

**ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ  
ЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ  
ПРИЧАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ ТИПА «БОЛЬВЕРК»**

**Якушев Д.И.**, доцент,  
**Осадчий В.С.**, к.т.н., доцент,  
**Слободянюк В.П.**, к.т.н., доцент,  
**Дмитриев С.В.**, к.т.н., доцент,  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
diyakushev@mail.ru

**Аннотация.** Одной из основных причин аварий причальных сооружений типа «больверк» является превышение допустимой проектом эксплуатационной нагрузки от складированных грузов в прикормонной зоне. Организация системы непрерывного мониторинга состояния анкерных тяг, а именно, контроль и отслеживание истории изменения усилий (деформаций) в автоматическом режиме, позволит значительно снизить риски возникновения аварийных ситуаций. Предлагаемая система наблюдений построена на использовании традиционных тензометрических датчиков, установленных на анкерных тягах с использованием цифрового канала обмена данными. Показания датчиков обрабатываются специальным программным обеспечением с сигнальным оповещением о превышении пороговых значений усилий. Выполнены поверочные расчеты по оценке влияния приращения полезной нагрузки от складированных грузов на изменения усилий в анкерных тягах несколькими способами. Подобные расчеты должны предшествовать установке тензометрического оборудования и являются основой разработки программы мониторинга, разрабатываемой для конкретного причального сооружения.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, причал, больверк, тяга, тензометрия, мониторинг, нагрузки

**ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ  
ЗА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ  
ПРИЧАЛЬНОЇ СПОРУДИ ТИПУ «БОЛЬВЕРК»**

**Якушев Д.І.**, доцент,  
**Осадчий В.С.**, к.т.н., доцент,  
**Слободянюк В.П.**, к.т.н., доцент,  
**Дмитрієв С.В.**, к.т.н., доцент,  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
diyakushev@mail.ru

**Анотація.** Однією з основних причин аварій причальних споруд типу «больверк» є перевищення допустимого проектом експлуатаційного навантаження від складованих вантажів в прикормонній зоні. Організація системи безперервного моніторингу стану анкерних тяг, а саме, контроль і відстеження історії зміни зусиль (деформацій) в автоматичному режимі, дозволить значно знизити ризики виникнення аварійних ситуацій. Запропонована система спостережень побудована на використанні традиційних тензометричних датчиків, встановлених на анкерних тягах, з використанням цифрового каналу обміну даними. Показання датчиків обробляються спеціальним програмним забезпеченням з сигнальним попередженням про перевищення порогових значень зусиль. Виконано перевіірочні розрахунки щодо оцінки впливу збільшення корисного навантаження

від складованих вантажів на зміну зусиль у анкерних тягах декількома способами. Подібні розрахунки повинні передувати встановленню тензометричного обладнання і є основою програми моніторингу, що розробляється для конкретної причальної споруди.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, причал, больверк, анкерна тяга, тензометрія, моніторинг, навантаження.

## ORGANIZATION OF OBSERVING SYSTEM FOR STRESS STATE-DEFORMED BERTHING FACILITIES TYPE "REVTMENT"

**Yakushev D.I.**, Assistant Professor,  
**Osadchy V.S.**, PhD, Assistant Professor,  
**Slobodianiuk V.P.**, PhD, Assistant Professor,  
**Dmitriiev S.V.**, PhD, Assistant Professor,  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
diyakushev@mail.ru

**Abstract.** One of the main causes of accidents berthing facilities "revetment" type is the excess of the permissible working load draft of the stored goods in quay apron zone. Organization of continuous monitoring of the state of the anchor rod system, namely, monitoring and tracking of the history of the efforts of change (deformation) in the automatic mode, will significantly reduce the risks of accidents. The proposed system is based on observations using conventional strain gauges mounted on the anchor rods using a digital communication channel. Sensor readings are processed by special software with a signal warning about exceeding the threshold values of efforts. Submitted calibration calculations to assess the impact of the increment of payload of the stored goods on the change in the anchoring rods efforts in several ways. Similar calculations must precede the installation of equipment and strains are the basis for the development of monitoring programs, developed for a specific berthing facility.

**Keywords:** stress-strain state, pier, revetment, pull, strain measurement, monitoring, loads

**Введение.** Увеличение числа аварий, в том числе гидротехнических сооружений, вызванное дефектами строительства, старением сооружений, изменениями условий эксплуатации, ошибками в проектировании, экстремальными внешними воздействиями и другими причинами, становится фактором, требующим создания научно-обоснованных подходов к проблемам социального риска и экологии, а также выбора безопасных технологий строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Вопросами, связанными с проектированием, строительством и эксплуатацией причальных сооружений занимались представители различных научных школ в Москве, Санкт-Петербурге, Одессе и т.д. Необходимой теоретической базой для решения прикладных задач являются фундаментальные исследования в области строительства портов и портовых сооружений, которым посвятили свои работы: А.Я. Будина, Б.Ф. Горюнова, Н.Н. Джунковского, П.П. Кульмача, Р.В. Лубенова, В.Е. Ляхницкого, Р.М. Нарбута, П.С. Никерова, Г.Н. Смирнова, Ф.М. Шихиева, В.К. Штенцеля, В.Г. Яковенко, П.И. Яковлева и др.

В инженерной практике используется большое количество различных по назначению, по конструкциям и форме причальных гидротехнических сооружений. Самыми распространенными конструкциями являются больверки, которые используются как в морской, так и в речной гидротехнике. Сооружения этого типа составляют более 50% от числа возводимых причалов. Основными преимуществами больверков по сравнению с другими типами конструкций, возводимыми в аналогичных условиях, являются: экономичность, малая трудоемкость, малая материалоемкость, краткие сроки строительства.

**Цели и задачи.** Цель работы – предложить к использованию в практике гидротехнического строительства и эксплуатации метод мониторинга за напряженно-

деформированным состоянием причального сооружения типа «Большверк», позволяющий в непрерывном эксплуатационном режиме отслеживать изменения в работе конструкций причала и оперативно реагировать на эти изменения при выходе наблюдаемых параметров из рабочего диапазона. В связи с этим, задачи исследования были сформулированы следующим образом:

- предложить принципиальную схему организации наблюдений за усилиями в анкерных тросах причального сооружения типа «Большверк»;
- дать оценку влияния изменения нагрузки от складываемых грузов на причале на величины анкерных усилий и возможности их контроля.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследования является причальное сооружение типа «Большверк» с анкеркой на одном уровне. Методы исследований – численные.

**Результаты исследований.** При строительстве большверков наиболее широко используют стальной шпунт, благодаря его экономичности, высокой индустриальности и простоте в производстве работ. Он может применяться в любых грунтовых условиях, кроме скальных, и в самых суровых климатических условиях (полярных). Сортамент стального шпунта насчитывает большое количество разнообразных профилей, отличающихся по типу замков и несущей способности. После забивки заанкерванный шпунт объединяют распределительным поясом для восприятия и распределения анкерных усилий. С помощью пояса могут быть частично выправлены искривления шпунтового ряда, образовавшиеся при забивке. Обычно, распределительный пояс выполняют из парных швеллеров, расстояние между которыми определяется диаметром анкерных тросов и их наклоном. После анкерки шпунтового ряда и обратной засыпки песком (благодаря плотности замков грунтопроницаемость стенки обеспечивается без каких-либо дополнительных мероприятий) шпунт омоноличивают поверху железобетонным сборно-монолитным оголовком.

Причальные сооружения являются весьма ответственными сооружениями, как с экономической, так и экологической точки зрения. Обеспечению их надежности и безопасности необходимо уделять особое внимание. Причальные сооружения подвергаются как воздействию природных явлений, так и явлений технологического характера. Эти воздействия обычно классифицируют следующим образом: геологические, гидрологические, метеорологические, сейсмические, эксплуатационные. Нередко аварии причальных сооружений происходят в результате наложения нескольких вышеуказанных воздействий [1]. При этом может иметь место взаимодействие двух или более факторов, каждый из которых в отдельности, возможно, не сыграл бы решающей роли в аварии причала. Анализ аварий причальных сооружений типа «большверк», выполненных из металлошпунта с анкеркой в одном уровне позволяет сделать вывод, что наиболее часто описываемым случаем является разрыв анкерных тросов. Мониторинг состояния этого конструктивного элемента, а именно – контроль и отслеживание истории изменения усилий (деформаций) мог-бы дать определенную интегральную оценку безопасности эксплуатации сооружения, в целом. Если величина погружения низа лицевой стенки, являющаяся расчётной величиной, определяется на стадии расчета сооружения, то величина нагрузки, действующая на лицевую стенку большверков в процессе эксплуатации, складывается из квазипостоянной составляющей – воздействие грунтов засыпки, воздействие от элементов стационарного оборудования и покрытия, устраиваемых на причале и переменной - нагрузки от перегружающей техники, технологического транспорта, складываемых грузов. Изменение нагрузки приводит к перераспределению опорных реакций и момента, возникающего в элементах лицевой стенки. Таким образом, косвенно, изменение реакции в анкерной тяге является показателем изменения, в том числе, и изгибающего момента в шпунте, что является определяющей величиной при расчете причального сооружения [2].

В технике нашел широкое применение метод экспериментального определения напряжённого состояния конструкций, основанный на измерении местных деформаций с

применением тензометров. Наибольшее применение при тензометрировании натуральных конструкций находят электрические тензометры сопротивления – тензорезисторы. Диэлектрическая подложка тензорезистора соединяется с чувствительной решёткой и исследуемой конструкцией связующим материалом. Принцип действия тензорезисторов основан на изменении электрического сопротивления чувствительной решётки при ее деформировании вместе с конструкцией. Изменение деформации конструкции  $\varepsilon$  определяется по формуле  $\varepsilon = \Delta R/kR$ , где  $\Delta R$  – изменение номинального сопротивления  $R$ ,  $k$  – коэффициент чувствительности.

Для «онлайн» мониторинга технического состояния причалов типа «больверк» с анкеркой в одном уровне, с целью оперативного контроля условий технической эксплуатации причала и возможного определения общего технического состояния основных конструкций в процессе эксплуатации, предлагается выполнить установку специальных тензодатчиков на элементы анкерных тяг, с объединением в единую информационную сеть, с обработкой и отображением текущего состояния уровня напряжений (усилий) в анкерных тягах на удаленном диспетчерском месте. Применение специализированного, разработанного для этой задачи ПО, позволит выполнять оперативный контроль за условиями технической эксплуатации причала, получать статистическую информацию по условиям его эксплуатации и изменении этих параметров за срок наблюдений. Так, например, при достижении напряжений в элементах тяг критического значения, система может выдавать предупреждающие сообщения оператору, который в свою очередь может приостанавливать грузовые или иные операции на причале для недопущения возникновения аварийного события. (Известно, что в подавляющем большинстве, аварии причалов были спровоцированы их перегрузкой). Примерная блок-схема системы представлена на рис. 1. Для устройства описанной системы мониторинга могут быть использованы серийные устройства, например, выпускаемые НПО «Метра», Россия. Разработка специализированного ПО для обработки и визуализации данных, а также, настройка оборудования под условия конкретного обследуемого сооружения может быть осуществлена силами коллектива инженеров – программистов на территории Украины, что поможет значительно снизить стоимость оборудования и затраты на эксплуатацию предлагаемой системы мониторинга.

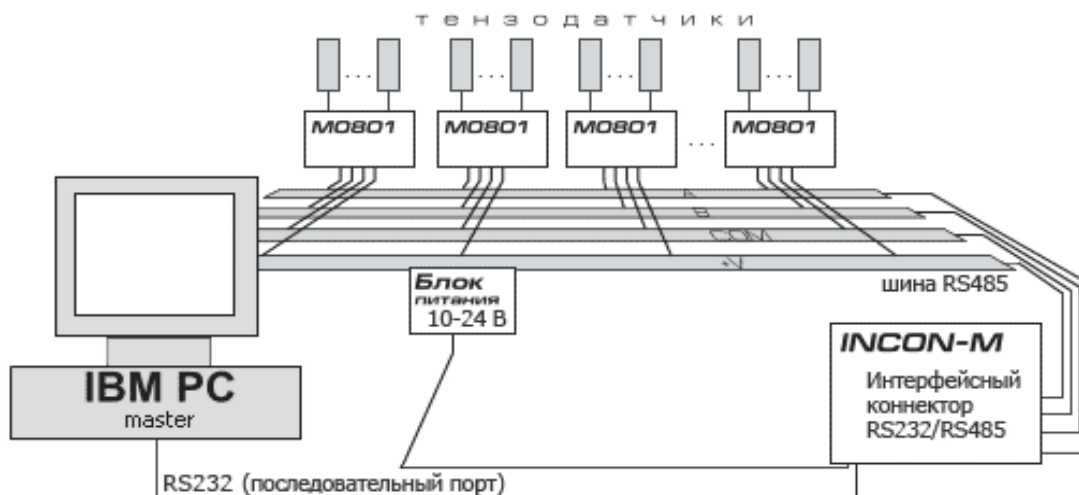


Рис.1. Блок-схема сети мониторинга за состоянием причального сооружения на базе АЦП М0801 (произв. НПО «МЕТРА») и шины RS 485

Следует отметить, что точная настройка системы требует наличия проектной и исполнительной документации по причалу, выполнения серии поверочных расчётов и метрологического обслуживания (поверки) оборудования в течении срока эксплуатации.

Техническая эксплуатация портовых сооружений включает: установление режима эксплуатации сооружений и надзор за его соблюдением; наблюдение за сооружениями и постоянное поддержание их в образцовом техническом состоянии; проведение мероприятий

по противокоррозионной защите конструкций сооружений; вскрытие резервов несущей способности сооружений с целью повышения эффективности их использования (увеличение нагрузок, глубин, пропускной способности, улучшение условий эксплуатации и т.д.) с минимальными затратами на их усиление и переустройство; перспективное планирование и проектирование реконструкции и ремонта важнейших сооружений в сочетании и увязке с новым строительством; текущий и капитальный ремонт сооружений; составление и ведение паспорта порта и паспортов сооружений [3].

Для теоретического обоснования возможности использования предложенной системы выполнен ряд численных экспериментов, а именно:

– выполнен расчет причального сооружения типа «Болверк» с анкеркой в одном уровне по «классической схеме» с применением графо-аналитического расчета методом Блюма-Ломмейера [4]. Варьировались значения величины полезной нагрузки  $q_1$  в прикордонной зоне. Схема причального сооружения с нагрузками от складированных грузов  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ , представлена на рис. 2. 1 и 2 – грунты засыпки и коренной породы соответственно.

– расчет причального сооружения выполнен с использованием программного комплекса SCAD в плоской постановке (модель упруго-податливой среды). Элементы грунтового массива моделировались пластинчатыми конечными элементами. Варьировалось изменение величин полезной нагрузки в прикордонной зоне.

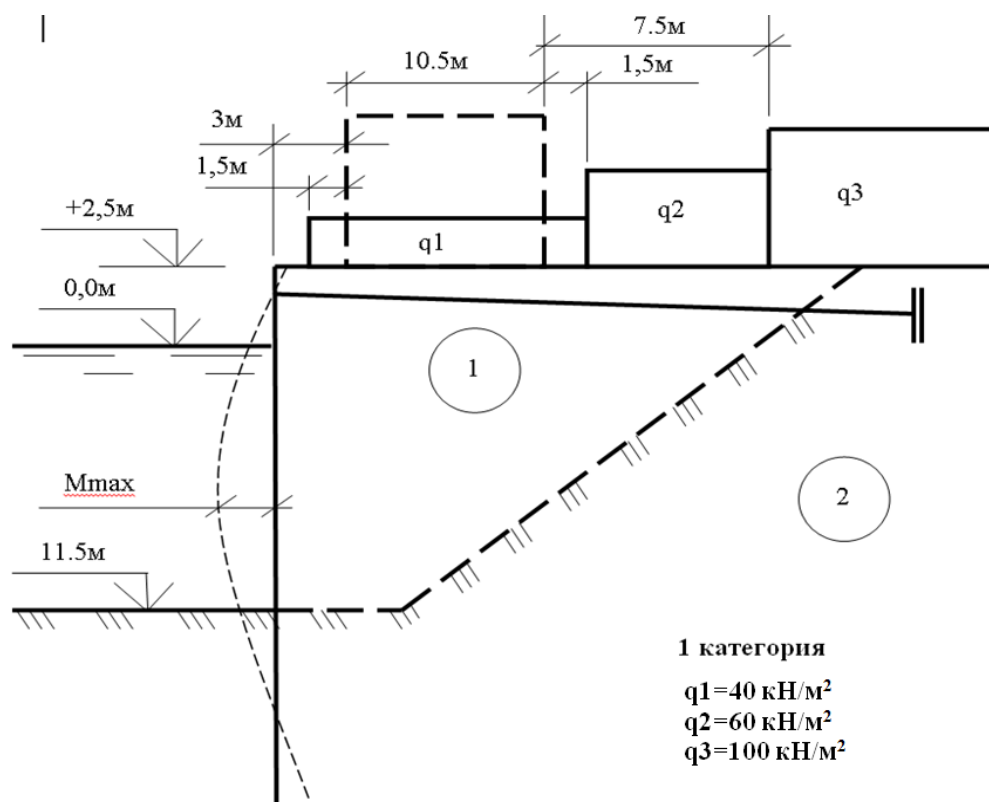


Рис. 2. Принятая расчетная схема причального сооружения типа «Болверк»

Зависимость усилия в анкере от величины полезной нагрузки на кордоне причала носит сложный характер. При использовании классической методики расчета зависимость усилия в анкере от изменения интенсивности нагрузки  $q_1$  носит линейный характер. Использование более сложных расчетных схем, учитывающих совместную работу элементов шпунта и грунтового массива, с использованием компьютерного оборудования реализующих метод конечных элементов, дает отличную, от линейной, зависимость (табл. 1, рис. 3). В любом случае, может быть определено предельное усилие, воспринимаемое одиночной анкерной тягой, по результатам определения предельной несущей способности как анкерной тяги, так и анкерного устройства.

Таблица 1 – Результаты расчетов по различным моделям

Величина полезной нагрузки в зоне $q_1$ , кН/м.п.	Приращение усилия в анкерной тяге, кН	
	Графоаналитический расчет	Расчет с использованием конечно-элементной модели
0	-	-
10	22,6	21,2
20	48,1	41,6
30	71,1	65,1
40	97,1	81,3

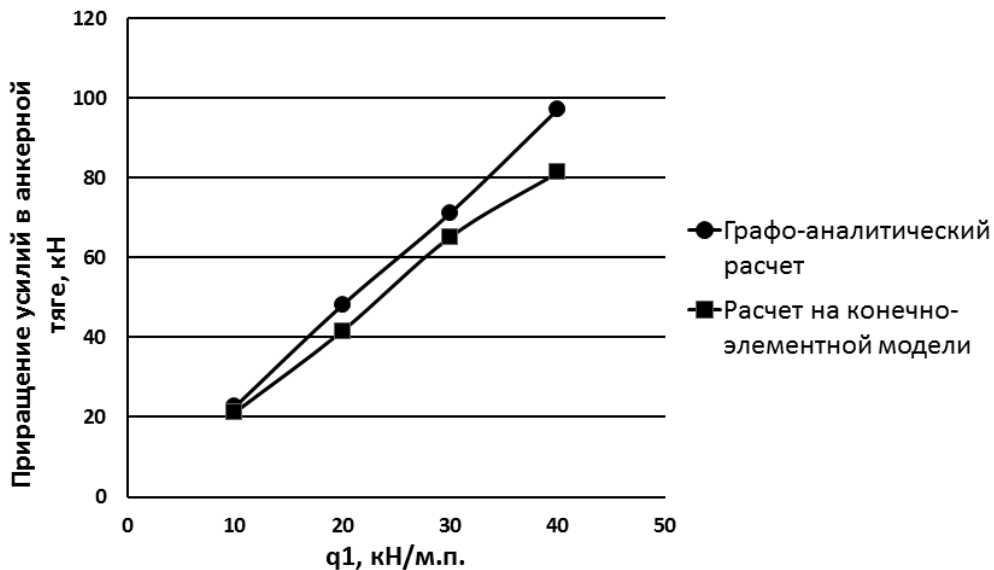


Рис. 3. Графики зависимостей изменения усилий в анкерной тяге от величины полезной нагрузки  $q_1$  на причале

Рассмотрение изополей вычисленных горизонтальных напряжений в грунте в плоских расчетных схемах, выполненных с применением программного комплекса «SCAD Office» [5], позволяет визуально оценить степень влияния нагрузок в различных зонах на величину анкерной реакции. На рис. 4 представлены вычисленные изополя горизонтальных напряжений в грунтовом массиве при учете полезных нагрузок только в зоне действия нагрузки  $q_1$ , расчетной интенсивности – 40 кН/м.п.

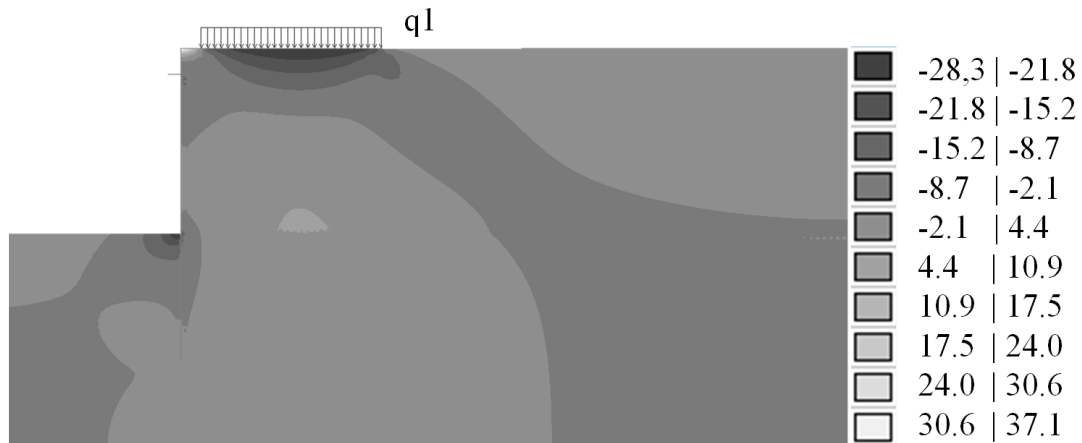


Рис. 4. Вычисленные изополя горизонтальных напряжений (кН/м<sup>2</sup>) в грунтовом массиве при учете нагрузок в зоне  $q_1$

Анализ результатов показывает, что наибольшее влияние на величину изменения реакции в анкере оказывает нагрузка в зоне  $q_1$ , и, практически, не влияет нагрузка в тыловой зоне  $q_3$ .

В связи с регулярным расположением анкерных тяг в плане сооружения, размещение контрольно-измерительной аппаратуры на тягах с определенным шагом, позволяет зафиксировать локальные зоны превышения нагрузки на кордоне. Поэтому, был выполнен ряд расчетов по моделированию конструкции причала в пространственной постановке, с моделированием локального превышения нагрузки в прикордонной зоне причала на ограниченной площади. В результате расчетов, аналогично «плоской» задаче, были получены изополя горизонтальных напряжений в элементах грунтового массива и эпюры анкерных реакций.

Одной из частых причин аварий эксплуатируемых причальных сооружений является нарушение правил эксплуатации причалов, а именно: превышение расчетных нагрузок на кордон. В соответствии с сложившейся практикой, на основании Закона Украины «О морских портах» [6], причалы находятся в собственности государства и могут эксплуатироваться хозяйствующими субъектами. Функции технического надзора и контроля за их эксплуатацией сохраняются за Администрациями портов. Использование предлагаемой автоматизированной системы контроля позволит своевременно выявлять случаи нарушения правил эксплуатации причалов, некомпетентность тальманов, нештатное использование причалов, снизить процесс трудоемкости проведения инспекций, получить объективный материал для арбитражных разбирательств по фактам выявления причин отказов эксплуатации причальных сооружений. В соответствии с требованиями [3] предусмотрен пересмотр норм эксплуатационных нагрузок с периодичностью 1 раз в год. Рекомендуются, в отдельных случаях, для действующих сооружений, выполнять их опытную отгрузку. Проведение комплекса работ по опытной отгрузке причалов позволит выполнить точную калибровку и настройку предлагаемой системы мониторинга.

**Выводы:** Предложенная принципиальная схема организации наблюдений за усилиями в анкерных тягах причального сооружения типа «Больверк», основанная на применении тензорезистивных датчиков и автоматизированной системы сбора информации, позволяет упростить процесс контроля за технической эксплуатацией и снизить аварийность причальных сооружений возникающей вследствие превышения эксплуатационных нагрузок на кордоне причала. Дана оценка влияния изменения нагрузок на кордон причала на величину усилий в анкерных тягах, по результатам расчетов по различным методикам. Подобные расчеты должны быть выполнены для конкретного наблюдаемого причального сооружения перед установкой тензометрического оборудования для обеспечения возможности анализа выполненных измерений.

## Литература

1. Костюков В.Д. Надежность морских причалов и их реконструкция / В.Д. Костюков. – М.: «Транспорт», 1987. – 223 с.
2. Алексеев И.О. Ремонт гидротехнических сооружений / И.О. Алексеев. – СПб.: «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2001. – 176 с.
3. Правила технической эксплуатации портовых сооружений и акваторий: РД 31.35.10-86: / В/О "Мортехинформреклама". – М. – 1988. – 87 с.
4. ВСН-3-80 Инструкция по проектированию морских причальных сооружений / В/О "Мортехинформреклама", [действительны с 6 июня 1980 г]. – М. – 1984. – 400 с.
5. Карпиловский В.С. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. – М.: изд. СКАД СОФТ, 2007. – 609с.
6. Украина. Законы. О морских портах Украины: Закон Украины [Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2013, № 7, ст.65 {Із змінами, внесеними згідно із Законом № 406-VII від 04.07.2013, ВВР, 2014, № 20-21, ст.712}] – (Актуальный закон).