

## Гидротехническое строительство

Научная статья

УДК 627.83:532.533.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-72-84



### РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО ПРИПАЯ

*Козлов Дмитрий Вячеславович, д-р техн. наук, профессор*

SPIN-код: 5878-6674, Author ID: 613295; kozlovdv@mail.ru

*Соломатин Сергей Викторович, канд. техн. наук*

solomatin.s.v@gmail.com

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

**Аннотация.** Несмотря на существенные достижения современной ледотехники, в научно-практической деятельности отсутствуют эффективные и надежные методы определения ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения (ГТС), учитывающие физико-механические свойства льда и особенности ледовой обстановки. Объектом полевых исследований стал закрытый залив Шарпов Шар в Карском море, ледовая обстановка которого характеризуется наличием устойчивого припая с ровным ледяным полем. Предметом исследований стала ледовая нагрузка в закрытых заливах, имеющих устойчивый ледовый припай на протяжении всего периода максимальных ледовых воздействий. Режим вязкопластической работы припайного льда обеспечивается природно-климатическими и ледовыми условиями залива. Деформирование устойчивого припая происходит в контактной зоне с проектируемым ГТС в состоянии длительной ползучести без накопления деформаций и разрушений. Разработан метод определения ледовых нагрузок, учитывающий особенности устойчивого ледового припая. Ледовые нагрузки на ГТС определяются на основе исходной информации о ледовой обстановке в районе строительства ГТС для периода максимальных ледовых нагрузок. Для весеннего периода при определении глобальной ледовой нагрузки от ровного льда на линейно протяженное сооружение с вертикальной гранью рекомендовано принимать значение поправочного коэффициента  $k_v = 0.055$ . Расчетная ледовая нагрузка на сооружение должна приниматься максимальной из всех нагрузок для рассматриваемых фаз ледового режима. В условиях вязкопластических деформаций льда за расчетную нагрузку на ГТС принимают нагрузку в момент взлома припайного льда, превышающую значение, наблюдающееся при вязкопластической работе ледяного поля и устойчивом припае. Разработанный метод можно реализовать только после включения в действующие нормативные документы соответствующих методических положений. Результаты численного моделирования ледовой нагрузки на основании действующей нормативной базы не дали возможности обосновать применение гравитационного ГТС для условий акватории залива Шарпов Шар. А предложенный расчетный метод оценки ледовой нагрузки, учитывающий особенности ледовой обстановки, позволил обосновать возможность применения гравитационного ГТС.

**Ключевые слова:** ледовая нагрузка, расчетный метод, залив Шарпов Шар, вязкопластические деформации льда, устойчивый ледовый припай

**Формат цитирования:** Козлов Д.В., Соломатин С.В. Развитие методов расчета ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения в условиях устойчивого припая // Природообустройство. 2023. № 3. С. 72-84. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-72-84.

Статья подготовлена по результатам выполнения научного проекта «Развитие методов композитного моделирования для предпроектного исследования и обоснования гидротехнических сооружений» – победителя конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований научными коллективами НИУ МГСУ.

© Козлов Д.В., Соломатин С.В., 2023

Scientific article

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR CALCULATING THE ICE LOAD ON MARINE HYDRAULIC STRUCTURES IN CONDITIONS OF STABLE LAND FAST ICE

*Kozlov Dmitry Vyacheslavovich, Doctor Of Technical Sciences, Professor*

SPIN-код: 5878-6674, Author ID: 613295; kozlovdv@mail.ru

*Solomatin Sergey Victorovich, candidate of technical sciences*

solomatin.s.v@gmail.com

National Research Moscow State University of Civil Engineering; 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russia

**Annotation.** *Despite the success of previous studies, there are still no reliable and accurate methods for determining the ice load on marine hydraulic structures (HS), taking into account the mechanical properties of ice and the characteristics of the ice situation. The object of the field study was the closed Sharapov Shar Bay in the Kara Sea, the ice situation of which is characterized by the presence of a stable land fast ice with a flat ice field. The subject of the study was the ice load in closed bays that have a stable land fast ice throughout the entire period of maximum ice impacts. The conditions of the bay provide viscoplastic deformation of the ice, and a stable land fast ice will deform around the HS in a state of prolonged creep without accumulation of cracks and damage. A method for determining ice loads has been developed, taking into account the features of a stable land fast ice. Ice loads on the HS should be determined on the basis of initial data on the nature of the ice situation in the HS construction area for the period of maximum ice loads. When determining the global load from flat ice on an extended structure with a vertical front wall for the conditions of Sharapov Shar Bay in April, when the maximum load from a stable land fast ice is observed, it is recommended to take the value of the correction factor  $k_v = 0.055$ . The calculated ice load on the HS should be taken as the maximum of all loads for the considered phase of the ice regime. Provided that the viscoplastic deformations of ice are taken into account, the calculated load on the HS is the load when breaking the soldered ice, exceeding the value that occurs during the viscoplastic operation of ice in conditions of stable land fast ice. The practical implementation of the proposed method is possible only after the relevant methodological requirements are included in the current regulatory documents. The use of current regulatory requirements in determining the calculated ice load does not allow to justify the use of gravity HS for the conditions of the Sharapov Shar Bay. And the proposed approach to the assessment of the ice load, taking into account the peculiarities of the phases of the ice regime and the transients between them, allowed us to justify the possibility of using a gravitational HS.*

**Keywords:** *ice load, calculation method, Sharapov Shar bay, viscoplastic deformations of ice, stable land fast ice*

**Format of citation:** *Kozlov D.V., Solomatin S.V. Development of methods for calculating the ice load on marine hydraulic structures in conditions of stable land fast ice // Prirodoobustrojstvo.2023. № 3. P. 72-84. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-72-84.*

*The article was prepared based on the results of the scientific project “Development of composite modeling methods for pre-project research and justification of hydraulic structures” – the winner of the 2023 competition for fundamental and applied scientific research by research teams of NRU (National Research University) Moscow State University of Civil Engineering (MGSU).*

**Введение.** Оценка ледовых нагрузок на гидротехническое сооружение (ГТС) принципиально сводится к вопросу о том, как лед деформируется и разрушается под нагрузкой, что в свою очередь определяется структурой и текстурой льда, возможными схемами его разрушения

перед сооружениями различной геометрической формы.

В суровых природно-климатических условиях морей Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока лед проявляет разные механические свойства: упругие, вязкие, пластичные, но при определенных условиях он становится твердым и очень хрупким. За последние десятилетия знания о механике льда заметно повысились. Детально изучена работа ледовых образцов в лабораторных условиях, актуализирована информация о видах и силах воздействия льда в реальном масштабе. Но несмотря на успешность проведенных исследований, до настоящего времени не существует надежных и точных методик определения ледовой нагрузки на реальные морские ГТС [1].

Цель исследований заключается в разработке метода расчета ледовой нагрузки на морские ГТС в условиях устойчивого ледового припая и его апробации на проекте гравитационного сооружения в одном из районов российского арктического шельфа.

#### **Материалы и методы исследований.**

На рубеже XX-XXI веков достигнут существенный прогресс в части проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений в Арктике, особенно для разведочно-бурения. Первое ледостойкое сооружение на шельфе было построено в 1972 г. в море Бофорта. В последующие 15-20 лет на Арктическом шельфе Канады и США было возведено более 30 сооружений для освоения глубоководных месторождений углеводородов. Россия также активно ведет работы на морском шельфе. Наиболее интенсивно строительство ГТС происходит в субарктической зоне (регионы Европейской части Арктики, шельфы дальневосточных морей и Сахалина), характеризующейся наличием однолетнего льда большой толщины и торосистых образований: с 1990 гг. – в районе острова Сахалин, где работает первая в стране арктическая морская ледостойкая платформа (МЛСП) «Моликпаю», и с 2000 гг. – в акватории юго-восточной части Баренцева моря (Печорском море) [1].

Зоны устойчивого ледового припая (неподвижного ледяного покрова, связанного с берегом), характерные, например, для мелководного залива Шарапов Шар в Карском море, могут рассматриваться как потенциальные места для строительства ледостойких ГТС.

В условиях Арктики и Дальнего Востока морские ГТС в течение длительного времени противостоят различным ледовым

воздействиям, наибольшие из которых могут значительно превосходить волновые и ветровые воздействия. В холодное время года в прибрежной зоне замерзающих арктических морей формируется припай. На мелководьях – как правило, закрытых заливов – лед ложится на дно, образуя подошву припая, предохраняющую береговую зону от навалов льда и воздействия льда на морское дно. Ледовая нагрузка в условиях устойчивого припая характеризуется отсутствием дрейфа льда в период максимальных нагрузок и воздействия торосов. Проектирование ледостойких ГТС с учетом особенностей ледовых условий устойчивого припая требует специального комплекса изыскательских и научно-исследовательских работ [1-3].

В отечественной практике проектирования ГТС используются нормативные документы [4-6], содержащие требования и алгоритмы определения расчетной нагрузки от дрейфующего льда и ледовых образований, не учитывающие воздействия в зоне устойчивого припая закрытых морских заливов, что «...сдерживает возможности проектировщиков по выбору оптимального типа сооружения для таких условий и приводит к увеличению материалоемкости конструкций и увеличению экологической нагрузки на акватории ввиду необходимости применения консервативных методик, разработанных для дрейфующего льда и ледовых образований» [1].

Практика выполнения ледовых исследований в России сводится, как правило, к разработке специальных технических условий, которые дополняют свод правил в части исходных данных и конкретных требований к полевым и камеральным работам. Расчет ледовых нагрузок по российским нормативным документам [4] требует достоверных статистических данных о ледовом режиме акватории, физико-механических свойствах ледового покрова и определенности характера разрушения льда перед сооружением. Аналогично обстоит дело с изыскательскими работами. Многообразие возможных типов ледовой обстановки не позволяет разработать единые требования к объемам, детализации и методам ледовых изысканий. При этом возможна разработка методик под конкретный тип ледовых условий, обеспечивающих получение набора данных, необходимого для разработки безопасных технических решений конструкций ледостойких ГТС.

Практика расчета ледовых нагрузок связана с утверждением сценариев воздействия и параметров ледовых образований в специальных технических условиях.



Наглядным примером, иллюстрирующим завышение существующих подходов к определению ледовых нагрузок, является эксперимент, проведенный на платформе «Моликпак» в Охотском море. После возведения МЛСП была проведена работа по измерению реальных ледовых воздействий в условиях эксплуатации платформы ранней весной, когда наблюдались наибольшие размеры ледовых образований и следовало ожидать максимальных значений ледовых нагрузок. Фактический результат составил не более 100 МН при проектной ледовой нагрузке в 2000 МН.

Таким образом, совершенствование методов формирования и обработки исходных данных о ледовом режиме закрытых заливов при малых подвижках припая, необходимых для определения расчетной ледовой нагрузки на ГТС от воздействия льда в фазе вязкопластических деформаций, а также оценка границ их применимости при расчетно-проектном обосновании ледостойких сооружений являются актуальными исследовательскими задачами. Полученные результаты создадут условия для разработки и/или усовершенствования нормативных документов, направленных на оптимизацию проектных решений и позволяющих в более полной мере учитывать особенности ледовой обстановки. Очевидно, что это приведет к снижению расчетной нагрузки от воздействия льда на ГТС и уменьшению негативного влияния на экологию района строительства при сохранении параметров надежности и безопасности сооружения.

Методы определения ледовой нагрузки на морские ГТС разработаны российскими (К.Н. Коржавиным, Ю.В. Долгополовым, Ф.И. Птухиным, Д.Е. Хейсиным, К.Н. Шхинком, Е.Н. Беллендиром и др.) и иностранцами (А. Assur, В. Michel, G. Timco, W.F. Weeks и др.) специалистами. Аналитические обзоры многочисленных исследований воздействия льда на ГТС с использованием детерминированных, вероятностных методов расчета и их сочетания выполнены в публикациях В.П. Афанасьева [7], С.А. Вершинина [8, 9], М.Г. Гладкова [10], Н.Н. Беллендира [11], А.Т. Беккера, Т.Э. Уваровой [12], А. Assur, W.F. Weeks [13], G. Timco [14] и др.

Каждый из методов предполагает построение возможного сценария взаимодействия ГТС с тем или иным видом ледового образования, а также выполнение расчета нагрузок на сооружение при его взаимодействии со льдом. Еще с середины 1950-1960 гг. в ледотехнике началось активное изучение механизмов разрушения

морского льда. В публикациях Frost, Ashby [15], Mellor, Cole, Weeks [16, 17], Hallam [18], С.В. Соломатина [3, 19] рассмотрены некоторые вопросы вязкопластической работы ледяного покрова. Изучение длительной ползучести льда выполнялось на малых образцах и не было доработано до получения зависимостей глобальной ледовой нагрузки от фазы работы льда. Причиной этого являлось отсутствие на тот момент необходимости в таких исследованиях, так как географические условия, в которых максимальная ледовая нагрузка возможна в фазе длительной ползучести льда, являются исключительно редкими [2].

В России исследования припайного льда проводились в 1970-2010 гг. на акватории Финского залива, шельфе Охотского моря, в Байдарцкой и Обской губе, у западного берега Ямала в заливе Шарапов Шар и других для расчета ледовой нагрузки и оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) ледяного поля. Исследования выполнялись без измерения подвижек льда и установления связи НДС ледяного поля с ними.

Предметом наших исследований стала ледовая нагрузка в закрытых заливах (на примере залива Шарапов Шар), имеющих устойчивый ледовый припай на протяжении всего периода максимальных ледовых нагрузок. Как объект исследования, залив Шарапов Шар отличается от ранее изученных акваторий сочетанием малой глубины (1,0-2,0 м), фиксирующей припайный лед на период максимальных нагрузок у гряды островов (Шараповы Кошки), и большим количеством градусо-дней мороза. Таким образом, мелководный залив Шарапов Шар представляет собой водный объект, в акватории которого возможно строительство ледостойких ГТС. При их проектировании целесообразно учитывать особенности работы льда в условиях его длительной ползучести.

Неотъемлемой частью исследований стали экспедиционные работы в акватории залива Шарапов Шар, результаты инженерных изысканий которых опубликованы в источниках [3, 19]. В результате исследований установлен факт перехода от молодого льда к устойчивому припаю при толщинах льда менее 200 мм. Устойчивый припай (без торошения и подвижек, вызывающих хрупкое разрушение льда) наблюдался на протяжении всего зимнего сезона, взлом и начало подвижек припайного льда – после перехода температуры, принимаемой для расчета прочности льда, к положительным значениям [1].

Важнейшим элементом ледовых исследований для устойчивого припая является определение динамики ледяного поля, оценка которой производилась при помощи спутникового оборудования с использованием наземных контрольно-корректирующих станций. При обнаружении факторов устойчивости припая принимались решения о дополнительных исследованиях мгновенных подвижек, запись координат на таких точках выполнялась каждые 30 сек. В целом для припая были характерны подвижки 10-15 см за декаду [19].

Исследования ледового режима позволили установить характерные особенности припая залива Шарапов Шар: отсутствие торошения в зимний период, ограниченность скорости подвижек, отсутствие доминирующего фактора возникновения подвижек, начало подвижек ледяного поля после перехода льда в фазу «гнилого льда».

Ледовая обстановка устойчивого припая характеризуется ровным ледяным полем. Нагрузка зависит от скорости подвижек припая, возникающих в результате воздействия на него ветра, течений и изменений температуры, причем нагрузки на сооружение от ветра и течения по сравнению с ледовой нагрузкой являются малозначительными [1]. В действительности весьма редко условия взаимодействия льда и ГТС настолько ограничены и четко определены, чтобы можно было с уверенностью сказать, что произойдет только взаимодействие в фазе ползучести. В большинстве случаев будет достаточно движущей силы для рассмотрения хрупкого механизма разрушения, когда нельзя ограничиваться только рассмотрением пластического взаимодействия. При определенных обстоятельствах (например, некоторых условиях прибрежного припайного льда) можно установить надежные пределы ожидаемых скоростей льда в течение расчетного срока службы конструкции [1].

Особенности воздействия припайного льда на сооружение являются следствием его малой динамики и однородности структуры. При небольших скоростях подвижек лед деформируется как вязкая жидкость, что соответствует его длительной ползучести без признаков разрушения. Увеличение скорости относительной деформации приводит к возможному разрушению льда в условиях кратковременной ползучести. При больших скоростях перемещения ледяных полей возможно разрушение ледяного поля по контакту с сооружением за счет сил смятия. При этом возникают пиковые значения нагрузок [1].

Расчет скорости относительной деформации льда перед ГТС  $\varepsilon$  выполняется по формуле (1):

$$\varepsilon = (V \cdot D) / k, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость подвижки ледяного поля;  $D$  – линейный размер (диаметр) сооружения (рис. 1 [20]);  $k$  – коэффициент, когда для протяженных (широких) сооружений рекомендуется принимать значение  $k = 2$ .

При вязкопластической работе ледяного материала количественная оценка скорости относительной деформации льда перед ГТС играет важную роль в расчете глобальной ледовой нагрузки. Поэтому целью последующих исследований должно стать уточнение границ зоны распространения деформаций перед ГТС с установлением их зависимостей от геометрических размеров сооружения и параметров ледяного поля.

Феноменологическая модель разрушения льда в условиях длительной ползучести включает в себя три процесса: упругие деформации; отложенные упругие деформации; вторичные пластические деформации.

Максимальная динамика ледяного поля, зафиксированная в заливе Шарапов Шар, характеризуется скоростью подвижек 2,5 мм/ч. При этом скорость относительной деформации  $\varepsilon$  с учетом коэффициента для широких сооружений равна  $4,5 \cdot 10^{-9}$  1/с. При такой скорости относительной деформации величина упругих деформаций не превышает 0,01%, а общая деформация может увеличиваться без лимитов [1]. Учитывая результаты инженерных изысканий и механизм вязкопластической работы льда, целесообразно в дальнейших расчетах рассматривать скорости относительной деформации  $\varepsilon$

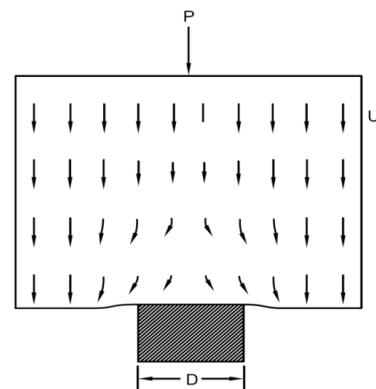


Рис. 1. Схема вязкопластических деформаций в ледовом поле вокруг индентора (D – ширина ГТС) [20]

Fig. 1. Scheme of viscoplastic deformations in the ice field around the indenter (D is the width of the HS) [20]

ниже  $10^{-7} 1/c$ , как и предлагает действующий СП 38.13330.2018 [4].

Таким образом, в заливе Шарапов Шар работа льда в устойчивом припаяе отвечает всем требованиям, обеспечивающим вязкопластическую деформацию как бесконечный процесс без накопления повреждений в ледяном поле и без достижения зоны упрочнения. Характерные для залива Шарапов Шар условия определяют вязкопластическую деформацию льда, при которой его различные микроструктуры работают во всех фазах: от отложенной до третичной ползучести при минимальном накоплении в них упругих деформаций. Устойчивый припай будет деформироваться вокруг ГТС в состоянии длительной ползучести без накопления трещин и повреждений [2].

На рисунке 2 представлены результаты испытаний по определению усилий в образцах льда разной температуры при одноосном сжатии и различной скорости относительной деформации. Для условий залива Шарапов Шар показаны значения прочности образцов льда при максимальной скорости их деформации перед прототипом исследуемого гидротехнического сооружения.

Из данных рисунка 2 [18] следует, что пластические деформации поликристаллического льда наблюдаются при скоростях относительной деформации  $\varepsilon$  менее  $10^{-5} c^{-1}$ .

В действительности взаимодействие льда и ГТС редко ограничено вязкопластической работой. Нельзя сказать, что иные виды взаимодействия исключены. Для решения этого вопроса было предложено понятие «этапы жизненного цикла устойчивого припая» [1].

Алгоритм расчета ледовой нагрузки для условий устойчивого припая предусматривает рассмотрение видов воздействия льда на ГТС в рамках трех основных фаз: I – «Образование льда и формирование припая»; II – «Устойчивый припай» (рис. 1); III – «Взлом припая». Для этих фаз были рассмотрены характерные сценарии ледового воздействия [1]. Для каждой из фаз сформулированы определяющие факторы, диктующие особые требования к инженерно-гидрометеорологическим изысканиям в условиях устойчивого припая. Так, в фазу II (рис. 1) воздействие при обтекании ГТС толстым льдом, формирующим устойчивый припай, будет протекать в рамках двух сценарных

этапов развития ледовой обстановки: этап 3 – устойчивый припай, увеличение нагрузки в вязкопластической фазе при взаимодействии ГТС и припая по мере роста толщины и прочности льда; этап 4 – устойчивый припай, снижение нагрузки в вязкопластической фазе при взаимодействии ГТС и припая по мере уменьшения прочности льда [2].

Результаты испытаний цилиндрических образцов льда на одноосное сжатие при разных скоростях относительной деформации и температурах образцов позволили оценить расчетную прочность льда в фазе длительной ползучести (рис. 2). Для дальнейших расчетов скорости относительной деформации и температура льда были приняты на основании итогов экспедиционных исследований и анализа фондовых материалов по заливу Шарапов Шар.

В условиях ползучести льда с малой скоростью наблюдается снижение величины контактных давлений. Поэтому в порядке расчета ледовой нагрузки целесообразно учесть значение функции сопротивления, включив в него величину коэффициента снижения прочности льда:

$$K(\varepsilon^\circ) = \frac{\sigma(\varepsilon^\circ)}{\sigma\left(\varepsilon = \frac{10^{-3} 1}{c}\right)} \quad (2)$$

где  $\sigma(\varepsilon^\circ)$  – значение прочности образцов льда на сжатие при соответствующей скорости относительной деформации  $\varepsilon^\circ$  (рис. 3).

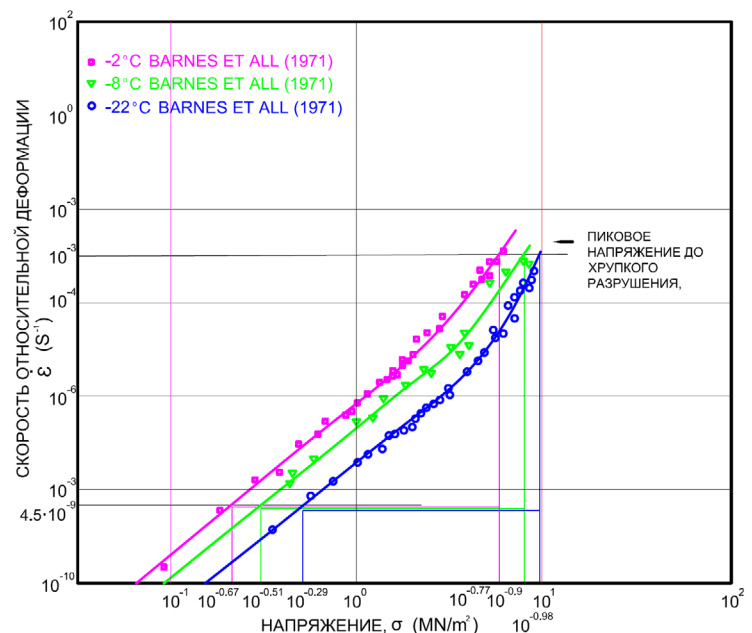


Рис. 2. Результаты испытаний образцов пресного поликристаллического льда на одноосное сжатие [18]

Fig. 2. Results of testing samples of fresh polycrystalline ice for uniaxial compression [18]



На основании данных испытаний [18], выполненных при температурах льда  $-22^{\circ}\text{C}$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $-2^{\circ}\text{C}$ , и соответствующих им значений  $K(\varepsilon^{\circ}) = 18$ ,  $K(\varepsilon^{\circ}) = 25$ ,  $K(\varepsilon^{\circ}) = 27$  была построена зависимость (рис. 3) коэффициента снижения прочности льда  $K(\varepsilon^{\circ})$  от температуры льда для скорости относительной деформации, соответствующей условиям залива Шарапов Шар в Карском море.

Оценка ледовой нагрузки при переходе от фазы устойчивого ледового припая к фазе разрушения припая выполняется с учетом смены механизма взаимодействия гидротехнического сооружения и ледяного поля. В инженерной практике расчет нагрузки от «гнилого» льда на сооружение не получил глубокого изучения по причине того, что типичные условия взаимодействия сооружения и ледяного поля предполагают разрушение в фазе кратковременной ползучести с возникновением максимальных нагрузок. Учет вязкопластической работы льда в период возникновения максимальных нагрузок делает актуальной задачу введения коэффициента снижения нагрузки ото льда в фазе таяния.

Работа по изучению коэффициента снижения прочности льда в фазе таяния была выполнена Гарри Тимко в канадской Арктике в 2002 г. с использованием объемного скважинного домкрата («borehole jack») [14]. Ледовые условия в заливе, где были проведены указанные опыты, соответствуют условиям залива Шарапов Шар по таким параметрам, как толщина льда и основные гидрометеорологические характеристики.

На основании результатов уникальных испытаний (рис. 4) [14] образцов льда установлено, что в области «жизненного цикла ледяного поля» накануне взломом припая значения прочности льда составляли не более 10% от значения максимальной прочности.

Особенности ледовых условий, сформировавшиеся в заливе Шарапов Шар, являются достаточным основанием для включения в расчет нормализованной прочности льда, полученной в результате испытаний, выполненных канадскими специалистами [14].

Наличие широкой полосы смерзания припая с дном и гряды островов, закрывающей залив Шарапов Шар, является в исследуемой акватории факторами устойчивости припая до начала термического разрушения льда. Это дает основание использовать результаты экспериментов по снижению прочности льда в период его таяния и назначать расчетную прочность льда с понижающим коэффициентом, равным 0,1, к значению его максимальной прочности.

Методологически в условиях устойчивого припая льда оценку ледовых нагрузок следует

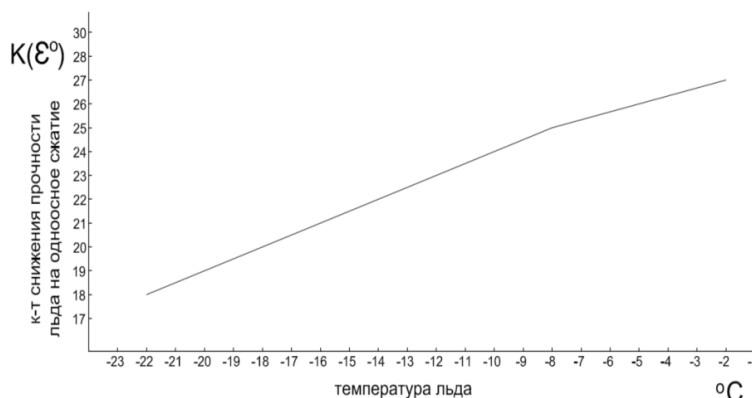


Рис. 3. Зависимость коэффициента снижения прочности льда от его температуры и скорости относительной деформации  $\varepsilon = 4.5 \cdot 10^{-9} 1/c$  (для учета пластических деформаций)

Fig. 3. Dependence of the pressure reduction coefficient when taking into account plastic deformations on ice temperature and relative deformation rate  $\varepsilon = 4.5 \cdot 10^{-9} 1/sec$

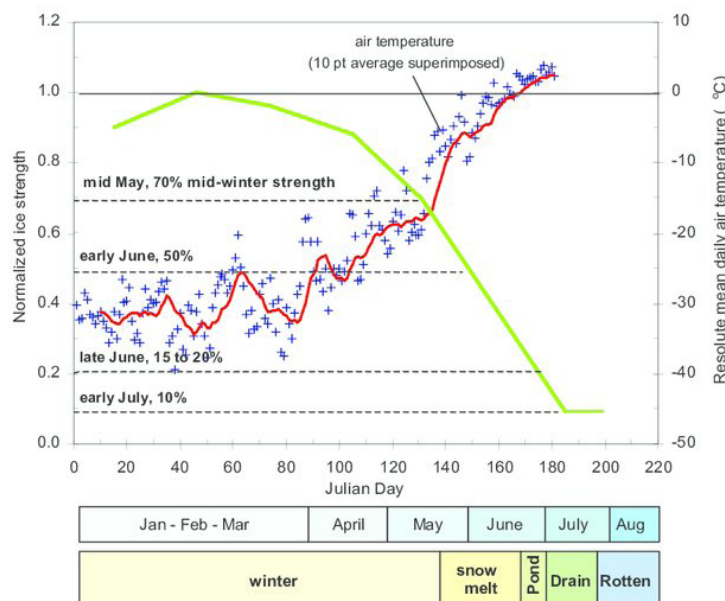


Рис. 4. Изменение прочности льда на сжатие за жизненный цикл льда [14]

Fig. 4. Change in the compressive strength of ice over the life cycle of ice [14]

выполнять в рамках 6 этапов развития ледовой обстановки с последующим выбором максимального значения расчетной нагрузки.

**Результаты и их обсуждение.** Численная реализация задачи расчетного обоснования типа гидротехнического сооружения под действием нагрузки от устойчивого припая льда была выполнена для нескольких сценариев развития ледовой обстановки в заливе Шарапов Шар по предлагаемой методике, а для сравнения – по СП38.13330.2018 [4] и ISO 19906 [21]. В качестве объекта расчетного обоснования выбрано сооружение, выполненное на основе морской баржи типа TERAS25 водоизмещением 2678 т. Геометрические размеры сооружения: ширина – 2438 м; длина – 7620 м; высота – 6,10 м. Для лучшего противодействия ледовым нагрузкам по аналогии с сооружением SSDC канадской фирмы CANMAR приняты следующие усиления баржи: для восприятия ледовых нагрузок корпус укреплен специальными стальными конструкциями (на 1000 т), выполнено бетонирование ребер (на 2000 т) и увеличена высота надводного борта (на 600 т).

Результаты расчетов по СП38.13330.2018 получены для двух сценариев. Первый сценарный расчет выполнен в соответствии с требованиями СП38.13330.2018 без обоснования возможности учета вязкопластических деформаций. Важно отметить, что свод правил не предъявляет требования и не дает рекомендации по учету вязкопластической работы льда. Это приводит к результату, не учитывающему данное явление.

Расчет максимальной нагрузки от ровного ледяного поля на линейно протяженное гидротехническое сооружение с вертикальной передней гранью выполнялся по формуле:

$$F_{bw} = k \cdot k_v \cdot R_c \cdot b \cdot h_d, \quad (3)$$

где  $R_c$  – предел прочности льда при сжатии;  $k$  – коэффициент неплотности контакта (для периода устойчивого припая с декабря по июнь принимался равным  $k = 0,4$ , в оставшееся время  $k = 1$ );  $k_v$  – коэффициент взаимодействия (принимался равным  $k_v = 1$ , а для вязкопластической работы льда  $k_v = 0,1$ );  $b$  – протяженность контакта ледяного покрова с сооружением (принималась равной длине баржи  $b = 76,2$  м);  $h_d$  – обеспеченная толщина ровного льда, назначавшаяся по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Второй сценарный расчет выполнен также в соответствии с СП38.13330.2018, но при

допущении о непревышении скорости относительной деформации льда перед сооружением  $\varepsilon$  значения  $10^{-7}$  1/сек.

Результаты расчета ледовой нагрузки на исследуемый тип ГТС с учетом и без учета вязкопластических деформаций льда и принятой исходной информацией, полученной по итогам экспедиционных исследований в акватории залива Шарапов Шар, представлены на рисунке 5. График синего цвета демонстрирует ледовую нагрузку, рассчитанную без учета обоснования не превышения скорости относительной деформации льда перед сооружением  $\varepsilon = 10^{-7}$  1/сек. График зеленого цвета – это нагрузка, полученная в результате расчетов при условии обоснования не превышения скорости относительной деформации льда перед сооружением  $\varepsilon = 10^{-7}$  1/сек.

Расчет глобальной ледовой нагрузки по ISO 19906 в зависимости от толщины ледяного поля выполнялся по аналитической формуле для давления льда:

$$p_g = C_R \cdot \left(\frac{h}{h_1}\right)^n \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^m, \quad (4)$$

где  $C_R$  – предел прочности льда на сжатие для арктических областей (в том числе Карского моря)  $C_R = 2,84$  МПа;  $w$  – протяженность контакта ледяного покрова с сооружением или длина баржи  $w = 762$  м;  $h$  – толщина ровного льда, назначаемая по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий;  $h_1$  – базовая (приведенная) толщина  $h_1 = 1$  м;  $m$  – эмпирический коэффициент, принимаемый равным  $m = 0,16$ ;  $n$  – эмпирический коэффициент, определяемый в зависимости от наблюдаемой толщины льда, для ледовых условий залива Шарапов Шар –  $n$  (в ноябре) =  $-0,46$ ,  $n$  (в декабре) =  $-0,34$ .

На рисунке 6 представлены результаты расчета глобальной ледовой нагрузки по ISO19906 в зависимости от толщины ледяного поля, которая наблюдалась в акватории залива Шарапов Шар.

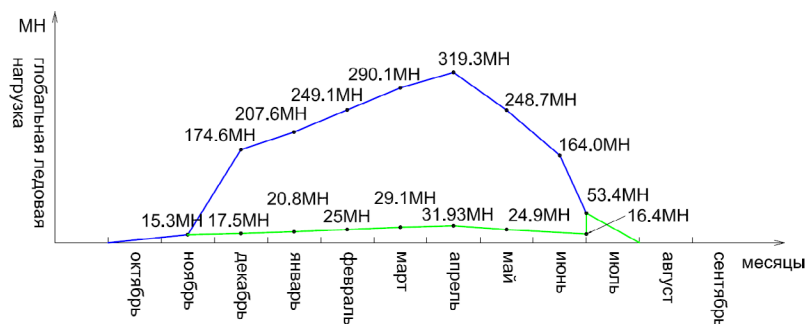


Рис. 5. Расчетная ледовая нагрузка на исследуемый тип ГТС по СП 38.13330.2018

Fig. 5. The results of calculations of the ice load on the studied type of HS according to SP 38.13330.2018



На рисунке 7 представлены результаты расчета глобальной ледовой нагрузки по предлагаемой методике для 3 фаз в рамках 6 этапов ледового режима для условий формирования, развития и разрушения припая в акватории залива Шарапов Шар, полученные с учетом снижения прочности льда на сжатие при фактических скоростях подвижек льда в зоне устойчивого припая, а также с учетом взлома припая после перехода принимаемой для расчета температуры воздуха к положительным значениям. В условиях акватории залива Шарапов Шар для апреля, когда наблюдается максимальная ледовая нагрузка от устойчивого припая, рекомендовано принимать значение поправочного коэффициента равным  $k_v = 0,055$  (обозначения в кружках соответствуют этапам ледового режима).

Из полученных результатов следует, что ледовая нагрузка на **этапах 1 и 2** совпадает с нагрузкой, полученной по СП 38.13330.2018. На **этапах 3 и 4** принята прочность льда, которую вычислили на основании коэффициента снижения, полученного на основе испытаний образцов льда на одноосное сжатие при скорости относительной деформации, равной максимальной и зафиксированной в акватории залива Шарапов Шар. Результаты на **этапах 5 и 6** получены с учетом снижения прочности льда при положительных температурах окружающей среды, определенных в экспериментах в Канадской Арктике для аналогичных условий. Это является надежным обоснованием для перехода от усилия на скважинном домкрате к усилию на одноосное сжатие и выполнению соответствующих расчетов [1].

Следует отметить, что в условиях залива Шарапов Шар расчетной максимальной нагрузкой для ГТС является нагрузка, которая возникает после взлома устойчивого припая.

Для выполнения численного моделирования была принята концепция гравитационного гидротехнического сооружения повышенной заводской готовности (баржи типа TERAS25). Выбор такого сооружения обусловлен его наименьшим воздействием на окружающую природную среду

среди доступных типов ГТС в условиях малых глубин.

Расчеты устойчивости исследуемого типа сооружения на определенную сдвигающую нагрузку проводились в рамках численного моделирования НДС системы гидротехническое сооружение – основание для условий залива Шарапов Шар. Задача решалась в плоской постановке методом конечных элементов (МКЭ) с использованием ПК Plaxis, апробированного при расчетном обосновании большого числа ГТС [2]. Выбор программного комплекса Plaxis 2D обусловлен более консервативными результатами по сравнению с использованием Plaxis 3D. При концептуальной проработке технического решения отсутствует необходимый уровень детализации задачи, который требуется для использования Plaxis 3D.

Численное моделирование выполнялось в 3 этапа: 1 – загрузка расчетного массива собственным весом ГТС и определение его

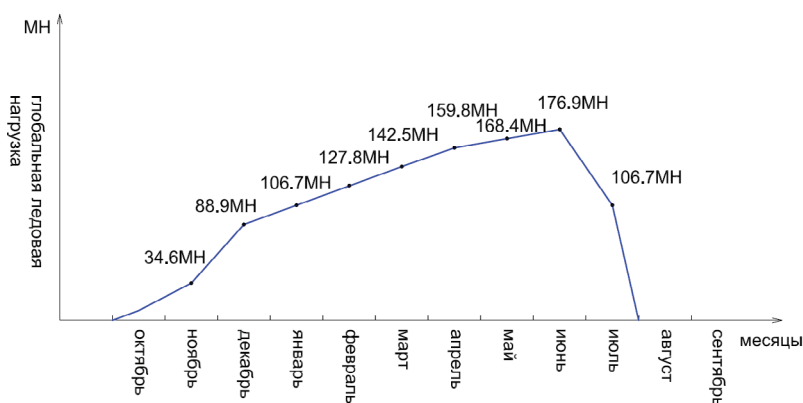


Рис. 6. Глобальная ледовая нагрузка, определенная по рекомендациям ISO 19906  
Fig. 6. Results of calculating the global ice load according to ISO 19906 recommendations

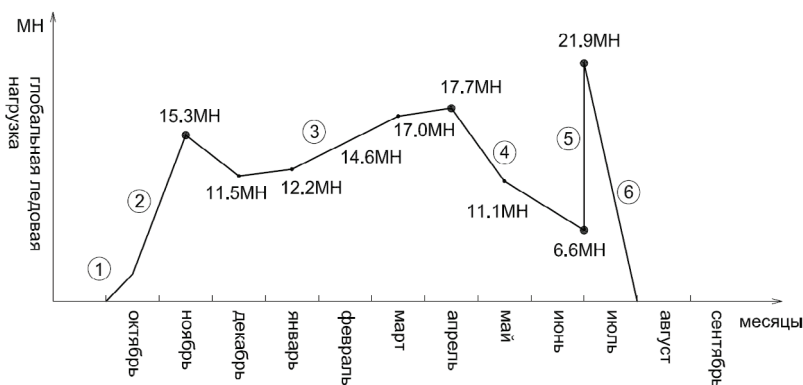


Рис. 7. Глобальная ледовая нагрузка, определенная по предлагаемой методике (① – номер этапа ледового режима)  
Fig. 7. The results of the calculation of the global ice load according to the proposed methodology (① – ice regime stage number)

начального (исходного) НДС; 2 – погружение заводского ГТС (баржи); 3 – приложение ледовых нагрузок.

В процессе моделирования получены 4 варианта для значений глобальной расчетной ледовой нагрузки: 1) определенной по СП 38.13330.2018 и равной 319.3МН (рис. 5, 8); 2) определенной по СП 38.13330.2018 с учетом обоснования возможности расчета нагрузки в области пластических деформаций льда и равной 53.3МН (рис. 5, 9); 3) определенной в зависимости от наблюдаемой толщины ледяного поля по ISO 19906 и равной 176.9МН (рис. 6, 10); 4) вычисленной по предлагаемой методике и равной 21.9МН (рис. 7, 11).

Результаты численного моделирования по первым 3 вариантам значений глобальной ледовой нагрузки на исследуемый тип ГТС (рис. 8-10) спрогнозировали образование под гидротехническим сооружением развивающихся зон необратимых пластических деформаций, то есть происходит потеря прочности основания при достижении критического значения нагрузки, равного 212,1 кПа. При этом расчет глобальной максимальной ледовой нагрузки, выполненный по предлагаемой методике, позволил обосновать прочность и устойчивость гравитационного ГТС (рис. 11).

Условия прочности и устойчивости системы «Лед-сооружение-основание» выполняются только при расчете на ледовую нагрузку, вычисленную по предлагаемой методике. Другие способы определения ледовой нагрузки (СП 38.13330.2018

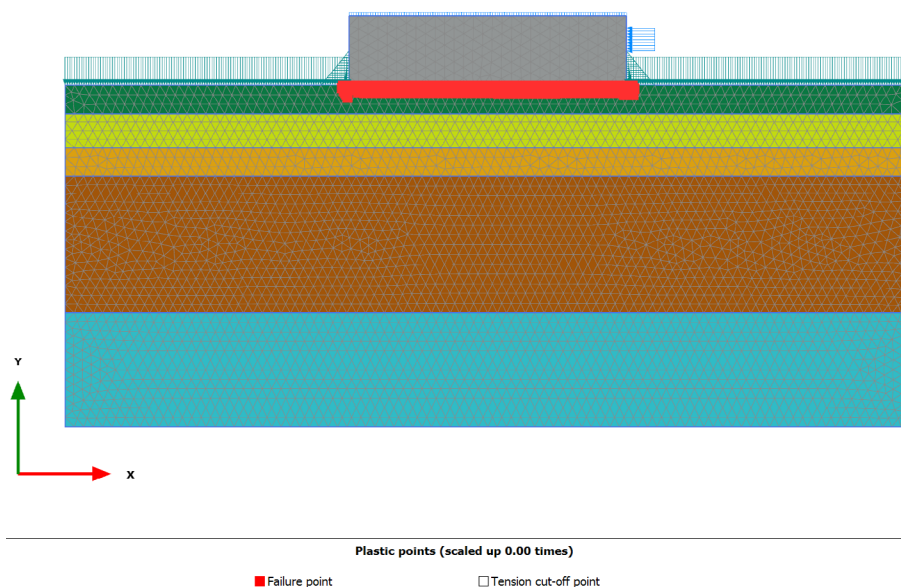


Рис. 8. Результаты расчета устойчивости ГТС, полученные по СП38.13330.2018-319.2 МН

Fig. 8. Calculation results of HS stability according to SP38.13330.2018-319.2 MN

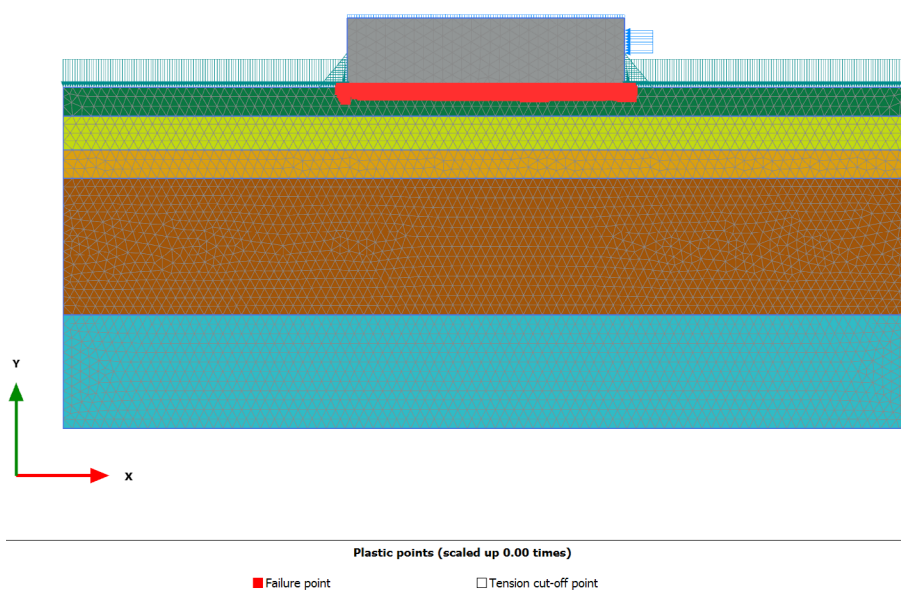


Рис. 9. Расчет устойчивости ГТС по СП38.13330.2018 с учетом возможности расчета в области пластических деформаций – 53.3 МН  
Fig. 9. Calculation of the stability of the HS according to SP38.13330.2018, taking into account the possibility of calculation in the field of plastic deformations – 53.3 MN

без учета вязкопластических свойств льда, СП 38.13330.2018 с учетом вязкопластических свойств льда и ISO 19906) не позволяют обосновать возможность применения гидротехнического сооружения повышенной заводской готовности на базе баржи Тeras 25 в заливе Шарашов Шар.



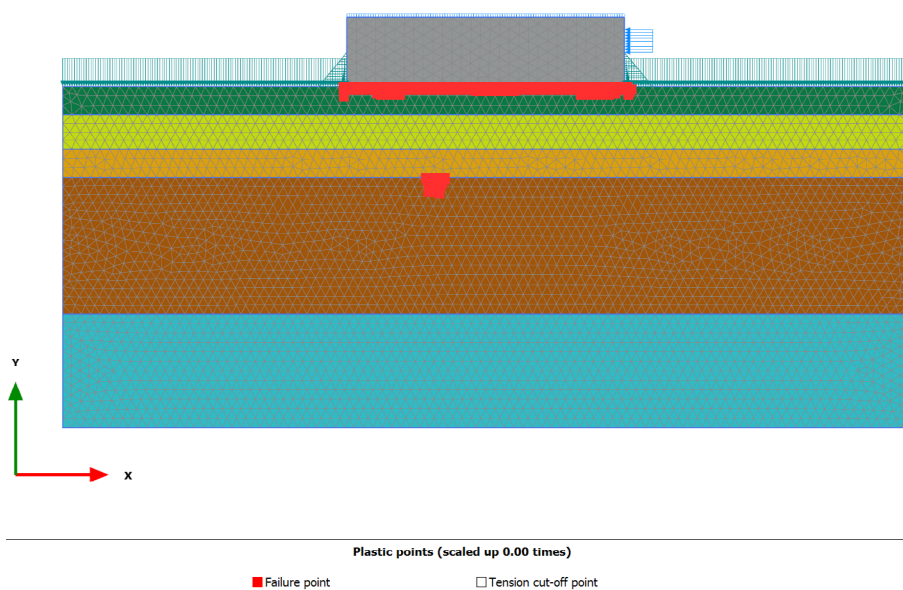


Рис. 10. Расчет устойчивости ГТС по ISO 19906-176.8 MN  
Fig. 10. Calculation of HS stability according to ISO 19906-176.8 MN

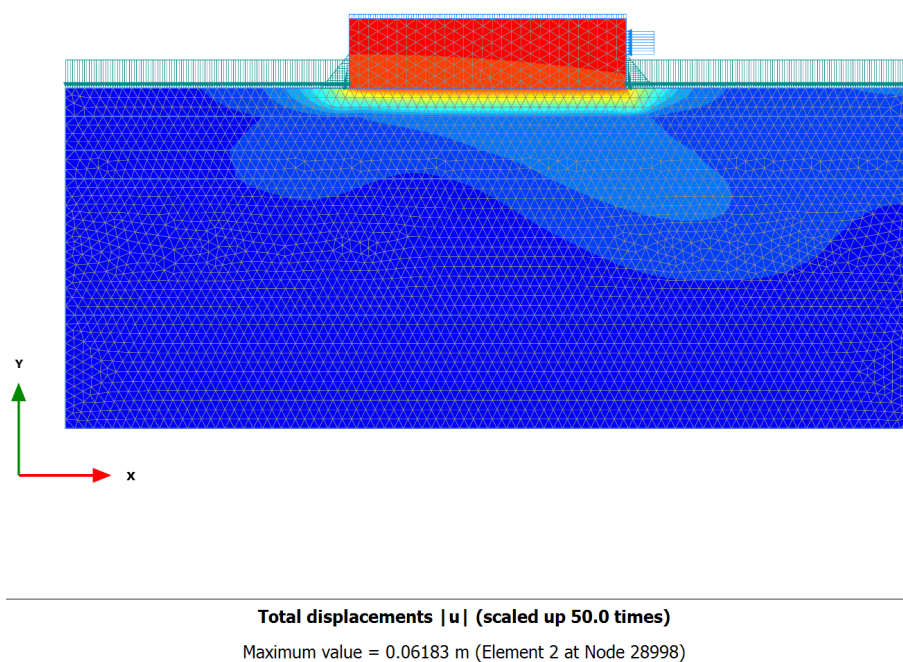


Рис. 11. Расчет устойчивости ГТС на сдвиг для варианта ледовой нагрузки, полученной по предлагаемой методике, – 21.8 MN  
Fig. 11. Calculation of the HS shear stability for the ice load obtained by the proposed method – 21.8 MN

### Выводы

Объектом натуральных исследований стал закрытый залив Шарапов Шар в Карском море, ледовая обстановка которого характеризуется наличием устойчивого припая с ровным ледяным полем. Предметом исследований явилась

в определении ледовой нагрузки для условий акватории залива Шарапов Шар играет прочность льда после взлома припая. В нормативных документах для условий, после взлома припая льда в расчетные формулы нагрузки

ледовая нагрузка в акваториях закрытых заливов с устойчивым припаем, наблюдающимся в течение всего периода максимальных ледовых нагрузок (на примере залива Шарапов Шар).

При проектировании ГТС необходимость учета в ледотехнических расчетах вязкопластических деформаций припайного льда обусловлена в первую очередь результатами полевых наблюдений за динамикой припая в заливе Шарапов Шар. Они показали, что в период февраля-мая подвижки льда происходили с максимальной скоростью 2,5 мм/ч, а характерные подвижки имели порядок в 10-15 см/декада.

Расчетные и экспериментальные исследования ледовой обстановки и проектируемого ГТС в заливе Шарапов Шар показали, что припайный лед в зоне контакта с сооружением будет деформироваться в условиях длительной ползучести без накопления существенных структурных изменений в ледяном поле.

При определении глобальной ледовой нагрузки на линейно протяженное ГТС с вертикальной гранью в апрельские дни, когда наблюдается максимальная нагрузка от припайного льда, предлагается значение коэффициента взаимодействия  $k_v$  принять равным 0,055.

Основную роль



предлагается вводить коэффициент, учитывающий степень температурного разрушения льда и соответствующие структурные изменения в ледяном покрове (например, переход большей части солей в жидкую фазу или состояние таяния). В разработанной методике на основании натуральных экспериментов, выполненных канадскими специалистами, рекомендовано в июле для прочности льда принимать значение коэффициента, равное 0,1. Кроме того, установлено, что условия проведения опытов в Канадской Арктике соответствуют (в первую очередь по толщине льда) условиям ледовой обстановки в акватории залива Шарапов Шар, что методически обосновывает переход от снижения усилий при сжатии льда трехосным скважинным домкратом к снижению прочности льда на одноосное сжатие  $R_c$ .

Численные исследования показали, что значение глобальной расчетной ледовой нагрузки на ГТС должно приниматься максимальным из всех значений нагрузок в соответствующих фазах ледового режима залива. Если учитывать вязкопластические деформации припайного льда, то за расчетную ледовую нагрузку на гидротехническое сооружение должна приниматься нагрузка в момент взлома припая,

#### Список использованных источников

1. **Соломатин С.В.** Совершенствование метода расчета ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения в условиях устойчивого припая: Дис. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». М., 2022. 147 с.
2. **Соломатин С.В.** Совершенствование метода расчета ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения в условиях устойчивого припая: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». М., 2022. 24 с.
3. **Соломатин С.В., Козлов Д.В.** Учет особенностей ледовых условий для повышения экологической эффективности проектов гидротехнического строительства на российском арктическом шельфе // Природообустройство. 2021. № 1. С. 47-63.
4. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/553863434>.
5. ВСН 41.88 Проектирование ледостойких стационарных платформ. М.: Миннефтепром СССР, 1988. 136 с.
6. Правила морского регистра судоходства. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2022.
7. **Афанасьев В.П.** Разработка и совершенствование методов расчета нагрузок на вертикальные сооружения шельфа от морских ледовых образований: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГСУ, 2007. 38 с.
8. **Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузмичев К.В.** Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. М.: Институт Гипростроймост, 2005. 208 с.

превышающая значение, возникающее при вязкопластической работе льда в условиях устойчивого припая.

Реализация предложенного метода на практике возможна только после внесения изменений в некоторые положения действующих нормативных документов, касающихся установления критериев устойчивого припая, определения граничных условий смены фаз ледового режима в акватории и оценки ледовой нагрузки при вязкопластическом деформировании льда и положительных температурах окружающей среды, а также требований к определению ледовой нагрузки от тонкого льда.

Требования действующего СП 38.13330.2018 для определения расчетной ледовой нагрузки не позволяет обосновать применение гравитационного ГТС заводской готовности для условий залива Шарапов Шар. При этом рекомендуемый метод расчета ледовой нагрузки, учитывающий особенности ледовой обстановки (фаз ледового режима и переходных процессов между ними), позволил обосновать возможность использования гравитационного ГТС, проектное решение для которого еще и существенно снижает экологическую нагрузку на район строительства.

#### References

1. **Solomatin S.V.** Improvement of the method for calculating the ice load on hydraulic structures in conditions of stable fast ice: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.07 / Solomatin Sergey Viktorovich [Place of defense: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering"]. Moscow, 2022. 147 p.: ill.
2. Improvement of the method for calculating the ice load on hydraulic structures in conditions of stable fast ice: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.07 / Solomatin Sergey Viktorovich [Place of defense: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering"]. Moscow, 2022. 24 p.
3. **Solomatin S.V., Kozlov D.V.** Taking into account the features of ice conditions to improve the environmental efficiency of hydraulic engineering projects on the Russian Arctic shelf. № 1. 202. S. 47-63.
4. SP 38.13330.2018 Loads and impacts on hydrotechnical structures (wave, ice and from ships). Updated edition of SNiP 2.06.04-82\*. <http://docs.cntd.ru/document/553863434>.
5. VSN41.88 Design of ice-resistant stationary platforms. Moscow: Minnefteprom SSSR. 1988. 136 p.
6. Rules of the Maritime Register of Shipping. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2022.
7. **Afanasyev V.P.** Development and improvement of methods for calculating loads on vertical structures of the shelf from sea ice formations. Autoref. Diss. – Doctor of technical sciences. Moscow. MGSU. 2007. 38 p.
8. **Vershinin S.A., Truskov P.A., Kuzmichev K.V.** Impact of ice on the structures of the Sakhalin shelf. Moscow: Giprostroymost Institute. 2005. 208 p.

9. **Вершинин С.А.** Воздействие льда на морские сооружения шельфа // Водный транспорт. М.: ВИНТИ, 1988. Т. 13. 219 с.

10. **Гладков М.Г.** Нагрузки и воздействия льда на морские гидротехнические сооружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: ВНИИГ, 1997. 45 с.

11. **Беллендир Е.Н.** Научное обоснование проектирования гравитационных опорных блоков морских ледостойких платформ и их сопряжения с грунтовым основанием: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2006. 284 с.

12. **Уварова Т.Э.** Истирающее воздействие дрейфующего ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток: ДВФУ, 2015. 35 с.

13. **Weeks W.F.** and Assur A. The mechanical properties of sea ice. CRREL Monograph II-C3, 1967.

14. **Timco G.** Proceedings of the 16th // IAHR International Symposium on Ice, 2. Ice Strength During the Melt Season. 2002. Pp. 187-193.

15. **Frost H.J.** and Ashby M.F. Deformation mechanism maps. Oxford: Pergamon Press, 1982. 166 p.

16. **Mellor M.** and Cole D.M. Deformation and failure of the ice under constant strain rate // Cold Regions Science and Technology. 1982. № 5.

17. **Weeks W.F.** and Mellor M. Mechanical properties of ice in Arctic seas // In Arctic technology and police. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Annual MIT Sea Grant. 1984.

18. **Hallam S.D.** The role of fracture in limiting ice forces // In IAHR1986. 86. Vol. 2. Pp. 287-319.

19. **Соломатин С.В.** Учет вязкопластических свойств льда для оптимизации проектных решений морских нефтегазопромысловых сооружений в заливе Шарпов Шар // Гидротехническое строительство. 2019. № 11. С. 16-21.

20. **Sanderson T.J.O.** Ice Mechanics: Risks to Offshore Structures // Graham and Trotman. London, 1988. 253 p.

21. ISO/DIS19906 «Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures». 2010. 466 p.

#### Критерии авторства

Козлов Д.В., Соломатин С.В. выполнили теоретические и численные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Козлов Д.В., Соломатин С.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 28.05.2023 г.

Одобрена после рецензирования 09.06.2023

Принята к публикации 09.06.2023 г.

9. **Vershinin S.A.** Impact of ice on offshore structures of the shelf // Water transport. Volume 13, Moscow: VINITI, 1988. 219 p.

10. **Gladkov M.G.** Loads and effects of ice on marine hydraulic structures. Autoref. Diss. – Doctor of technical sciences. SPb. VNIIG. 1997. 45 p.

11. **Bellendir E.N.** Scientific substantiation of designing gravitational supporting blocks of marine ice resistant platforms and their connections with ground base. Dissertation of the doctor of technical sciences. Saint-Petersburg, 2006. 284 p.

12. **Uvarova T.E.** The abrasive effect of drifting ice cover on marine hydraulic structures. Autoref. Dissertation of the Doctor technical sciences. Vladivostok. FEFU. 2015. 35 p.

13. **Weeks W.F.** and Assur A., The mechanical properties of sea ice. CRREL Monograph II-C3, 1967.

14., G. Timco, Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice, 2, Ice Strength During the Melt Season, pp. 187-193, 2002.

15. **Frost H.J.** and Ashby M.F., Deformation mechanism maps. Oxford: Pergamon Press, 1982, 166 p.

16. **Mellor M.** and Cole D.M., Deformation and failure of the ice under constant strain rate, Cold Regions Science and Technology 5, 1982.

17. **Weeks W.F.** and Mellor M., Mechanical properties of ice in Arctic seas. In Arctic technology and police. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Annual MIT Sea Grant, 1984.

18. **Hallam S.D.**, The role of fracture in limiting ice forces. In IAHR86 Vol. 2, 1986. Pp. 287-319.

19. **Solomatina S.V.** Taking into account the viscoplastic properties of ice to optimize the design solutions of offshore oil and gas field structures in the Sharapov Shar Bay // Hydraulic engineering construction. 2019. № 11. P. 16-21.

20. **Sanderson T.J.O.** Ice Mechanics: Risks to Offshore Structures. Graham and Trotman, London, 1988, 253 p.

21. ISO/DIS19906 “Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures”. 2010. 466 p.

#### Criteria of authorship

Kozlov D.V., Solomatina S.V. carried out theoretical and computational investigations, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Kozlov D.V., Solomatina S.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 28.05.2023

Approved after reviewing 09.06.2023

Accepted for publication 09.06.2023