

Исследование прочностных свойств льда и численное моделирование

А.О. Мурдза^{1,2}, А.В.Марченко²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Университетский центр Свальбарда (ЮНИС)

1 Введение

Знания свойств льда очень важны в таких областях деятельности человека, как судоходная отрасль; разведка и добыча нефти, проектирование различных сооружений, расположенных в ледовых условиях; устойчивость льда, применяемого в качестве платформы и в других морских работах. Морской лед имеет комплексное воздействие на бытовые, социальные и экономические деятельности человека. Таким образом, знания свойств и поведения льда, полученных экспериментальным путем, важны в современном мире. В частности, натурные полноразмерные испытания необходимы при изучении свойств льда, что влияет на точность результатов: опыты проводятся в реальных условиях на больших масштабах и позволяют оценить исходные свойства льда. Данная работа основывается на испытаниях такого типа, целью которой является определение механических и физических свойств морского льда.

Для определения прочностных свойств льда выполняются различные эксперименты со льдом. Основными типами испытаний являются тесты на сжатие, изгиб и растяжение (Karulina, Karulin, & Marchenko, 2013), (Karulin, et al.), (Marchenko, et al., 2014). Эксперименты с консольными балками выполняются для расчета прочности морского льда на изгиб, которая используется для расчета ледовых нагрузок на наклонные конструкции и корабли, а также для оценки несущей способности плавающего льда и амплитуд

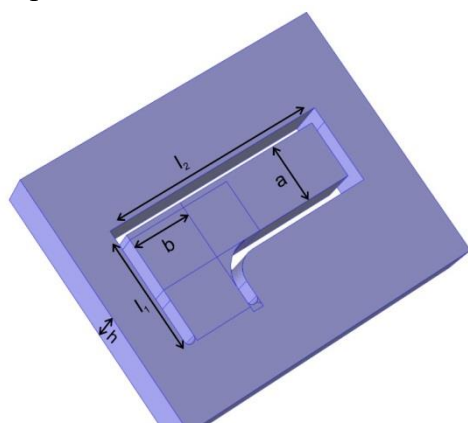


Рис. 1. Конфигурация исследуемой балки

поверхностных волн, которые потенциально могут разбить плавающий лед (Frederking & Svec, 1985) (Dumont, Kohout, & Bertino, 2011). Тесты для испытаний вдавливанием с помощью индентора или тесты сжатия балок выполняются для оценивания прочности льда при сжатии. Данные типы тестов являются аналогом взаимодействия дрейфующего льда и неподвижных вертикальных структур.

Для того, чтобы получить новую информацию о прочностных свойствах льда, была придумана другая форма балки, которая является модификацией консольной балки. Она имеет Г-образную форму, где одна боковая поверхность закреплена, а другие свободные, как показано на Рис. 1 Эксперименты были проведены в апреле 2015г. во фьорде Wahlenbergfjorden острова Nordaustlandet на Свальбарде.

Основной целью испытаний, проведенных с Г-образными балками, является получение кручения вместе с изгибом. В данном случае трещина может образоваться из-за комбинации растяжения и сжатия. Таким образом, для кривой разрушения льда может быть получена новая информация (новые точки для прочности на сдвиг).

2 Описание оборудования и процедуры проведения экспериментов

Во время полевых работ были выполнены три теста с L-образными балками: к двум была приложена нагрузка по направлению вниз и к одной – вверх.

Установка для испытаний изображена на Рис. 2а (для нагрузки вниз) и Рис. 2б (для нагрузки вверх). Балки, зафиксированные в одном из их концов, были выпилены во льду и подготовлены к эксперименту. Использовалась следующая установка для нагружений: стальная рама была помещена над свободным концом балки, как показано на Рис. 2. Гидравлический цилиндр расположен под верхней частью рамы. Установка была прикреплена ко льду с обеих сторон с помощью двух цепей. Датчик перемещения был зафиксирован на отдельной раме; тонкая стальная проволока была натянута между этим датчиком и верхней частью балки. Таким образом, отклонение конца балки измерялось независимо от датчика нагружения. Гидравлический цилиндр приводился в движение с помощью гидроэлектростанции. Во время эксперимента измерялись значения силы и перемещения во времени и записывались во внутренний регистратор данных.



Рис. 2. Установка для испытаний: а) нагружение вниз; б) нагружение вверх

Все размеры балок отображены в Таблица 1.

Таблица 1. Размеры балок

Размеры	Балка 1	Балка 2	Балка 3
l_1 [m]	1.05	1.2	1.2
l_2 [m]	1.95	2.1	2.08
a [m]	0.55	0.6	0.6
b [m]	0.55	0.6	0.65
h [m]	0.565	0.53	0.6

где l_2 – расстояние до точки нагружения, h – средняя толщина балки.

3 Полученные результаты и анализы

Полученные результаты, а именно перемещение и приложенная сила к балке как функции времени и приложенная сила как функция от смещения показаны на Рис. 3. Эти графики указывают на хрупкое поведение льда.

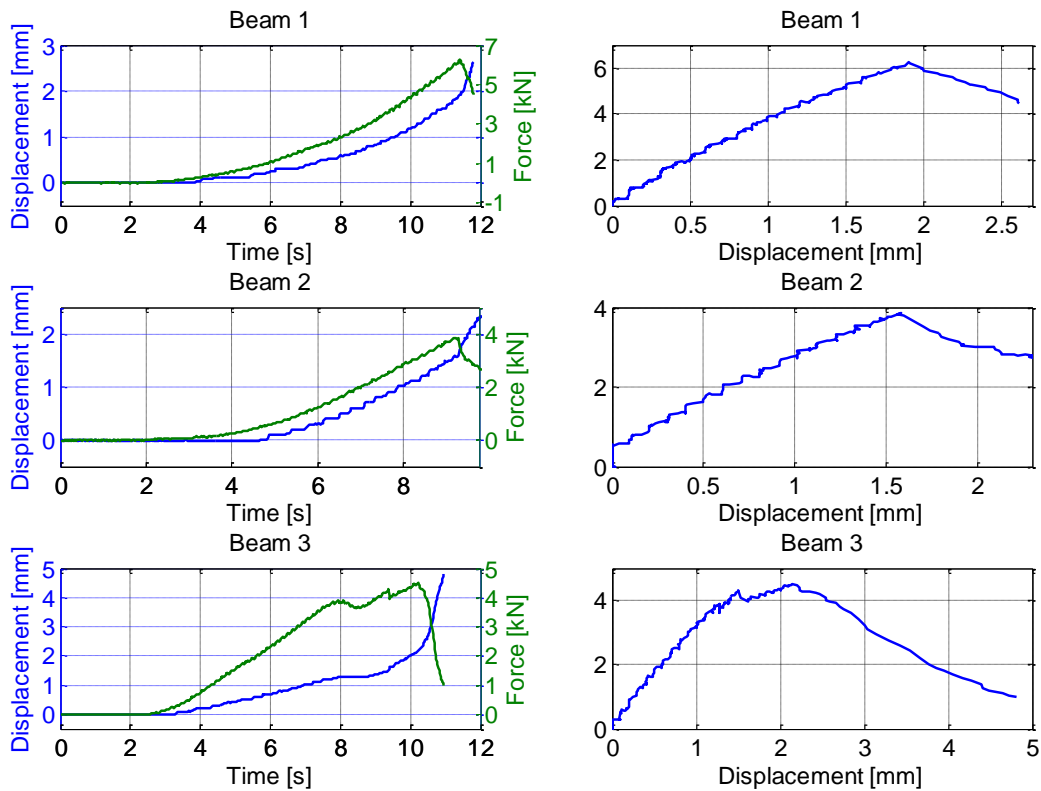


Рис. 3. Перемещение и сила нагружения как функции времени – графики с лева; сила нагружения как функция перемещения – графики с лева

Во время первых двух тестов (нагружение вниз), сила и перемещение увеличивались равномерно до максимального пика силы. В этот момент образовалась трещина и начала очень быстро распространяться. Далее, сила резко упала вниз, что и показывает хрупкое поведение льда; смещение резко выросло, поскольку балка уже не могла сопротивляться

приложенной силе. Во время третьего испытания (нагрузка вверх) сила не была монотонно возрастающей функцией. На кривой, изображающей силу, можно видеть три пика; после первых двух сила незначительно понизилась, а затем продолжала увеличиваться. Кроме того, во время первого пика на кривой смещение оставалось стабильным. Эти факты означают, что, так как лед в нижних слоях был очень мягким и слабым, якорь, который был прикреплен к нижней части балки, начали проникать в лед примерно с 8-й по 9-ю секунды эксперимента. В результате проникновение отображается на графике увеличением силы и постоянством смещения в течение этого времени.

Все три испытания показали линейную зависимость между силой и перемещением до момента начала развития трещины.

Основные результаты экспериментов отображены в Таблица 2.

Таблица 2. Результаты экспериментов

Номер теста	Направление нагрузки	Максимальная сила [Н]	Перемещение при максимальной силе [мм]	Средняя толщина снежного покрова [см]
1	Вверх	6267	1.94	13
2	Вверх	3881	1.598	11
3	Вниз	4506	2.135	-

Средняя толщина снежного покрова на третьей балке не определена. В связи с быстрым ростом температуры воздуха в течение этого дня уровень воды значительно увеличился, и балка оказалась полностью покрытой водой (высота надводной части льда приняла отрицательное значение). Этот факт возможно повлиял на полученные результаты. Например, так как балка была полностью погружена под воду, выталкивающая сила Архимеда увеличилась. В результате измеренная сила со стороны гидроцилиндра, приложенная к балке, была занижена, так как нагрузка была направлена вверх. После эксперимента сломанная балка поднялась на некоторую высоту. Через некоторое время на верхней поверхности балки сформировался снег.

Полученные в результате тестов трещины показаны на Рис. 4. Этот рисунок иллюстрирует диагональные трещины возле корней балок. Трещины представлены черными пунктирными линиями. Во втором и третьем тестах трещины распространяются от полуцилиндрических углов, где находятся концентрации напряжений (расстояние s от корня к одной из сторон трещины равно 0). Расположение трещин является рациональным. Тем не менее, во время первого испытания трещина распространялась на некотором расстоянии от корня пучка ($s = 0.08$). Это может быть объяснено обнаруженными неровностями во льду на месте первой балки. Данный участок льда возможно состоял из ледяных блоков, которые смялись вместе. Этот вывод был сделан вследствие измеренных различных толщин льда в балке и сделанных снимков в воде подо льдом.

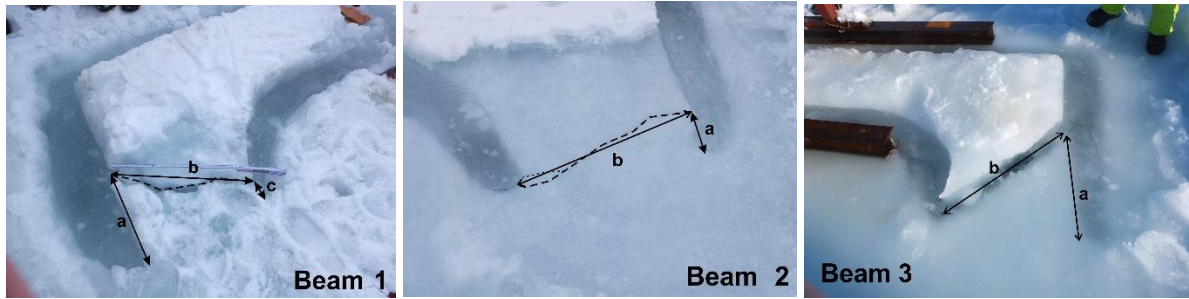


Рис. 4. Образовавшиеся трещины

Все размеры полученных трещин перечислены в Таблица 3.

Таблица 3. Размеры трещин

Beam number	a [m]	b [m]	c [m]
1	0.4	0.64	0.08
2	0.1	0.62	-
3	0.55	0.82	-

После первого испытания был извлечен керн льда вблизи корня балки для измерений профиля солености. Полученные значения приведены на Рис. 5. Средняя соленость была примерно 6.5 промилле.

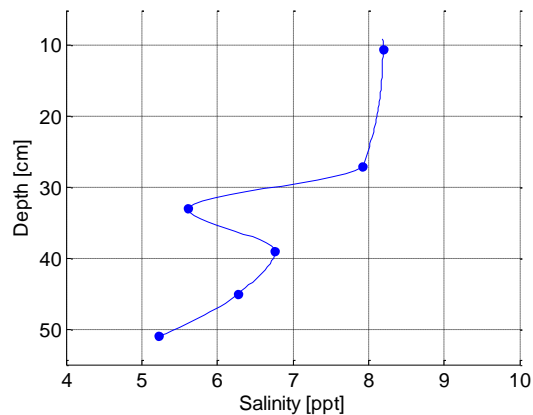


Рис. 5. Профиль солености

Температура льда во время испытаний варьировалась от -4 до -3 °C.

4 Численное моделирование

Численное моделирование L-образных балок проводилось в конечно-элементном пакете COMSOL Multiphysics 5.1. Для численного анализа лед считался изотропными и линейным эластичным материалом (до момента разрушения). Следующие параметры для льда были использованы при моделировании: плотность – 920 кг / м³, коэффициент Пуассона – 0.33.

Выбранная сетка автоматически приспособивалась к геометрии модели с элементами очень малого размера. Треугольные и четырехугольные элементы использовались в

зависимости от расположения в модели. Стационарный анализ был выбран для моделирования распределений в конкретном положении балки.

Рис. 6 показывает распределение напряжений по Мизесу на поверхности балки. Как видно, высокая концентрация напряжений присутствует в окрестности корня балки.

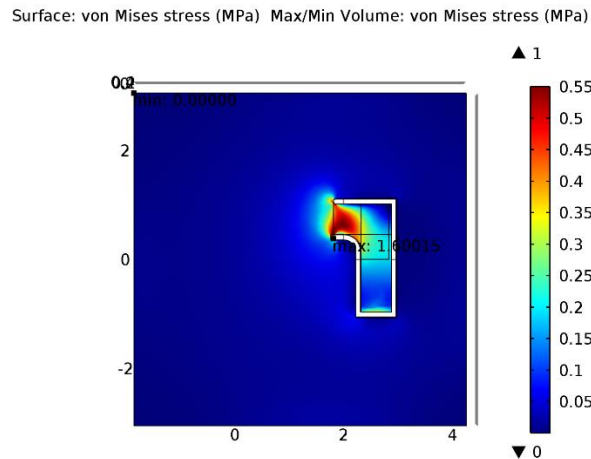


Рис. 6. Распределение напряжений по Мизесу.

На Рис. 7 изображены распределения главных напряжений в сечении первой балки трещиной (поверхность разрушения). Как видно, максимальные напряжения сосредоточены на краях разреза, то есть на поверхности балки. Таким образом, можно сделать заключение, что трещина начала свое развитие именно на одной из поверхностей балки, а не внутри.

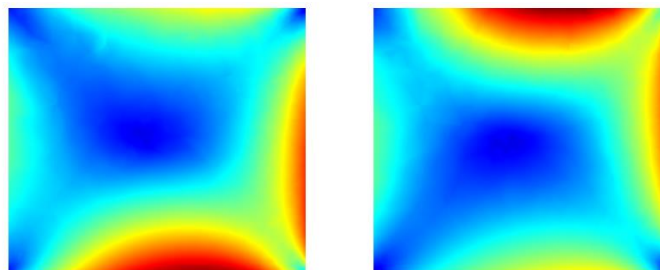


Рис. 7. Распределение двух главных напряжений в сечении первой балки трещиной

На Рис. 8 показано распределение главных напряжений вдоль краев разреза. По осям x и y отложены главные напряжения, которые соответствуют сжатию и растяжению соответственно. Красными звездочками показаны прочность льда на сжатие (на оси x) и прочность льда на растяжение (на оси y), которые были определены при помощи других типов экспериментов. Как видно из второго и третьего графика, напряжения на боковой поверхности (которая находится ближе к закругленной поверхности балки) преобладают над напряжениями на других поверхностях. Можно сделать предположение, что именно на этой поверхности образовалась трещина.

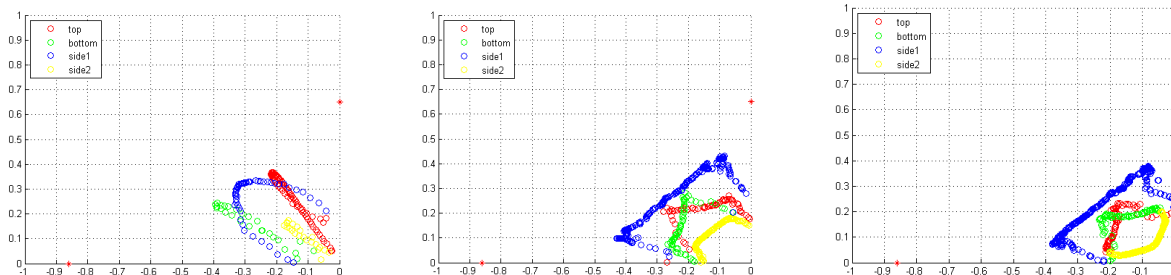


Рис. 8. Распределение главных напряжений вдоль краев разреза на каждой из балок.

5 Выводы

Три испытания с L-образными балками были проведены, два из них происходили с нагружением вниз и одно с нагружением вверх. Поведение балок во время тестов было очень похожим. Трещины проходили в окрестности полуцилиндрических углов, где присутствовали максимальные концентрации напряжений. Был сделан вывод, что именно в этом месте на боковой поверхности балки происходило зарождение трещин.

6 Литература

- Dumont, D., Kohout, A., & Bertino, L. (2011). A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 116, C04001.
- Frederking, R., & Svec, O. (1985). Stress-relieving techniques for cantilever beam tests in an ice cover. *Cold Regions Science and Technology* 11, 247-253.
- Karulin, E., Marchenko, A., Karulina, M., Chistyakov, P., Sakharov, A., Ervik, A., & Sodhi, D. (б.д.). Field Indentation Tests of Vertical Semi-Cylinder on First-Year Ice. (стр. 179-186). 2014: Proceedings of the 22-nd «International Symposium on Ice».
- Karulina, M., Karulin, E., & Marchenko, A. (2013). Field investigations of first-year ice mechanical properties in North-West Barents Sea. Proceedings of the 22-nd International Conference on «Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions».
- Marchenko, A., Karulin, E., Chistyakov, P., Sodhi, D., Karulina, M., & Sakharov, A. (2014). Three dimensional fracture effects in tests with cantilever and fixed ends beams. (стр. 249-256). Proceedings of the 22-nd «International Symposium on Ice».