

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА НА ИЗГИБ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

д-р техн. наук К.Е. САЗОНОВ, науч. сотр. А.А. ДОБРОДЕЕВ

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: kirsaz@rambler.ru

В январе 2013 г. в северной части Каспийского моря проводилась международная ледоисследовательская экспедиция, в состав которой входили представители России (ФГУП «Крыловский государственный научный центр»), Казахстана (AGIP КСО), Финляндии (Aker Arctic) и Италии (Navalprogetti). Целью экспедиции было исследование прочностных свойств ледяного покрова, знание которых необходимо при проведении морских операций. В ходе экспедиции решалась задача нахождения соответствия между данными о прочности льда на изгиб и сжатие, полученными методами разрушения консольных балок на плаву и сжатия цилиндрических образцов льда, с данными определения этих же характеристик косвенным методом по результатам измерения температуры и солёности льда. В соответствии с планом работ выполнялись исследования прочности ледяного покрова на изгиб также путем разрушения балок небольших размеров, выпиленных из ледяного покрова, методом



Рис. 1. Расположение станций при проведении исследований прочности льда.

трехточечного изгиба. Кроме этого проводилось измерение распределения температуры и солености льда путем измерения этих характеристик на кернах, добываемых из ледяного покрова. На последней станции вместо измерения прочности балок при трехточечном изгибе были выполнены измерения прочности льда на сжатие.

Натурные испытания выполнялись с борта судна обеспечения морских операций «MANGYSTAU-5». Станции выполнялись на маршруте от порта Баутино до морского месторождения Кашаган и обратно (рис. 1). Всего за время выполнения натурных испытаний было выполнено 4 станции. Данные о выполненных на станциях измерениях представлены в табл. 1.

Таблица 1

Измерения, выполненные на станциях

№ станции	Дата	Средняя толщина льда, см	Количество консольных балок	Количество балок для трехточечного изгиба	Количество кернов для измерения температуры и солености	Количество образцов для измерения прочности льда на сжатие
1	19.01.2013	36,6	4	8	8	–
2	20.01.2013	24,3	5	14	7	–
3	21.01.2013	46	5	18	8	–
4	22.01.2013	20,4	5	–	7	43
5	23.01.2013	Исследования льда не проводились, выполнялись измерения подводного шума				

Выше было сказано, что в экспедиции участвовали российские, финские, итальянские и казахские специалисты. В задачу финских специалистов входило предоставление измерительной аппаратуры и непосредственное измерение параметров, характеризующих свойства льда. Специалисты Крыловского центра разработали план и теоретическую базу эксперимента, участвовали в измерениях, ими были обработаны полученные результаты и сформулированы основные выводы проведенных исследований. Методика и результаты обработки, выполненные авторами статьи, приводятся ниже.

При проведении экспериментов размеры консольных балок выбирались в соответствии с рекомендациями МАГИ (ИАНР..., 1979). Все балки небольшого размера были длиной 120 см. Они выпиливались из ледяного покрова на всю его толщину, а затем по толщине пилились пополам. И только на третьей станции в относительно толстом льду удалось получить три балки по толщине льда.

Керны для измерения температуры и солености льда отбирались из неразрушенного ледяного покрова в непосредственной близости от корневого сечения балок. Соленость кернов определялась как для всего керна в целом, так и для его верхней и нижней частей в отдельности. Относительный объем рассола определялся по известной формуле Г.В. Франкенштейна и Р. Гарнера (Frankenstein, Garner, 1967).

Определение прочности льда на изгиб осуществлялось в соответствии с рекомендациями МАГИ по стандартным формулам:

$$\sigma_f = \frac{6Pl}{bh_1^2} \text{ — для консольных балок,}$$

где P — максимальное значение усилия, l , b , h_l — длина, ширина и толщина балки;

$$\sigma_f = \frac{3Pl_1}{2bh_l^2} \text{ — для малых балок,}$$

где l_1 — расстояние между опорами. Все полученные результаты проверялись по критерию Шовене, который позволяет выделять грубые ошибки в выборках малого объема (Огibalов, Мирзаджанзаде, 1976).

Полученные результаты сопоставлялись с данными расчетов прочности льда, полученными по формуле Г. Тимко и С. О’Брайна (Timco, O’Brien, 1994):

$$\sigma_f = 1,76 \exp(-5,88(v_b)^{1/2}), \quad (1)$$

где σ_f — прочность льда на изгиб, v_b — относительный объем рассола, а также по формуле, предложенной И. Дикенсом для льдов с малым содержанием объема рассола (Dykens, 1968):

$$\sigma_f = 0,76(1 - 5,88(v_b/0,202)^{1/2}). \quad (2)$$

При проведении расчетов по формулам (1) и (2) использовались как средние по толщине значения температуры льда и относительного объема рассола, так и аналогичные данные, вычисленные отдельно для верхней и нижней частей ледяного покрова. Результаты расчетов для консольных балок представлены на рис. 2–4.

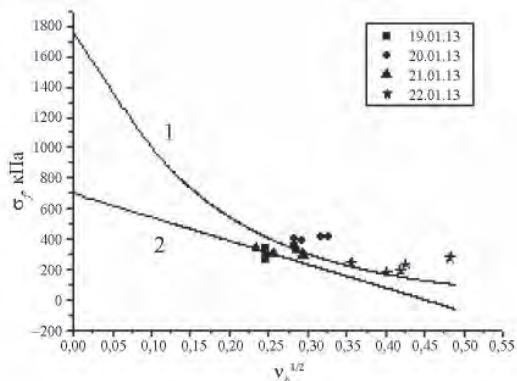


Рис. 2. Значения прочности, вычисленные по среднему значению относительного объема рассола: 1 — формула (1), 2 — формула (2).

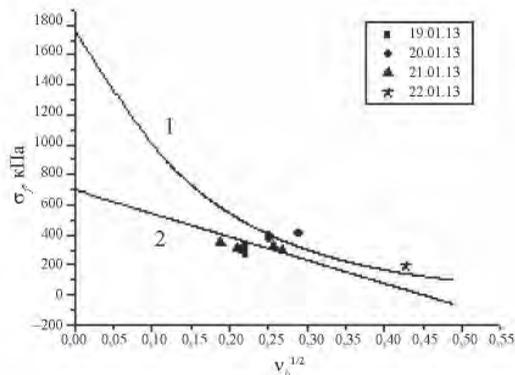


Рис. 3. Значения прочности, вычисленные по среднему значению относительного объема рассола для верхней части балки: 1 — формула (1), 2 — формула (2).

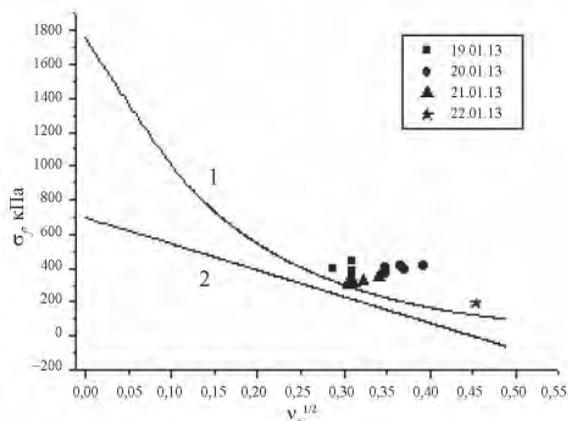


Рис. 4. Значения прочности, вычисленные по среднему значению относительного объема рассола для нижней части балки: 1 — формула (1), 2 — формула (2).

Анализ соответствия экспериментальных данных (рис. 2–4) результатам прогноза, выполненного по уравнениям (1) и (2), проводился на основании сравнения сумм квадратов невязок. Результаты анализа показывают, что наилучшее согласование со всей совокупностью данных имеет формула (2) в случае использования значения относительного объема рассола, определенного по верхней части балок. Однако при значениях $(v_b)^{1/2} > 0,27$ формула (2) может давать некорректные результаты. Поэтому для всей совокупности данных, не вводя градаций по величине $(v_b)^{1/2}$, необходимо использовать формулу (1). Если экспериментальные данные разбить на две группы, то для группы $(v_b)^{1/2} < 0,27$ наилучшее совпадение наблюдается для формулы (2) при использовании среднего по толщине значения относительного объема рассола. Аналогичный результат был получен для льдов Балтийского моря (Крупина, Кубышкин, 2007). Для группы данных $(v_b)^{1/2} > 0,27$ наилучшее совпадение наблюдается для формулы (1) при величине $(v_b)^{1/2}$, определенной по верхней части балки.

На основании анализа результатов выполненных экспериментов для определения прочности льда на изгиб по результатам измерения солёности и температуры льда можно рекомендовать использовать формулу (2) при $(v_b)^{1/2} < 0,27$ и среднем значении величины $(v_b)^{1/2}$, а также формулу (1) при $(v_b)^{1/2} > 0,27$, при этом необходимо использовать данные об относительном объеме рассола, полученные для верхней части ледяного покрова (не менее $1/3$ и не более $1/2$ толщины льда).

Данные рис. 4 убедительно показывают, что использование значений относительного объема рассола, полученных для нижней части ледяного покрова, приводит к существенным ошибкам.

Из приведенных рисунков следует, что данные по прочности льда относительно слабо зависят от относительного объема рассола (рис. 5). Обращает на себя внимание то, что при экстраполяции полученных данных к пресному льду $(v_b)^{1/2} = 0$ предельное значение прочности льда составляет 454,4 кПа. Это значение существенно ниже, чем по формулам (1) и (2), которые дают значения 1760 кПа и 700 кПа соответственно. По-видимому, это связано с тем, что в момент образования ледяной покров Северного Каспия имеет высокую солёность, которая затем уменьшается за счет стекания рассола. При этом в структуре льда остаются каналы, по которым стекал рассол. При относительно высоких температурах воздуха или при наличии снежного по-

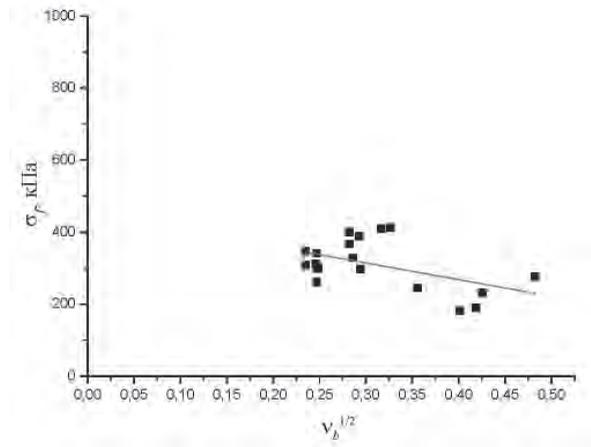


Рис. 5. Линейная регрессия всей совокупности данных.

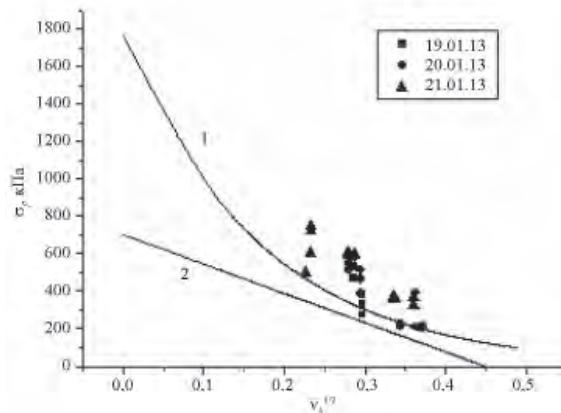


Рис. 6. Значения прочности, вычисленные по среднему значению относительного объема рассола для нижней, верхней и средней частей балки: 1 — формула (1), 2 — формула (2).

крова на льду сплошность ледяного покрова не восстанавливается. Поэтому каналы могут играть роль концентраторов напряжения, приводя к снижению прочности относительно пресного льда. Другой причиной снижения прочности льда является большая динамичность льдов в северной части Каспийского моря, которая приводит к появлению в них различных дефектов (трещин, неоднородности строения и т.п.). Эти дефекты также снижают прочность относительно пресного льда.

На рис. 6 представлены результаты, полученные при испытании малых балок методом трехточечного изгиба, а на рис. 7 приведены совместные данные по консольным балкам при среднем значении относительного объема рассола и малым балкам.

Экспериментальные данные, полученные по малым балкам, были сопоставлены с результатами ранее выполненных исследований (Болгов, Красножон, Любушин, 2007) и показали хорошее совпадение. Среднее значение прочности для матового льда составило 0,44 МПа, по данным работы (Болгов, Красножон, Любушин, 2007) эта величина лежит в пределах 0,35–0,6 Мпа. Уравнение регрессии по всей совокуп-

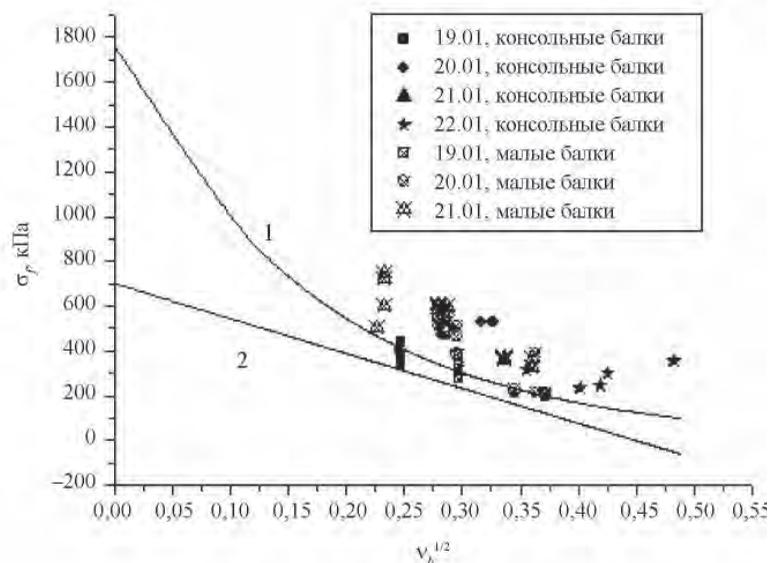


Рис. 7. Совместные результаты по консольным (среднее значение относительного объема рассола) и малым балкам.

ности данных для пресного льда дало оценку 1,38 МПа, по данным указанной работы это значение составляет примерно 1,3 МПа.

Тем не менее данные рис. 6 и 7 показывают, что малые балки дают завышенное значение прочности по сравнению с прогнозом по температуре и солёности, а также с данными по консольным балкам. По-видимому, такое расхождение связано с проявлением масштабного эффекта. Существующие методы учета масштабного эффекта (Богородский, Гаврило, 1980) дают слишком большое снижение прочности льда и не могут быть использованы для корректировки полученных данных.

По нашему мнению, использование малых балок не может быть признано эффективным методом определения прочности льда на изгиб по причине достаточно большой трудоёмкости и из-за сильного влияния масштабного эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы в гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.

Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.

Крутина Н.А., Кубышкин Н.В. Прочность при изгибе дрейфующего ровного однолетнего морского льда в Баренцевом море // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. № 34 (318). С. 139–159.

Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Механика физических процессов. М.: Изд-во МГУ, 1976. 370 с.

Dykens I. Tensile and flexural properties of saline ice / Proc. Int. Symp. on Physics of Ice. Munich, 1968. P. 9–14.

IAHR – Recommendations on Testing Methods of Ice Properties. Second Report from IAHR - Working Group on Standardizing Testing Methods in Ice /Schwarz Joachim ed. // Bulletin Series A. Research Report. Division of Water Resources Engineering, University of Luleå, Sweden. 1979. Vol. 24. 26 p.

Frankenstein G.W., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from $-0,5$ to $-22,9$ °C // *J. Glaciol.* 1967. № 6 (48). P. 943–944.

Timco G.W., O'Brien S. Flexural strength equation for sea ice // *Cold Regions Science and Technology.* 1994. Vol. 22. P. 285–298.