

УДК 69.059.32

Р. Ю. Горгуца, канд. техн. наук, доц.,
ООО «Морстройтехнология»,
г. Санкт-Петербург, Россия

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРИЧАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

**RECONSTRUCTION OF BERTHING STRUCTURES USING
MODERN TECHNOLOGIES: THEORY AND PRACTICE**

Аннотация. Статья посвящена реконструкции причальных сооружений, достигших предельных сроков износа. Актуальность обусловлена пересмотром сейсмических норм и ростом нагрузок. Проанализированы современные методы: применение инъекционных анкеров и закрепление грунта обратной засыпки. На основе ретроспективного анализа и опыта проектирования для портов России доказана их эффективность для повышения несущей способности и сейсмостойкости без вывода причалов из эксплуатации.

Abstract. This article addresses the reconstruction of aged berthing structures that have reached the end of their service life. The need for such upgrades is driven by updated seismic design codes and increasing operational loads. The study analyzes contemporary reinforcement techniques, specifically the use of injection anchors and backfill soil stabilization. Based on a review of past projects and design experience from Russian ports, the

author demonstrates that these methods effectively enhance the bearing capacity and seismic resilience of the structures without requiring the berths to be taken out of operation.

Ключевые слова: причальные сооружения, реконструкция, больверк, сейсмостойкость, грунтовые анкеры, закрепление грунта, инъекционная цементация, износ, гидротехнические сооружения.

Keywords: berthing structures, reconstruction, bulkhead, seismic resistance, ground anchors, soil stabilization, injection grouting, wear and tear, hydraulic engineering structures.

Введение

Причальные гидротехнические сооружения являются критически важным элементом портовой инфраструктуры России. Значительная их часть, особенно распространенные сооружения типа «больверк», была построена в 60–70-е гг. XX в. и в настоящее время исчерпала нормативный срок службы и подвержена значительному моральному износу.

Актуальность их реконструкции обуславливается комплексом факторов: истечением сроков службы, необходимостью увеличения глубин у причалов из-за роста габаритов судов, а также ужесточением требований к эксплуатационным и сейсмическим нагрузкам [7]. Пересмотр карт общего сейсмического районирования привел к повышению расчетной балльности для многих портов, в то время как существующие сооружения проектировались по устаревшим нормам.

Традиционные методы усиления, регламентированные действующими инструкциями [5], зачастую являются трудоемкими, требуют значительных материальных затрат и длительного вывода объекта из эксплуатации. В этой связи внедрение современных технологий, таких как устройство инъекционных грунтовых анкеров и закрепление грунтов массива обратной засыпки, представляет собой перспективное направление.

Целью данной статьи является обобщение теоретических основ и практического опыта реконструкции причальных сооружений с применением современных геотехнических методов, анализ их эффективности на основе выполненных проектов и натурных испытаний.

Реконструкция причальных сооружений с применением инъекционных (грунтовых) анкеров. Особенности причальных сооружений типа «больверк»

В соответствии с нормативными документами, расчетные сроки службы гидротехнических сооружений зависят от их класса: для

сооружений I и II классов срок службы составляет 100 лет, а для III и IV классов — 50 лет.

Дополнительно рекомендуется учитывать сроки физического износа: для металлических конструкций — 40 лет, для железобетонных — 50 лет, а также морального износа — 25–35 лет.

Причалные сооружения типа «больверк», широко распространенные на территории России, массово строились в 60–70-е гг XX в. Большинство из них относятся к III классу, так как высота вертикальной лицевой стенки не превышает 20 м.

Актуальность реконструкции причальных сооружений типа «больверк»:

1. Истечение срока службы: физический и моральный износ конструкций.

2. Рост товарооборота и изменение габаритов судов: необходимость увеличения глубин у причалов.

3. Несоответствие современным требованиям: устаревшие конструкции не выдерживают текущих эксплуатационных нагрузок.

Согласно инструкции по усилению и реконструкции причальных сооружений в РД 31.31.38-86 [5] существуют различные методы усиления, которые могут быть применены для рассматриваемого типа причала.

Основные варианты включают:

а) погружение шпунтовой оторочки и устройство новой анкерной системы;

б) возведение нового сооружения;

г) погружение экранирующих рядов;

д) устройство разгрузочной плиты;

ж) устройство грунтовых анкеров;

и) закрепление грунта основания причала.

Большинство этих методов являются трудоемкими и требуют значительных материальных затрат.

Повышение сейсмостойкости причальных сооружений типа «больверк»

Все сооружения в Российской Федерации проектируются и строятся с учетом требований нормативных документов (СНиП, РД, СП и др.).

Причалные гидротехнические сооружения (ГТС), расположенные в сейсмически опасных районах, также подчиняются отдельным нормам для обеспечения безопасности (таблица 1).

Таблица 1

Сравнение карт общего сейсмического районирования для различных водных бассейнов, при переиздании сейсмических норм

Бассейн	Порт	Нормативные документы							
		СНиП П-А.12-62	СНиП П-А.12-69*	СНиП П-7-81*			СП 14.13330.2014		
				А	В	С	А	В	С
Черное море	Туапсе	7	7	8	9	9	8	9	9
	Новороссийск	6	6	8	9	9	8	9	9
	Сочи	7	7	8	9	9	8	9	9
Баренцево море	Мурманск	–	–	5	6	7	–	6	7
Японское море	Владивосток	6	6	6	6	7	6	6	7
	Ванино	–	6	7	8	9	7	8	9
	Находка	7	7	6	7	8	6	7	8
Охотское море	Южно-Сахалинск	7	7	8	8	9	8	8	9
	Петропавловск-Камчатский	8	9	9	10	10	9	10	10
Каспийское море	Махачкала	7	7	8	9	10	8	9	10

С каждым новым изданием карт общего сейсмического районирования (ОСР) менялась сейсмичность, что приводило к ее повышению в некоторых районах. Однако причальные сооружения, построенные ранее, не реконструировались в соответствии с новыми нормами.

При реконструкции причальных сооружений проектировщик обязан учитывать современные требования по сейсмике.

Особенности расчета причального сооружения типа «больверк» на сейсмическое воздействие

При выполнении расчета на сейсмическое воздействие используется метод пересчета бокового давления на лицевую стенку в соответствии с РД 31.3.06-2000 [6].

Суть метода:

1. Пересчет коэффициентов активного и пассивного давления грунта на лицевую стенку с учетом сейсмического воздействия.
2. Определение новых внутренних усилий в элементах конструкции.

При особом сочетании нагрузок (сеймика) наблюдается увеличение активного давления грунта и уменьшение пассивного. Это приводит к возрастанию внутренних усилий в элементах конструкции (рис. 1).

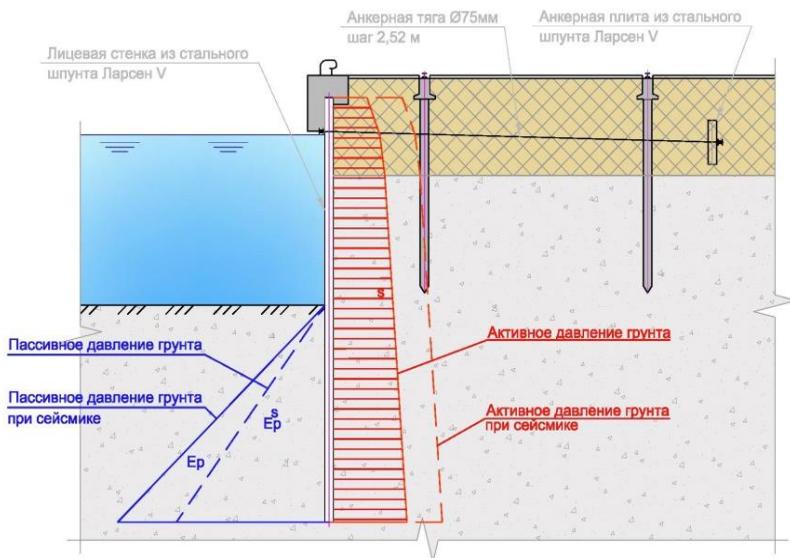


Рис. 1. Построение эпюр активного и пассивного давлений грунта при основном и особом сочетании

Ретроспективный анализ механизма разрушения причальных сооружений типа «больверк» при сейсмическом воздействии

В разные периоды времени проводились обследования и анализ конструкций типа «больверк», подвергшихся серьезным сейсмическим воздействиям. В результате были выявлены конструктивные особенности, недочеты и ошибки, которые привели к значительным разрушениям причальных гидротехнических сооружений.

Рассмотрим примеры разрушений при конкретных землетрясениях.

Тохоку, Япония (2011 г.). Восточно-японское землетрясение магнитудой 9,0 баллов нанесло тяжелый урон причальным ГТС (рис. 2).

Наиболее характерные повреждения:

1. Обрывы анкерных тяг.
2. Сверхнормативные перемещения лицевых стенок.
3. Провалы в покрытии и последующее полное разрушение конструкций.



Рис. 2. Последствия подземных толчков и цунами в Тохоку, Япония, 2011 г.

Пуэрто-Монт, Чили (1960 г.). Чилийское землетрясение магнитудой 9,3–9,5 баллов привело к разрушению анкерных креплений больверков:

1. Разрывы в местах нарезной части тяг (соединения с муфтами).
2. Разрушения в местах крепления анкеров к шпунтовым стенкам.

Петропавловск-Камчатский, Россия (1959 г.). Землетрясение магнитудой около 8 баллов вызвало повреждения причальных конструкций. Наиболее сильные повреждения они получили при недостаточной прочности анкерных тяг.

На основании анализа теории расчета и разрушений причальных сооружений при сейсмических воздействиях, можно сделать следующие выводы:

Основные проблемы:

1. Обрывы анкерных тяг свидетельствуют о значительном увеличении горизонтальной нагрузки при сейсмических воздействиях.
2. Анкерные тяги являются ключевым элементом, воспринимающим горизонтальную составляющую сейсмической нагрузки, и требуют усиления в первую очередь.

Нормативная база:

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие сейсмоусиление существующих сооружений с использованием современных методов.

Для повышения сейсмостойкости приходится руководствоваться требованиями для строительства новых сооружений и рекомендациями РД 31.31.38-86 [5], разработанными для полной реконструкции причальных сооружений.

Опыт реконструкции причальных сооружений с использованием инъекционных (грунтовых) анкеров

ООО «Морстройтехнология» выполнила проект реконструкции причалов №№ 28а, 28, 29, 30 в порту Новороссийск. Проект получил положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России» в 2014 г., а в 2015 г. начались работы по реконструкции причалов №№ 28а, 28 (рис. 3).

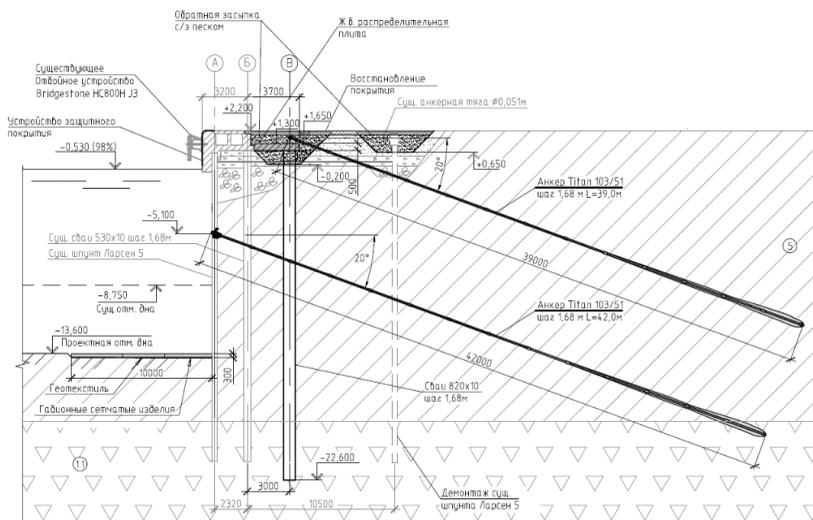


Рис. 3. Конструктивный разрез причала № 28 (отметки приведены в Балтийской системе высот)

Авторский надзор и техническое сопровождение строительства выполнялись специалистами ООО «Морстройтехнология».

Проектом предусмотрено увеличение отметки дна почти на 5 м за счет установки двух уровней грунтовых анкеров:

- надводный ряд;
- подводный ряд на глубинах 3 м (причал № 28а) и 4,5 м (причал № 28).

Контрольным испытаниям статической выдергивающей нагрузкой была подвержена наиболее нагруженная часть анкеров по совокупности факторов (грунтовые условия, существенный износ элементов существующего причала и т. д.). Приемочным испытаниям статической выдергивающей нагрузкой были подвержены все анкера.

Для испытаний анкеров в подводной зоне специалистами ООО «Морстройтехнология» была разработана уникальная конструкция рамы, закрепленная к рельсу прикордонной зоны причала.

На раму установили: блочный механизм с домкратом и тросиковый датчик, соединенный с регистрирующей аппаратурой на поверхности.

Испытания проводились проходным домкратом грузоподъемностью 300 тонн (рис. 4). Нагрузка увеличивалась ступенями до 252,2 тс, с фиксации перемещений через заданные интервалы.



Рис. 4. Испытание анкера с использованием проходного домкрата

В результате анкера были закреплены на конструкции при блокировочной нагрузке 1,6 тс для всех анкеров (рис. 5).

ООО «Морстройтехнология» выполнила проект реконструкции причалов №№ 1–3 в порту Петропавловск-Камчатский, которые были построены в 1955–1957 гг. Конструкция выполнена из шпунта Ларсен 5, заанкеренного тягами диаметром 75 мм (рис. 6).

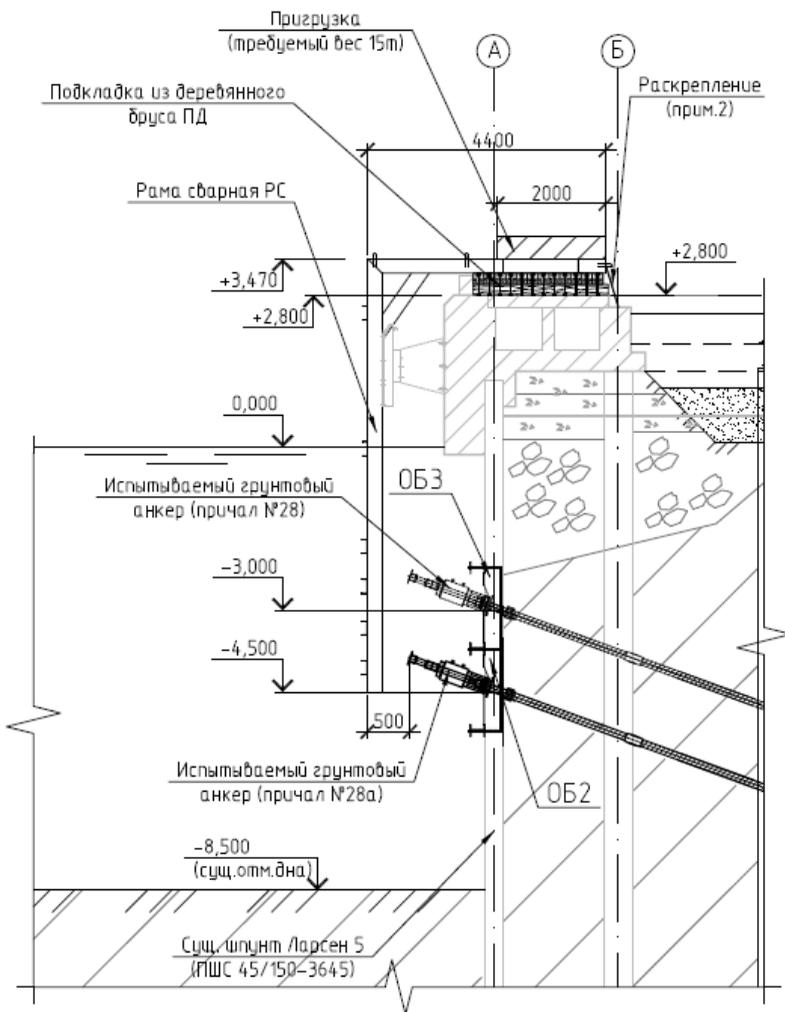


Рис. 5. Схема прикрепления сварной рамы к причальному сооружению

При расчете на сейсмическое воздействие активное давление грунта увеличивается, а пассивное уменьшается, что приводит к росту внутренних усилий в элементах конструкции. Это означает, что сооружение, безопасное в обычном режиме, может не выдержать сейсмических нагрузок по современным нормам.

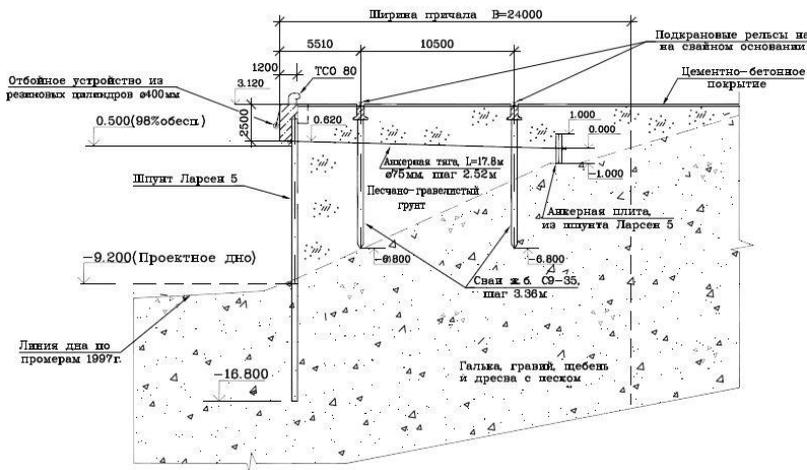


Рис. 6. Конструктивный разрез причалов №№ 1-3 в порту Петропавловск-Камчатский

Реконструкция причальных сооружений гравитационного типа

Рассматриваемый тип конструкции – гравитационное сооружение, выполненное из массивной кладки. В качестве примера взят причал базы боновых заграждений нефтерайона «Шесхарис» в морском порту Новороссийск (рис. 7).

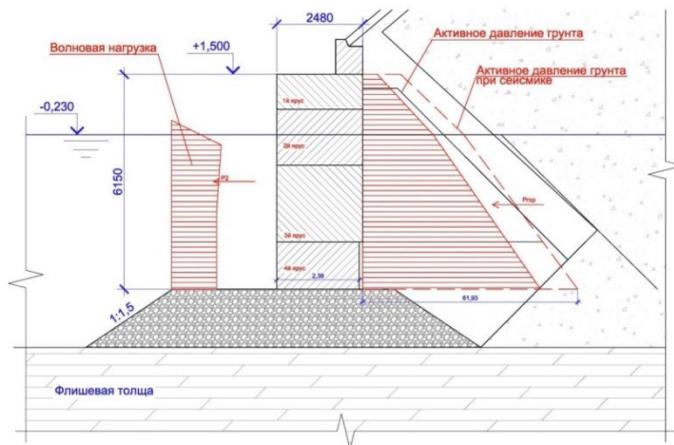


Рис. 7. Причал базы боновых заграждений нефтерайона Шесхарис МТП Новороссийск. Конструктивный разрез

Характеристики сооружения:

Год постройки — 1966, последняя реконструкция — 1978.

Конструкция: правильная кладка бетонных блоков с монолитной железобетонной надстройкой.

Паспортная сейсмостойкость — 7 баллов.

При анализе усилий, действующих на сооружение при основном и особом сочетании нагрузок (сеймика), выявлено:

– увеличение активного давления грунта и дополнительной волновой нагрузки за счет сейсмических коэффициентов.

– недостаточная устойчивость сооружения на плоский сдвиг при горизонтальной сейсмической нагрузке.

Требуется проведение мероприятий по повышению сейсмостойкости сооружения.

Компания «Морстройтехнология» выбрала схему усиления с использованием грунтовых анкеров (рис. 8).

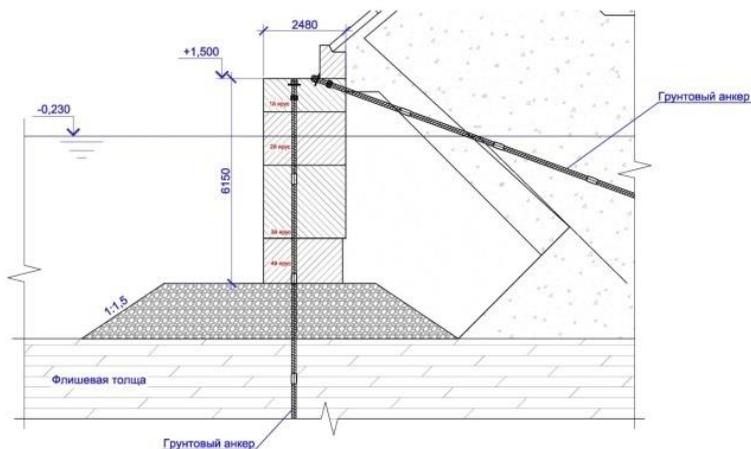


Рис. 8. Усиление сооружения из массивовой кладки грунтовыми анкерами

Особенности схемы:

Часть анкеров — вертикальные, устанавливаемые через отверстия, пробуренные алмазным буром. Они объединяют отдельные ярусы конструкции.

Другая часть — наклонные анкера (близкие к горизонтали), предназначенные для восприятия горизонтальной сейсмической нагрузки.

Проведенные мероприятия позволили повысить сейсмостойкость сооружения до проектных 9 баллов.

Реконструкция причальных сооружений эстакадного типа

Эстакадные причалы — еще один распространенный тип конструкций.

Примером служит причал № 16 в порту Новороссийск, построенный в 1962 г. Причал выполнен в виде высокого свайного ростверка с подпричальным откосом. Свайное основание представлено преднатяженными железобетонными сваями диаметром 1,6 м, объединенными верхним строением. Подпричальный откос представляет собой послойную укладку сортированным камнем.

Сейсмичность района повысилась с 7 до 9 баллов, что потребовало сейсмоусиления.

Расчет и анализ сейсмостойкости причальной конструкции

Конструкция причального сооружения была рассчитана в программном комплексе SCAD Office методом конечных элементов. В процессе расчета выполнялись следующие этапы:

- преобразование статических нагрузок в массы.
- учет присоединенной массы воды в сваях.

Результаты расчета на сейсмическое воздействие 9 баллов:

- выявлены сверхнормативные перемещения конструкции.
- обнаружены изгибающие моменты в сваях, превышающие допустимые значения.

На основании этих результатов было выполнено сейсмоусиление конструкции, в результате которого она обрела устойчивость к сейсмическому воздействию интенсивностью 9 баллов (рис. 9).

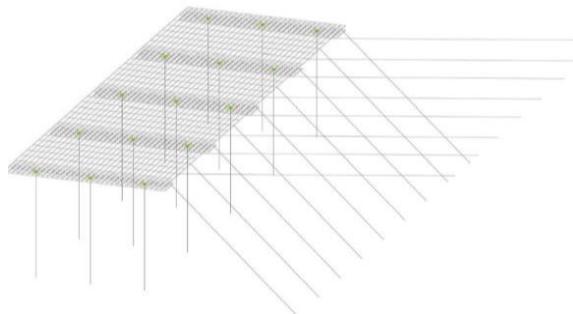


Рис. 9. Схема установки грунтовых анкеров

Вывод: Использование грунтовых анкеров является эффективным и экономически целесообразным решением для повышения сейсмостойкости причальных сооружений.

Реконструкция причалов типа «больверк» путем изменения характера работы сооружения с распорного на гравитационное

Выбор способа реконструкции причальных сооружений зависит от конструктивной схемы и внешних условий, включающих:

- инженерно-геологические условия (характеристики грунта, уровень грунтовых вод и др.);
- возможность или необходимость переноса линии кордона в сторону акватории;
- возможность вывода сооружения из эксплуатации на время проведения работ;
- необходимость увеличения глубины у причала;
- повышение категории эксплуатационных нагрузок и установка нового тяжелого технологического оборудования;
- изменение сейсмичности района в связи с обновлением нормативной базы.

Типовые способы реконструкции причалов типа «больверк»

Согласно инструкции по усилению и реконструкции причальных сооружений, к типовым способам реконструкции относятся:

- выполнение оторочки перед существующим причальным сооружением;
- возведение дополнительных экранирующих элементов;
- возведение дополнительных разгружающих элементов;
- закрепление грунта.

Способ закрепления грунта пока не получил широкого распространения в отечественной практике из-за недостаточной развитости нормативной базы и отсутствия возможности точного прогнозирования результатов и степени их влияния на конечный результат (фактические свойства грунта определяются только после пробного закрепления).

Условия, при которых закрепление грунта является рациональным:

- невозможность перемещения линии кордона в сторону акватории (стесненность операционной акватории);
- отсутствие возможности погружения экранирующих элементов;
- необходимость значительного понижения отметки дна перед сооружением.

Преимущества закрепления грунта:

- работы проводятся без вывода сооружения из эксплуатации;
- отсутствует стеснение операционной акватории;
- нет необходимости в перекладке крановых и ж/д путей, инженерных сетей и другого причального оборудования;
- совмещение инженерных изысканий с производством строительных работ (пробы грунта берутся в процессе закрепления);
- отсутствие необходимости погружения несущих конструктивных элементов в «тело» причала;
- разгрузка основных несущих элементов (лицевая стенка, анкерные элементы) за счет изменения напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим подробнее наиболее актуальные технологии закрепления грунта

Способ напорной инъекторной цементации основан на инъекционном уплотнении грунта под высоким давлением (~10 МПа).

В результате повышается плотность грунтового массива и улучшаются механические свойства слабых грунтов за счет уплотнения грунта и образования жестких включений из застывшего цементного раствора.

В результате грунтовый массив превращается в природно-техногенный композит с высокими прочностными и деформационными характеристиками. Одновременно обеспечивается армирование грунтового массива стальными неизвлекаемыми инъекторами, заполненными цементным раствором (рис. 10).

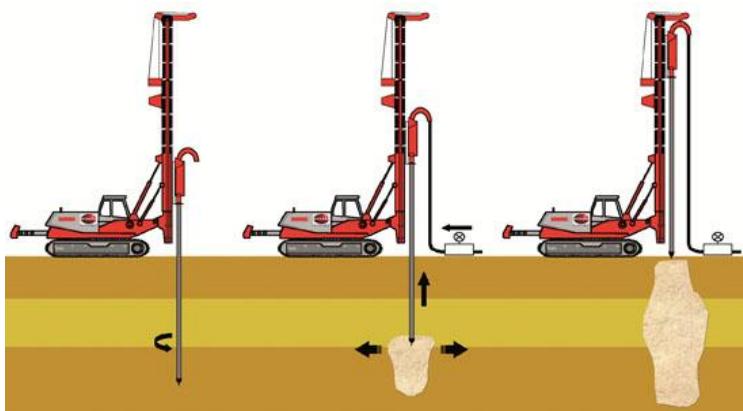


Рис. 10. Схема технологического процесса напорной инъекторной цементации

Способ струйной цементации грунтов — при данной технологии бурится скважина, в которую под высоким напором (40–100 МПа) через сопла (насадки малого диаметра) подается цементирующий раствор. Это способствует перемешиванию грунта и цементного раствора, что позволяет получить грунтоцементную колонну (рис. 11).

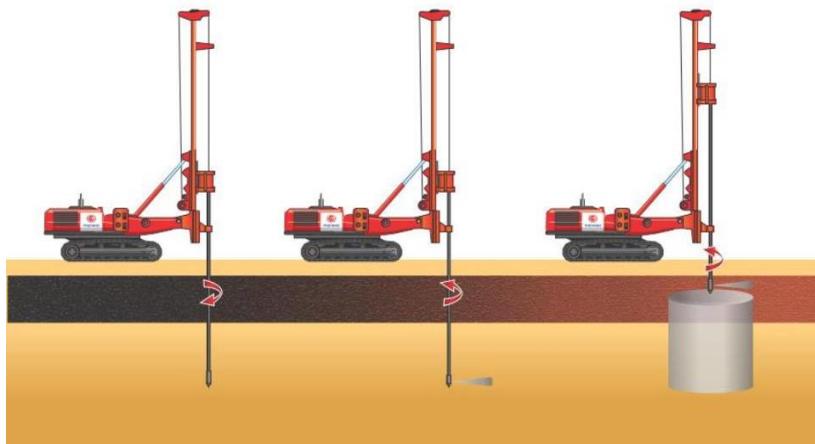


Рис. 11. Схема технологического процесса струйной цементации грунтов

Буромесительная технология наиболее часто используется метод влажного смешивания грунта, как наиболее универсальный и подходящий для всех типов грунта.

Буромесительная технология заключается в выполнении грунтоцементных колонн с помощью специального буромесительного агрегата, состоящего из полый штанги и специального рабочего органа.

В процессе бурения происходит размельчение и перемешивание грунта с водоцементным раствором или другими химическими реагентами (известь, зола, шлак, бентонит и др.), подаваемыми по полый штанге.

Основной целью данного процесса является равномерное рассеивание связующих элементов в грунте с целью быстрого и продуктивного получения химической реакции гидратации (рис. 12).

Преимущества метода закрепления грунта

Реконструкция причалов типа «больверк» методом закрепления грунта заключается в повышении физико-механических свойств грунта засыпки пазухи причала. Это достигается за счет применения

вяжущих материалов, которые устанавливают более прочные связи между частицами грунта.

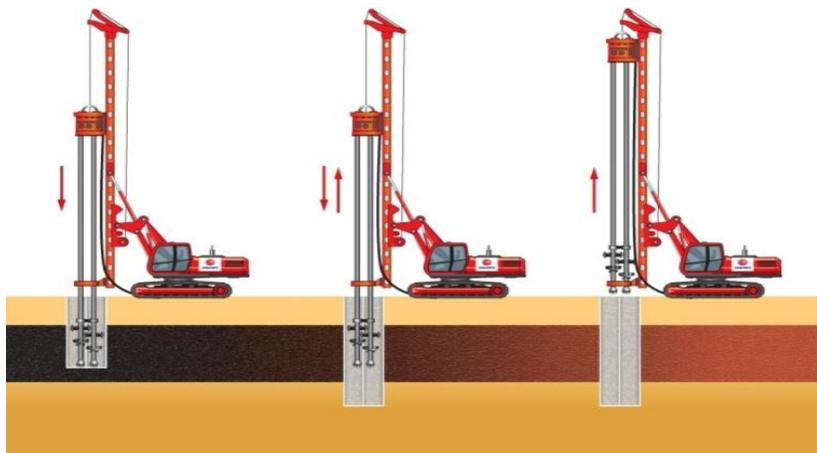


Рис. 12. Схема технологического процесса буромесительной технологии

В результате, при повышении таких параметров, как угол внутреннего трения и сцепление грунта засыпки, происходит уменьшение интенсивности горизонтальной составляющей активного давления (табл. 2).

Таблица 2

Влияние закрепления грунта на характер работы конструкции

Расчетные параметры	Значения расчетных параметров		
	До закрепления	При незначит. повышении характеристик	После закрепления
Интенсивность равномерно-распределенной нагрузки (q), т/м ²	2	2	2
Удельный вес грунта (γ), т/м ³	1,8	2,2	2,2
Угол внутреннего трения грунта (φ), град.	30	40	40
Удельное сцепление грунта (C), кгс/см ² (кПа)	0,00 (0)	0,1 (10)	0,2 (20)
Свободная высота стенки (h), м	13	13	13
Результирующее активное давление грунта (ΣP_a), т/м п.	120	48	24,5

В этом случае изменяется расчетная схема сооружения. Расчет общей устойчивости реконструированного сооружения выполняется как для гравитационного сооружения. При этом, вопрос прочности элементов анкерной опоры и лицевой стенки становится вторичным, так как повышенные характеристики грунта гарантируют минимальную передачу усилий или полное их отсутствие на данные несущие элементы.

Опыт реконструкции причальных сооружений методом закрепления грунта

Специалисты ООО «Морстройтехнология» провели комплексные исследования по реконструкции причальных сооружений типа больверк и провели комплекс теоретических, лабораторных и натурных исследований. Эти работы стали основанием для принятия решения о реконструкции причалов ООО «МГС-Терминал» в порту Санкт-Петербург.

Причалы ЖБ-1, ЖБ-2, ЖБ-3, построенные в 1959 году, представляют собой заанкерованный больверк с лицевой стенкой из стального шпунта.

Нагрузки до реконструкции:

- равномерно-распределенная: 10–20 кПа;
- крановая: г/п 16 т, усилие на каток 250 кН.

Задачи реконструкции:

1. Продлить срок службы причалов.
2. Увеличить отметку дна до -9,0 м Б.С.
3. Увеличить эксплуатационные нагрузки:
 - равномерно-распределенная: 10–60 кПа;
 - крановая: г/п 32 т, усилие на каток 308,7 кН.

На основании проведённых лабораторных, полевых исследований и опытной огрузки установлена принципиальная возможность применения метода изменения характеристик (закрепления) грунтов обратной засыпки для реконструкции или капитального ремонта причальных сооружений типа больверк [4].

ООО «Морстройтехнология» выступила генпроектировщиком по разработке проектной и рабочей документации на реконструкцию причалов №№ 34, 35 в порту Восточный. Реконструкция причалов проводилась методом обратной засыпки.

Этап 1

1. ДНУР на акватории причалов и на подходном канале до отметки «минус» 10,5 БС.

2. Строительство швартовых палов.

3. Замена отбойных устройств.

Этап 2

1. ДНУР на акватории причалов и на подходном канале до отметки «минус» 12,5 БС.

2. Изменение свойств грунтов обратной засыпки причалов № 34, 35.

Метод оказался экономически целесообразным по сравнению с альтернативными вариантами, такими как устройство оторочки или применение инъекционных анкеров. Результаты работ продемонстрировали возможность увеличения проектных глубин и нагрузок на причал при сохранении требуемых показателей прочности и устойчивости конструкций.

Выводы

Проведенный анализ подтвердил высокую актуальность комплексной реконструкции причальных сооружений, вызванной совокупностью факторов их физического и морального износа, а также ужесточением нормативных требований, в первую очередь, по сейсмической безопасности.

Ретроспективный анализ разрушений при землетрясениях (Тохоку, Чили, Камчатка) выявил типовые уязвимости конструкций, ключевой из которых является недостаточная прочность анкерных креплений, испытывающих резкий рост нагрузки.

Применение инъекционных грунтовых анкеров доказало свою высокую эффективность для сейсмоусиления различных типов причалов, позволяя вести работы без остановки эксплуатации. Опыт проектирования и реализации в портах Новороссийск и Петропавловск-Камчатский служит практическим подтверждением метода. Реконструкция методом закрепления грунта обратной засыпки является решением, которое позволяет преобразовать распорную схему работы сооружения в гравитационную, снимая избыточную нагрузку с несущих элементов.

Представленные теоретические расчеты и данные натурных испытаний формируют доказательную базу для внедрения данных технологий, для широкого распространения которых необходима актуализация нормативной базы, прямо регламентирующей современные методы усиления существующих гидротехнических сооружений.

Список литературы

1. *Горгуца Р. Ю.* Реконструкция причальных стенок с применением инъекционных анкеров и методы их контроля ниже уровня воды / Р. Ю. Горгуца, С. В. Лисовский, П. О. Бойченко // ГИДРОТЕХНИКА. XXI ВЕК – 2016. – № 2 (26). – С. 46–49.
2. *Горгуца Р. Ю.* Эффективные способы повышения сейсмостойкости существующих причальных сооружений / Р. Ю. Горгуца, Д. В. Григорьев // Сборник научных трудов – СПб.: ИПЦ Санкт-Петербургского Политехнического университета, 2020 – С. 239–253.
3. *Николаевский М. Ю.* Реконструкция причалов типа больверк путём изменения характера работы сооружения с распорного на гравитационное / М. Ю. Николаевский, Р. Ю. Горгуца, А. В. Соколов // ГИДРОТЕХНИКА. XXI ВЕК – 2014. – № 1 (17). – С. 64–69.
4. *Горгуца Р. Ю.* Теория и практика реконструкции причальных сооружений типа больверк посредством изменения характеристик (закрепления) грунтов обратной засыпки / Р. Ю. Горгуца, А. М. Николаевский // ГИДРОТЕХНИКА. XXI ВЕК – 2017. – № 3 (31). – С. 56–59.
5. РД 31.31.38-86 «Инструкция по усилению и реконструкции причальных сооружений».
6. РД 31.3.06-2000 «Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании морских ГТС типа больверк».
7. СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах».