

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ, СООРУЖЕНИЯ

DOI: 10.15593/2409-5125/2020.04.01

УДК 626

М.А. Селиванова, Н.М. Мальков

Дальневосточный федеральный университет

ОБЗОР ТИПОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИЧАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Арктика в последние годы стала приоритетной территорией развития. Ее промышленное освоение связано с добычей полезных ископаемых, развитием транспортных путей и транспортной инфраструктуры. Северный морской путь, связывающий все арктические регионы России, занимает ведущие позиции в освоении Арктики. Тем не менее в настоящее время вдоль трассы Северного морского пути целесообразно выполнить модернизацию, а в некоторых случаях необходимо начать новое строительство портовой инфраструктуры. В подобных обстоятельствах возникают задачи поиска оптимальных инженерных решений при возведении сооружений. В статье приводится обзор конструкций причальных сооружений, рекомендованных к возведению в суровых климатических условиях. Выделены основные условия применения каждого типа конструкций. Проанализированы особенности условий эксплуатации сооружений на Арктическом шельфе. Даны рекомендации для выбора оптимального типа конструкций при наличии в основании строительной площадки слабых грунтов, а также при ледовом и сейсмическом воздействии. Систематизированы требования, которым должны соответствовать причальные сооружения морских портов с замерзающей акваторией, эксплуатируемые в ледовый период. Также были рассмотрены причальные сооружения, построенные в суровых климатических условиях разных стран. Обоснована целесообразность применения оболочечных конструкций, представляющих собой тонкие железобетонные или металлические оболочки (в большинстве случаев цилиндрические), заполненных грунтом, в суровых климатических условиях Арктики. Описаны основные достоинства данного типа конструкций, а также отмечен ряд их недостатков. Проанализированы основные факторы, от которых зависит выбор типа конструкции гидротехнического сооружения.

Ключевые слова: шельф, суровые условия, сейсмика, слабые грунты, причальные сооружения, оболочечные конструкции.

Введение. Арктика в последние годы стала приоритетной территорией развития. Ее промышленное освоение связано с добычей полезных ископаемых, развитием транспортных путей и транспортной инфраструктуры.

Северный морской путь, связывающий все арктические регионы России, занимает ведущие позиции в освоении Арктики. Тем не менее в настоящее время вдоль трассы Северного морского пути целесообразно вы-

полнить модернизацию, а некоторых случаях необходимо начать новое строительство портовой инфраструктуры.

Износ портовой инфраструктуры является одной из ключевых проблем в повышении конкурентоспособности Северного морского пути. Большая часть портовых гидротехнических сооружений вдоль трассы Севморпути достигла своего нормативного срока службы [1]. Значительная часть сооружений, действующих на внутренних водных путях, эксплуатируется более 50 лет, а в некоторых случаях и дольше. Также вызывает опасение состояние портовых перегрузочных комплексов [1].

Ремонт инфраструктуры и возведение новых гидротехнических сооружений ввиду сложных климатических условий затруднено.

Шельфовая зона арктических морей характеризуется наличием слабых сжимаемых грунтов в основании, в связи с этим усложнено устройство каменных постелей, а также затруднено производство массивных железобетонных конструкций и их транспортировка из-за отдаленности объектов.

В подобных обстоятельствах возникают задачи поиска оптимальных инженерных решений при возведении сооружений.

Основные особенности и условия эксплуатации сооружений на шельфе. Шельфовая зона обладает особой спецификой по своим климатическим, инженерно-геологическим, геологическим, сейсмическим и другим условиям [2]:

- существенное повышение волновых нагрузок вследствие трансформации волн;
- наблюдаемые на большей ее части торосы, поля дрейфующего льда, стамухи;
- слабые грунтовые основания, сопровождаемые большой сейсмической активностью;
- множественные регрессии и трансгрессии, являющиеся следствием непростых природно-климатических и инженерно-геологических условий;
- неравномерное распространение многолетнеохлаждаемых и мерзлых грунтов.

Условия эксплуатации и строительства сооружений на арктическом шельфе также отличаются специфическими особенностями, которые требуют учета не только при проектировании гидротехнических сооружений, но и при производстве строительных работ [2]:

- отсутствие необходимой инфраструктуры, отдаленность объектов от строительных баз;
- трудные условия и недолгая длительность периода, необходимого для транспортирования, сборки и установки гидротехнических сооружений;

- сложные условия эксплуатации (большие нагрузки и воздействия на сооружения).

Рекомендованные типы конструкций причальных сооружений при строительстве в сейсмических районах с преобладанием в основании слабых грунтов. В условиях, где слабые грунтовые основания сопровождаются большой сейсмической активностью, рекомендуется применять следующие конструкции гидротехнических сооружений согласно Р 31.3.02–98:

- причальные заанкеренные стенки из стального шпунта (рис. 1);
- причальные эстакады на железобетонных центрифугированных сваях-оболочках, на стальных трубчатых, на коробчатых сваях и на призматических сваях (рис. 2);
- причальные сооружения из оболочечных конструкций (рис. 3).

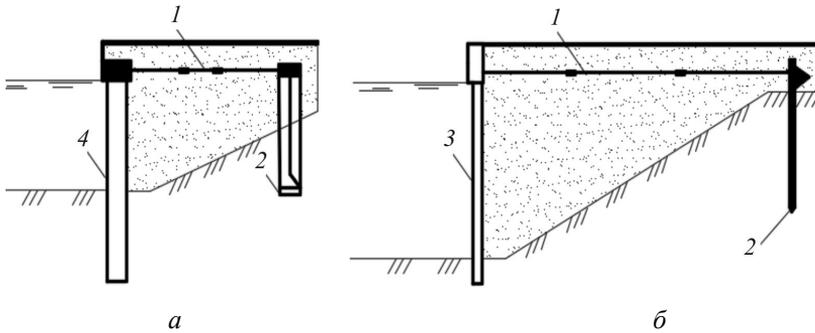


Рис. 1. Пример причального сооружения из заанкеренного больверка из свай-оболочек (а); то же, из шпунта (б); 1 – анкерная тяга; 2 – анкерная плита (стенка); 3 – шпунт; 4 – колонна-оболочка

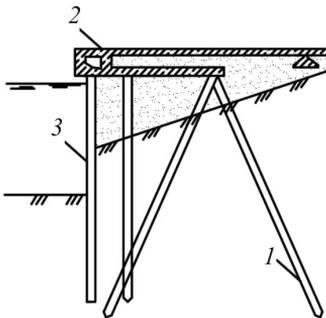


Рис. 2. Пример причального сооружения эстакадного типа; 1 – свая; 2 – верхнее строение; 3 – несущий шпунт

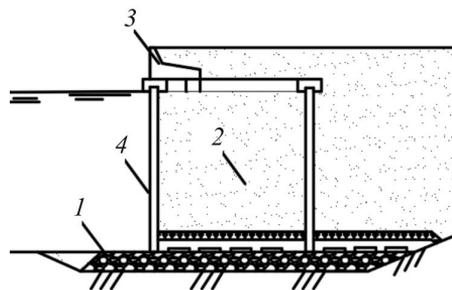


Рис. 3. Пример причального сооружения, выполненного из ОБД; 1 – каменная постель; 2 – песчаная засыпка; 3 – надстройка; 4 – оболочка большого диаметра

При наличии в основании заанкеренного больверка слабых грунтов, грунты должны быть укреплены или заменены на крупнообломочные грунты. Потребность в замене или укреплении грунтов определяется на основании расчетов прочности и устойчивости с учетом сейсмических воздействий. Грунт замены либо закрепленный грунт рекомендуется располагать на плотных подстилающих грунтах за лицевой стенкой и перед ней. Ширина участка замены или укрепления грунта устанавливается расчетами устойчивости сооружения с учетом сейсмических воздействий. Грунт, находящийся за лицевой стенкой, рекомендуется заменять или укреплять на всем участке между лицевой и анкерной стенками.

Способ строительства заанкеренного больверка (последовательность отсыпки грунта) должен исключать смещение оставляемых слабых грунтов при работах по образованию территории и скопление их у лицевой стенки. Для этого необходимо отсыпку грунта производить со стороны стенки вглубь территории. Желательно также перед лицевой и анкерной стенками предусматривать уплотнение отсыпаемых грунтов.

Оболочки большого диаметра необходимо опирать на плотные подстилаемые грунты, при этом слабые грунты внутри самих оболочек стоит заменять на более прочные либо укреплять их.

Свайные опоры должны быть погружены в прочные, устойчивые к сейсмическим воздействиям грунты.

Для повышения горизонтальной жесткости пирсов эстакадного типа рекомендуется: поверх слабых грунтов отсыпать последовательно песчаную подушку и слой крупнообломочного грунта с последующим их уплотнением. Рекомендуется также на сваях в этом слое закреплять уширители, вовлекающие больший объем грунта в работу при горизонтальных нагрузках. Предлагается также устройство козловых опор [3].

Типы конструкций причальных сооружений, рекомендованные к возведению в суровых арктических условиях. Причальные сооружения морских портов с замерзающей акваторией, эксплуатируемые в ледовый период, должны удовлетворять следующим основным требованиям [4]:

- выдерживать нагрузки, возникающие в связи с воздействием льда и проведением швартовных операций в ледовой обстановке;
- сохранять возможность эксплуатации при отрицательных температурах воздуха и в ледовых условиях;
- должны быть оборудованы специальными средствами, обеспечивающими безопасность и быстроту проведения швартовных операций.

Лицевые стенки засыпных причальных сооружений для условий Арктики следует выполнять из стальных шпунтовых свай или труб, эк-

ранирующие элементы – из железобетонных свай и свай-оболочек. Допускается применять для лицевых стенок элементы из предварительно напряженного железобетона и бетона высокой прочности согласно Р 31.3.02–98.

Предлагается использовать следующие конструкции гидротехнических сооружений:

- причальные сооружения из обыкновенных бетонных массивов, массивов гигантов, из пустотелых бетонных массивов (рис. 4);
- оболочечные причальные сооружения (см. рис. 3);
- причальные сооружения типа больверк (см. рис. 1);
- набережные и пирсы эстакадного типа согласно СП 287.1325800.2016: а) на призматических железобетонных сваях, при толщине льда в акватории до 0,25 м; б) на трубчатых железобетонных сваях, при толщине льда в акватории до 0,4 м (см. рис. 2).

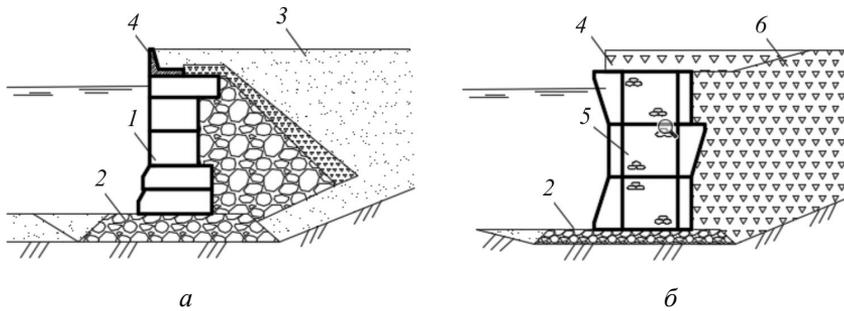


Рис. 4. Вид причального сооружения, выполненного: *а* – из обыкновенных массивов; *б* – из пустотелых массивов; 1 – обыкновенный бетонный массив; 2 – каменная постель; 3 – песчаная засыпка; 4 – надстройка; 5 – пустотелый массив; 6 – засыпка камнем

Причальные сооружения, эксплуатируемые в арктических и субарктических условиях. В конце XX в. в нашей стране при проектировании причальных сооружений в суровых условиях Арктики получили распространение различные типы конструкций. Так, например, в порту Тикси (Россия) эксплуатируется причал оболочечной конструкции из стального шпунта (восьмибалльный район сейсмичности) [5].

Оболочечные конструкции из стального шпунта строятся в Гренландии, Канаде, США (Аляска) (рис. 5) [5].

Нефтепричал в заливе Кука и причал в Анкоридже (США, Аляска) построены с использованием трубчатых свай. Причалы свайной конструкции в Анкоридже хорошо зарекомендовали себя при землетрясении

1964 г. Причал сместился приблизительно на 0,3 м по горизонтали, в то время как зона порта была сдвинута почти на 0,9 м [5].

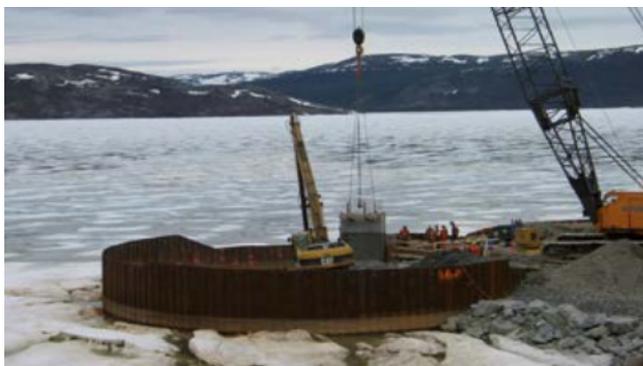


Рис. 5. Причальное сооружение из оболочечных конструкций в Канаде [8]

Сооружения гравитационного типа из массивов-гигантов построены в некоторых портах Канады (Квебек, Картье, Севен Айлендс) и находятся в условиях, приближенных к арктическим [5]. В порту Квебек массивы-гиганты выполнены железобетонными цилиндрической формы высотой 27,5 м и диаметром 24,5 м, установлены на каменной отсыпке и снабжены ледорезными устройствами. Следует отметить сложность естественных условий порта. Зимний период характеризуется дрейфующими ледяными полями. Во время весеннего паводка льды сильным течением выносятся в Атлантический океан, при этом ледяные поля достигают гигантских размеров и веса. Принятое техническое решение устройства причала учитывало особенности местных условий [5].

Конструкции причалов в морском порту Сабетта (Россия) представляют собой заанкерованный больверк и выполняются из металлического трубошпунта. По характеристикам и временным рамкам проекта эти сооружения уникальны и реализуются в России впервые, так как расчетная нагрузка на покрытие при разгрузке модулей составляет 10 т/м^2 , а сроки строительства составляют всего полтора года (рис. 6) [7].

В рамках освоения Салмановского (Россия) нефтегазоконденсатного месторождения и реализации строительства заводов по отгрузке сжиженного природного газа завершено строительство причалов в северной части Обской губы Карского моря. Конструкция причала представляет собой заанкерованный больверк и выполняется из металлического трубошпунта [7].

Несколько причалов типа «заанкеренный больверк» построены в городе Певек (Россия). Эксплуатация этих причалов в течение длительного

времени показала их достаточную надежность [5]. Заанкеренные больверки возведены и в ряде других пунктов, в том числе в порту Магадан, где ледовые условия достаточно тяжелы [5].

В Архангельске (Россия) построено три морских причала в виде экранированного заанкеренного больверка с использованием предварительно-напряженных железобетонных оболочек [5].

На полуострове Таймыр с применением шпунта трубчатого сварного (ШТС) идет строительство глубоководного морского терминала Чайка (рис. 7). Данная конструкция позволяет вести строительство в сжатые сроки, выдерживает ледовые нагрузки, а также обеспечивает устойчивость причальных сооружений с удельными вертикальными нагрузками.



Рис. 6. Причал порта Сабетта [8]



Рис. 7. Строительство порта Чайка [9]

Угольная набережная эстакадного типа построена на Шпицбёргене (Норвегия). Общая ее длина составляет 195 м (рис. 8) [6].



Рис. 8. Причальная набережная на Шпицбергене [10]

Оболочки большого диаметра. Как один из перспективных типов конструкций для строительства причальных сооружений в суровых климатических условиях авторами предлагаются заполненные оболочки различных конструктивных решений (рис. 9).

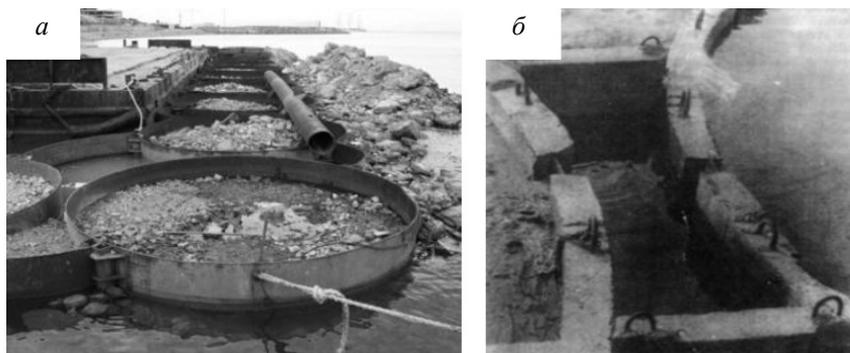


Рис. 9. Причальные сооружения из оболочечных конструкций:
а – из стальных оболочек; б – из железобетонных оболочек [4]

Данный тип конструкций обладает рядом преимуществ:

- экономичность;
- возможность оболочки сохранять прочность при значительных отклонениях от проектного положения вследствие перераспределения усилий в наполнителе в процессе эксплуатации;
- возможность применять сооружения из оболочечных конструкций в условиях, когда в основании шельфовой зоны находятся сравнительно слабые сжимаемые грунты.

Однако следует отметить ряд проблем, связанных с применением оболочечных конструкций:

- неравномерность передачи усилия от оболочки с наполнителем на основание;
- затруднения, связанные с описанием напряженно-деформированного состояния системы «оболочка – упругий наполнитель» с учетом физико-механических свойств наполнителя, условий контакта наполнителя с оболочкой и краевых эффектов;
- отсутствие автоматизированной единой методики расчета оболочечных конструкций с упругим наполнителем;
- недостаточность выбора конструктивных решений, позволяющих увеличить эффективность работы наполнителя в различных эксплуатационных условиях;
- потребность в разработке вариантов по технологии возведения сооружений из оболочечных конструкций для различных условий строительства [11].

Указанные проблемы обозначились ввиду недостаточной исследованности характера напряженно-деформированного состояния оболочечных

конструкций как в натуральных условиях, так и на моделях. Ввиду этого дальнейшие исследования в области напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций с упругим наполнителем остаются актуальными.

Заключение. При строительстве гидротехнических сооружений в сложных климатических условиях находят все более широкое применение экономичные комбинированные конструкции. Оболочечным конструкциям с грунтовым наполнителем отдают предпочтение при возведении причальных сооружений, так как данная конструкция позволяет учесть технологические возможности при строительстве. Выбор типа конструкции гидротехнического сооружения также зависит от нескольких факторов [12]:

1. Свойства грунта основания. При тяжелых инженерно-геологических условиях применение нашли оболочки из шпунта, тогда как применение оболочек большого диаметра не всегда возможно ввиду сложности подводных работ при устройстве постели.

2. Доступность материалов и оборудования. Это зачастую является важнейшим фактором при выборе типа конструкции, так как удаленность или отсутствие поблизости сборочной площадки увеличивает стоимость производства работ и сроки возведения. Достоинством цилиндрической оболочки из шпунта является то, что ее составляющие элементы (стальной шпунт) подбираются по каталогам завода-изготовителя и доставляются на строительную площадку в более узкие сроки.

3. Габаритные размеры самого проектируемого сооружения. Оболочки из шпунта могут быть соединены в разнообразном порядке в зависимости от расположения будущего сооружения. Набор форм цельных оболочек, напротив, весьма ограничен, как правило, они изготавливаются в форме цилиндра. Цельные оболочки устанавливаются в ряд, вплотную, или на небольшом расстоянии друг от друга, которое перекрывается фрагментом оболочки такого же или меньшего радиуса.

4. Условия строительства гидротехнических сооружений.

5. Сейсмическая нагрузка. Оптимальным решением при строительстве в сейсмических районах могут стать оболочки из шпунта, в то время как применение цельных оболочек, опирающихся на плотные подстилающие слои грунта, не всегда возможно в связи со значительной глубиной погружения конструкции.

Библиографический список

1. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года. – М., 2013. – С. 171.
2. Беллендир Е.Н. Научное обоснование проектирования гравитационных опорных блоков морских ледостойких платформ и их сопряжения с грунтовым основанием. – СПб., 2006.
3. Разработка основных положений по проектированию причальных сооружений в условиях Арктики. Рекомендации по проектированию причальных сооружений в условиях Арктики. (промежуточный отчет). Тема 5.1.1., раздел 5.1.1.5. Задание Госнахзаэплана 0.54.03.02.02. Д. Книга 1.Л. – 1979. – С. 63.
4. Математическая модель оболочки с наполнителем к расчету гидротехнических сооружений / Н.Я. Цимбельман, Д.А. Потянихин, А.И. Мамонтов, Т.И. Чернова, Е.В. Квон, И.Г. Кузнецов // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 4(31). – С. 43–50.
5. Штанько Л.Ф. Разработка инструкции по проектированию причальных сооружений для условий Арктики с учетом воздействий нагрузок и мерзлого грунта в теле сооружения. (Промежуточный отчет). Тема 3.4.1.1 / Дальморниипроект. – Владивосток, 1981.
6. Sheet piles and design solutions [Электронный ресурс]. Стальные шпунтовые сваи. Общий каталог 2014. – URL: <http://sheetpiling.arcelormittal.com/> (дата обращения: 10.09.2020).
7. Проекты строительства ООО «Трест Запсибгидрострой» для нефтегазовой отрасли. – URL: http://www.s-ng.ru/pdf/main_1939.pdf (дата обращения: 10.09.2020).
8. Проект Ямал СПГ в Сабетте [Электронный ресурс]. – URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/95954> (дата обращения: 10.09.2020).
9. Самый северный угольный терминал заработает на Таймыре [Электронный ресурс]. – URL: https://www.korabel.ru/news/comments/samyu_severnoy_ugolnyy_terminal_zarabotaet_na_taymyre.html (дата обращения: 10.09.2020).
10. Water-ice actions on the coal quay at Kapp Amsterdam in Svalbard / A. Marchenko, A. Shestov, A. Sigítov, S. Løset // Proc. Int. Conf. Port Ocean Eng. Arct. Cond., POAC11-145. – Montreal, Canada, 2011. – 11 p.
11. Беккер А.Т., Цимбельман Н.Я. Применение оболочечных конструкций с упругим наполнителем в строительстве // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. Владивосток. – 2010. – № 2(4). – С. 27–34.
12. Чернова Т.И., Цимбельман Н.Я. Цилиндрические оболочки с внутренним наполнителем в практике геотехнического строительства // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2016. – № 1(41). – С. 11–20.

References

1. Strategiya razvitiya morskoy portovoy infrastruktury Rossii do 2030 goda. Available at: http://www.rosmorport.ru/media/File/State-Private_Partnership/strategy_2030.pdf (accessed 10 September 2020).
2. Bellendir E.N. Nauchnoe obosnovanie proektirovaniya gravitatsionnykh opornykh blokov morskikh ledostoykikh platform i ikh sopryazheniya s gruntovym osnovaniem. Sankt-Peterburg, 2006.
3. Razrabotka osnovnykh polozhenij po proektirovaniyu prichal'nykh sooruzhenij v usloviyah Arktiki. Rekomendacii po proektirovaniyu prichal'nykh sooruzhenij v usloviyah Arktiki. (promezhutochnyj otchet). – 1979. – P. 63.
4. Tsimbel'man N.Ya., Potyanikhin D.A., Mamontov A.I., Chernova T.I., Kvon E.V., Kuznetsov I.G. Matematicheskaya model' obolochki s napolnitelem k raschetu gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Mathematical model of a shell with filling agent applied to hydroengineering constructions] *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 4(31), pp. 43-50.
5. Shtan'ko L.F. Razrabotka instruksii po proektirovaniyu prichal'nykh sooruzheniy dlya usloviy Arktiki s uchetom vozdeystviy nagruzok i merzlogo grunta v tele sooruzheniya (Promezhutochnyy otchet). Moscow: Dal'morniiproekt, 1981.
6. Sheet piles and design solutions. Available at: <http://sheetpiling.arcelormittal.com/> (accessed 10 September 2020).

7. Proekty stroitel'stva OOO «Trest Zapsibgidrostroy» dlya neftegazovoy otrasli. Available at: http://www.s-ng.ru/pdf/main_1939.pdf (accessed 10 September 2020).

8. Proekt Yamal SPG v Sabette. Available at: <https://sdelanounas.ru/blogs/95954/> (accessed 10 September 2020).

9. Samyj severnyj ugol'nyj terminal zarabotaet na Tajmyre. Available at: https://www.korabel.ru/news/comments/samyj_severnyj_ugolnyj_terminal_zarabotaet_na_tajmyre.html (accessed 10.09.2020).

10. Marchenko, A., Shestov, A., Sigitov, A., Løset, S., 2011. Water-ice actions on the coal quay at Kapp Amsterdam in Svalbard. Proc. Int. Conf. Port Ocean Eng. Arct. Cond., POAC11-145, Montreal, Canada, 11 pp.

11. Bekker A.T., Tsimbel'man N.Ya. Primenenie obolocheknykh konstruksiy s uprugim napolnitelem v stroitel'stve [Construction applications of elastic core shell structures] *Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 2(4), pp. 27-34.

12. Chernova T.I., Tsimbel'man N.Ya. Tsilindricheskie obolochki s vnutrennim napolnitelem v praktike geotekhnicheskogo stroitel'stva. [Cylindrical Shells with Infill in Geotechnical Engineering Practice] *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2016, no. 1(41), pp. 11-20.

Получено 31.08.2020

M. Selivanova, N. Malkov

OVERVIEW OF TYPES OF BERTHING STRUCTURES USED IN SEVERE CLIMATE CONDITIONS

The article provides an overview of the structures of berthing facilities recommended for construction in harsh climatic conditions. The main conditions for the use of each type of structure are highlighted. The features of the operating conditions of structures on the Arctic shelf are analyzed. Recommendations are given for choosing the optimal type of structures in the presence of soft soils at the base of the construction site, as well as under ice and seismic impacts. The berthing facilities built in severe climatic conditions of different countries are analyzed. The expediency of using shell structures, which are thin reinforced or metal concrete shells (in most cases cylindrical) filled with soil in severe climatic conditions of the Arctic, has been substantiated. The main advantages of this type of structures are described, and a number of disadvantages of the proposed type of structures are noted that are associated mainly with the peculiarities of the interaction between the shell and the filler material, as well as with the difficulties in organizing the transfer of load from the shell structure to the soil base.

Keywords: shelf, severe conditions, seismic, soft soils, berthing facilities, shell structures.

Селиванова Мария Александровна (Владивосток, Россия) – ассистент кафедры «Гидротехника, теория зданий и сооружений», Дальневосточный федеральный университет (690922, Приморский край, остров Русский, пос. Аякс, 10, e-mail: selivanova.ma@dvfu.ru).

Мальков Николай Михайлович (Владивосток, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидротехника, теория зданий и сооружений», Дальневосточный федеральный университет (690922, Приморский край, остров Русский, пос. Аякс, 10, e-mail: malkov.nm@dvfu.ru).

Maria Selivanova (Vladivostok, Russian Federation) – Assistant Lecturer, Department of Hydrotechnics, Theory of Buildings and Structures, Far Eastern Federal University (690922, Primorsky Territory, Russky Island, village Ajax, 10, e-mail: selivanova.ma@dvfu.ru).

Nikolay Malkov (Vladivostok, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydrotechnics, Theory of Buildings and Structures, Far Eastern Federal University (FEFU) (690922, Primorsky Territory, Russky Island, village Ajax, 10, e-mail: malkov.nm@dvfu.ru).