, минимальные и средние значения для предела прочности льда в разных точках измерения. Для дальнейшего исследования особенностей прочности льда в разных морских районах был проведен статистический анализ предела прочности на изгиб и других необходимых параметров морского льда в акватории залива Лайчжоу и по западному и восточному побережьям Ляодунского залива; результаты анализа представлены в Таблице 3.

Таблица 2 – Статистический анализ предела прочности морского льда на изгиб в разных точках измерения вдоль побережья Бохайского залива

Но- мер	Географическое назва- ние	Темпе- ратура, °С	Соле- ность, 10 <sup>-3</sup>	Объем рас- сола, 10 <sup>-3</sup>	Скорость нагружения, (МПа * с <sup>-1</sup> )	Предел прочности на из- гиб, МПа		
						Макс.	Мин.	Сред.
А	порт Хайхун	-6,56	5,59	55,22	0,42	1,89	0,19	0,88
В	эстакада Гуаньхай	-2,96	5,55	144,91	0,44	1,26	0,23	0,60
С	причал Хунгуан	-5,58	5,36	68,10	0,45	1,94	0,36	0,99
D	р. Сяодао	-7,50	4,14	39,12	0,28	1,45	0,31	0,80
Е	дер. Наньбао	-3,39	5,84	104,86	0,86	1,53	0,57	1,03
F	городской уезд Синчэн	-4,35	4,38	69,34	0,37	1,66	0,21	0,67
G	Баюйцюань	-8,78	4,80	29,74	0,40	1,89	0,82	1,22
Н	Дацзуйцзы	-6,66	4,30	32,91	0,73	1,79	1,41	1,59
I	о. Чансин	-3,92	4,06	114,77	0,22	1,17	0,15	0,50

Таблица 3 – Статистический анализ предела прочности морского льда на изгиб по разным акваториям Бохайского залива

Акватория	Темпе- ратура, °С	Соле- ность, 10 <sup>-3</sup>	Объем рас- сола, 10 <sup>-3</sup>	Скорость нагружения, (МПа * с <sup>-1</sup> )	Предел прочности на из- гиб, МПа		
					Макс.	Мин.	Сред.
залив Лайчжоу	-5,73	5,22	70,13	0,40	1,94	0,19	0,84
Западное побережье Ляодун- ского залива	-3,93	5,03	84,22	0,59	1,66	0,21	0,83
Восточное побережье Ляодун- ского залива	-5,73	4,30	68,49	0,38	1,89	0,15	0,93

4. Сопоставление природных характеристик льда Бохайского моря с морями Арктики.

Имеющиеся в литературе данные по прочностным свойствам льда характеризуются очень большим разбросом, при этом, как правило, предполагается, что разброс вызван преимущественно широкой изменчивостью этих свойств. Однако причина не только в изменчивости, а в значительной степени - в несовершенстве методик испытаний и в отсутствии их корректного нормирования. В значительной мере это связано с тем, что изначально основные принципы испытаний льда были взяты из технологий испытаний материалов в промышленности. Дальнейшее их развитие шло практически самостоятельно, при этом не всегда учитывались тоже развивающиеся общеметрологические требования и методики. В частности, не всегда соответ-

ствуют современным метрологическим требованиям существующие методы определений прочностных свойств льда, не подвергались критическому анализу точностные характеристики существующих методов определения плотности льда. Кроме того, все эти методы не позволяют полностью автоматизировать процессы измерений, что, несомненно, является весьма существенным их недостатком при современных требованиях к постановке физического эксперимента.

В связи с отсутствием единых методик оказываются трудно сопоставимыми данные, приводимые различными авторами. Тем более, что в большинстве публикаций практически отсутствуют сообщения о технических особенностях применяемых технологий.

В табл. 4 приведены данные различных авторов по прочности льда при изгибе. [13].

Таблица 4 – Систематизированные данные различных авторов по прочности льда при изгибе

№ п/п	Авторы, организация	Район испытаний, структура льда	Т, С°	S <sub>л</sub> , %	σ, МПа	Условия испытаний
1	2	3	4	5	6	7
1	Рывлин А.Я., 1975	Арктический бассейн	-	-	0,5 + 0,6 0,15 + 0,3 (min)	Консоли на плаву в естественных условиях
2	Рывлин А.Я., 1950-1971	То же			0,25 0,7 (с учетом k=2,8)	Консоли на плаву в естественных условиях. Статистический анализ
3	Петров И.Г., 1976	--	0 -1 -2 -3 -4 -5 - 10 - 15 - 20 - 25	- - - - - - - - - - - - - -	0,20 0,40 0,65 0,75 0,85 0,90 1,10 1,20 1,35 1,40	Наиболее вероятные (экспертные) значения при совокупности различных условий испытаний
4	Буткович, 1956, 1959	-		-	0,2 ÷ 0,7	Натурные эксперименты
5	Панов В.В., Воеводин В.А., Николаев С.Е., 1976	-	-	1 2 3	1,5 0,8 0,4	Натурный молодой лед

№ п/п	Авторы, организация	Район испытаний, структура льда	$T_{л}, C^{\circ}$	$S_{л}, \%$	$\sigma, \text{МПа}$	Условия испытаний
6	Петров И.Г., 1971	Восточная часть Карского моря	-4 ÷ -8	4 ÷ 6	0,67±1,05	Испытания малых образцов
7	По исходным данным ААНИИ	Восточная часть Карского моря	-1,9 -6,2±2 -5,0±2	4,3±0,6 3,8±0,4 3,9±0,4	0,75±0,07 0,98±0,09 0,94±0,12	Статистическая обработка, стандартные оценки
		Шестоватая структура с добавками	-	-	0,72±0,06	Обработка рядов, распределенных по типам кристаллической структуры.
		Зернистая с добавками	-	-	1,04±0,08	
		Чисто зернистая структура	-	-	1,06±0,16	
		Столбчатая структура	-	-	1,19±0,16	
		Чисто шестоватая структура	-	-	0,67±0,08	
		Среднее для всех структур	4,1±2	4,0±0,5	0,97±0,03	
8	По исходным данным ААНИИ	Восточная часть Карского моря	-1,9±0,1 -6,2±2 -5,0±2	4,3±0,6 3,8±0,4 3,9±0,4	0,72±0,07 0,94±0,09 0,95±0,12	Статистическая обработка. Оценки по медианным значениям
		Шестоватая структура с добавками	-	-	0,78±0,06	
		Зернистая структура	-	-	0,95±0,1	
		Столбчатая структура	-	-	1,12±0,16	
		Чисто зернистая структура	-	-	0,99±0,16	
		Среднее для всех структур	4,1±2	4,0±0,5	0,93±0,06	

При сопоставлении прочностных характеристик следует учитывать, что в большинстве случаев при обработке результатов испытаний расчет предела прочности льда на изгиб производится по формулам справедливым для изотропного однородного материала. В действительности же естественный ледяной покров, находящийся на границе двух сред (воды и воздуха), является изотропным только в плоскости, параллельной плоскости замерзания. По толщине его физико-механические свойства изменятся вследствие изменения температуры и солености. Поэтому при нахождении разрушающих напряжений при изгибе использование формул для изотропного льда может привести к существенным ошибкам.

На рисунке 8 представлен график зависимости прочности льда в Бохайском море от температуры. Из него следует, что с понижением температуры льда растет его прочность при изгибе. Это так же видно и на рисунке 9, где изображена зависимость прочности льда морей Арктики (Восточная часть Карского моря) от температуры. Следовательно, можно утверждать, что независимо от местонахождения льда, его прочность на изгиб будет увеличиваться при понижении температуры. При этом можно отметить некоторую степень зависимости прочности льда от температуры (рис. 10). Это говорит о том, что на прочностные характеристики влияют сразу несколько факторов, а не каждый в отдельности. [X].

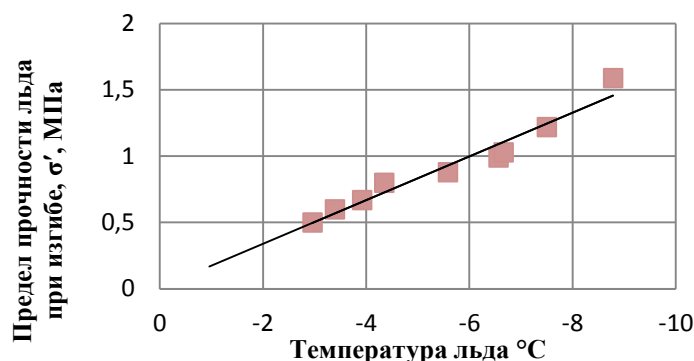


Рисунок 8 – Зависимость температуры на предел прочности морского льда на изгиб (море Бохай)

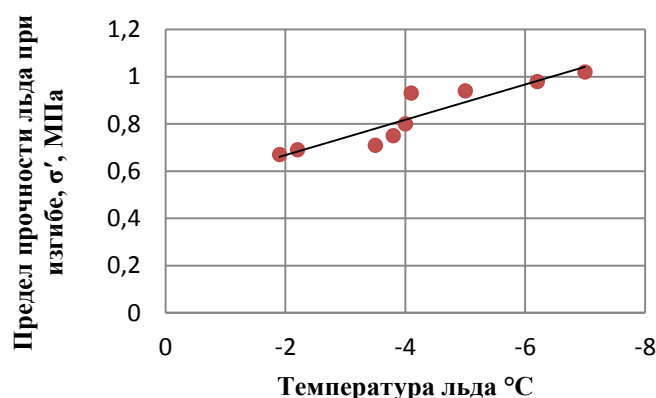


Рисунок 9 – Зависимость температуры на предел прочности морского льда на изгиб (Восточная часть Карского моря)

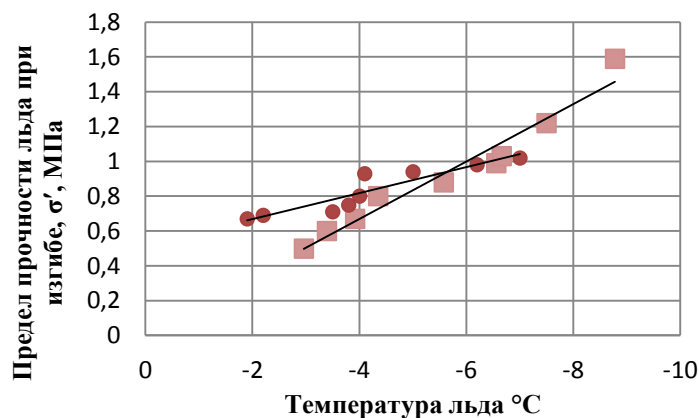


Рисунок 10 – Демонстрация степени зависимости прочности льда от температуры.

Следует отметить, что различия гидрометеорологических условий на обширных морских акваториях обуславливает формирование и развитие ледяного покрова не только неоднородного по возрасту, морфологическим характеристикам, но так же неоднородного по строению и физическим свойствам льда. Особенно это проявляется в шельфовой зоне арктических морей, где велико влияние пресноводного стока, малых глубин и местами сложного рельефа дна. В итоге формируется ледяной покров со сложным строением, которое должно быть учтено при оценке сопротивления льда нагрузке. [13].

Если сравнить осредненное значение предела прочности льда на изгиб, полученный в результате

исследования льда в Бохайском море и средние значения различных авторов, то видно, что значения прочности льда при изгибе находятся в одном диапазоне. Это означает, что физические и химические параметры льда в Бохайском заливе и льда других морей сопоставимы. Следовательно, для расчетов ледовых нагрузок при проектировании морских стационарных сооружений в Бохайском заливе, можно использовать методы и правила расчета ледовой нагрузки, используемые в России (правила РС, СНиП).



### Заключение

Физико-механические свойства морского льда являются важным параметром при исследовании динамических характеристик льда и проектировании морских ледостойких сооружений. В 2008-2010 гг. были проведены натурные и лабораторные испытания физико-механических свойств образцов морского льда, взятых вдоль береговой линии Бохайского залива. Ключевое значение в ходе испытаний имело исследование предела прочности льда на изгиб. В результате измерений, проведенных в девяти разных точках акватории Бохайского залива, были определены свойства сопротивления льда изгибу по трем разным морским районам: залива Лайчжоу, западного и восточного побережья Ляодунского залива. Благодаря анализу зависимости предела прочности морского льда от объема рассола, температуры и скорости нагружения, были выявлены отрицательная экспоненциальная зависимость предела прочности льда от квадратного корня объема рассола и линейная зависимость предела прочности от скорости нагружения. Были впервые сопоставлены зависимости прочности льда Бохайского моря и льдов Арктических морей (Восточная часть Карского моря) от температуры. Из сравнения видно, что осредненное значение предела прочности льда на изгиб, полученное в результате исследования льда в Бохайском море и среднее значение прочности льда Арктических морей находятся в одном диапазоне. Таким образом, физические и химические параметры льда в Бохайском заливе и льда других морей сопоставимы. Следовательно, для расчетов ледовых нагрузок при проектировании морских стационарных сооружений в Бохайском заливе, можно использовать методы и правила расчета ледовой нагрузки, используемые в России (правила РС, СНИП).

В итоге, результаты проведенного исследования могут служить справочным материалом при определении расчетных показателей прочности морского льда на изгиб для разных образцов льда, а так же являются рекомендательными при проектировании морских ледостойких сооружений.

### Литература

1. Тимко Г. У., Виск У. Ф. Обзор технических свойств морского льда [Журнал]. Наука и техника в районах крайнего Севера, 2010, 60 : 107-129.
2. Мастерсон Д. М. Новейшие достижения в области конструкции льда и его несущей способности [Журнал]. Наука и техника в районах крайнего Севера, 2009, 58(3) : 99-112.

3. Фредеркинг Р. М. У., Тимко Г. У. Об изменении свойств льда на изгиб методом разрушения консольных балок [Журнал]. Ежегодное издание по гляциологии, 1983, 4 : 58-65.

4. Тимко Г. У., О'Брайен С. Уравнение для нахождения предела прочности морского льда на изгиб [Журнал]. Наука и техника в районах крайнего Севера, 1994, 22: 285-298.

5. Парсонс Б. Л., Лал М., Уильямс Ф. М. и др. Влияние размера балки на предел прочности на изгиб морского льда, пресноводного льда и льда айсбергов [Журнал]. Философский журнал А, 1992, 66(6) : 1017-1036.

6. Гаврило В. П., Лебедев Г. А., Федотов В. И. и др. Сезонная изменчивость физико-механических характеристик морского льда [Журнал]. Международный журнал о ведении инженерно-технических работ в морских и полярных условиях, 1991, 1(1) : 1053-5381.

7. Ковакс А. Оценка полномасштабной прочности однолетнего морского льда на изгиб и сжатии [Журнал]. Журнал геофизических исследований, 1997, 102(С4) : 8681-8689.

8. Бланшет Д. Механические свойства однолетнего морского льда на острове Тарсиут [Журнал]. Журнал о ведении инженерно-технических работ в районах крайнего Севера, 1997, 11 : 59-83.

9. Барретте П. Д., Филипс Р., Кларк Дж. И. и др. Поведение модельного морского льда на изгиб в центрифуге [Журнал]. Журнал о ведении инженерно-технических работ в районах крайнего Севера, 1999, 13(3) : 122-138.

10. Суй Цзисюэ, Мэн Гуанлинь, Ли Чжицзюнь и др. Анализ факторов, влияющих на прочность морского льда на изгиб в Бохайском заливе [Журнал]. Наука о морской среде, 1996, 15(1) : 73-76. (На китайском языке)

11. Гагнон Р. Е., Гаммон П. Х. Характеристика и прочность на изгиб льдов айсбергов и ледников [Журнал]. Журнал о гляциологии, 1995, 41(137) : 103-111.

12. Франкенштейн Г., Гарнер Р. Уравнения для определения объема рассола морского льда при температуре от -0,5°C до -22,0°C [Журнал]. Журнал о гляциологии, 1967, 6(48) : 943-944.

13. Степанюк И.А., Смирнов В.Н. Методы измерений характеристик динамики ледяного покрова, 201, Санкт-Петербург.

14. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976.-Т. 331.-С. 77-99.