

УДК 551.326.7+626

Влияние солености и строения льда на его прочность

Горгуца Роман Юльевич¹,
Ксенофонтова Дарья Андреевна²,
Соколов Артемий Валерьевич³

^{1,4}к.т.н., главный инженер, e-mail: rgorgutsa@morproekt.ru

^{2,4}инженер 3-й категории, ⁵аспирант

^{3,4}руководитель группы

⁴*Морстройтехнология.*

195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21, корп. 2, лит. А

⁵*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

Аннотация: Аналитические зависимости в действующих отечественных нормативных документах не в полной мере учитывают особенности связанные с изменением распределения солености в толще льда, которая в свою очередь влияет на его прочность.

В представленном докладе уделено внимание строению льда и его солености. Приведены и систематизированы основные зависимости для определения солености льда и количества жидкой фазы в нем на основе отечественной нормативной базы и зарубежных источников. Выполнен сравнительный анализ влияния вышеупомянутых параметров, рассчитанных по различным методикам, на итоговую прочность льда. Предложены способы корректировки прочности льда в некоторых слоях, в случае, если соленость в них, полученная аналитическим путем, по отношению к замеренной при натурных испытаниях оказалась завышенной или, наоборот, заниженной. Уточненное распределение солености по толщине льда может снизить расчетные нагрузки на ГТС.

В настоящей работе приводятся необходимые пояснения к расчетным методикам нормативных документов, позволяющие определить итоговую прочность льда более корректно, при отсутствии данных натуральных испытаний.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, соленость, прочность льда, структура льда, жидкая фаза, рассол, Северный морской путь.

Введение

Арктика является стратегически важным регионом для Российской Федерации в области экономических, военных и экологических разработок, а также в области недропользования. В связи с этим ведется активное освоение региона, развитие инфраструктуры побережья вдоль Северного морского пути (СМП), в том числе строительство новых и реконструкция имеющихся гидротехнических сооружений.

Лимитирующими нагрузками на возводимые в Арктике гидротехнические сооружения являются нагрузки от полей ровного льда и других ледовых образований.

Степень воздействия дрейфующего ледяного поля на ГТС зависит от множества факторов, которые можно разделить на три основные группы (рис. 1).



Рисунок 1: Схема факторов, обуславливающих нагрузку на ГТС

Существует множество различных формул по расчету ледовых нагрузок на ГТС [1–11], которые дают широкий диапазон результатов [12]. Тем не менее при проектировании инженеры сталкиваются с вопросами, однозначный ответ на которые не дает ни один из существующих нормативов. В большей степени, это касается всех факторов, учитывающих свойства льда. В докладе особое внимание уделено солености льда и ее влиянию на его прочность. Область исследования настоящей работы приведена на рис. 1.

Соленость льда

Соленость – основной параметр, отличающий морской лед от пресного. Необходимость ее учета при расчетах обусловлена структурой морского льда.

В начале формирования ледяного покрова кристаллы льда, накапливающиеся под поверхностью воды беспорядочной массой, смерзаясь, захватывают некоторое количество рассола, который при дальнейшем замерзании льда частично выдавливается на его поверхность.

Затем лед нарастает в виде игл, направленных вниз, тем самым формируется столбчатая его структура (рис. 2). Дренажные каналы (рис. 2) в толще льда способствуют транзиту рассола. Это обуславливает наименьшую соленость льда в средней его части и наибольшую в верхних и ниж-

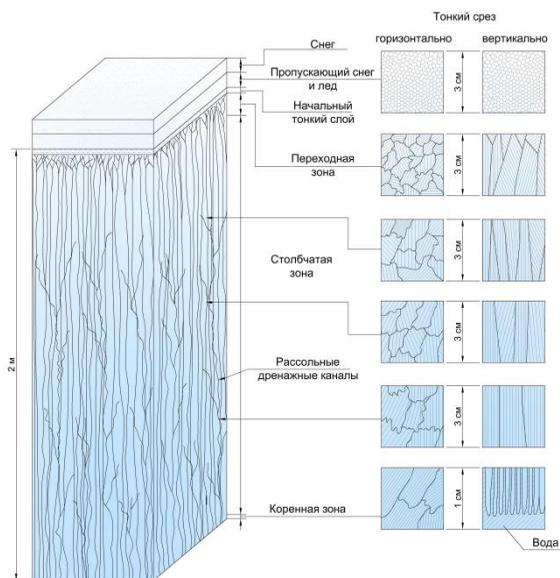


Рисунок 2: Схема структуры однолетнего льда

них слоях. Диаграмма распределения солености льда по толщине имеет упрощенную графическую закономерность в виде буквы «С» [13–16]. Пример распределения солености во льду в течение зимы приведен на рис. 3 [17].

Вышеуказанные особенности строения морского льда существенно влияют на его прочность.

С понижением температуры ниже минус 23 °С, при которой начинает осаждаться кристаллогидрат хлорида натрия $\text{NaCl} \times 2\text{H}_2\text{O}$, рассол внутри пор кристаллизуется. Прочность морского льда начиная с указанной температуры существенно растет. В работе [18] отмечено, что при температуре ниже минус 23 °С морской лед обладает большей прочностью по сравнению с пресным льдом. Также интересен диапазон температур от минус 8,2 °С до минус 23 °С, при котором выпадает из рассола глауберова соль ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$), при этом прочность льда повышается, но не так интенсивно, как при температуре ниже минус 23 °С.

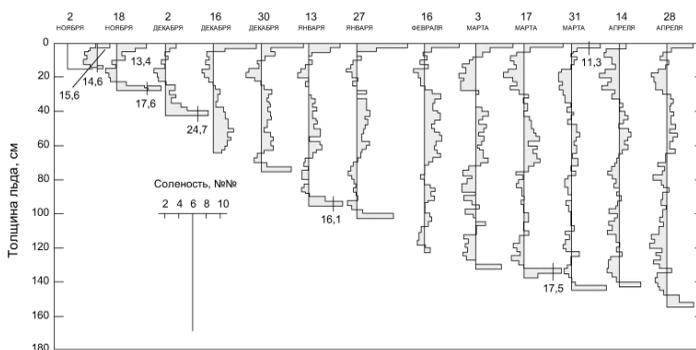


Рисунок 3: Распределение солености по толщине льда в течение зимы

Указанные явления учитываются отечественными нормативами (формулы (5)–(13) настоящей работы) при определении объема рассола, но значения определяющих температур перехода несколько отличаются от приведенных выше.

Учет солености в нормативной базе

По отечественным нормам [1, 2, 6] соленость льда (S_i , ‰), в зависимости от его возраста, находится в соотношении $0,15 \div 0,20$ от солености воды (S_w , ‰). Таким образом, нормативы учитывают изменчивость солености льда с течением времени лишь умножением на соответствующий коэффициент. Альтернативный способ вычисления солености льда приведен в работе [19]:

$$S_i = S_w(0,2e^{-0,017t} + 0,1) \quad (1)$$

В формуле (1) t – время в сутках с момента образования льда.

Непосредственно для определения прочности льда используется такой параметр, как объем рассола (v_b), зависящий от солености льда (S , ‰) и температуры (T , °C). Для определения данного параметра отечественными нормами [6], а также международными [5] принята методика Франкенштейна Г.Е. и Гарнера Р.:

$$v_b = S \cdot \left(\frac{49.185}{|T|} + 0.532 \right). \quad (2)$$

В СНиП [2] соленость морского льда учитывается посредством аналогичного параметра – количества жидкой фазы в соответствующем слое (v_i , ‰), которая определяется по океанографическим таблицам [20] при заданных значениях температуры и солености.

Вопрос определения количества жидкой фазы в слое льда имеет смысл рассмотреть более подробно, так как в отечественных нормативах ([1, 2]) обнаружены разночтения.

В соответствии с указаниями [20] количество жидкой фазы в слое льда определяется по зависимости

$$b = \sigma \cdot \frac{1+s}{s+p}. \quad (3)$$

В формуле (3) b – количество рассола в граммах на 1 кг морского льда (г/кг) – то же, что и количество жидкой фазы в [1]; σ – отношение массы содержащихся во льду солей к массе морского льда, определяемое по

$$\sigma = \frac{1000S_i}{1000 + S_i}. \quad (4)$$

Результаты вычисления по данной формуле близки к солености. Другими словами, допустимо принимать вместо σ соленость льда S_i (‰).

В формуле (3) s – отношение массы растворенных в рассоле солей к массе чистой воды в рассоле; p – отношение массы выпавших в осадок солей к массе чистой воды в рассоле.

$$s = -0,01848t \quad \text{при } 0 > t > -7,3 \text{ °C}; \quad (5)$$

$$s = -0,01077t + 0,0567 \quad \text{при } -7,3 > t > -22,4 \text{ °C}; \quad (6)$$

$$s = -0,0047t + 0,1677 \quad \text{при } -22,4 > t > -30,0 \text{ °C}. \quad (7)$$

$$p = 0 \quad \text{при } 0 > t > -7,3 \text{ °C}; \quad (8)$$

$$p = -0,0031t - 0,0235 \quad \text{при } -7,3 > t > -22,4 \text{ °C}; \quad (9)$$

$$p = -0,1010t - 2,160 \quad \text{при } -22,4 > t > -30,0 \text{ °C}. \quad (10)$$

В формулах (5)–(10) t – температура льда в рассматриваемый промежуток времени.

В соответствии с указаниями [1] количество жидкой фазы в слое льда определяется по зависимостям:

$$\xi_i = -S_{w,t}(1 - 0,0185t_i)/(0,0185t_i) \quad \text{при } 0 > t > -7,3 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (11)$$

$$\xi_i = -S_{w,t}(1,06 - 0,010t_i)/(-0,033 + 0,014t_i) \quad \text{при } -7,3 > t > -22,4 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (12)$$

$$\xi_i = -S_{w,t}(1,17 - 0,005t_i)/(2,0 + 0,105t_i) \quad \text{при } -22,4 > t > -30,0 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (13)$$

В формулах (11)–(13) ξ_i – количество жидкой фазы в i -м слое ледяного поля (г/кг); $S_{w,t}$ – соленость льда – S_i (%); t_i – температура льда в i -м слое ледяного поля, $^\circ\text{C}$.

Хронология появления и развития рассматриваемого параметра в отечественных нормативах, регламентирующих порядок вычисления ледовых воздействий, приведена в таблице.

Обзор норм с точки зрения учета объема рассола во льду при определении прочности

Нормативный документ	Год выпуска норматива	Зависимость для определения объема рассола, v_b	Зависимость для определения прочности льда, R_c
[20]	1975	$v_b = f(S_i, T_i)$ – ф-лы (3)–(10)	-
[9]	1977	–	$R_c = f(S_i, T_i)$
[8]	1988	–	
[2]	1984	Ссылается на [20] – $v_b = f(S_i, T_i)$ – ф-лы (3)–(10)	$R_c = f(v_b)$
[6]	2001	$v_b = f(S_i, T_i)$ – ф-ла (2)	
[1]	2013	$v_b = f(S_i, T_i)$ – ф-лы (11)–(13)	

Обозначения: v_b – объема рассола (количество жидкой фазы) во льду; R_c – прочность льда; S_i – соленость льда; T_i – температура льда.

Сопоставительный анализ формул (3)–(10) [20] и (11)–(13) [1] показал, что они идентичны после преобразований и дают одинаковый результат.

Необходимо обратить внимание, что для сопоставительного анализа и в настоящем докладе формулы (11)–(13) приведены с учетом исправлений, которые не всем доступны. В свободном доступе (интернет), а также платных специализированных информационно-справочных системах отображаются ошибочные формулы с опечатками. Использование некорректных формул приведет к неверной интерпретации результатов.

В [1] отсутствует методика вычисления температуры слоя льда (t_i) и говорится, что принимать ее необходимо «по натурным данным или при их

отсутствии на основе решения задачи теплопроводности при стационарном режиме по температуре воздуха, скорости ветра, действующим течениям соответствующей ежегодной вероятности превышения с учетом класса сооружений».

Поскольку норматив не дает конкретных рекомендаций по определению (t_i), мы предлагаем пользоваться при вычислении температуры слоя льда указаниями утратившего силу норматива [2]:

$$t_i = (t_u - t_b)z_i + t_b. \tag{14}$$

В формуле (14) t_u – температура льда на границе воздух (или снег)–лед, °С, определяемая методами тепло- и массообмена по данным о температуре воздуха, толщине снежного покрова и скорости ветра или принимаемая равной среднесуточной температуре воздуха до момента расчетного воздействия льда на сооружение при данной толщине льда (с учетом периода запоздания, зависящего от толщины льда); t_b – температура льда на границе лед–вода (температура замерзания); z_i – расстояние от границы лед–вода до середины i -го слоя в долях толщины ледяного поля. В соответствии с [1]:

$$t_b = -0,057S_w. \tag{15}$$

Сравнение подходов учета солёности

Были проанализированы значения прочности льда, полученные с использованием различных формул для определения солёности морского льда и объема рассола в нем. На рис. 4,а приведены значения солёности, вычисленные по методикам [1] и [19], на рис. 4,б – соответствующие значения прочности льда. Объем рассола и прочность льда в обоих случаях определялся по методике [1]. На рис. 5,а приведены значения объема рассола, вычисленные по методикам [1] (формулы (11)–(13) и [5] (формула (2)), на рис. 5,б – соответствующие значения прочности.

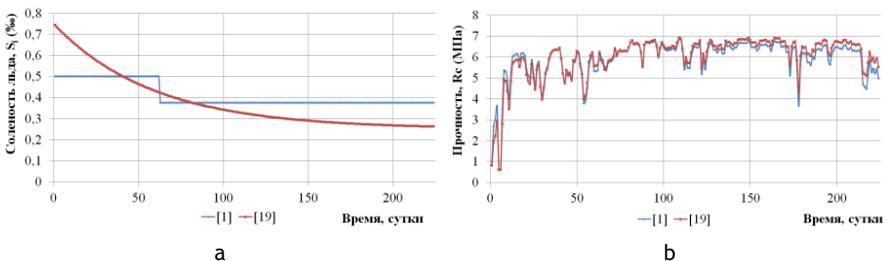


Рисунок 4: Изменение солёности (а) и прочности (б) во времени по методикам [1] и [19]

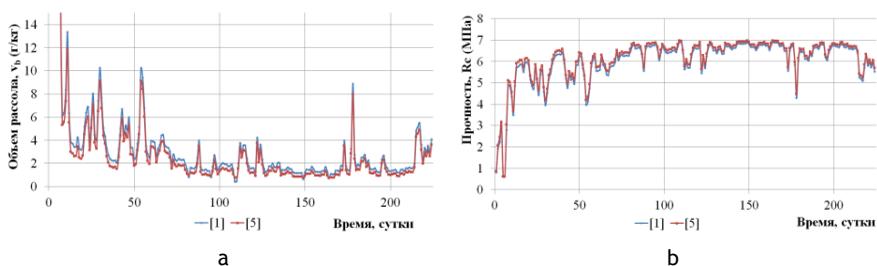


Рисунок 5: Изменение объема рассола (а) и прочности (б) во времени по методикам [1] и [5]

Анализ вычислений показал, что разница в значениях прочности льда по сравниваемым методикам не превышает 5%. Таким образом, любая из рассмотренных методик может применяться для инженерных вычислений. Зависимость (2) использовать удобнее с точки зрения расчетов, так как она проще в автоматизации по сравнению с зависимостями (11)–(13).

Учет характера распределения солености

По методикам [1, 2] авторы вычисляли прочность льда для множества объектов и сравнивали с результатами натурных испытаний. Результаты сравнения дали основания полагать, что вычисляемая прочность льда получается несколько завышенной. Некорректное вычисление прочности льда в дальнейшем приводит к завышению нагрузок на проектируемое ГТС и его экономических показателей.

При вычислении объема рассола в толще льда по слоям, пользуясь методиками, описанными в настоящей работе, соленость льда принимается постоянной и осредненной по толщине. Данное упрощение приводит к тому, что не учитывается реальное распределение солености во льду (рис. 3) и как следствие понижение его прочности в верхнем и нижнем слоях.

В случае отсутствия данных натурных исследований солености льда по толщине при проектировании предлагается учитывать дискретность солености введением соответствующих коэффициентов. Для верхнего и нижнего слоев предлагается принимать повышенное значение солености. Для средних слоев – пониженное. Значения коэффициентов для приведения среднего значения солености к солености соответствующего слоя предлагается назначить на основе анализа многочисленных исследований распределения солености по толщине льда. Дальнейшим направлением исследования в рассматриваемой области может стать работа по назначению описанных коэффициентов.

Поскольку прочность верхнего слоя льда по методикам [1, 2] наибольшая по сравнению с нижележащими слоями, учет повышенной солености верхнего слоя приведет к снижению итоговой прочности льда.

Выводы

1. В отечественной нормативной базе имеются различные подходы к определению солёности льда. Существуют версии нормативов с некорректно приведенными формулами для определения данной величины.

2. Методика определения объема рассола, приведенная в [20], идентична методике, приведенной в [1].

3. Кроме отечественных зависимостей для определения солёности льда и объема рассола в его порах известны зарубежные методики, применение которых упрощает процесс расчета.

4. Результаты, полученные с использованием рассмотренных в настоящей работе зарубежных зависимостей, расходятся с результатами, вычисленными по отечественным формулам, не более чем на 5%.

5. С целью упрощения расчетов при проектировании рекомендуется использовать формулу (2) для определения объема рассола вместо формул (11)–(13) из [1]. Объем рассола и прочность льда определять послойно в зависимости от температур отдельных слоев.

6. При выполнении аналитических расчетов прочности льда необходимо учитывать дискретность солёности по его толщине. В верхних и нижних слоях ледяного покрова следует принимать повышенные значения солёности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] СП 38.13330.2012. Свод правил. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*, М.: Минрегион РФ, 2012.

[2] СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) / Госстрой СССР. М., 1984.

[3] CAN/CSA-S471-04. General requirements, design criteria, the environmental and loads, National Standard of Canada, app. Dec. 2005.

[4] ISO 19906:2010. Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures, International Standard, app. Dec. 2011.

[5] API RP 2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions / Amer. *Petroleum Inst. Bulletin*. Dallas, 1995.

[6] Р 31.3.07-01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. М.: Минтранс России, 2002.

[7] СТО Газпром 2-3.7-29-2005. Методика расчета ледовых нагрузок на ледостойкую стационарную платформу. М.: Газпром, 2005.

[8] ВСН 41.88. Проектирование морских ледостойких стационарных платформ / Миннефтепром СССР. М., 1988.

- [9] П 58-76/ВНИИГ. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов) / Минэнерго СССР. Л., 1977.
- [10] Fransson L. Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads: Elforsk rapport 09:55 / L. Fransson, L. Bergdahl. April, 2009, 43 p.
- [11] Oil and Gas GmbH: General Terms and Conditions. Germanischer Lloyd, Hamburg, 2005.
- [12] Финагенов О.М., Уварова Т.Э., Ким С.Д. Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран // Вести газовой науки. 2013. №. 3(14).
- [13] Бурке А. Морские льды. Главсевморпути, 1940.
- [14] Лосет С., Шхинек К.Н., Гудместад О., Хойланд К. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. СПб.: Лань, 2010.
- [15] Кубышкин Н.В. Закономерности формирования солёности нарастающего морского льда и ее влияние на некоторые характеристики льда: дис... канд. физ.-мат. наук: 11.00.08. СПб., 2000. 154 с.
- [16] Фарафонов А.Э. Неоднородность ледяных полей и ее учет при определении ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения: дис... канд. техн. наук: 05.23.17. Владивосток, 2006. 126 с.
- [17] Weeks W. On sea ice, Univ. of Alaska Press, 2010.
- [18] Assur A. Composition of sea ice and its tensile strength, *Arctic sea ice*, **598**, p. 106–138, 1958.
- [19] Assur A., Weeks W.F. Growth, structure, and strength of sea ice. *US Army Materiel Command, Cold Regions Research & Engineering Laboratory*, **135**, 1964.
- [20] Океанографические таблицы, изд. 4-е, перераб. и доп. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 478 с.

The Effect of Salinity and Structure of Ice on Its Strength

Roman Gorgutsa¹, Daria Ksenofontova², Artemii Sokolov³

^{1,4}PhD (in Technical Sciences), Chief Engineer,
e-mail: rgorgutsa@morproekt.ru

^{2,4}Engineer (⁵PhD Student)

^{3,4}Head of a Group

⁴*Morstroytehnologiya*.

21/2, liter A, Gzhatskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 195220

⁵*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29, Polytechnicheskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 195251

Abstract: The article focuses on the structure and salinity of the ice. Basic dependencies for definition of ice salinity and quantity of liquid in ice, based on the national regulatory framework and foreign sources are presented. A comparative analysis of the impact of the above-mentioned parameters, calculated by different methods, on the final strength of the ice is performed. Recommendations on the choice of engineering methodology for calculating the strength of the ice are given. The article provides a method for adjusting the ice strength in some layers in case, when salinity in these layers calculated analytically is higher or lower than measured in field tests. Specified distribution of salinity in ice thickness may reduce the designed loads on hydraulic structures.

Keywords: hydraulic structure, salinity, ice strength, ice structure, liquid phase, brine, Northern Sea Route.