

# Опыт крупномасштабных испытаний прочности ледяных полей на изгиб в Карском море и море Лаптевых

**К.А. Корнишин, В.А. Павлов, к.т.н. (ОАО «НК «Роснефть»),  
В.Н. Смирнов, д.ф-м.н., А.А. Ньюбом (ФГБУ «АНИИ»),  
Я.О. Ефимов (ООО «Арктический научно-проектный центр шельфовых технологий»)**

**Ключевые слова:** морской лед, методика экспериментов, гравитационные волны, деформации и напряжения при изгибе, сравнение с образцами

**Key words:** sea ice, experimental methods, gravity waves, deformations and stresses during bending, comparison with samples

**Адрес для связи:** smirnov@aari.ru

## Введение

Физика и механика морского льда, его геометрические размеры и динамика являются основными факторами, которые используются при решении научных и прикладных задач при освоении месторождений арктического шельфа. Традиционно физико-механические свойства льда изучаются на кернах, выбуренных из ровных ледяных полей, торосов или айсбергов. Однако в связи с масштабным эффектом такое изучение прочности льда не отражает специфики механики разрушения ледяных образований в натуральных условиях при взаимодействии с инженерными сооружениями.

Предпринимаются попытки изучения прочности морского льда на основе рассмотрения его не только как материала и конструкции, но и как крупномасштабной дискретной среды. Такой подход основан на тесно связанных научных задачах: механической, отражающей напряженное состояние ледяного покрова; геометрической, обусловленной деформациями ледяных полей при сжатии и торошении; физической, отражающей физико-механические процессы, происходящие под действием как внешних, так и внутренних сил.

В обобщающих работах по зависимости давления на сооружение от площади контакта показано, что чем масштабнее система лед – сооружение, тем меньше давление/прочность морского льда, взаимодействующего с сооружением [1]. При самых больших масштабах прочность льда может быть на три порядка меньше прочности малых образцов льда. В натуральных условиях при изучении форм механики разрушения льда около сооружения (причала, айсберга, острова) давление/прочность льда могут оце-

ниваться в реальных условиях взаимодействия [2]. Следы такого взаимодействия льдов прослеживаются в Карском море при торошении дрейфующих льдов с айсбергами.

Одна из главных задач при определении прочности льда – организация инструментального мониторинга механики взаимодействия с одновременным измерением динамических параметров, накопление статистических данных о силах взаимодействия при больших масштабах в системе лед – ледокол. На сахалинском шельфе крупномасштабные испытания прочности льда проводились при прямом измерении действующих сил, разрушающих большие объемы льда [3].

Результаты испытаний прочности льда с использованием скважинного зонда-индентора при сложном силовом воздействии на ровный или торосистый лед отражают особенности деформирования и разрушения локального объема льда в естественных условиях, что позволяет разрабатывать теоретические модели механики разрушения льда. Проведение данных испытаний связано с критическим отношением к традиционным методам определения прочности на образцах льда. Критерий разрушения образца льда не отражает специфику механики разрушения ледяных образований в натуральных условиях при взаимодействии с сооружениями. Метод определения прочности льда с помощью скважинного зонда-индентора позволяет определить энергетические критерии прочности льда в реальных условиях. Такая работа должна проводиться в том числе с целью включения соответствующего раздела в российские нормативные и регулирующие документы.

К крупномасштабным испытаниям прочности льда на изгиб относятся эксперименты по разлому ледяной балки/консоли на плаву. Однако прочность при изгибе ледяных консолей рассчитывается без учета анизотропии льда по толщине. Ограниченные размеры консоли по сравнению с ледяным полем требуют проведения статистически значимого числа испытаний. В настоящее время разрабатывается метод определения деформационных и прочностных характеристик ледяного покрова при изгибе естественного ледяного поля при воздействии на него свободной гравитационной волной, возбуждаемой ледоколом.

## Результаты работы

Во время экспедиции «Кара Зима-2015» для определения характеристик прочности полей ровного льда при изгибе были проведены крупномасштабные эксперименты по разрушению льда ледоколом и созданию в ледяном поле свободной гравитационной волны, вызывающей изгибные деформации и напряжения в ледяной пластине. При выполнении экспериментов использовались следующие измерительная техника и оборудование (рис. 2):

- наклономер ЦНД-СМ для измерения наклонов по двум взаимно ортогональным направлениям (X, Y); диапазон измерений углов наклона  $\pm 0,00116$  рад;
- ледовый кольцевой деформометр (максимальная чувствительность к относительным деформациям  $10^{-6}/\text{мВ}$ );

- трехкомпонентные сейсмометры/вело-симетры СМЕ-4311 (частотный диапазон колебательных процессов 0,01–60 Гц);

- трехкомпонентный акселерометр Bell Howell 4-202 для измерения статических или динамических ускорений судна, устанавливаемый на форштевне ледокола.

На ровный ледяной покров в двух точках по ходу движения судна устанавливались сейсмометры, кольцевой деформометр и наклономер (рис. 1, 2). Перед экспериментами по маршруту движения ледокола определяли толщину и физические свойства льда: толщина льда изменялась от 61 до 68 см; толщина снега достигала 22 см; средняя температура верхней поверхности льда составляла  $-6,8$  °С; соленость и средняя плотность льда – соответственно 5,77 ‰ и  $939 \text{ кг/м}^3$ .

Дополнительные измерения с помощью скважинного зонда-индентора показали, что локальная прочность ровного льда распределяется по площади ледяного по-



Рис. 1. Общий вид участка ледяного поля при проведении крупномасштабного эксперимента с ледоколом «Ямал» (Карское море, ледовая станция, 23.05.15 г.)

крова неоднородно и может существенно различаться даже на небольших интервалах. На рис. 3 показана пространственная неоднородность средней локальной прочности на пути ледокола при проведении эксперимента: на ровном припайном льду почти по всей длине маршрута локальная прочность льда на сжатие изменялась в пределах 19–20 МПа.

На рис. 4 представлены записи цугов изгибно-гравитационных волн при движении ледокола по схеме одиночный разлом – движение – остановка и цугов одиночной волны.

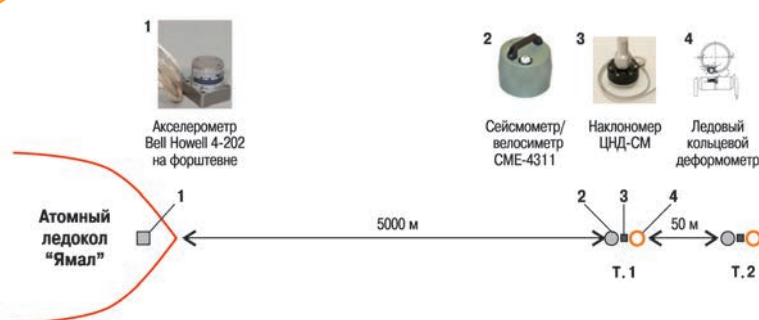


Рис. 2. Схема размещения приборов при проведении крупномасштабных экспериментов по разрушению льда (свободная гравитационная волна проходит расстояние до 1 км)

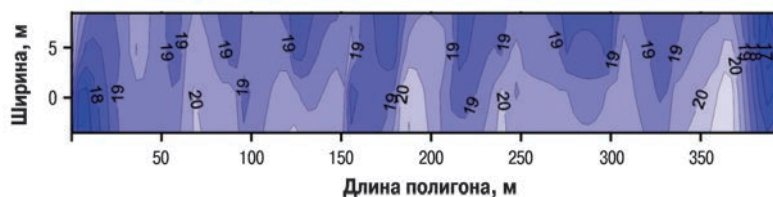


Рис. 3. Пространственная неоднородность средней локальной прочности (МПа) на маршруте ледокола (квадрат  $5 \times 5$  м, расстояние между центрами квадратов 30 м)

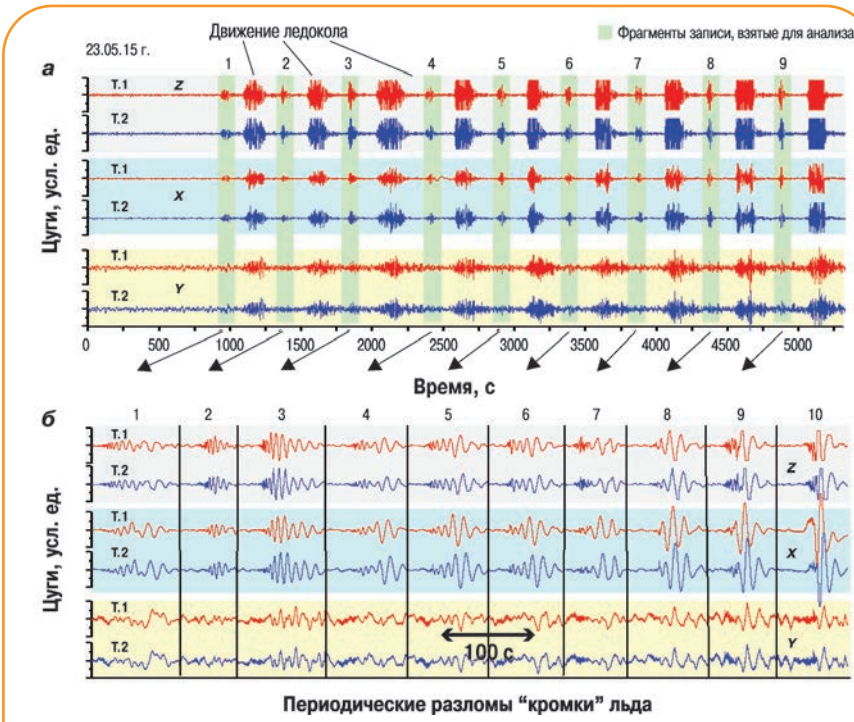


Рис. 4. Цуги изгибно-гравитационных волн в период движения ледокола по схеме разлом – перемещение – остановка (а) и волн при одиночном разломе льда (б)

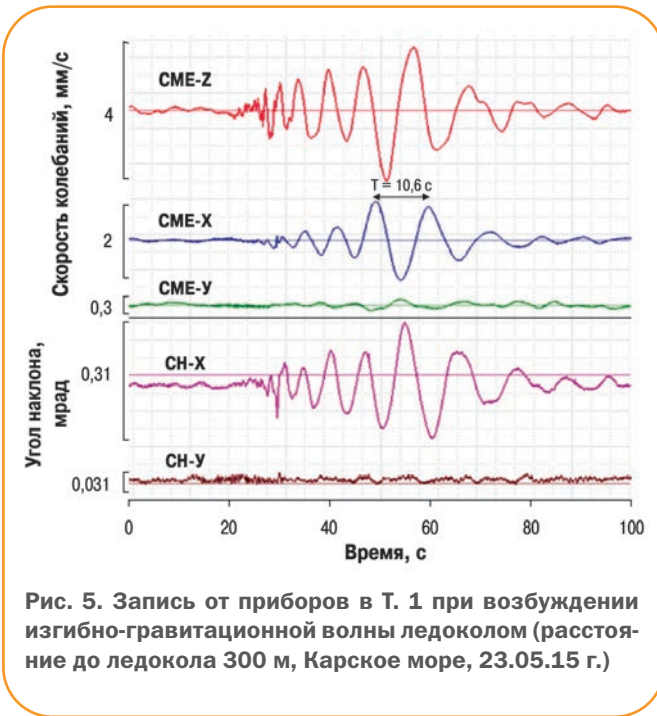


Рис. 5. Запись от приборов в Т. 1 при возбуждении изгибно-гравитационной волны ледоколом (расстояние до ледокола 300 м, Карское море, 23.05.15 г.)

Ледокол двигался в ледяном поле с остановками через каждые 20 м, создавая изгибно-гравитационную волну, которая распространялась на сотни метров от остановившегося после разлома ледокола. Горизонтальное ускорение движения ледокола при ломке льда достигало  $16 \text{ см/с}^2$ . В результате в двух точках ледяного поля регистрировались момент разрушения кромки льда изгибом, фазовая скорость, период и длина волны. По этим параметрам опреде-

лялись нормальные напряжения сжатия/растяжения в верхнем слое сечения ледяной пластины. При большой крутизне волны они вызывали сквозные трещины, параметры которой регистрировались сейсмометром, наклономером и деформометром.

На рис. 5 показана запись процесса деформирования ледяного поля волной при одиночном разломе. Получаемые параметры волновых процессов, сопровождаемых деформациями изгиба ледяного поля, дают возможность оценить разрушающие напряжения в сечении ледяной пластины.

**Оценка прочностных характеристик ледяного поля при изгибе**

Механика деформирования и разрушения ледяных полей при крупномасштабных испытаниях прочности льда с помощью ледокола характеризуется модулями упругости и деформации, относительными деформациями и нормальными напряжениями в слое ледяного поля при изгибе. В данном случае модуль упругости  $E$  рассчитывался через дисперсионное соотношение между фазовой скоростью  $c$  и волновым числом  $k$  [4], определяемое по формуле

$$c = \left( \frac{Dk^4 + \rho_2 g}{\rho_1 h k^2 + \rho_2 k / \tanh(kH)} \right)^{1/2}, \tag{1}$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость ледяной пластины льда;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность соответственно льда и морской воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – средняя толщина льда;  $H$  – средняя глубина моря.

Из формулы (1) получаем

$$D = \frac{c^2(\rho_1 h k^2 + \rho_2 k / \tanh(kH))}{k^4} - \rho_2 g / k^4.$$

Цилиндрическая жесткость связана с модулем упругости соотношением

$$D = E h^3 / 12(1 - \mu^2), \tag{2}$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.



Модуль упругости ледяного поля в условиях глубокой воды для критического значения периода свободных колебаний  $T$  определялся по формуле

$$E = \frac{12(1-\mu^2)\rho_1 g^4}{h^2} \left(\frac{T}{2\pi}\right)^6 \quad (3)$$

Максимальная амплитуда вертикального смещения

$$\text{в волне } z_0 = \frac{\varphi_0 \lambda}{2\pi} \quad (\varphi_0 - \text{максимальная амплитуда}$$

вертикального наклона в волне);  $\lambda$  – длина волны. Максимальные напряжения сжатия  $\sigma_x$  в верхнем слое льда во впадине волны или максимальные напряжения растяжения в верхнем слое льда на гребне определялись по формуле

$$\sigma_x = \varepsilon_x E = \frac{\pi h E}{\lambda(1-\mu^2)} \varphi_0 = \frac{h E k^2}{2} z_0, \quad (4)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\varepsilon_x$  – относительная деформация в слое льда.

Параметры волновых процессов в крупномасштабном эксперименте 23.05.15 г. при средней толщине льда 0,65 м представлены в таблице.

$\Delta\phi$ , с	$T$ , с	$\lambda$ , м	$\varphi_0 \cdot 10^{-4}$ рад	$z_0$ , мм	$E$ , МПа	$\sigma_x$ кПа	$\varepsilon_x \cdot 10^{-5}$
3,20	11,5	180	6,46	18	3385	56,9	1,68
3,08	6,5	106	2,58	4	110	1,3	1,14
3,28	10,5	160	5,43	14	1961	31,1	1,59
3,55	10,4	147	4,20	10	1852	24,8	1,34
2,88	11,5	200	8,66	28	3385	68,7	2,03
3,20	12,3	192	2,30	7	5068	28,3	0,56
3,20	7,1	111	8,18	14	187	6,5	3,45
2,80	10,5	188	3,28	10	1961	16,0	0,82
3,00	9,5	158	10,4	26	1076	33,1	3,08
3,00	11,9	198	2,90	9	4156	28,5	0,69
2,80	8,55	153	10,7	26	572	18,7	3,27
2,25	12,2	271	2,44	11	4826	20,3	0,42
2,80	12,3	220	8,81	31	5068	95,2	1,88
2,45	11,3	231	4,47	16	3047	27,6	0,91
2,90	11,1	191	11,6	35	2737	77,7	2,84
2,52	10,8	214	5,34	18	2322	27,1	1,17
2,90	8,35	144	11,9	27	496	19,2	3,88
2,70	10,75	199	8,73	28	2246	46,1	2,05
2,90	7,35	127	12,7	25	228	10,7	4,68
2,90	9,9	171	9,46	26	1377	35,8	2,59

Примечание.  $\Delta\phi$  – сдвиг между волнами.

По данным экспериментов 15.05, 23.05, 01.06 и 06.06.15 при толщине льда 0,6–1,5 м среднее значение относительной деформации составило  $1,7 \cdot 10^{-5}$ , максимальное –  $8,4 \cdot 10^{-5}$ , минимальное –  $3,04 \cdot 10^{-6}$ .

Характеристикой прочности ледяного поля на изгиб считается индекс прочности льда, поскольку при изгибе в нем возникают деформации сжатия/растяжения в нижних и верхних слоях, а также сдвиг по слоям. Форма эпюры деформаций и напряжений изменяется

в зависимости от напряженно-деформированного состояния, зависящего от динамики развития деформаций и возникновения трещины. Эти положения легли в основу крупномасштабного метода испытаний прочности ледяного поля на изгиб.

В результате проведения четырех крупномасштабных экспериментов получены значения напряжений сжатия/растяжения в диапазоне 15–130 кПа. На рис. 6 показана сравнительная диаграмма изгибной прочности в зависимости от площади излома по сечению ледяной пластины при изгибе при трех видах испытаний.

Первый вид испытаний – оценка средних по толщине льда прочностей круглых пластин льда толщиной 1,7–2 см и диаметром 14 см. Как правило, круглые пластины разрушаются на 2–4 сектора. Поэтому площадь излома при данном виде испытаний составляет 24–56 см<sup>2</sup>. Второй вид – разрушение консольных балок на плаву. Площадь излома равняется произведению ширины консоли и толщины льда в месте разрушения. Третий вид испытаний – определение напряжений в ровном ледяном поле при его изломе ледоколом «Ямал» и возбуждения свободной гравитационной волны (крупномасштабный эксперимент). В этом случае площадь излома считалась как произведение ширины создаваемого ледоколом канала (примерно равна ширине ледокола) и толщины льда.

Испытания круглых пластин и консольных балок осуществлялись на ледяных полях участков, на которых проводился крупномасштабный эксперимент. Из рис. 6 видно, что прочность при изгибе – предельные напряжения при сжатии/растяжении слоя ледяного



Рис. 6. Прочность при изгибе морского льда по данным экспедиции «Кара Зима-2015»:

1, 2, 3 – соответственно первый, второй и третий (при проведении четырех крупномасштабных экспериментов на разных полях) виды испытаний

поля при изгибе – значительно меньше прочности образцов льда и ледяных консолей на изгиб.

Полученные при натуральных экспериментах данные можно использовать для определения нормальных напряжений сжатия/растяжения в слое ледяного поля при его деформировании изгибом с целью оценки прочности ледяного поля на изгиб. Средние напряжения сжатия/растяжения при изгибе ледяного поля волной достигали 50 кПа, т.е. были значительно меньше изгибной прочности ледяной консоли на плаву.

Можно ожидать, что при соответствующих экспериментах и вследствие масштабного эффекта крупномасштабная прочность ледяного поля на изгиб будет существенно меньше значений, принимаемых в настоящее время по нормативным документам. Подобный вывод предполагает получение в дальнейшем зависимости изгибной прочности от площади разрыва.

### Выводы и рекомендации

1. Испытана методика определения деформационных и прочностных характеристик морского льда при крупномасштабных экспериментах с использованием ледокола. Полученные данные по механике разрушения ровного льда являются первой попыткой изучения разрушающих напряжений во льду и сопоставления их с изгибной прочностью, полученной при традиционных испытаниях образцов и ледяных консолей.

2. На основе полученных данных о параметрах упругих и изгибно-гравитационных волн, толщине и плотности льда определены модули упругости ледяных полей.

3. Получены оценки нормальных напряжений сжатия/растяжения в верхнем слое ледяного поля при его деформировании и разрушении изгибом. Показано, что средние напряжения при изгибе ледяного поля гравитационной волной составили 50 кПа.

4. Предложены подходы к определению прочности ледяного поля на изгиб в естественных условиях, например, при воздействии ледяных полей на сооружение с наклонной стенкой.

5. Следует провести эксперименты по сравнению нормальных напряжений при изгибе ледяного поля с прочностью ледяных консолей на изгиб и оценить упруговязкие характеристики льда при образовании разлома ледяного поля при изгибе.

6. При крупномасштабных экспериментах следует также оценивать механику возникновения сквозных трещин в ледяном поле, определять их размеры,

проводить прямые измерения деформаций и напряжений вблизи трещин. С учетом масштабного эффекта крупномасштабная прочность ледяного поля на изгиб может оказаться существенно меньше принимаемой в настоящее время по нормативным документам.

7. Разработанный мониторинг параметров естественных процессов деформирования и разрушения ледяных полей рекомендуется применять при прогнозировании состояния дрейфующих и припайных льдов в реальном масштабе времени. Система раннего предупреждения возможных опасных ледовых явлений позволит уменьшить риск при выполнении работ в полярных экспедициях, повысить безопасность нахождения людей на льду, избежать потери оборудования и нарушения графика выполнения работ.

8. Проведение крупномасштабных экспериментов способствует оптимальному определению прочности ледяного покрова и позволяет повысить качество научно-технического обоснования проектных ледовых нагрузок на наклонные грани сооружения.

### Список литературы

1. Sanderson T.J.O. Ice Mechanics. Risk to offshore structures. – London: Grahamand Troutman, 1988.
2. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения / В.Н. Смирнов, А.И. Шушлебин, С.М. Ковалев, И.Б. Шейкин. – СПб.: ААНИИ, 2011. – 178 с.
3. Palmer A.C., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. – London: World Scientific, 2012. – 357 p.
4. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 215 с.

### References

1. Sanderson T.J.O., *Ice mechanics*, Risk to offshore structures, London: Grahamand Troutman, 1988.
2. Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Sheykin I.B., *Metodicheskoe posobie po izucheniyu fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik ledyanykh obrazovaniy kak iskhodnykh dannykh dlya rascheta ledovykh nagruzok na berega, dno i morskie sooruzheniya* (Toolkit for the study of physical and mechanical properties of ice formations like the original data for the calculation of ice loads on the shore, bottom and marine structures), St. Petersburg: AANII, 2011, 178 p.
3. Palmer A.C., Croasdale K., *Arctic offshore engineering*, London: World Scientific, 2012, 357 p.
4. Kheysin D.E., *Dinamika ledyanogo pokrova* (The dynamics of the ice cover), Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1967, 215 p.