

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЁРТОГО ЛЬДА (ОБЗОР)

© 2023 г. К. Е. Сазонов^{1,2,*}

¹ Крыловский научный центр, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: kirsaz@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 02.03.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

В обзоре рассмотрены основные направления исследований тёртого льда. Основное внимание уделено морфометрическим особенностям тёртого льда в каналах, изучению пористости и прочностных свойств тёртого льда как сыпучей среды, а также процессам формирования консолидированного слоя. Описаны эксперименты по определению свойств тёртого льда в ледовых бассейнах — это новое направление в исследованиях. Сформулированы некоторые не решенные проблемы.

Ключевые слова: тёртый лёд, консолидированный слой, пористость, прочность, канал

DOI: 10.31857/S207667342302014X, **EDN:** RVFGJZ

ВВЕДЕНИЕ

Тёртым льдом (далее — ТЛ) или ледовой кашей (brash ice) называются плавающие ледяные образования, характерный размер которых не превышает 2 м. Такие образования всегда присутствуют в естественном дрейфующем ледяном покрове. К ТЛ могут быть отнесены начальные формы льда, образующиеся при замерзании акватории, например, блинчатый лёд (Сазонов, 2022). Также ТЛ всегда образуется при различных динамических процессах в ледяном покрове, таких как торошение и наслоение льда. Однако доля ТЛ, образовавшегося в естественных условиях, по отношению к другим типам льда достаточно мала, поэтому его роль в различных океанологических и гляциологических процессах незначительна. Этим можно объяснить отсутствие интереса исследователей к этому типу льда, который наблюдался до недавнего времени.

Отношение к ТЛ как объекту исследования стало меняться в конце XX века. Интерес к этой ледяной формации был обусловлен развитием судоходства в припайных льдах, которые характерны для внутренних водных путей, закрытых протяженных заливов внутренних морей, например, Балтийского. Для судоходства в этих районах, как правило, используются вполне определенные трассы, на которых прокладываются судоходные каналы. В результате эксплуатации таких каналов были выявлены особенности формирования в них льда. Установлено, что лёд в таких каналах отличается от находящегося в непосредственной близости припайного льда по следующим пара-

метрам: канал почти полностью заполнен ТЛ; толщина льда в канале может в несколько раз превышать толщину припайного льда; отдельные куски льда могут смерзаться в канале в монолит, толщина которого также может превышать толщину припайного льда.

Указанные особенности ледяных каналов оказывали существенное влияние на возможность плавания по ним судов (Сазонов, 2021). В некоторых случаях толщина слоя ТЛ в канале и степень его консолидации были таковыми, что движение по нему становилось невозможным и приходилось прокладывать новый канал параллельно существующему, например, на Енисее (Смирнов, 1993). С начала XXI в. интенсивность судоходства в арктических морях, включая зоны припайного льда, стала возрастать, увеличилось количество портов, работающих в ледовых условиях. Все это сделало проблему изучения ТЛ актуальной уже и для арктических морей.

Ниже приводится обзор состояния исследований проблемы ТЛ. Некоторые из материалов данной работы были ранее частично опубликованы автором (Сазонов, 2022). В обзоре рассматриваются исследования строения каналов и акваторий портов, заполненных ТЛ; исследования свойств ТЛ и процессов их консолидации.

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЁРТОГО ЛЬДА

Одни из первых исследований строения ледяных каналов с ТЛ выполнены скандинавскими

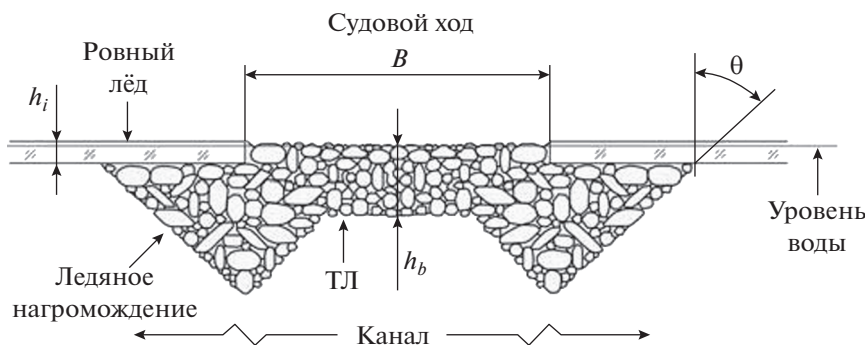


Рис. 1. Схема канала, заполненного тёртым льдом (Ettema, Huang, 1990).

Fig. 1. Scheme of a channel filled with brash ice (Ettema, Huang, 1990).

(Kannari, 1983; Sandkvist, 1986) и американскими специалистами (Ettema, Huang, 1990). Далее эти исследования продолжили (Nortala-Hoikkanen, 1999; Chomatas, 2015; Riska et al., 2019). Наиболее обстоятельна работа (Kannari, 1983), в которой приведены результаты натурных измерений морфометрических особенностей каналов ТЛ в Ботническом заливе. В ней представлены результаты промеров толщины слоя ТЛ в канале, как поперёк, так и вдоль канала.

Для удобства описания каналов, заполненных ТЛ, в работе (Kannari, 1983) введена характеристика приведённой толщины канала:

$$H_A = \frac{1}{B_c} \int_{x_1}^{x_2} H(x) dx, \quad (1)$$

где B_c — ширина канала; $H(x)$ — распределение толщин ТЛ по ширине канала, при этом точки начала и конца области интегрирования удовлетворяют условию $x_2 - x_1 > B_c$, учитывая распространение ТЛ под его кромки. Характеристика H_A до сих пор используется при описаниях каналов с ТЛ.

В работах (Kannari, 1983; Sandkvist, 1986; Nortala-Hoikkanen, 1999) изучены и сформулированы основные особенности ледяных каналов с ТЛ, которые сводятся к следующим положениям:

1. Распределение толщины слоя ТЛ по ширине канала можно считать условно симметричным относительно оси канала. Минимальная толщина слоя располагается в средней части канала, а к краям канала формируются ледяные нагромождения ТЛ, глубина которых может достигать значительных размеров. В работе (Nortala-Hoikkanen, 1999) в одном из исследованных каналов толщина ТЛ в его центральной части изменялась от 0.9 до 1.5 м, а толщина ледяных нагромождений по краям — от 1.5 до 3 м. При измерениях профилей ТЛ по ширине канала часто наблюдаются относительно небольшие ледяные образования,

расположенные между осью канала и его кромкой. Возникновение таких образований связано с прохождением по каналу относительно небольших судов, ширина которых меньше его ширины.

2. Распределение толщины ТЛ по длине канала также неравномерно. На большей части дистанции её изменения незначительны, резкое увеличение наблюдается в конце дистанции, что, возможно, связано с какими-либо изменениями в режиме движения судна.

3. Слой ТЛ не является гомогенным. По результатам бурения консолидированного слоя ТЛ в нем, так же как и в торосистых образованиях, обнаружены полости, свободные ото льда (Sandkvist, 1986).

На основании выполненных исследований была предложена обобщенная модель ледяного канала, которая используется во многих прикладных работах (рис. 1). Недавно эта модель была использована для создания относительно простой геометрической схемы его эволюции при движении судов (Bridges, 2020).

В работе (Kannari, 1983) выполнены исследования распределения по размерам кусков ТЛ, наполняющего канал. Такое распределение принято описывать логнормальным законом (Sorsimo, 2016; Prasanna, 2018) по аналогии с описанием распределения по размерам обломков битого льда в канале за ледоколом (Tuovinen, 1979). Описание распределения кусков льда по размерам по ширине канала дается в работе (Sandkvist, 1986). В ней указывается, что форма и размер ледяных глыб варьируют от очень маленьких кусочков ледяного сала до больших блоков объемом около 4 м³. Вдоль осевой линии канала в основном расположены небольшие куски льда и сала. Более крупные блоки льда смещены к краям канала. Чем больше судов ходит по каналу, тем различия в строении канала по ширине проявляются более резко. Автор указанной работы описывает также последовательную эволюцию кусков льда в канале. Во время первых проходов судна в каналах

тонкий ровный лёд разрушался на относительно большие куски. При этом наблюдались многочисленные наслоения льда, которые впоследствии смерзались. При увеличении количества проходов судов форма обломков льда в канале начинает стремиться к сферической. Такие куски льда при взаимодействии с корпусом проходящего судна практически не раздвигаются в сторону, а поворачиваются вокруг некоторой оси. Близкая картина формирования слоя ТЛ в канале описана в работе (Ettema, Huang, 1990).

Хотя исследование морфометрических особенностей ТЛ продолжается уже несколько десятилетий, остается еще ряд вопросов, которые не получили удовлетворительного объяснения. Так, не ясен вопрос о связи размеров кусков ТЛ с толщиной ровного ледяного покрова, в котором прокладывается первоначальный канал. В работе (Kannari, 1983) указано, что в различных каналах средний размер блока льда не совпадал. Непонятно, как в процессе эволюции канала происходит изменение размеров обломков, какое влияние на этот процесс оказывает частота движения судов. Существуют ли различия в характеристиках ТЛ, образовавшегося в судоходных каналах, в которых происходит относительно редкое движение судов, и ТЛ на акваториях портов, где движение носит интенсивный характер. Данных о распределении ТЛ на акваториях портов крайне мало (Riska et al., 2014; Riska et al., 2019) и они часто относятся к распределению льда в подводных каналах портов.

СВОЙСТВА ТЁРТОГО ЛЬДА

Для описания свойств ТЛ обычно используется модель механики сыпучей среды. Традиция восходит к методам исследования торосов и ледяных нагромождений (Loset et al., 2006; Palmer, Croasdale, 2013). Очевидно, что ТЛ во многом похож на перечисленные ледяные образования, поэтому использование одних и тех же методов анализа не вызывает сомнений. Необходимо отметить, что ТЛ благодаря своим размерам в наибольшей степени подходит для использования такого описания.

Одной из важных характеристик слоя ТЛ является его пористость. Согласно работе (Mellor, 1980), теоретическая пористость сыпучих материалов составляет примерно 0.4. В натуральных условиях она определяется путём бурения. При этом определяется так называемая “линейная” пористость, которую обычно отождествляют с пористостью всего слоя. В отличие от торосистых образований, где такое отождествление не совсем корректно (Астафьев и др., 1997; Сазонов, 2021), для слоя ТЛ оно может быть принято. Это связано с небольшими размерами кусков льда и, соответственно, более плотной его естественной упаков-

кой в слое. В работе (Nortala-Hoikkanen, 1999) указывается довольно широкий диапазон изменения этого параметра: от 0 до 0.3 для ТЛ, расположенного в средней части канала, и от 0 до 0.49 для ледяных нагромождений у краев канала. Еще больший диапазон изменения пористости указан в работе (Matala, 2021): от 0.07 до 0.6. Автор работы базируется на анализе многочисленных результатов измерений, включающих измерения в ледовых бассейнах. Отмечено, что данные, полученные в ледовых бассейнах 0.32–0.37 и 0.42, близки к теоретическому значению. Анализируя эти данные, автор работы считает такой разброс не противоречащим теории. По мнению автора данного обзора, это не так. Пористость ТЛ – переменная величина, которая эволюционирует во времени под действием термодинамических факторов (Сазонов, 2021). Об этом свидетельствуют данные, полученные в ледовых бассейнах, в которых за время проведения экспериментов термодинамические процессы не успевают проявиться и поэтому они близки к теоретическому значению. По результатам выполненных исследований можно указать тенденцию к снижению пористости ТЛ в средней части канала, где группируются куски льда наименьшего размера.

Основное соотношение механики сыпучей среды – это соотношение Кулона–Мора (Цытович, 1973):

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где c – коэффициент сцепления сыпучей среды; τ ; σ – касательные и нормальные напряжения на рассматриваемой элементарной площадке среды; φ – угол внутреннего трения среды.

Величины c и φ – физические константы сыпучей среды, подлежащие экспериментальному определению. Нахождение этих величин в натуральных условиях, как в случае изучения ледяных нагромождений, так и тёртого льда, весьма трудоемко, а полученные результаты не всегда однозначны. Поэтому подавляющее большинство данных о свойствах ледяных нагромождений и ТЛ как сыпучей среды получено в лабораторных условиях. Исследованию свойств льда в ледяных нагромождениях посвящено большое количество работ, например (Astrup, 2012), в которой описываются экспериментальные методы и устройства для определения параметров ледовой среды. В работах (Ettema, Urroz-Aguirre, 1991; Liferov, Bonnetmaire, 2005) приводится обзор полученных результатов, а также высказывается мнение, что линейная формула Кулона–Мора (2) не всегда хорошо описывает результаты. В качестве причин, вызывающих отклонение, называются возможность смерзания кусков льда между собой, значительное влияние механического зацепа кусков. Отклонения от закона Кулона–Мора наблюдаются и при увеличении скорости движения ТЛ.

В работе (Montenegro, Cabrera, 2017) приводятся данные, что при повышении скорости поведение такой сыпучей среды больше напоминает неньютоновскую жидкость.

Вопросам влияния спекания кусков льда на прочностные свойства ТЛ и льда в ледяных образованиях в последнее время уделяется большое внимание (Marchenko, Chenot, 2009; Boroojerdi et al., 2020). В указанных исследованиях изучалось влияние спекания на прочность образцов льда при сдвиге и изгибе. Наибольший интерес представляют результаты для образцов, погруженных в воду. В работе (Boroojerdi et al., 2020) было установлено, что при увеличении времени погружения образцов льда с 1 мин до 14 дней прочность сцепления при замерзании увеличивалась со временем погружения, достигая пика примерно через 5 мин. Затем она уменьшалась, когда лёд достигал температуры равновесия с окружающей водой, после чего оставалась постоянной. Авторы работы считают, что процессы спекания и ползучести — доминирующий механизм при длительном погружении кусков льда в воду. В работе (Zhaka et al., 2020) приведены результаты испытаний по исследованию прочности на сжатие образцов льда, полученных из смерзшегося в монолит ТЛ в канале и из ровного льда в окрестностях канала. Авторы отмечают, что в обоих типах льда наблюдалась смешанная структура из зернистого и столбчатого льда, но в ровном льду преобладали столбчатые кристаллы, которые прерывались слоями ледяной крошки. ТЛ содержал беспорядочно ориентированные фрагменты столбчатых кристаллов льда, смешанные с зернистыми. Результаты испытаний показали, что прочность на сжатие смерзшегося льда во всех случаях превышала соответствующую прочность ровного льда. Характер изменения прочности льда при изменении скорости его нагружения оставался одинаковым для обоих типов льдов. Как для ровного льда, так и для повторно замерзшего ТЛ, отобранного в Ботническом заливе, максимальное значение прочности на сжатие уменьшалось с увеличением пористости. Солёность обоих типов льдов была крайне мала и не оказывала влияния на величину прочности.

Интересные результаты исследований получены специалистами из Норвегии. В этих работах исследовалось влияние различных факторов на смерзание кусков лабораторного льда. Первая работа (Helgøy et al., 2013a) посвящена описанию методики проведения исследований, включая описание приёмов приготовления лабораторного льда, и экспериментальной установке. В работе (Helgøy et al., 2013b) приводятся результаты экспериментов по изучению прочности сцепления кусков льда при замораживании в зависимости от следующих факторов: контактные поверхности (естественная верхняя/нижняя и поверхности, по-

лученные при распиливании образцов); ориентация кристаллов; солёность ледяных блоков и др.

Сдвиговая прочность замороженных образцов изменялась в диапазоне от 1.9 до 118.3 кПа. Наиболее прочные связи замерзания образовывались между двумя естественными нижними поверхностями, а самые слабые связи при замерзании образовывались между двумя распиленными поверхностями. Для образцов с распиленными контактными поверхностями было исследовано влияние направления кристаллов льда. Образцы со столбчатыми кристаллами, выровненными перпендикулярно к замораживаемым поверхностям, дали наивысшую прочность смерзания, образцы со столбчатыми кристаллами, выровненными параллельно к замораживаемым поверхностям, дали самую низкую прочность скрепления замораживанием. Высокая начальная солёность (2–3.5‰), кусков льда показала высокую степень смерзания по сравнению с ледяными блоками с низкой начальной солёностью (0–1‰). Образцы с распиленными контактными поверхностями испытывались как на воздухе, так и на воде. Эти эксперименты показали, что прочность замораживания образцов, испытанных в воде, примерно вдвое больше по сравнению с образцами, испытанными на воздухе. Обнаружено, что изменение температуры ледяных блоков и скорости их нагружения не влияет на прочность смерзания. В работе (Astrup et al., 2013) приводятся результаты испытаний смерзшихся кусков льда в сдвиговом боксе. По этим данным, напряжение сдвига возрастало в диапазоне от 8.9–59.7 кПа, усиливаясь с увеличением солёности кусков льда.

Для исследования ТЛ с позиции механики сыпучей среды в ледовых бассейнах применяются практически те же самые методы, что и при натурных исследованиях (Matala, Skogström, 2019; Matala, 2020). В описываемых экспериментах определялись следующие параметры ТЛ: пористость, распределение кусков льда по размерам, сжимаемость, угол естественного откоса и угол внутреннего трения. В экспериментах испытывались три типа ТЛ: два первых были приготовлены из моделированного льда с прочностью на изгиб 29 и 57 кПа, третий — пресный лёд, промышленно изготавливаемый для коммерческих нужд, прочность на изгиб 600 кПа. Этот лёд представлял собой полые цилиндры небольшого размера. ТЛ первых двух типов изготавливался с помощью ручного инструмента, лёд третьего типа использовался без предварительной подготовки. Средний размер кусков по результатам измерений составлял для первого типа льда 34.8–35.6 мм, для второго — 42.2–62.2 мм, а для третьего — 25.8–26.5 мм.

Пористость определялась по стандартной процедуре определения плотности льда, принятой в ледовых бассейнах. В экспериментах пористость

ТЛ, приготовленного из моделированного льда, изменялась от 0.3 до 0.437 (1-й и 2-й типы льда). Средняя пористость льда 3-го типа была 0.545. Столь высокие значения связаны с наличием полостей внутри кусков льда. Изучение размеров кусков льда первых двух типов показало, что на характер их распределения оказывает влияние исходная прочность льда на изгиб, что связано с увеличением модуля упругости более прочного льда. Наибольший интерес представляют результаты изучения компрессионного уплотнения ТЛ. Для проведения эксперимента использовался специальный бокс, который погружался в бассейн, заполнялся ТЛ, а затем к нему прикладывалось сжимающее давление. Эксперименты показали, что при сжатии ТЛ существуют два критических значения давления. При давлениях ниже первого критического значения лёд в боксе не сжимается, при достижении второго критического давления сжатие прекращается. Изменение объема ТЛ между этими значениями давления описывается индексом сжатия λ_c , который задавался формулой $\lambda_c = dV/[\log(\sigma)]$, где V — объём ТЛ; σ — напряжения сжатия. Средняя величина индекса для 1-го типа льда составила -0.00774 , для 2-го типа -0.00629 , для 3-го типа -0.02758 . Размерность индекса специально не указана. Автор исследования (Matala, 2020) приводит размерность $\text{м}^3/\text{Па}$, с чем нельзя согласиться, так как напряжения прологарифмированы. В приведённых результатах можно увидеть тенденцию к увеличению сжимаемости ТЛ при уменьшении размеров льдин. Существенное увеличение сжимаемости для 3-го типа льда, по-видимому, связано с влиянием формы кусков льда. Сжимаемость ТЛ — достаточно важная характеристика для различных прикладных вопросов, поэтому требует дальнейшего изучения.

Углы естественного откоса определялись как на воздухе, так и в воде путём их непосредственного измерения по сделанным фотографиям. Результаты для 1-го и 2-го типов льда значительно отличаются от аналогичных величин, принятых автором в качестве натурных данных. 3-й тип льда показал удовлетворительные результаты. Величина угла внутреннего трения определялась с помощью специального бокса, погруженного в воду бассейна. Автор работы не удовлетворен полученными данными (для льдов 1-го и 2-го типа в некоторых экспериментах были получены отрицательные значения), поэтому они не приводятся.

Интересные исследования по разрушению блоков соленого льда при контакте друг с другом выполнены в работах (Prasanna et al., 2021a; 2021b). Такое взаимодействие можно считать типичным для ТЛ и льда в ледяных образованиях. В работах показано, что возникающие при взаимодействии кусков льда усилия часто лимитиру-

ются развитием сдвигового разрушения, при этом блоки обычно разрушаются при сдвиге на плоскостях, имеющих характеристики “кулоновских сдвиговых разломов”. Можно сделать предположение, что именно такой механизм способствует образованию округлой формы ТЛ.

Новый экспериментальный метод изучения свойств ТЛ в натурных условиях предложен в работе (Bonath et al., 2019). В слой ТЛ погружается устройство, напоминающее зонтик. Под слоем ТЛ это устройство раскрывается, а затем вытаскивается вместе с ТЛ. Усилие, затрачиваемое на выдергивание устройства, регистрируется. При проведении испытаний использовался кран, установленный на ледоколе.

Дальнейшее изучение предложенного метода изложено в работе (Patil et al., 2021). В ней авторы пытались проанализировать полученные экспериментальные материалы с помощью математического моделирования. При выполнении расчётов изучался вопрос о том, какие характеристики ТЛ можно определить предложенным методом. Окончательного ответа пока не получили. Очевидно, что предложенный метод обладает явным достоинством, связанным с его простотой. Однако столь же очевидны и присущие ему недостатки. Основной из них — влияние корпуса ледокола на состояние ТЛ. Измерения можно провести только в непосредственной близости от корпуса ледокола, но при движении ледокола состояние ТЛ изменяется.

НАРАСТАНИЕ И СМЕРЗАЕМОСТЬ ТЁРТОГО ЛЬДА

Изучению этого аспекта проблемы ТЛ посвящено большое количество работ. На первом этапе исследований усилия были направлены на получение полуэмпирических зависимостей, базирующихся на решении задачи Стефана и связывающих нарастание ТЛ с градусо-днями мороза (Sandkvist, 1986; Ettema, Huang, 1990). Эти зависимости имели вид:

$$h_{bi,eq} = h_0 + \sum_{i=1}^M \alpha \sqrt{\Delta\theta_i}, \quad (3)$$

где $h_{bi,eq}$ — эквивалентная толщина ТЛ в канале в соответствии с определением из работы (Kannagi, 1983); h_0 — начальная толщина ровного льда, в котором был проложен канал; M — число проходов судов по каналу; $\Delta\theta_i$ — количество градусо-дней мороза между $i-1$ и i проходами судна по каналу; α — эмпирический коэффициент.

Сандквист (Sandkvist, 1986) установил на основе изучения двух судоходных каналов в районе Лулеа, что величина этого коэффициента равна

$\alpha = 12 \frac{\text{мм}}{(\text{°C} \cdot \text{день})^{0.5}}$. В работе (Eranti et al., 1983) при изучении ТЛ в Сайменском канале было получено другое значение коэффициента $\alpha = 6.5 \frac{\text{мм}}{(\text{°C} \cdot \text{день})^{0.5}}$. Столь значительное расхождение в значениях коэффициента указывало на то, что предложенный подход не учитывал какие-то важные факторы, влияющие на процесс нарастания ТЛ.

В дальнейшем финскими специалистами было предложено в формулах типа (3) учитывать пористость ТЛ (ρ) (Riska et al., 1997), где выражение для расчета толщины ТЛ может быть записано в следующем виде:

$$h_{bi,eq} = h_0 + \sum_{i=1}^M \alpha \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} \sqrt{\Delta\theta_i}. \quad (4)$$

В этом выражении определение коэффициента α отличается от того, которое использовалось в формуле (3). Этот коэффициент может быть определен по экспериментальным данным, либо рассчитан по известным теплофизическим характеристикам льда $\alpha = \sqrt{2\lambda/\rho_i L}$, где λ — коэффициент теплопроводности льда; ρ_i — плотность льда; L — удельная теплота фазового перехода вода—лёд.

В описанных моделях приращение слоя ТЛ в канале происходит при движении по нему судов, которые разрушают консолидированный слой во льду и переводят его в ТЛ с пористостью (ρ). Приращение толщины слоя ТЛ после прохода судна зависит от толщины консолидированного слоя в нём $\Delta h_{bi,eq} = (\rho/1-\rho) h_{cl}$. Тем не менее уже в работах (Riska et al., 1997; Karulin et al., 2018), указывалось, что при движении судна в ТЛ происходит не только разрушение консолидированного слоя, но и перемешивание его кусков с несмерзшимся ТЛ. При этом под воду попадают куски льда, содержащие “запас холода”, который способствует замерзанию воды в пространстве между ними и другими кусками. В работе (Karulin et al., 2018) предлагается вводить поправку, которая учитывает этот эффект, в величину начальной пористости ТЛ. При определении её величины в работе предполагается, что указанные процессы протекают мгновенно. Такое предположение приводит к мгновенному уменьшению пористости слоя ТЛ и при выполнении дальнейших расчётов провоцирует более быстрый рост консолидированного слоя. В реальности выравнивание температур длится достаточно долго, поэтому изменение пористости внутри слоя ТЛ происходит постепенно, а также неравномерно в разных частях слоя. “Запас холода”, а также процессы спекания льда на стыке отдельных кусков могут приводить к образованию “температурных мостиков” внутри слоя

ТЛ (Сазонов, 2021a). Наличие таких мостиков приведет к тому, что нарастание льда будет происходить не только на границе формирования консолидированного слоя, но и ниже него. Этот процесс также со временем будет понижать пористость ТЛ. Еще одним фактором, который может влиять на изменение пористости ТЛ, служит хорошо известный процесс уплотнения сыпучей среды. Некоторые специалисты считают, что именно этот процесс — основной механизм, приводящий к уменьшению пористости торосистых образований (Харитонов, 2021). Из вышесказанного следует, что пористость ТЛ может изменяться во времени, поэтому в математических моделях прогнозирования развития толщины слоя ТЛ необходимо это учитывать.

В последнее время для решения задач прогнозирования роста ТЛ все чаще используется решение задачи теплопроводности в полном объёме, при этом уравнение теплового баланса служит одним из граничных условий на неизвестной нижней границе консолидированного слоя, например (Riska et al., 2019; Андреев и др., 2019). Полная постановка задачи позволяет учесть влияние на процесс формирования консолидированного слоя целого ряда внешних факторов: наличия на верхней поверхности слоя снега и надводного слоя ТЛ, инсоляцию, собственное тепловое излучение слоя, турбулентный теплообмен с окружающим воздухом и т.д. В работах (Riska et al., 2014; Chomatas, 2015) проанализировано влияние большей части указанных факторов на результаты расчетов. Авторы приходят к выводу, что наибольшее влияние на развитие консолидированного слоя в ТЛ оказывают пористость и частота движения судов, следующим по значимости оказалась температура воздуха.

Новым направлением в исследовании смерзаемости каналов с ТЛ стало изучение указанных процессов в ледовых бассейнах. Ранее такие эксперименты выполнялись эпизодически без проведения необходимых детальных исследований (Krupina et al., 2013). Недавно эти исследования возобновились под руководством профессора К. Риска. Две группы исследований выполнены в Гамбургском ледовом бассейне. В работе (Bridges et al., 2019) были описаны две серии экспериментов по исследованию смерзания слоя ТЛ при различных начальных условиях. В первой серии экспериментов варьировалась толщина слоя ТЛ, пористость и солёность льда оставались постоянными. Во второй серии изменялась пористость льда, что было достигнуто за счёт изменения толщины исходного ледяного поля, из которого изготовлялся ТЛ. Пористость составляла 0.1, 0.2 и 0.3. Толщина слоя ТЛ при пористости 0.2 в обеих сериях была одинаковой. Эксперимент с первой серией продолжался 48 ч, а со второй — 168 ч, температура воздуха во время экспериментов была постоян-

ной – 15°C. Непрерывно фиксировались температура воздуха, воды и распределение температуры внутри слоя ТЛ, включая консолидированный слой. Периодически измерялись толщина слоя, солёность льда на верхней и нижней границах консолидированного слоя, прочность консолидированного слоя на сжатие. В результате получен набор интересных данных, малая часть которых приведена в работе. Интерес представляют измерения профиля температуры по толщине. К сожалению, в работе не указано, к каким условиям относится представленная информация, однако её анализ позволяет сделать вывод о существенной нелинейности профилей. Результаты измерений прочностных свойств льда из консолидированного слоя показали, что прочность возрастает при увеличении времени намораживания и начальной пористости, и уменьшается с ростом солёности. Эти работы продемонстрировали принципиальную возможность изучения процессов смерзаемости в ледовом бассейне.

В следующей работе (Bridges et al., 2020) ТЛ в канале создавался с помощью модели судна из ровного льда толщиной 30 мм. В этом эксперименте весь бассейн по длине был разбит на четыре секции. В секциях 2–4 модель протаскивалась по каналу каждый день, а в секции 1 – раз в два дня. Эксперимент продолжался 7 дней, при этом в бассейне поддерживалась температура –7.4°C. Основное внимание уделялось измерению морфометрических характеристик ТЛ в образовавшемся канале, температуры, солёности и пористости. Наибольший интерес представляют данные о характере изменения профиля сечения канала в зависимости от частоты прохода модели. Интересные данные получены по пористости, она оставалась практически постоянной со средним значением $\rho = 0.45$. Столь высокое значение пористости свидетельствует, на наш взгляд, о существенных погрешностях её измерения в условиях ледового бассейна, а также о том, что целый ряд физических процессов, приводящих к снижению пористости, не был смоделирован в эксперименте.

В работе (Zhaka et al., 2021) эксперименты проводились в небольшом бассейне с естественным охлаждением. Цель исследования – сравнение результатов измерения нарастания толщины тонкого слоя ТЛ (<10 см), который изготавливался с помощью ручного инструмента (молоток и металлическая пластина), с расчётами по модели Сандквиста. Эксперименты, проведенные в небольшом масштабе, продемонстрировали возможность изучения влияния различных факторов, влияющих на образование и развитие ТЛ. Так, исследования выявили влияние характера разрушения и начальной толщины льда на размер кусков и толщину слоя. Кроме этого, было обна-

ружено значительное влияние выпавшего снега на характеристики слоя ТЛ.

Накопление ТЛ в каналах и особенно на закрытых акваториях портов представляет серьёзную проблему для их использования. Для борьбы с нарастанием слоя ТЛ часто применяются тепловые методы: подача теплой воды (Carstens, 1977; Pan, Eranti, 2009) и барботаж (Pan, Eranti, 2007). Использование тепловой энергии не всегда эффективно, так как существует вероятность уноса тепла движущейся жидкостью. Тем не менее подобные системы широко используются в Финляндии. Так, в г. Котка теплая вода с тепловой мощностью 50–200 МВт выбрасывается в море зимой от электростанции Муссало. Эта теплая вода дрейфует вдоль берега на протяжении примерно 2 км и позволяет создать благоприятные условия в порту. В ряде портов Финляндии применяется система барботажа в основном для защиты причальных стенок (Pan, Eranti, 2007).

Работы (Pan, Eranti, 2007; Pan, Eranti, 2009) посвящены применению современных CFD методов для решения задач распространения струй теплой воды и подъёма воды от дна пузырьками воздуха на акваториях портов. По выполненным в них оценкам в порту Вуосаари в Хельсинки примерно 4×10^5 м³ ТЛ может быть растоплено в экстремальную зиму. Проблема борьбы с ТЛ рассматривалась при проектировании порта Сабетта (Coche, Kalinin, 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в работе обзор исследований ТЛ показывает, что эта проблематика длительное время остается актуальной. Интенсивность проводимых исследований в первую очередь определяется запросами практики, которые связаны с работой водного транспорта на замерзающих акваториях. В последнее время одними из важнейших стимулов стали проектирование и строительство портов и все увеличивающийся объём грузопотока через них. Поэтому большая часть исследований ТЛ выполнена специалистами в области гидрометеорологии, судостроения, гидротехники и эксплуатации флота.

Основные направления выполняемых исследований во многом повторяют работы, которые уже много лет сопровождают изучение ледяных нагромождений, например, торосов. Это анализ факторов, влияющих на морфометрические характеристики ТЛ в каналах и портах, законов формирования консолидированного слоя и пористости, прочностных свойств. Во всех этих направлениях получены новые, интересные результаты. Тем не менее еще остаются вопросы, требующие дальнейших исследований. Часть из них были упомянуты выше. Здесь же можно указать на необхо-

димось дальнейшей разработки средств борьбы с ТЛ, а также усовершенствование технических средств, приспособленных к эффективной работе в этих условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев О.М., Гудошников Ю.П., Виноградов Р.А., Клячкин С.В. Ледовые каналы как лимитирующий фактор при проектировании терминалов отгрузки углеводородов в прибрежной зоне арктических морей // Науч.-технич. сб. "Вести газовой науки". 2019. № 2 (39). С. 46–52.
- Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стахи Охотского моря. СПб: "Прогресс-Погода", 1997. 197 с.
- Сазонов К.Е. К вопросу о пористости кия тороса (по поводу статьи В.В. Харитоновой) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 1. С. 60–66. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-60-66>
- Сазонов К.Е. Движение судов в тёртых льдах: результаты исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 406–424. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>
- Сазонов К.Е. Тёртый лёд – рукотворная проблема морской ледотехники. // Природа. 2022. № 3. С. 15–26.
- Смирнов А.П., Майнагашев Б.С., Голохвастов В.А., Соколов Б.М. Безопасность плавания во льдах. М.: Транспорт, 1993. 335 с
- Харитонов В.В. Распределение пористости неконсолидированной части кия торосов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 1. С. 44–59. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>
- Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 280 с.
- Astrup O.S. Experimental Investigations of Ice Rubble: Shear Box and Pile Testing. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology. 2012. 145 p.
- Astrup O.S., Helgøy H., Høyland K.V. Laboratory work on freeze-bonds in ice rubble, part III: shear box experiments // Электронный ресурс. https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_090.pdf. Дата обращения: 01 03 2023
- Bonath V., Zhaka V., Sand B. Field measurements on the behavior of brash ice // Электронный ресурс. <https://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-106.pdf>. Дата обращения: 01 03 2023
- Borojerd M.T., Bailey E., Taylor R.S. Experimental study of the effect of submersion time on the strength development of freeze bonds // Cold Regions Science and Technology. 2020. V. 172. 102986. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103120>
- Bridges R. Geometric Model on the Evolution of Brash Ice Channels // Proc. of the Thirtieth (2020) Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Shanghai, China, 2020. P. 617–621.
- Bridges R., Riska K., Haase A. Experimental Tests on the Consolidation of Broken and Brash Ice // Электронный ресурс. <https://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-144.pdf>. Дата обращения: 01 03 2023
- Bridges R., Riska K., Suominen M., Haase A. Experimental Tests on Brash Ice Channel Development // Proc. of the Thirtieth Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Shanghai, China, 2020. P. 639–643.
- Carstens T. Maintaining an Ice-Free Harbor by Pumping of Warm Water // Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Delft, St. Johns, Canada. 1977. V. 1. P. 347–357.
- Chomatat K. Development of Brash Ice Growth Models and Estimation of the Energy Needs to Manage Ice in the Yamal LNG port in Sabetta. Master of Science Case Study. Delft University of Technology. 2015. 202 p.
- Coche E., Kalinin A. Yamal LNG: Challenges of an LNG port in Arctic // Электронный ресурс. https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_172.pdf. Дата обращения: 01 03 2023
- Eranti E., Penttinen M., Rekonen T. Extending the Ice Navigation Season in the Saimaa Canal // Proc. 7th Int. POAC Conf. Helsinki, Finland. 1983. P. 494–504.
- Ettema R., Huang H.P. Ice Formation in Frequently Transited Navigation Channels. CRREL Special Report 90–40. 1990. 120 p.
- Ettema R., Urroz-Aguirre G.E. Friction and cohesion in ice rubble reviewed // Cold Regions Engineering. 1991. V. 12. P. 317–326.
- Helgøy H., Astrup O.S., Høyland K.V. Laboratory work on freeze-bonds in ice rubble, part I: experimental set-up, ice-properties and freeze-bond texture // Электронный ресурс. https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_125.pdf. Дата обращения: 01 03 2023
- Helgøy H., Astrup O.S., Høyland K.V. Laboratory work on freeze-bonds in ice rubble, part II: results from individual freeze-bond experiments // Электронный ресурс. https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_126.pdf. Дата обращения: 01 03 2023
- Kannari P. Measurements of characteristics and propulsion performance of a ship in old ice-clogged channels // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC–83, Espoo, Finland. 1983. V. 2. P. 600–619.
- Karulin E.B., Karulina M.M., Tarovik O.V. Analytical Investigation of Navigation Channel Evolution in Severe Ice Conditions // Электронный ресурс. https://www.researchgate.net/publication/326190461_Analytical_Investigation_of_Navigation_Channel_Evolution_in_Severe_Ice_Conditions. Дата обращения 01.03.2023
- Krupina N., Chernov A., Likhomanov V., Maksimova P., Savitskaya A. The ice tank study of ice performance of a large LNGC in the old channel // Электронный ресурс. https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_023.pdf. Дата обращения: 01 03 2023
- Liferov P., Bonnemaire B. Ice rubble behaviour and strength: Part I. Review of testing and interpretation of results // Cold Regions Science Technology. 2005. 41 (2). P. 135–151. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2004.10.001>

- Loset S., Shkhinek K.N., Gudmestad O.T., Hoyland K.V.* Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. St. Petersburg: Publuser "Lan", 2006. 272 p.
- Marchenko A., Chenot C.* Regelation of ice blocks in the water and the air // Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Lulea, Sweden. 2009. V. 1. P. 543–554.
- Matala R.* Investigation of model-scale brash ice properties // Ocean Engineering. 2021. V. 225. 108539. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108539>
- Matala R., Skogström T.* Soil mechanics measurement methods applied in model brash ice // Proc. of the 25th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Delft, The Netherlands, 2019. P. 53–65.
- Mellor M.* Ship resistance in thick brash ice // Cold Regions Science Technology. 1980. V. 3 № 4. P. 305–321.
- Montenegro Cabrera I.* Smoothed particle hydrodynamics modeling of brash ice. Master Thesis. University of Rostock. 2017. 94 p.
- Nortala-Hoikkanen A.* Development of brash ice in channels navigated by ship // Proc. of the 15th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-99, Espoo, Finland. 1999. V. 2. P. 620–630.
- Palmer A., Croasdale K.* Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publ. 2013. 357 p.
- Pan H., Eranti E.* Applicability of Air Bubbler Lines for Ice Control in Harbours // China Ocean Engineering. 2007. V. 21. №. 2. P. 215–224.
- Pan H., Eranti E.* Flow and heat transfer simulations for the design of the Helsinki Vuosaari harbour ice control system // Cold Regions Science and Technology. 2009. № 55 P. 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.09.001>
- Patil A., Sand B., Fransson L., Bonath V., Cwirzen A.* Simulation of brash ice behavior in the gulf of Bothnia using smoothed particle hydrodynamics formulation // Journ. of Cold Regions Engineering – ASCE. 2021. V. 35. № 2. 04021003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000245)
- Prasanna M.* Numerical Simulation of Brash Ice. Master Thesis. University of Rostock. 2018. 92 p.
- Prasanna M., Wei M., Polojärvi A., Cole D.M.* Breakage of saline ice blocks in ice-to-ice contact // Электронный ресурс. <https://www.poac.com/Papers/2021/POAC21-065.pdf>. Дата обращения: 01 03 2023
- Prasanna M., Wei M., Polojärvi A., Cole D.M.* Laboratory experiments on floating saline ice block breakage in ice-to-ice contact // Cold Regions Science and Technology 2021. V. 189. 103315. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021b.103315>
- Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T.* Performance of Merchant Vessels in the Baltic. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 1997. V. 52. 72 p.
- Riska K., Bridges R., Shumovskiy S., Thomas C., Coche E., Bonath V., Tobie A., Chomatas K., Caloba Duarte de Oliveira R.* Brash ice growth model – development and validation. // Cold Regions Science and Technology. 2019. V. 157. P. 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.004>
- Sandkvist J.* Brash Ice Behavior in Frequent Ship Channels // University of Luleå. 1986. №. 139. 132 p.
- Sorsimo A., Nyman T., Heinonen J.* Ship-ice interaction in a channel. Winter navigation research board. Helsinki, Finland. Research Report. 2016. №. 93. 22 p.
- Tuovinen P.* The Size Distribution of Ice Blocks in a Broken Channel. Ship hydrodynamics laboratory, Helsinki University of Technology. Otaniemi, Espoo, 1979. 19 p.
- Zhaka V., Bonath V., Sand B., Cwirzen A.* Physical and mechanical properties of ice from a refrozen ship channel ice in Bay of Bothnia // Электронный ресурс. https://sintef.brage.unit.no/sintefxmlui/bitstream/handle/11250/2716075/IAHR_2020_BS_Physical%2band%2bmechanical%2bproperties%2bof%2bice%2bfrom%2ba%2brefrozen%2bship%2bchannel%2bice%2bin%2bBay%2bof%2bBothnia.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Дата обращения: 01 03 2023
- Zhaka V., Bridges R., Riska K., Cwirzen A.* Brash ice formation on a laboratory scale // Электронный ресурс. <https://www.poac.com/Papers/2021/POAC21-086.pdf>. Дата обращения: 01 03 2023

Citation: Sazonov K.E. Investigation of brash ice (overview). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 302–312. [In Russian]. doi 10.31857/S207667342302014X

Investigation of Brash Ice (Overview)

K. E. Sazonov^{a,b,#}

^a *Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia*

^b *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: kirsaz@rambler.ru*

The urgency of brash ice study is growing in connection with intensive shipping in fast ice zone of freezing seas as well as inland waterways. In addition, an important incentive for such studies is the design and construction of port infrastructure in these water areas. The review shows that the main directions of research refer to three main topics. 1) Investigation of morphometrical brash ice characteristics in navigable channels and harbors, their variability under ambient factors. The most well-studied morphometrical parameters of

brash ice are relative channel thickness and its distribution over channel width. Size distribution details about brash ice floes are of great interest for researchers. 2) Investigation of porosity and mechanical properties of brash ice as a granular material taking account of freezing between individual ice blocks. In many respects, these parameters determine the pattern of brash ice interaction with ships and the possibility of their movement. 3) Description of consolidated layer formation in brash ice and refinement of predictions for brash ice growth in the water area under consideration depending on the intensity of ship traffic and the number of degree-days with negative temperatures over the time interval between ship passages. Large attention is given to new methods of studies including full-scale and laboratory experiments, as well as the use of ice basins for this purpose, with a brief review of thermal methods for brash ice management. The paper formulates some of the problems yet to solved, which require extra studies.

Keywords: brash ice, consolidated layer, porosity, strength, channel

REFERENCES

- Andreev O.M., Gudoshnikov Yu.P., Vinogradov R.A., Klyachkin S.V. Ice channels as a limiting factor in the design of hydrocarbon export terminals in the coastal zone of the Arctic seas. *Vesti Gazovoy Nauki*. Bulletin Gas Science. 2019, 2: 46–52. [In Russian].
- Astafiev V.N., Surkov G.A., Truskov P.A. *Torosy i stamukhi Ohotskogo moraya*. Hummocks and stamukhas of the Sea of Okhotsk. St. Petersburg: “Progress-Weather”, 1997: 197 p. [In Russian]
- Sazonov K.E. On the porosity of ridge keel (with reference to V.V. Kharitonov’s paper). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (1): 60–66 [In Russian].
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-60-66>
- Sazonov K.E. Ship operation in brash ice: results of investigations *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 406–424 [In Russian].
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>
- Sazonov K.E. Brash ice – a man-made problem of marine ice engineering. *Priroda*. Nature. 2022, 3: 15–26. [In Russian].
- Smirnov A.P., Mainagashev B.S., Golokhvastov V.A., Sokolov B.M. *Bezopasnost’ plavaniia vo l’dakh*. Ice navigation safety. Safety of navigation in ice. Moscow: Transport, 1993: 335 p. [In Russian].
- Kharitonov V.V. Distribution of porosity of the unconsolidated part of the keel of hummocks *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (1): 44–59 [In Russian].
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>
- Tsytoich N.A. *Mekhanika gruntov*. Soil mechanics. Moscow: Vysshaya shkola. High School. 1973: 280 p. [In Russian].
- Astrup O.S. Experimental Investigations of Ice Rubble: Shear Box and Pile Testing. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology. 2012: 145 p. Astrup O.S., Helgøy H., Høyland K.V. Laboratory work on freeze-bonds in ice rubble, part III: shear box experiments. Retrieved from: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_090.pdf. (Last access: 01 March 2023)
- Bonath V., Zhaka V., Sand B. Field measurements on the behavior of brash ice. Retrieved from: <https://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-106.pdf>. (Last access: 01 March 2023).
- Borojerdi M.T., Bailey E., Taylor R.S. Experimental study of the effect of submersion time on the strength development of freeze bonds. *Cold Regions Science and Technology*. 2020, 172: 102986.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103120>
- Bridges R. Geometric Model on the Evolution of Brash Ice Channels. Proc. of the Thirtieth (2020) Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Shanghai, China, 2020: 617–621.
- Bridges R., Riska K., Haase A. Experimental Tests on the Consolidation of Broken and Brash Ice. Retrieved from: <https://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-144.pdf>. (Last access: 01 March 2023).
- Bridges R., Riska K., Suominen M., Haase A. Experimental Tests on Brash Ice Channel Development. Proc. of the Thirtieth Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Shanghai, China, 2020: 639–643.
- Carstens T. Maintaining an Ice-Free Harbor by Pumping of Warm Water. Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Delft, St. Johns, Canada. 1977, 1: 347–357.
- Chomatas K. Development of Brash Ice Growth Models and Estimation of the Energy Needs to Manage Ice in the Yamal LNG port in Sabetta. Master of Science Case Study. Delft University of Technology. 2015: 202 p.
- Coche E., Kalinin A. Yamal LNG: Challenges of an LNG port in Arctic. Retrieved from: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_172.pdf. (Last access: 01 March 2023).
- Eranti E., Penttinen M., Rekonen T. Extending the Ice Navigation Season in the Saimaa Canal. Proc. 7th Int. POAC Conf. Helsinki, Finland. 1983: 494–504.
- Ettema R., Huang H.P. Ice Formation in Frequently Transited Navigation Channels. CRREL Special Report 90–40. 1990: 120 p.
- Ettema R., Urroz-Aguirre G.E. Friction and cohesion in ice rubble reviewed. *Cold Regions Engineering*. 1991, (12): 317–326.
- Helgøy H., Astrup O.S., Høyland K.V. Laboratory work on freeze-bonds in ice rubble, part I: experimental set-up, ice-properties and freeze-bond texture. Retrieved from: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_125.pdf. (Last access: 01 March 2023).

- Helgøy H., Astrup O.S., Høyland K.V.* Laboratory work on freeze-bonds in ice rubble, part II: results from individual freeze-bond experiments. Retrieved from: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_126.pdf (Last access: 01 March 2023).
- Kannari P.* Measurements of characteristics and propulsion performance of a ship in old ice-clogged channels. Proc. of the 7th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-83, Espoo, Finland. 1983. V. 2. P. 600–619.
- Karulin E.B., Karulina M.M., Tarovik O.V.* Analytical Investigation of Navigation Channel Evolution in Severe Ice Conditions. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/326190461_Analytical_Investigation_of_Navigation_Channel_Evolution_in_Severe_Ice_Conditions (Last access: 01 March 2023).
- Krupina N., Chernov A., Likhomanov V., Maksimova P., Savitskaya A.* The ice tank study of ice performance of a large LNGC in the old channel. Retrieved from: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_023.pdf (Last access: 01 March 2023).
- Liferov P., Bonnemaire B.* Ice rubble behaviour and strength: Part I. Review of testing and interpretation of results. Cold Region Science and Technology. 2005, 41 (2): 135–151.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2004.10.001>
- Loset S., Shkhine K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V.* Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. St. Petersburg: Publisher “Lan”, 2006: 272 p.
- Marchenko A., Chenot C.* Regelation of ice blocks in the water and the air. Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Luleå, Sweden. 2009, 1: 543–554.
- Matala R.* Investigation of model-scale brash ice properties. Ocean Engineering. 2021, 225: 108539.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108539>
- Matala R., Skogström T.* Soil mechanics measurement methods applied in model brash ice. Proc. of the 25th Inter. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Delft, The Netherlands, 2019: 53–65.
- Mellor M.* Ship resistance in thick brash ice. Cold Reg. Sci. Technol. 1980, 3 (4): 305–321.
- Montenegro Cabrera I.* Smoothed particle hydrodynamics modeling of brash ice. Master Thesis. University of Rostock. 2017: 94 p.
- Nortala-Hoikkanen A.* Development of brash ice in channels navigated by ship. Proc. of the 15th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-99, Espoo, Finland. 1999, 2: 620–630.
- Palmer A., Croasdale K.* Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publ. 2013: 357 p.
- Pan H., Eranti E.* Applicability of Air Bubbler Lines for Ice Control in Harbours. China Ocean Engineering. 2007, 21 (2): 215–224.
- Pan H., Eranti E.* Flow and heat transfer simulations for the design of the Helsinki Vuosaari harbour ice control system. Cold Regions Science and Technology 2009, 55: 304–331.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.09.001>
- Patil A., Sand B., Fransson L., Bonath V., Cwirzen A.* Simulation of brash ice behavior in the gulf of Bothnia using smoothed particle hydrodynamics formulation. Journ. of Cold Regions Engineering – ASCE. 2021, 35 (2): 04021003.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000245)
- Prasanna M.* Numerical Simulation of Brash Ice. Master Thesis. University of Rostock. 2018: 92 p.
- Prasanna M., Wei M., Polojärvi A., Cole D.M.* Breakage of saline ice blocks in ice-to-ice contact. Retrieved from: <https://www.poac.com/Papers/2021/POAC21-065.pdf> (Last access: 01 March 2023).
- Prasanna M., Wei M., Polojärvi A., Cole D. M.* Laboratory experiments on floating saline ice block breakage in ice-to-ice contact. Cold Regions Science and Technology 2021, 189: 103315.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021b.103315>
- Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T.* Performance of Merchant Vessels in the Baltic. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt 1997, 52: 72 p.
- Riska K., Bridges R., Shumovskiy S., Thomas C., Coche E., Bonath V., Tobie A., Chomatas K., Caloba Duarte de Oliveira R.* Brash ice growth model – development and validation. // Cold Regions Science and Technology. 2019, 157: 30–41.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.004>
- Sandkvist J.* Brash Ice Behavior in Frequent Ship Channels. University of Luleå. 1986, 139: 132 p.
- Sorsimo A., Nyman T., Heinonen J.* Ship-ice interaction in a channel. Winter navigation research board. Helsinki, Finland. Research Report. 2016, 93: 22 p.
- Tuovinen P.* The Size Distribution of Ice Blocks in a Broken Channel. Ship hydrodynamics laboratory, Helsinki University of Technology. Otaniemi, Espoo, 1979: 19 p.
- Zhaka V., Bonath V., Sand B., Cwirzen A.* Physical and mechanical properties of ice from a refrozen ship channel ice in Bay of Bothnia. Retrieved from: https://sintef.brage.unit.no/sintefxmlui/bitstream/handle/11250/2716075/IAHR_2020_BS_Physical%2band%2bmechanical%2bproperties%2bof%2bice%2bfrom%2ba%2brefrozen%2bship%2bchannel%2bice%2bin%2bBay%2bof%2bBothnia.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Last access: 01 March 2023)
- Zhaka V., Bridges R., Riska K., Cwirzen A.* Brash ice formation on a laboratory scale. Retrieved from: <https://www.poac.com/Papers/2021/POAC21-086.pdf> (Last access: 01 March 2023).