

Инженерные мероприятия по уменьшению толщины ледового поля в порту Сабетта на полуострове Ямал



Альшименко А. И.
д. т. н., профессор,
зав. кафедрой
«Гидротехническое
строительство» СПбПУ



Казунин И. Д.
аспирант СПбПУ



Николаевский М. Ю.
к. т. н., генеральный директор
ООО «Морстройтехнология»

Аннотация: Строительство морского порта Сабетта, расположенного на полуострове Ямал, предназначенного для обеспечения перевалки углеводородного сырья и поставок природного газа, нефти и газового конденсата морским транспортом в другие страны. В условиях арктического севера, где располагается порт Сабетта, существует проблема замерзания акватории, что, в свою очередь, создает трудности в судоходстве.

На сегодняшний день существует несколько способов решить эту проблему: механическое разрушение ледового покрова (ледоколы), тепловое воздействие (использование барботажных установок), растапливание льда теплой водой.

В статье представлен новый метод разрушения ледового покрова, который предполагает уменьшение теплопроводности верхних слоев воды. Для этого можно использовать «одеяло», состоящее из отдельных элементов, позволяющих их подвижку при проходе судна. Также эти элементы будут создавать поры в ледовом поле, что уменьшит его прочность и позволит кораблю разламывать лед.

Использование «одеяла» позволит существенно сократить затраты энергии на проводку судов при наличии ледового покрова.

Ключевые слова: Арктика, акватория порта, ледовое поле, судоходство во льдах, ледовое воздействие, тепловое воздействие.

Abstract: The construction of north sea-port Sabetta, located at Yamal peninsula is designed for the transloading of hydrocarbon crude from Yamal gas condensate field to provide the transfer of natural gas and oil by sea transport to other countries. Arctic area conditions where port Sabetta is located produce difficulties for navigation related to the problem of icing.

There are three ways of solving this problem nowadays: mechanical destruction of the ice sheet (by means of ice-breakers), heat exposure (using bubbler devices), ice melting by warm water.

The paper presents a new method of ice sheet destruction which suggests decreasing heat conductivity of upper water layers. To achieve this it is possible to use a "blanket" made up of separate polyethylene elements closely located to each other covering the harbour area and to allow their shift during ship passage. In addition these elements will make pores in ice field reducing its strength and allowing the ship to break ice easily.

Using the "blanket" will allow to cut significantly energetic and, consequently, economical costs for pilotage in north conditions.

Key words: arctic harbour area, ice sheet, ice navigation, ice exposure, heat exposure.



Рис. 1. Расположение порта Сабетта. 3D-модель порта Сабетта. Причалы для швартовки судов, завод «СПГ-Сабетта» по сжижению газа (фото с сайта <http://www.novatek.ru>)

На полуострове Ямал начато строительство морского порта Сабетта (рис. 1), предназначенного для транспортировки сжиженного газа, нефти и газового конденсата в страны Западной Европы, Северной и Южной Америки и страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

Одной из проблем, которые предстоит решить при строительстве порта, является обеспечение нормальных условий подхода судов для выполнения погрузо-разгрузочных работ. Площадь акватории, которую нужно защитить от замерзания, составляет $S_{\text{авв}} = 111$ га (она рассчитана с учетом необходимости устройства разворотного круга, операционных акваторий и других объектов в соответствии с нормативными правилами) [8] (рис. 2).

Борьба с образованием ледового покрова на поверхности акваторий морских портов, расположенных в северных широтах, ведется достаточно давно. К настоящему времени предложен ряд способов обеспечения движения судов в акваториях портов. Их можно разделить на две группы: механическое разрушение ледового покрова и тепловое воздействие на ледовый покров [2].

Механическое разрушение ледового покрова в первую очередь подразумевает проводку судов с помощью ледоколов. Ледоколы разрушают ледовый покров, ломая его на отдельные небольшие льдины, что позволяет судам соответствующего ледового класса проходить за ними в кильватере. Однако такая проводка, обеспечивающая движение одного судна или каравана судов, достаточно дорога, а канал, образованный при проводке судов, быстро замерзает, что требует прокладки нового судового хода. Следует заметить, что ледовый покров, образованный при замерзании с включением льдин, разрушенных ранее, обладает существенно большей прочностью и требует больших затрат энергии при следующей проходке [1].

Примеры использования теплового воздействия на ледовый покров сводятся в основном к применению барботажных установок (использующих идею переноса относительно теплых нижних слоев воды в верхние) [11], а также сбрасыванию подогретых теплых вод [2]. В частности, на сегодняшний день успешным является использование теплых вод совместно с барботажом для защиты порта Вуосаари (Хельсинки) от образования льда: Nuachen Pan и Esa Eranti [12] предложили систему (рис. 3), которая позволяет использовать тепло контура ТЭС для обогрева акватории порта.

На рис. 3 показано, как теплая вода t_r от ТЭС поступает в водосбросной канал, откуда с t'_r забирается и с t''_r под углом в 45° подается внутрь акватории порта. Перемешиваясь при помощи барботажных установок, она равномерно прогревает всю зону и защищает от ледообразования.

Выполним оценку энергопотребления трех основных способов борьбы с образованием льда, приведенную к затратам энергии на разрушение 1 м^3 :

— оценка энергии, затраченной ледоколом, произведена из расчета мощности СЭУ ледокола ($N_{\text{сэу}} = 95$ МВт), потраченной на прохождение $L = 1$ м льда, толщиной $h = 1$ м, со скоростью $V_s = 1\text{ м/с}$:

$$Q = \frac{L}{V_s} \cdot N_{\text{сэу}} = \frac{1}{1} \cdot 95 = 95 \text{ МДж}$$

— оценка энергии барботажной установки произведена с использованием энергии теплой воды ($+40^\circ\text{C}$) и 30% разрушения льда за счет барботаж:

$$Q = 0,7 \cdot (c_p \cdot m \cdot \Delta T + m \cdot L) = 0,7 \cdot (2100 \cdot 1 \cdot 40 + 1 \cdot 2100) = 270 \text{ МДж}$$

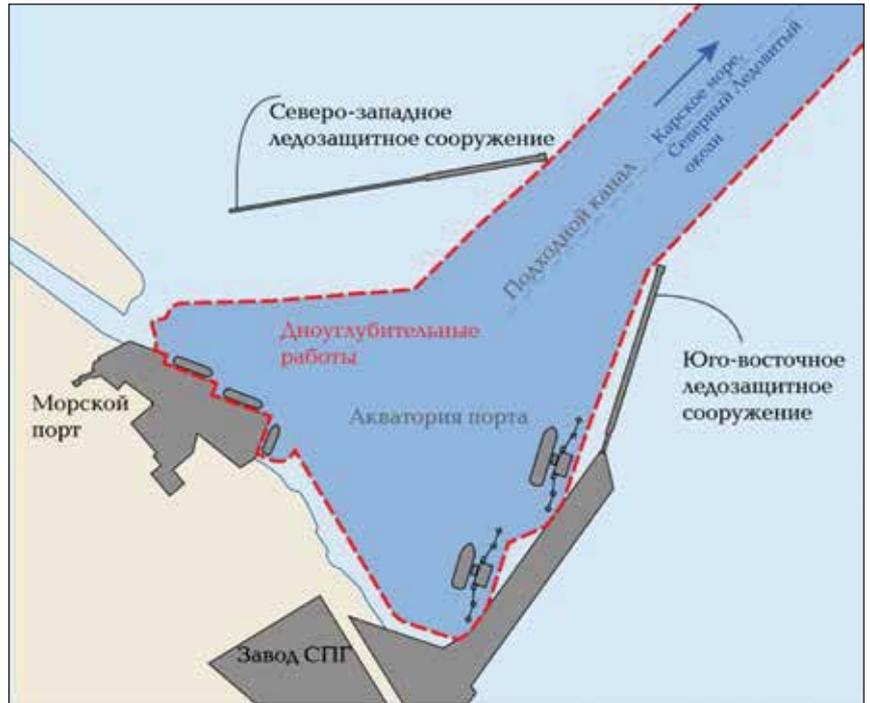


Рис. 2. Порт Сабетта. Вид сверху (фото с сайта <http://www.skmost.ru>)

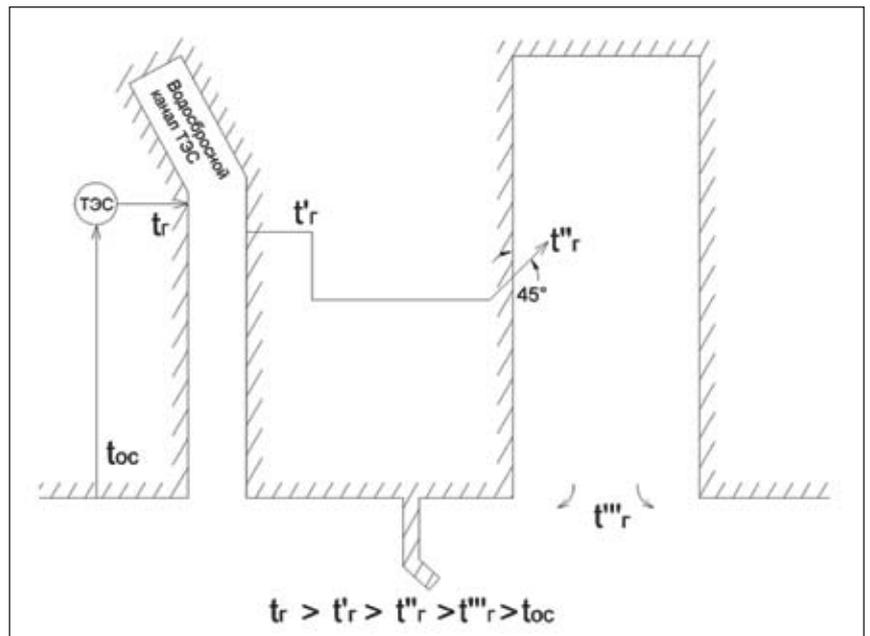


Рис. 3. Схема тепловых потоков порта Вуосаари, Хельсинки [12]

— оценка энергии растапливания льда выполнена с использованием метода слива горячей воды без перемешивания:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T + m \cdot L = 385 \text{ МДж}$$

В условиях порта Сабетта важным является обеспечение самой возможности прохода судов соответствующего ледового класса и швартовки их у причалов. Отдельные льдины могут оставаться на поверхности, если они не мешают навигации. Таким образом, задачу проводки можно преобразовать, сведя ее к уменьшению толщины ледового покрова, а не к полному его уничтожению. Это позволит существенно сократить затраты энергии на проводку судов при наличии ледового покрова.

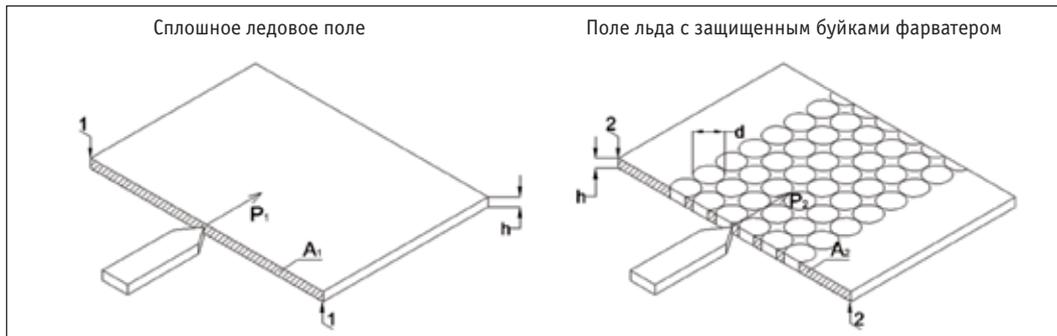


Рис. 4. Схематическая модель сплошного ледового поля и поля льда с защищенным буйками фарватером

В нормальных условиях усилие, создаваемое при движении судна, будет прямо пропорционально (1) допустимому напряжению и площади сечения фронтального поля льда (Сеч. 1-1 рис. 4), а при расположении буйков внутри поля, усилие будет снижено на величину прямо пропорциональную (1) уменьшению площади льда за счет исключения площади буйков (Сеч. 2-2 рис. 4). Общее снижение прочности льда за счет нахождения в нем подвижных буйков (центров концентраций напряжений) можно оценить, используя известные зависимости [5]:

$$P = \sigma_{\text{льда}} * A, \quad (1)$$

откуда:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\sigma_{\text{льда}} * A_2}{\sigma_{\text{льда}} * A_1} = \frac{A_1 - n * d * h}{A_1} = 1 - \frac{n * d * h}{A_1} \quad (2)$$

где P – прикладываемое усилие разрушения (Н), $\sigma_{\text{льда}}$ – допустимое напряжение (Па), A_1 – площадь сечения без отверстий (м^2), A_2 – площадь сечения с отверстиями (м^2),

d – диаметр буйка (м), n – количество буйков в сечении (шт.), h – толщина льда (м).

Для оценки уровня энергетических затрат необходимо рассчитать тепловой баланс системы [3], [7], который будет иметь специфические особенности,

накладываемые на него предложенной нами конструкцией.

На рис. 5 изображена схема теплового баланса, учитывающая основные потоки тепла от грунта, воды, воздуха и теплопритока от грунтовых вод. При уменьшении температуры окружающей среды вода начинает отдавать тепло воздуху ($q_{\text{возд}}$). Как только температура верхних слоев воды опускается до нуля и ниже, начинает образовываться лед, и тогда скорость передачи тепла уменьшается. Сама вода, помимо своего собственного тепла, получает его от грунта ($q_{\text{гр}}$) и грунтовых вод ($q_{\text{гр вод}}$). Кроме того, за счет течения реки ($W_{\text{рек}}$) образуется диссипация энергии теплового потока ($q_{\text{тр}}$), который также влияет на температуру воды ($T_{\text{вод}}$) и ее способность сопротивляться замерзанию.

Уравнение теплового баланса системы (рис. 5) с учетом сделанного допущения о том, что дисбаланс энергии будет конвертироваться в образование ледового покрытия ($\rho_{\text{лед}}$ – плотность льда ($\text{кг}/\text{м}^3$), L – удельная теплота плавления льда ($\text{Дж}/\text{кг}$), $h_{\text{лед}}$ – толщина льда (м)), записывается следующим образом [9]:

$$dE = \frac{dMi}{dt} = \rho_{\text{лед}} * L * \frac{dh_{\text{л}}}{dt} = \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

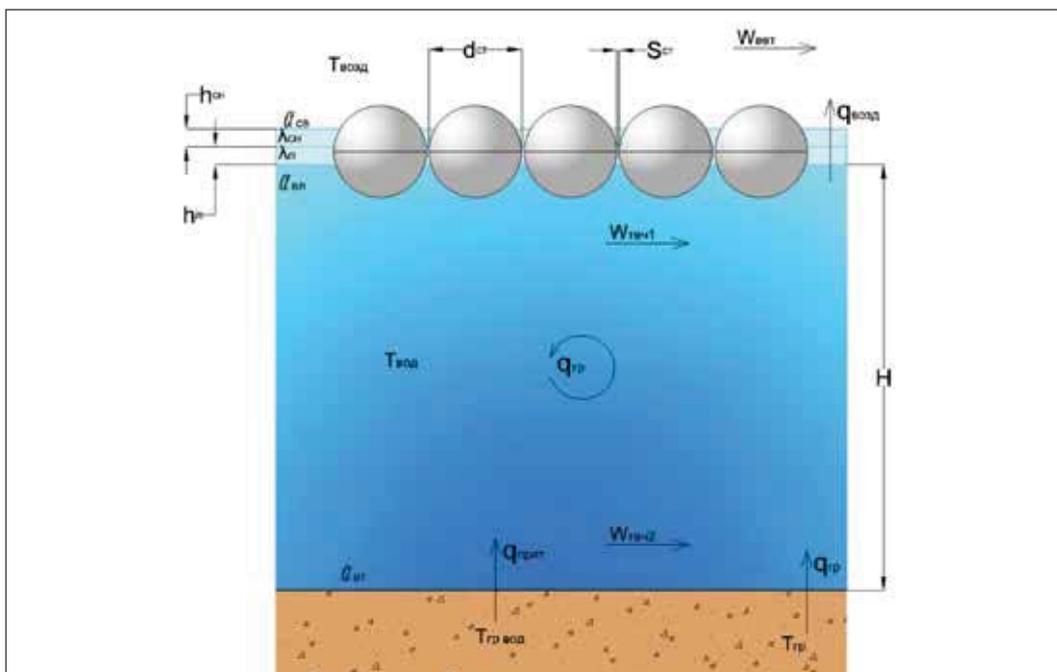


Рис. 5. Схема теплового баланса защищенной буйками акватории порта

где тепловые потоки записываются в следующем виде:

$$\sum_{i=1} q_i = q_{\text{возд}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{прит}} + q_{\text{гр}} \quad (4)$$

В соответствии с известными зависимостями теплоприток от воды к воздуху через лед, снежный покров и конструкции буйков записывается:

$$q_{\text{возд}} = \alpha * (T_{\text{возд}} - T_{\text{лед}}), \quad (5)$$

где:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{св}}} + \frac{h_{\text{снег}}}{\lambda_{\text{снег}}} + \frac{h_{\text{лед}}}{\lambda_{\text{лед}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вл}}}}$$

Теплоприток от грунта к воде:

$$q_{\text{гр}} = \alpha_{\text{гр}} * (T_{\text{гр}} - T_{\text{вод}}) \quad (6)$$

Теплоприток от грунтовых вод к воде:

$$q_{\text{гр вод}} = C_{\text{н}} * (T_{\text{гр вод}} - T_{\text{вод}}) \quad (7)$$

Трение воды в зависимости от вида течения, конструкции буйков и диссипации энергии турбулентного потока:

$$q_{\text{в}} = \rho * \varepsilon * H \quad (8)$$

где ρ – плотность воды (кг/м³), ε – диссипация энергии потока, H – глубина водоема (м).

В свою очередь:

$$\varepsilon = g * W_{\text{теч1}} * i$$

где $W_{\text{теч1}}$ – скорость течения реки (м/с), g – ускорение свободного падения (м/с²), i – уклон поверхности дна (см/км).

Будем считать теплообмен стационарным, для которого коэффициенты теплопередачи α (Вт/(м²*град)) и теплопроводности λ (Вт/(м*град)) являются функциями вида [4], [10]:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{св}} &= f(W_{\text{вет}}; d_{\text{ст}}; S_{\text{ст}}) \\ \lambda_{\text{снег}} &= f(h_{\text{снег}}; d_{\text{ст}}; \lambda_{\text{ст}}; S_{\text{ст}}) \\ \lambda_{\text{лед}} &= f(h_{\text{лед}}; d_{\text{ст}}; \lambda_{\text{ст}}; S_{\text{ст}}) \\ \alpha_{\text{вл}} &= f(W_{\text{теч1}}; d_{\text{ст}}; S_{\text{ст}}) \\ \alpha_{\text{гр}} &= f(W_{\text{теч2}}) \\ q_{\text{тр}} &= f(W_{\text{теч1}}; d_{\text{ст}}; S_{\text{ст}}) \end{aligned} \quad (9)$$

где $W_{\text{вет}}$ – скорость ветра (м/с), $d_{\text{ст}}$ – диаметр буйка (м), $S_{\text{ст}}$ – расстояние между буйками (м), $h_{\text{снег}}$ – толщина снега (см), $h_{\text{лед}}$ – толщина льда (см), $W_{\text{теч1}}$ – скорость течения воды у поверхности (м/с), $W_{\text{теч2}}$ – скорость течения воды у дна (м/с).

В результате анализа формул (3), (4) получим дифференциальное уравнение скорости увеличения толщины льда в зависимости от внешних воздействий:

$$\frac{dh_{\text{л}}}{dt} = \frac{1}{\rho_{\text{лед}} * L} * (q_{\text{возд}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{прит}} + q_{\text{гр}}) \quad (10)$$

Решим уравнение (10) с учетом (9), где интенсивность теплового потока между дном и водой будет рассматриваться с учетом того, что температура у дна близка к нулю (условие близости к вечной мерзлоте), и особенностей порта Сабетта [6]: $W_{\text{вет}} = 6,8$ м/с, $d_{\text{ст}} = 2$ м, $\lambda_{\text{снег}} = 0,1$ Вт/(м*град), $\lambda_{\text{лед}} = 2,2$ Вт/(м*град), $T_{\text{возд}} = \text{от } -8^{\circ}\text{C до } -48^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{вод}} \approx +2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{гр вод}} = 0^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{ст}} = 0,1$ м, $h_{\text{снег}} = 5$ см, $\lambda_{\text{ст}} = 80,4$ Вт/(м*град), $W_{\text{теч1}} = 0,1$ м/с, $W_{\text{теч2}} = 0,04$ м/с, $i = 4$ см/км.

В результате для принятой толщины снега $h_{\text{снег}} = 5$ см, получим следующие зависимости интенсивности образования льда:

На графике (рис. 6) отображено изменение толщины образования льда на основе решения уравнения (10) в зависимости от градиента температур пресной воды $T_{\text{вод}} = +2^{\circ}\text{C}$, окружающей среды в диапазоне от $T_{\text{возд}} = -8^{\circ}\text{C}$ до -48°C и материала буйков — легированная сталь.

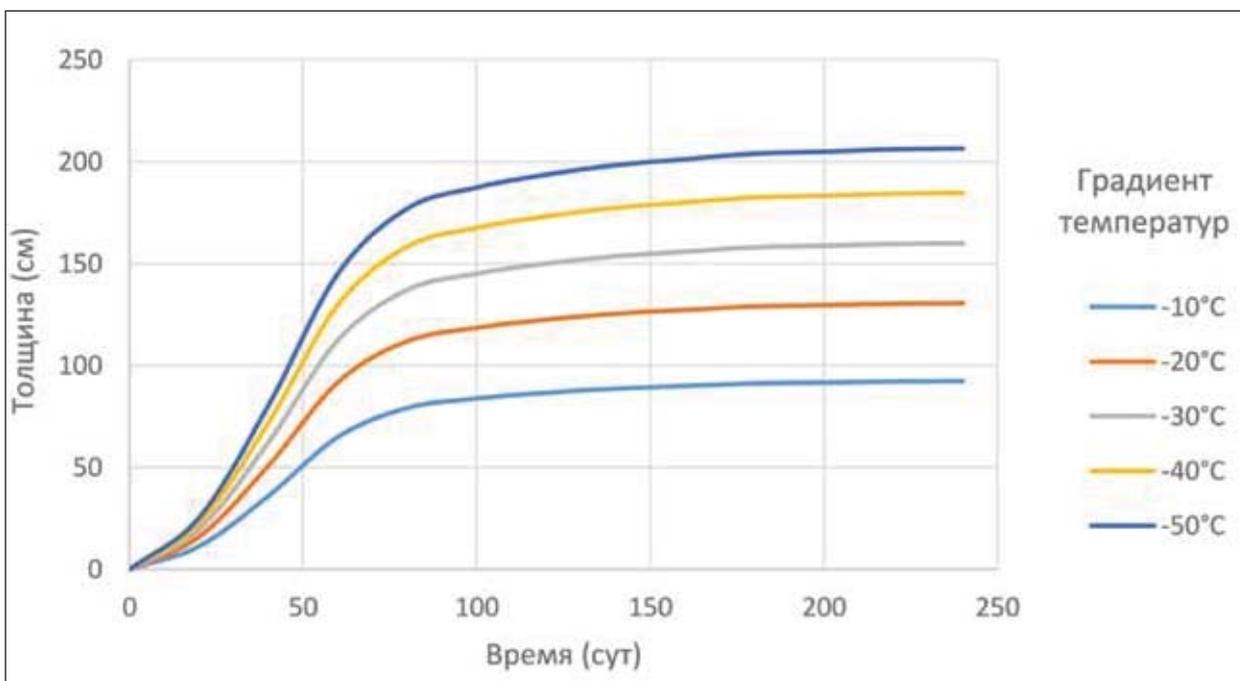


Рис. 6. Расчетный график изменения толщины льда на поверхности акватории, защищенной буйками, в зависимости от градиента температур между пресной водой и температурой окружающей среды

Приведенный график (рис. 6) показывает, что наличие 5 см слоя рыхлого снега приводит к стабилизации нарастания толщины льда. Однако со временем снег спрессовывается, и его теплопроводность возрастает, следовательно, возрастает толщина льда. Для ликвидации снижения теплопроводности снега в условиях малоснежных зим на территории порта можно расположить установку, генерирующую искусственный снег, который будет «накрывать» защищаемый буйками фарватер и задерживаться между ними, тем самым сохраняя низкую теплопроводность (рыхлого) снега и уменьшая толщину льда.

Анализ теплового баланса (10) показал, что са-

мым эффективным способом снижения толщины льда $h_{\text{л}}$ является:

- изменение теплопроводности льда с помощью включения в его структуру металлических или полиуретановых буйков с воздухом;
- изоляция ледового покрытия и буйков сверху с помощью естественного или искусственного снега (природный изолятор), генерируемого специальными установками, расположенными на входе в акваторию (рис. 7).

Таким образом, проблему защиты порта Сабетта от ледообразования в его акватории можно решить с меньшими затратами энергии, чем при ранее предложенных способах.

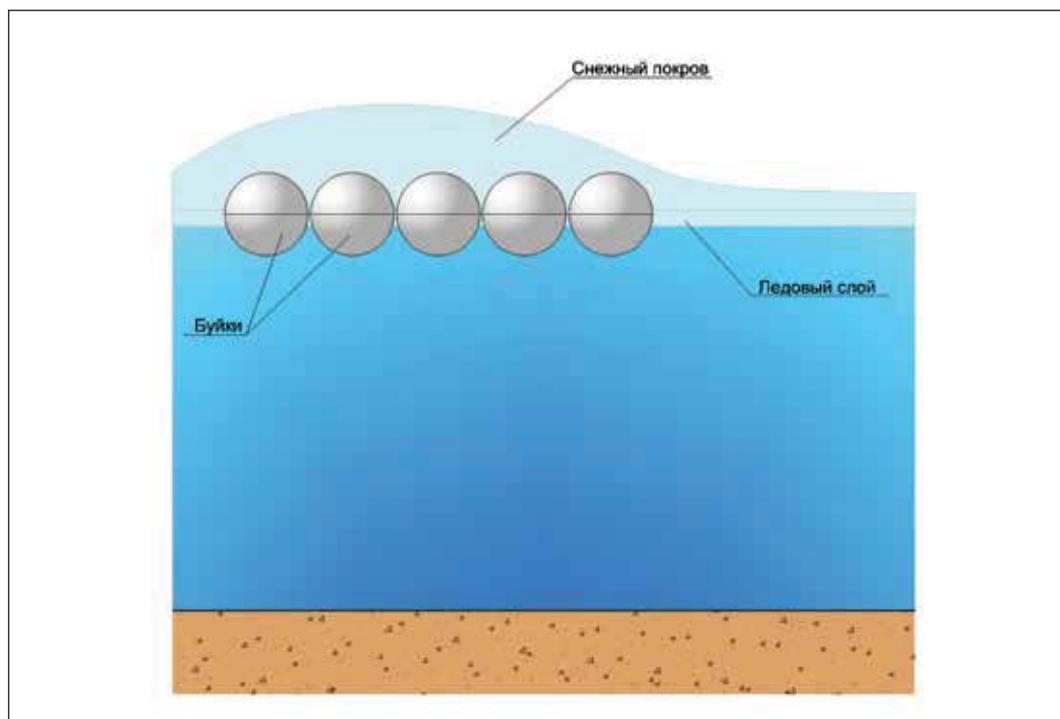


Рис. 7. Схема взаимодействия снега и буйков

ЛИТЕРАТУРА:

1. Альхименко А. И. и др. Гидротехнические сооружения морских портов. С. П. Лань. 2014. 427 с.
2. Богородский В. В., Гаврило В. П., Недошивин О. А. Разрушение льда. Методы, технические средства. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 232 с.
3. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР / Р. В. Донченко. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 242 с.
4. Елема В. А. Техническая термодинамика и теплопередача. Новороссийск, 2013. 312 с.
5. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. М.: Физматлит, 1959.
6. Кириллов В. В. Государственная экологическая экспертиза в районе пос. Сабетта на полуострове Ямал. Москва, 2012. 52 с.
7. Козлов Д. В. Лед пресноводных водоемов и водотоков / Д. В. Козлов. М.: Изд-во МГУП, 2000. 263 с.
8. Минин М. В. Строительство морского порта Сабетта // Электронное агентство Arctic info. Web: <http://www.arctic-info.ru>
9. Юренева В. Н., Лебедева П. Д. Теплотехнический справочник. Том 1. Москва, 1976. 743 с.
10. Юренева В. Н., Лебедева П. Д. Теплотехнический справочник. Том 2. Москва, 1976. 897 с.
11. Carstens, T. Maintaining an Ice-Free Harbour by Pumping of Warm Water the Heat budget // Proceedings of the POAC Conference. 1977. V. 1.
12. Huachen Pan, Esa Eranti. Flow and heat transfer simulations for the design of the Helsinki Vuosaari harbour ice control system // Journal Elsevier, 2009. P. 304 310.

Резервы импортозамещения

Бесконнекторные балочные шпунтовые стены с внутренним анкером и нащельником из классических шпунтов, или рюмочные шпунтовые стены. Характерные особенности рюмочных шпунтовых стен

Текущая экономическая и политическая ситуация предполагает быстрый поиск технологических решений, позволяющих снизить стоимость шпунтовых стен, в том числе для вновь возводимых глубоководных портов страны, и минимизировать зависимость от импортных комплектующих.

Генеральный директор ООО «Профиль Групп Фирм» А. Л. Калинин и технический директор к. т. н. А. В. Калинина рассказывают о техническом решении специалистов компании – рюмочных шпунтовых стенах.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для глубоководных портов нужны мощные и длинные несущие шпунтовые сваи. Как правило, такие сваи имеют либо 0-образное сечение (трубы), либо H-образное сечение (балки). Оба варианта требуют сварки — присоединения шпунтовых замковых элементов (замков) к свае. Новая труба большого диаметра — это дорого и долго из-за перегруженности производственных мощностей. Дополнительно к ней нужен еще более дорогой (как правило, импортный) замок-коннектор, плюс дорогая логистика (перевозка «воздуха»).

Крупных горячекатаных балок (более 70Ш5, НТМК) при нынешнем технологическом укладе у нас в стране пока не выпускают. Значит, балку для сверхтяжелых стен нужно сварить — причем разнополочную. А еще лучше вместо балки, в качестве несущей части свайной конструкции, применить сварной тавр (Т-образное сечение) — он меньше весит. К тавру легко подобрать необходимые габариты и моменты сечения.

Сами по себе балки и тавры задачу соединения свай в стену не решают. Все равно нужны замки-коннекторы. Замки можно взять у стандартных шпунтов. Но для этого шпунт надо разрезать, приварить каждую половинку резаного шпунта к трубе, что образует два сварных шва, а всего — четыре. Такой способ требует значительных финансовых и временных затрат. Эту тему хорошо исследовал г-н В. В. Гончаров (председатель совета директоров ООО «Трест Запсибгидрострой»), к. т. н. в своих изысканиях по трубошпунтам. Работать желательно со стандартными готовыми изделиями, не требующими дополнительной обработки. Например, объединить в одно целое стандартно выпускаемые г/к (горячекатаные) шпунт и балку.

Возникает вопрос — каким способом объединять. Процесс нужен простой и надежный. Пусть это будет сварка. Современные технологии позволяют получить прочность сварного соединения уровнем не хуже прочности основного металла. Кроме того, руководство РФ призывает проектировщиков и строителей использовать отечественные материалы в своих проектных решениях. А в стране есть производитель,

который выпускает и г/к шпунт (Л5-УМ), и г/к балку, — это НТМК. Эти факты и послужили отправной точкой для выработки нижеописанного технического решения.

Первоначально мы состыковали стандартно выпускаемые г/к балку и г/к корытный шпунт производства НТМК и получили форму рюмки в сечении (рис. 1 а, 1 б, 1 в). Отсюда и общее название – рюмочные шпунтовые стены (РШС), хотя, как будет показано ниже, «рюмка» в сечении угадывается не всегда.

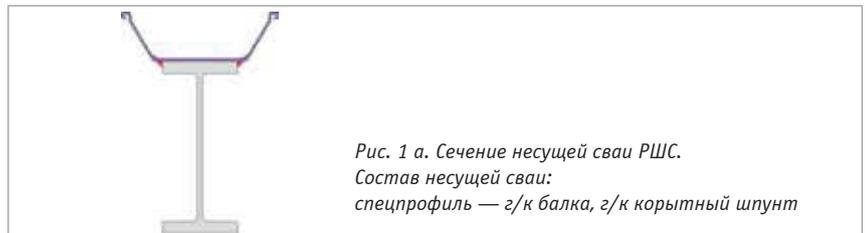


Рис. 1 а. Сечение несущей сваи РШС.

Состав несущей сваи:

спецпрофиль — г/к балка, г/к корытный шпунт



Рис. 1 б. Часть стены (2 периода) РШС.

Состав периода:

г/к балка, пара г/к корытных шпунтов

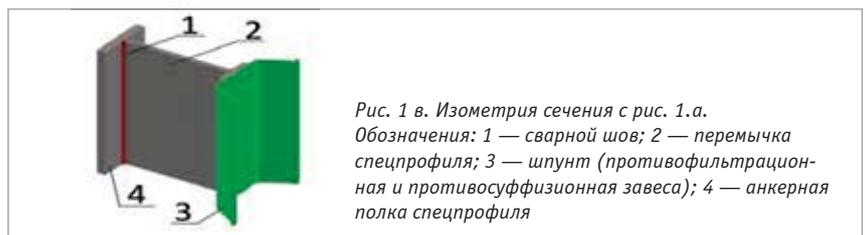


Рис. 1 в. Изометрия сечения с рис. 1 а.

Обозначения: 1 — сварной шов; 2 — перемычка спецпрофиля; 3 — шпунт (противофильтрационная и противосуффизсионная завеса); 4 — анкерная полка спецпрофиля