Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 624.012.45

Ремонт и восстановление сборных железобетонных силосов СОГ после аварийных воздействий

Туров А.И., Школьников С.Н.

Дальневосточный государственный аграрный университет

Аннотация

Рассматриваются вопросы ремонта и восстановления сборных железобетонных силосов из объемных элементов типа СОГ, получивших повреждения в результате аварийного динамического воздействия. На основании обследования промышленной силосной банки систематизированы характерные повреждения конструкций: трещины различного раскрытия, разрушение защитного слоя бетона, оголение арматуры, нарушение межэлементных швов и вутов, остаточные деформации стен, взаимные смещения сборных элементов и локальная утрата участков стен.

Предложен дифференцированный подход к восстановлению, предусматривающий разделение поврежденных конструкций на три категории. Для слабо поврежденных элементов предусматривается инъектирование трещин полимерными составами, восстановление швов, вутов и защитного слоя бетона; для конструкций средней степени повреждения - устройство внутренней железобетонной обоймы толщиной 60–80 мм; для сильно поврежденных стен - устройство железобетонной обоймы толщиной до 100 мм с анкерным соединением с существующей конструкцией либо применением сквозных стяжных элементов. Выполнено расчетное обоснование железобетонной обоймы.

Предложенное конструктивное решение сопоставлено с зарубежным опытом восстановления железобетонных силосов посредством дополнительных железобетонных оболочек. Показано, что дифференцированное назначение способов ремонта позволяет учитывать фактическую остаточную работоспособность элементов и снижать материалоемкость восстановления при обеспечении требуемой надежности сооружения.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Ключевые слова: ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЙ СИЛОС, СОГ, АВАРИЙНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ТРЕЩИНЫ, РЕМОНТ СТЕНЫ, УСИЛЕНИЕ, ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ ОБОЙМА, ИНЪЕКТИРОВАНИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ АНКЕРЫ, СТЯЖНЫЕ БОЛТЫ

Введение

Железобетонные силосы широко применяются на предприятиях хранения и переработки зерна и других сыпучих материалов. В процессе эксплуатации их стены воспринимают сложное сочетание воздействий, включающее вертикальные нагрузки, горизонтальное давление хранимого материала, локальные воздействия при загрузке и разгрузке, температурные деформации и циклическое изменение напряженного состояния.

Дополнительную опасность для предприятий по переработке зерна представляют аварийные динамические воздействия, в том числе возникающие при воспламенении пыле-газовоздушных смесей. Последствия подобных воздействий могут существенно отличаться от повреждений, формирующихся в условиях обычной длительной эксплуатации.

Влияние конструктивных и технологических факторов, периодических циклов загрузки и разгрузки, характера движения сыпучего материала, коррозии арматуры, абразивного износа внутренней поверхности, ошибок проектирования и строительства, а также аварийных воздействий. восстановление силоса не должно сводиться только к устранению видимых дефектов. Поэтому необходимо учитывать причины повреждения и фактическую схему работы сооружения.

Практический й опыт восстановления поврежденных зерновых силосов приведен в работах автора [1-3]. При ремонте железобетонных силосов с широкими вертикальными трещинами автором применялась внутренняя железобетонная обойма. Новый слой объединялся с существующими конструкциями анкерами, закрепленными эпоксидным составом. Усиление обеспечивало увеличение толщины наружных стен и формирование дополнительного слоя горизонтальной арматуры. В работе [4] приведён способ восстановления повреждённых силосных воронок.

Таким образом, устройство дополнительного железобетонного слоя с обеспечением совместной работы с существующей конструкцией является апробированным способом восстановления поврежденных силосов.

Вместе с тем, сборные силосы из объемных элементов типа СОГ имеют особенности, существенно отличающие их от монолитных цилиндрических силосов. Пространственная

работа такой конструкции зависит не только от прочности отдельных стенок, но также от состояния горизонтальных межсоговых швов, вутов, соединительных элементов и взаимного положения отдельных сборных блоков.

Поэтому непосредственное применение известных способов усиления без учета технического состояния каждого элемента не всегда является рациональным.

Цель исследования - разработка дифференцированного способа ремонта и восстановления сборных железобетонных силосов СОГ после аварийного воздействия на основе результатов обследования, классификации повреждений и расчетной оценки усиленных стен.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ конструктивного решения существующей силосной банки;
- систематизация характерных повреждений элементов СОГ;
- разработка критериев выбора способа ремонта и усиления;
- разработка конструктивных решений железобетонных обойм;
- расчетная проверка усиленной стены на действие бокового давления сыпучего материала;
- сопоставление предложенного решения с известным зарубежным опытом восстановления железобетонных силосов;
- разработка технологической последовательности ремонтных работ.

Конструктивная характеристика объекта исследования

Объект исследования представляет собой многоячейковую силосную банку промышленного предприятия.

Силосная банка выполнена из сборных объемных железобетонных элементов СОГ квадратного сечения.

Основные геометрические характеристики:

- размер ячейки в плане - 3×3 м;
- полная высота силоса - 21,6 м;
- число сборных элементов по высоте - 18;
- высота одного элемента СОГ - 1,2 м;
- толщина существующей стенки - 100 мм.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Стенки элементов армированы сетками из проволочной арматуры диаметром 5 мм. В угловых зонах предусмотрено дополнительное горизонтальное армирование стержнями диаметром 10 мм с шагом 200 мм [5].

В углах объемных элементов имеются железобетонные вуты, обеспечивающие сопряжение смежных стен и повышающие пространственную жесткость ячейки.

Вертикальная конструкция силоса формируется последовательной установкой элементов СОГ друг на друга.

Поэтому горизонтальные межэлементные швы непосредственно участвуют в передаче усилий. Вычислено боковое давление сыпучего материала на стенки силоса [6].

Загрузка сыпучего материала осуществляется через верхнюю часть силоса, разгрузка - через нижнюю воронку [7].

Результаты обследования и характер повреждений

Обследование после аварийного воздействия показало, что техническое состояние конструкций существенно изменяется как между отдельными силосами, так и по высоте одной ячейки [8].

Выявлены следующие основные повреждения:

- трещины различного направления и раскрытия;
- нарушение заполнения горизонтальных межсоговых швов;
- повреждение железобетонных вутов;
- сколы и отслоение защитного слоя;
- оголение рабочей арматуры;
- локальные разрушения бетона;
- остаточный выгиб стен;
- смещение отдельных элементов СОГ;
- смещение сопряженных плит;
- частичное или полное отсутствие отдельных участков стен.

На участках с относительно небольшими повреждениями преобладают трещины и локальное разрушение защитного слоя.

В наиболее поврежденной зоне зафиксированы трещины шириной до нескольких миллиметров, протяженные зоны разрушения бетона, смещения отдельных элементов СОГ до 60 мм и сопряженных плит до 300 мм. Подобные повреждения свидетельствуют о том,

что аварийное воздействие привело не только к локальному трещинообразованию, но и к изменению геометрии отдельных участков пространственной системы.

Особое значение имеет остаточный выгиб стенки. Если при небольших значениях деформации стена может сохранять работоспособность после восстановления трещин и защитного слоя, то значительная остаточная деформация может свидетельствовать об изменении расчетной схемы и необратимых деформациях арматуры.

Следовательно, ширина раскрытия трещин не может рассматриваться как единственный критерий выбора способа ремонта.

Принцип дифференцированного восстановления

Анализ повреждений показал нецелесообразность применения одного способа усиления ко всем элементам силосной банки.

Предлагается разделить поврежденные конструкции на три категории.

Первая категория

К первой категории относятся элементы, сохранившие исходную геометрическую форму и не имеющие признаков существенного снижения несущей способности.

Характерные признаки:

- трещины преимущественно до 0,30–0,35 мм;
- отсутствие значительного остаточного выгиба;
- локальные сколы защитного слоя;
- отсутствие протяженного оголения рабочей арматуры;
- сохранность основных соединений.

Для данной категории основной задачей ремонта является восстановление монолитности, герметичности и долговечности.

Вторая категория

Ко второй категории относятся стены с более выраженными повреждениями, но без полной утраты несущей функции.

Ориентировочные признаки:

- остаточный выгиб порядка 40–100 мм;
- трещины до 0,5–0,6 мм;
- локальное разрушение межсоговых швов;
- повреждение защитного слоя;
- ограниченные участки оголения арматуры.

Для таких стен предусматривается устройство дополнительного железобетонного слоя.

Третья категория

К третьей категории относятся элементы с существенным нарушением первоначальной силовой схемы:

- значительное разрушение бетона;
- протяженное оголение арматуры;
- остаточный выгиб более 100–120 мм;
- множественные трещины большого раскрытия;
- разрушение горизонтальных и вертикальных соединений;
- смещение сборных элементов;
- частичная или полная утрата стенки.

В данном случае ремонт трещин и поверхности не может рассматриваться как достаточная мера восстановления несущей способности.

Таблица 1. Категории повреждений и рекомендуемые способы восстановления

Категория	Характер повреждения	Основной способ
I	небольшие трещины, локальные сколы, геометрия сохранена	инъектирование и локальный ремонт
II	трещины до 0,5–0,6 мм, выгиб 40–100 мм, повреждение швов	железобетонная обойма 60–80 мм
III	разрушение бетона и стен, выгиб более 100–120 мм, нарушение стыков	железобетонная обойма до 100 мм, восстановление или замена участков стены

Материалы и технология локального ремонта

Для элементов первой категории предлагается преимущественно локальный ремонт.

Трещины, влияющие на монолитность конструкции, целесообразно заполнять инъекционными материалами.

Для сухих конструктивных трещин рекомендуется применять низковязкие двухкомпонентные полимерные составы на эпоксидной основе, обеспечивающие высокую адгезию к бетону и восстановление связи между берегами трещины.

Для влажных трещин и участков, где основной задачей является герметизация, могут применяться полиуретановые инъекционные составы.

Внутренние пустоты и поврежденные стыки могут заполняться цементными, полимерцементными либо эпоксидно-цементными инъекционными материалами.

Восстановление разрушенного бетона выполняется высокопрочными безусадочными ремонтными смесями.

При оголении арматуры технология включает:

- удаление непрочного бетона;
- очистку арматуры от продуктов коррозии;
- нанесение антикоррозионного пассивирующего состава;
- восстановление сечения конструкционной ремонтной смесью;
- восстановление защитного слоя.

Выбор конкретных материалов российского, китайского или иного производства должен выполняться не по торговому наименованию, а по требуемым физико-механическим характеристикам, адгезии, усадке и совместимости с существующим бетоном [9].

Восстановление посредством железобетонной обоймы

Для элементов второй и третьей категорий предлагается устройство внутренней монолитной железобетонной обоймы.

Принцип такого усиления соответствует общему подходу, применяемому при восстановлении поврежденных железобетонных конструкций: возле существующей стены создается дополнительный армированный слой, способный воспринимать часть действующих усилий.

Для исследуемых СОГ предлагается преимущественно **внутреннее** расположение обоймы. Это связано с ячеистой структурой силосной банки, ограниченной доступностью наружных поверхностей внутренних стен и необходимостью непосредственного восприятия давления хранимого продукта новым несущим слоем.

Толщина обоймы назначается в зависимости от степени повреждения:

- 60–70 мм - для относительно небольших повреждений;
- 80 мм - основной вариант для средней степени;
- 100 мм - для сильно поврежденных элементов.

Для обоймы предусматривается тяжелый бетон класса не ниже В25.

Рабочее вертикальное армирование принимается: Ø12 мм, А500С с шагом s=20мм.

Горизонтальное армирование: Ø10 мм, А500С, с шагом s=200 мм.

Площадь вертикальной арматуры на 1 м стены составляет 5,65 см^2.

При толщине существующей стены 100 мм и обоймы 80 мм общая конструктивная толщина составляет 180 мм.

Обеспечение совместной работы существующей стены и обоймы

Одним из ключевых вопросов является соединение существующего и вновь устраиваемого железобетона.

Конструкция железобетонной обоймы представлена на рис. 1.

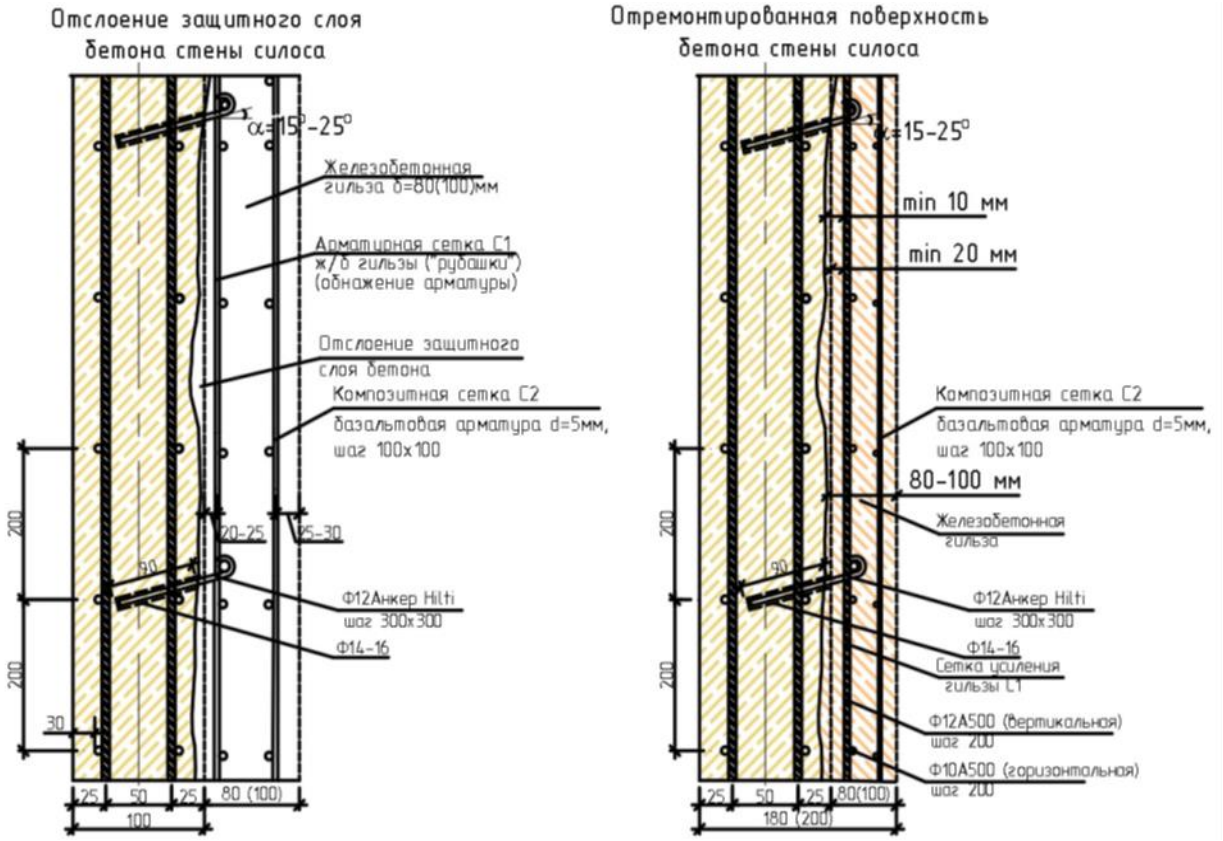

Рис. 1. Армирование железобетонной обоймы

На необходимость надежной связи между старой и новой конструкцией указывает и зарубежный опыт.

В работе Collins и др. [10] новая торкрет-бетонная оболочка соединялась с существующими конструкциями крюковыми анкерами, которые закреплялись эпоксидным составом.

Такое решение обеспечивало совместную работу нового и существующего

железобетона и позволяло сформировать дополнительный внешний слой горизонтальной арматуры.

Для рассматриваемых СОГ предложены два варианта.

Вариант 1 - химические анкеры

Предусматриваются анкеры диаметром 12 мм.

Ориентировочная глубина заделки: a=90 мм.

Шаг анкеров составляет 300х300 мм.

Анкерный состав должен обеспечивать передачу усилий на сдвиг и вырыв с учетом фактической прочности существующего бетона.

Вариант 2 - сквозные стяжные элементы

При значительном повреждении существующего бетона надежность локальной химической анкеровки может снижаться.

В этом случае возможно применение сквозных стяжных болтов с опорными пластинами. Эти стяжные болты соединяют одновременно две железобетонные обоймы, расположенные по обоим граням повреждённой стены.

Такой вариант позволяет передавать усилия механически через существующую стенку и в меньшей степени зависит от состояния ее поверхностного слоя.

Расчет железобетонной обоймы

Расчет выполнялся на действие бокового давления сыпучего материала.

Расчетное давление принято с учетом коэффициента безопасности при взрыве p_d=46кПа.

Рассматривается панель: ширина стенки a=3,0 м; высота стенки b=1,2м.

Обойма рассматривается как железобетонная пластина, закрепленная по контуру.

Изгибающие моменты определяются в двух направлениях:

$$Mx=\alpha_x \cdot p_d \cdot a^2; \quad (1)$$

$$My=\alpha_y \cdot pd \cdot b^2, \quad (2)$$

где α_x, α_y - коэффициенты, определяемые соотношением сторон и условиями закрепления.

Требуемая площадь арматуры определяется из условия: As=M/(Rs·z}.

Расчет показывает, что вертикальная арматура Ø12 мм, А500С с шагом 200 мм

обеспечивает требуемую несущую способность.

Фактическая площадь: As=5,65 см^2.

Коэффициент использования принятого армирования по изгибающему моменту составляет ориентировочно 0,41.

Расчет по второй группе предельных состояний показывает, что ожидаемая ширина раскрытия нормальных трещин составляет: a_{crc}=0,15 мм, что меньше предельных значений 0,2–0,3 мм.

Следовательно, предложенная обойма удовлетворяет требованиям как по прочности, так и по трещиностойкости.

Восстановление сильно поврежденных стен

При значительном остаточном выгибе существующей стены устройство нового слоя непосредственно по деформированной поверхности не всегда рационально.

В зависимости от состояния конструкции предусматриваются:

- вырубка выступающих разрушенных частей;
- демонтаж аварийного участка;
- восстановление проектной геометрии;
- устройство нового участка стены;
- последующее объединение восстановленного участка с общей обоймой.

Если часть стены полностью утрачена, новый железобетонный участок должен рассматриваться не как ремонтный слой, а как самостоятельный замещающий несущий элемент. Особое значение приобретает опирание обоймы. Новый несущий слой должен передавать усилия на нижележащую часть сооружения. Поэтому железобетонная обойма должна иметь конструктивно надежное опирание в зоне основания силоса и воронки.

До усиления стен необходимо проверить состояние самой воронки и ее сопряжений.

Технологическая схема ремонта трещин и восстановления защитного слоя стены представлена на рис. 2.

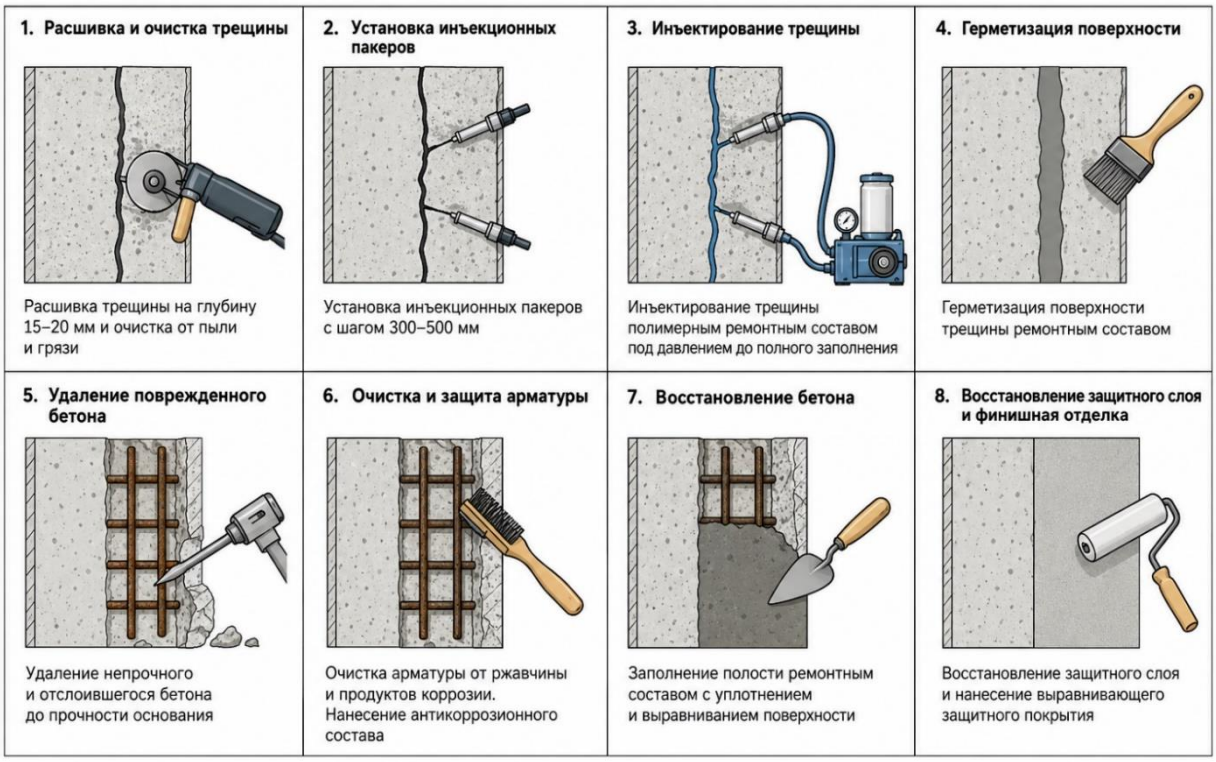

Рис. 2. Технологическая схема ремонта трещин и восстановления защитного слоя стены

Сопоставление с зарубежными исследованиями

Предложенный способ восстановления имеет как общие черты, так и принципиальные отличия от известных зарубежных решений.

Maraveas [11], обобщая опыт эксплуатации железобетонных силосов, показывает, что повреждения являются результатом взаимодействия большого числа факторов - конструктивных, эксплуатационных, технологических и материаловедческих. Поэтому ремонт должен учитывать первопричину дефекта и особенности последующей эксплуатации.

Это положение согласуется с результатами настоящего исследования. Для сборных СОГ одинаковая ширина трещины не обязательно означает одинаковую степень опасности. Существенное значение имеют остаточная деформация стенки, состояние вутов и межэлементных швов, оголение арматуры и взаимное смещение сборных элементов.

Работа Collins и до. [10] представляет особый интерес как практический пример восстановления реально эксплуатируемых зерновых силосов.

В обоих случаях используется общий конструктивный принцип: существующая стена+анкеры+дополнительная арматура+новый бетон.

Однако имеются существенные различия (табл. 2).

Таблица 2. Сопоставление решений Collins и др. [10] и предлагаемого усиления СОГ

Параметр	Collins и др. [10]	Предлагаемое решение
Тип силосов	железобетонные зерновые силосы	сборные объемные СОГ
Основное повреждение	широкие вертикальные трещины	трещины, разрушение швов, выгиб, смещения, утрата стен
Расположение усиления	снаружи	преимущественно изнутри
Новый материал	армированный торкрет-бетон	монолитный железобетон
Связь со старым бетоном	анкеры с эпоксидным закреплением	химические анкеры или сквозные болты
Характер усиления	усиление наружного контура	дифференцированное усиление отдельных ячеек
Дополнительная мера	ограничение режима эксплуатации	выбор степени усиления по категории повреждения

Таким образом, зарубежный опыт подтверждает эффективность самого принципа создания дополнительной железобетонной оболочки.

Отличительной особенностью предлагаемого решения является **дифференциация степени усиления в зависимости от фактического состояния каждого элемента СОГ**.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что выбор способа восстановления целесообразно осуществлять не по одному диагностическому показателю, а по совокупности признаков.

В общем виде категорию технического состояния можно представить как функцию: $K=f(a_{crc}, f, Dj, Dc, Ds)$,

где a_{crc} - ширина раскрытия трещин;

f - остаточный выгиб стены;

Dj - степень повреждения стыков и вутов;

Dc - степень разрушения бетона;

Ds - состояние рабочей арматуры.

Такой подход позволяет избежать двух крайних решений.

Первое - ограничиться инъектированием трещин в конструкции, фактически утратившей исходную геометрию и часть несущей способности.

Второе - выполнить массивную железобетонную обойму на всех стенах независимо

от фактической степени их повреждения.

Предлагаемая система предусматривает промежуточные уровни конструктивного вмешательства.

При этом вывод Collins и др. [10] о целесообразности сочетания конструктивного ремонта с контролем последующего режима эксплуатации представляется важным и для сборных СОГ. После восстановления необходимо исключить режимы загрузки и разгрузки, способные создавать не предусмотренные проектом локальные воздействия.

Результаты Maraveas [11] дополнительно показывают необходимость учитывать характер движения сыпучего материала и цикличность эксплуатации при оценке долговечности восстановленного сооружения.

Выводы

- Аварийное воздействие на сборную железобетонную силосную банку приводит к неоднородным повреждениям - от поверхностного трещинообразования до разрушения стен, нарушения стыков и остаточного изменения геометрии элементов.

- Ширина раскрытия трещин не может являться единственным критерием выбора способа ремонта. Необходимо учитывать остаточные деформации, состояние стыков и вутов, степень разрушения бетона и состояние арматуры.

- Предложено разделять поврежденные элементы СОГ на три категории и применять соответствующие уровни конструктивного вмешательства: локальный ремонт; облегченную железобетонную обойму; усиленную железобетонную обойму с восстановлением разрушенных участков.

- Для конструктивных трещин рекомендуется инъектирование низковязкими полимерными составами преимущественно эпоксидного типа. Для влажных трещин и герметизации могут использоваться полиуретановые системы.

- Для элементов средней степени повреждения целесообразно применение внутренней железобетонной обоймы толщиной около 80 мм.

- Для тяжелых повреждений может применяться обойма толщиной до 100 мм с предварительным восстановлением либо заменой разрушенных участков стен.

- Расчет при боковом давлении сыпучего материала 46 кПа показывает достаточность рабочего армирования Ø12 мм. А500С с шагом 200 мм при горизонтальном армировании Ø10 мм, А500С с шагом 200 мм.

- Расчетная ширина раскрытия трещин в рассматриваемом варианте составляет около 0,15 мм.

- Для обеспечения совместной работы существующей стены и нового железобетона предложено применение химических анкеров Ø12 мм с шагом 300×300 мм. Для сильно поврежденного существующего бетона альтернативой являются сквозные стяжные элементы.

- Зарубежный опыт Collins и др. [10] подтверждает эффективность усиления поврежденных зерновых силосов посредством дополнительной железобетонной оболочки, соединенной с существующей конструкцией анкерами.

- В отличие от известного зарубежного решения, предусматривающего наружное усиление групп силосов, для сборных СОГ предложено внутреннее и дифференцированное усиление, назначаемое в зависимости от технического состояния конкретных элементов.

- Предлагаемый подход позволяет снизить объем и материалоемкость восстановительных работ по сравнению с одинаковым усилением всей силосной банки при обеспечении требуемой надежности наиболее поврежденных участков.

Таким образом. предложена методика дифференцированного назначения трех уровней восстановления сборных СОГ в зависимости от сочетания трещин, остаточного выгиба, состояния швов/вутов и разрушения сечения, плюс конструктивное сравнение анкерной и болтовой связи обоймы.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке дифференцированного подхода к восстановлению многоячейковых сборных железобетонных силосов СОГ после локального аварийного воздействия, при котором степень конструктивного вмешательства определяется совокупностью параметров трещинообразования, остаточной деформации стен, состояния межэлементных соединений, бетона и арматуры.

В отличие от известных решений с устройством сплошной дополнительной оболочки предлагается назначать параметры усиления по фактическому техническому состоянию отдельных элементов силосной банки.

Практическая значимость

Разработанный подход может применяться при обследовании, проектировании

ремонта и усилении эксплуатируемых сборных железобетонных силосных банок предприятий хранения и переработки зерна и других сыпучих материалов.

Список использованных источников:

1. Туров, А. И. Усиление конструкций зернового элеватора / А. И. Туров, М. А. Пыхтеева // АгроЭкоИнфо. – 2019. – № 1(35). – С. 34. – EDN PZZNSE.

2. Туров, А. И. Усиление конструкций силосного корпуса / А. И. Туров // АгроЭкоИнфо. – 2020. – № 3(41). – С. 26. – EDN DQRXVN.

3. Туров, А. И. Ремонт стен силосного корпуса / А. И. Туров // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 3(51). – EDN JCBIXM.

4. Туров, А. И. Восстановление работоспособности воронок силосного корпуса / А. И. Туров // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 2(56). – EDN IDMNBF.

5. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции (актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). - М.: Минстрой России. - 2018. -143 с. https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/d40/SP-63.pdf

6. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (актуализированная редакция СНиП 2.01.07- 85*). - М.: Минстрой России. - 2016. - 96 с. https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/13673/

7. СП 108.13330.2012. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна (актуализированная редакция СНиП 2.10.05-85). - М.: Минстрой России. - 2012. - 60 с. https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1903/

8. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. https://docs.cntd.ru/document/1305691614

9. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. - М.: Минстрой России. - 2017. - 117 с. https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/95e/sp-28.pdf

10. Collins M.P., Adebar P., Seabrook P.T., Kuchma D., Sacre P. External Repair of Cracked Grain Silos // Concrete International. 1997. Vol. 19. No. 11. P. 22–28.

11. Maraveas C. Concrete Silos: Failures, Design Issues and Repair/Strengthening Methods // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 11. Article 3938. DOI: 10.3390/app10113938. https://doi.org/10.3390/app10113938

Цитирование: Туров А.И., Школьников С.Н. Ремонт и восстановление сборных железобетонных силосов СОГ после аварийных воздействий [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2026. – № 5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2026/5/st_508.pdf
DOI: https://doi.org/10.51419/202165508.