

DOI 10.25741/2413-287X-2022-07-2-178

УДК 614.841.4

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ СИЛОСОВ ЭЛЕВАТОРА

В. ЛООЗЕ, старший научный сотрудник лаборатории,

А. ГАВРИЛОВ, заведующий лабораторией неразрушающего контроля и технической диагностики, НИИПХ Росрезерва

С. БЕЛЕЦКИЙ, директор ВНИИ кондитерской промышленности — филиала ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова

E-mail: grain-miller@yandex.ru

В статье представлен метод неразрушающего контроля силосов элеватора, изготовленных из монолитного железобетона, при помощи которого стало возможным оперативно проводить диагностику степени их повреждения. Метод позволяет определять, позиционировать и классифицировать повреждения монолитного железобетона, через которые внутрь силоса проникает влага. Это приводит к увлажнению зерновой массы и, как следствие, активизации процесса ее самосогревания, снижающего качественные показатели зерна. Данный метод разработан ввиду отсутствия оперативных методик неразрушающего инструментального контроля силосов из монолитного железобетона.

Ключевые слова: монолитный железобетон, контроль температурно-влажностного режима, самосогревание зерна, тепловизионный контроль, неразрушающий метод, температура, длительное хранение, хранитивность зерна, наружные силосы.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ПОВРЕЖДЕНИЯМ СИЛОСОВ ИЗ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Для сохранения качества зерна, хранящегося в течение длительного времени на элеваторе силосного типа, необходимо обеспечивать стабильность температурно-влажностного режима, сглаживать резкие перепады температуры зерна, особенно вблизи стен (ограждающих конструкций). Наилучшим образом этим требованиям соответствуют конструкции, выполненные из монолитного или сборного железобетона. Наряду с преимуществом, стабилизирующей функцией, в железобетонной конструкции присутствуют и недостатки — возникновение в стенах повреждений и просачивание через них внутрь силоса воды. Атмосферная влага проникает в силосы как монолитной, так и сборной конструкции. Трещины, бреши и разрушения снижают водонепроницаемость ограждающих конструкций. В монолитных силосных корпусах они возникают на границе зон с различной плотностью

A method for rapid non-invasive control of the integrity of cast-in-place concrete silo bins in grain elevators is presented. The method allows for the determination, localization, and classification of the damages within the concrete resulting in the penetration of water into the bins; the moistening of grain activates its self-heating and results in the deterioration of its quality. The method developed is the first instrumental technique for rapid non-invasive control of the integrity and quality of cast-in-place concrete silo bins based on the automated monitoring of internal temperature and humidity.

Keywords: cast-in-place concrete, control of internal temperature and humidity, self-heating of grain, automated heat monitoring, non-invasive method, temperature, long-term storage, storability of grain, outdoor silo bins.

бетона и зависят от качества устройства надсилосной и подсилосной конструкций.

Проникновение атмосферной воды внутрь силосов из монолитного железобетона наблюдается по нескольким причинам. Например, трещины появляются в местах «холодных» технологических стыков, которые образованы в результате особенности технологического процесса, применяемого в прошлом веке, — строительства монолитной конструкции в плоскости контакта застывшего железобетона нижнего уровня и заливаемого жидкого железобетона верхнего уровня. Такой стык наиболее подвержен повреждению под воздействием перепадов температур между внутренними и наружными стенами, а также под воздействием внешних температур и атмосферного увлажнения.

Последствия взаимодействия с внешней средой проявляются в таких дефектах, как вспучивание, выкрашивание, эрозия железобетона, нарушение водонепроницаемости [1–3].

Наблюдения за состоянием монолитных силосов показывают, что при колебаниях температуры наружного воздуха поврежденные «холодные» стыки находятся в сложных, непрерывно циклических движениях. В результате температурных колебаний в летнее и зимнее время года, а также в течение суток возникают деформации и, соответственно, некоторое раскрытие или закрытие образовавшихся трещин. На их образование в стыках, помимо наиболее опасных температурных деформаций, оказывают влияние следующие факторы [4]:

- неравномерность осадки различных участков стен вследствие осадки фундамента, как правило, заметно проявляющаяся в первое время эксплуатации здания; в дальнейшем осадка постепенно затухает, а деформации и повреждения, которые она вызывает, могут быть легко устранены и больше не повторяются;
- местные циклические динамические деформации стен силосов при загрузке и выгрузке из них зерна;
- усадочные явления в железобетоне; обычно усадочные деформации бетона незначительны и могут или вовсе не вызывать трещин в стыке, или в худшем случае определять появление только волосяных трещин;
- отклонения геометрических размеров (перекосы, отдельные выступы), вызывающие местные напряжения в материале и в примыкающих к нему деталях;
- попадание воды в образовавшиеся при деформации трещины, в том числе в волосяные, с последующим ее замерзанием.

Повреждения стыков повышают воздухопроницаемость, они могут быть причиной протечек. Вода, проникающая через стыки, ухудшает санитарно-гигиенические условия хранения зерна, вызывает усиленную коррозию арматуры и металлических связей, разрушение стыков, тем самым сокращает срок службы здания. Водопроницаемость стыков, обусловленная перемещением воды через трещины при дожде, таянии снега и льда, усиливается под действием ветра и капиллярного подсоса воды по трещинам.

Для снижения водопроницаемости монолитных железобетонных конструкций применяют различные способы защиты: оштукатуривание, герметизацию эластичными мастиками, покраску защитными составами, пропитку водоотталкивающими растворами. При этом мастики и герметики, плотно заполняя микротрещины, должны обладать способностью следовать за температурными и механическими деформациями при любых колебаниях температуры и быть стойкими во времени.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Визуально-инструментальный метод основан на осмотре силоса из монолитного железобетона изнутри. Проверяющий при помощи лебедки с тросом спускается в силос и осматривает внутренние поверхности стен че-

рез бинокль или фотографирует и затем проводит анализ снимков, сделанных цифровым фотоаппаратом (ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния, выявления повреждений стен наружных силосов элеватора из монолитного железобетона»). К недостаткам этого способа относятся: громоздкость и значительный вес конструкции лебедки; необходимость наличия у проверяющего действующего допуска к работам на высоте, в замкнутых пространствах и медицинской справки; значительные затраты ручного труда на перемещение лебедки (трудоемкость) и необходимость проведения высотных работ, опасных для жизни; длительность проведения испытания (3–5 рабочих дней); субъективность оценки факта протечки; недостаточно высокая точность, так как невозможно количественно оценить степень повреждения.

Способ определения степени повреждения силосов из сборного железобетона позволяет выявлять разрушения межпанельных швов в местах ухудшения теплоизоляционных свойств. Для этого тепловизионное устройство с чувствительностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и длиной волны 2–12 мкм размещают на расстоянии 1–100 м от наружной поверхности силосного корпуса элеватора под углом не более 20 град. при положительной температуре наружного воздуха и разности температур внутри и снаружи силоса не менее 4°C . Осуществляют тепловизионную съемку исследуемой поверхности и получают термографический отчет (термограмму), по которому устанавливают максимальную и минимальную температуру на поверхности наружных стен силосного корпуса элеватора, по разности температур определяют место и степень повреждения швов наружного силоса элеватора (патент RU № 2525313, C2, 10.08.2014). Недостаток данного способа состоит в невозможности его применения для исследований силосов из монолитного железобетона, так как в них отсутствуют межпанельные швы, а стены имеют увеличенную по сравнению со сборным железобетоном толщину, как следствие, повышенную устойчивость к образованию трещин и более высокие теплоизоляционные свойства [5].

Способ проверки водонепроницаемости наружных стен силосов из сборного железобетона методом искусственного дождевания [6]. Он основан на результатах исследования водонепроницаемости стыков стен сборных железобетонных силосных корпусов предприятий по хранению и переработки зерна, с учетом опыта исследования водонепроницаемости стыков в жилищном строительстве, а также «Указаний по методике инструментальной проверки герметичности стыков стеновых панелей, оконных и балконных блоков методом дождевания» на заводах и стройплощадках ВСН-100-74 НИИМосстроя. Недостаток данного метода в низкой степени эффективности оценки, сложности исполнения, значительных затратах ресурсов и энергии. Для силосов из монолитного железобетона данная методика не адаптирована.



Особенности обследования наружных силосов элеваторов из монолитного железобетона с использованием тепловизионного оборудования

Учитывая изложенное выше, было предложено провести экспериментальную проверку возможности использования тепловизионного оборудования неразрушающего контроля для определения степени повреждения силосов элеватора из монолитного железобетона, сокращения длительности проведения испытания и снижения трудоемкости. Установление места и степени повреждения фасадных стен силоса позволяет определить необходимость проведения работ по санированию железобетонных стен силосов элеваторов, а также спрогнозировать объем и время наступления таких работ в будущем.

Обнаружить скрытые дефекты в строительных сооружениях возможно, если дефекты столь значительны, что температурные аномалии в зоне их нахождения возникают даже в стационарном режиме. В ограждающих конструкциях такими дефектами являются инфильтрации воздуха, «температурные мостики» и существенные локальные изменения теплопередачи [7, 8]. Амплитуда температурного сигнала в месте инфильтрации воздуха зависит от перепада давления (температурного напора) между давлением воздуха внутри помещений и атмосферным. Температурный напор может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от особенностей вентиляции и высоты точки контроля.

Тепловизионный метод обследования строительных конструкций основан на определении разницы между температурами дефектной и целостной поверхностей. И чем больше перепад температур, тем выше точность в определении места и площади дефектного участка.

Для проверки возможности использования тепловизионного оборудования при оценке степени повреждения силосов из монолитного железобетона использовался комплект аппаратуры NEC R300SR. Компьютерная система была оснащена специальной программой InfReC Analyzer NS9500 Standard [9], позволяющей обрабатывать полученные данные термографической съемки и выдавать эти результаты в виде цветных термограмм с возможностью их анализа и представления в виде специальных таблиц. Результаты тепловизионной съемки позволяют увидеть распределение температурных полей в инфракрасном спектре световых волн по площади, ограниченной возможностями снимаемых объектов. Важно помнить то, что тепловизионная аппаратура очень чувствительна к различного рода изъянам на поверхности сканируемого объекта, таким как отслоение краски, выбоины и т.п., что приводит к искажению температурного поля.

С целью повышения точности, сокращения длительности проведения испытания и снижения трудоемкости место и степень повреждения силосного корпуса из монолитного железобетона устанавливают после проверки герметичности силосов. Если установлено, что силос негерметичен,

то место и степень повреждения определяют по разнице максимальной и минимальной температуры на поверхности наружных стен наружных силосов. Температуру измеряют тепловизионным устройством, действие которого основано на измерении инфракрасного излучения объектов и преобразовании его в видимое изображение. Уровень инфракрасного излучения зависит от температуры поверхности объекта и его излучательной способности. Это позволяет камере рассчитать по формуле температуру и отобразить ее на экране.

Для определения степени повреждения наружных стен силоса из монолитного железобетона на люк загрузки зерна пустого наружного силоса устанавливают компрессор. С помощью него внутри силоса атмосферным воздухом создают избыточное давление 200–500 Па, затем подачу воздуха прекращают, так чтобы не было обратного хода воздуха. Далее измеряют время, в течение которого давление воздуха внутри силоса снижается на 50%. Опытным путем было установлено: если интервал времени равен или превышает 40 с, то это свидетельствует о герметичности силоса и отсутствии повреждений стен. Если он составляет менее 40 с, то герметичность нарушена из-за наличия повреждений в стенах силоса. В этом случае повторно нагнетают избыточное давление 200–500 Па атмосферным воздухом, подогретым на 10–15°C, и обследуют наружную поверхность стен наружных силосов при помощи тепловизионного оборудования с чувствительностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и длиной волны 2–12 мкм. Для этого его устанавливают на расстоянии 1–100 м от элеватора под углом не более 20 град. При этом необходимо учитывать, при превышении угла наклона изменяется коэффициент излучения и, как следствие, возрастает погрешность измерения температурного поля. С увеличением расстояния до объекта измерения более чем на 100 м ухудшается детальность осмотра и искажаются истинные значения температуры. При чувствительности тепловизионного устройства более $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и длины волны, выходящей за диапазон 2–12 мкм, снижается точность измерений.

Далее осуществляют тепловизионную съемку наружной поверхности силоса. Обнаружение скрытых дефектов основано на использовании принципа сравнения текущей зоны контроля с эталонной (бездефектной) зоной и определение ее теплотехнических характеристик. Эталонная зона указывается из технологических соображений или определяется в ходе тепловизионного осмотра. При этом тепловизор (инфракрасный сканер) используют для измерения поверхностной температуры. Результаты тепловизионной съемки обрабатывают на компьютере и получают термографический отчет, по которому устанавливают максимальную и минимальную температуру на поверхности наружных стен и вычисляют разность указанных температур. Экспериментально установлено, что при отсутствии или незначительных повреждениях (степень повреждения — от 0 до 5%) разница температур должна составлять не более 1,5°C.

Это обусловлено разными коэффициентами излучения монолитной бетонной поверхности, подвергающейся негативному воздействию внешней среды. Если есть повреждение, то воздух из силоса, имеющий более высокую температуру, проникает на наружную поверхность и повышает ее температуру. При таких условиях интервал между максимальной и минимальной температурами увеличивается до 2,0°C, что свидетельствует об усилении разрушительных процессов с характерной степенью повреждения стен от 5 до 60%. Дальнейшая эксплуатация такого силоса возможна, но рекомендуется проведение профилактических работ. Разница температур 2,5°C и более указывает на значительное повреждение стен (рисунок), на возможности проникновения в силос атмосферной влаги и, как следствие, нарушение требуемых условий хранения зерна, что обуславливает снижение его качества или порчу. В этом случае необходимо проведение работ по санированию наружных железобетонных стен силоса.

Далее по термограмме устанавливают место и степень повреждения наружной стены силоса на участках, которые имеют температуру поверхности выше минимальной температуры на этой же термограмме, по признакам, указанным в таблице.

Методика проведения технического обследования определяет аномальные по температуре зоны поверхности и дает возможность определить реальные тепло-технические характеристики наружных ограждающих конструкций силосных корпусов элеваторов. Анализ полученных данных позволяет разработать соответствующие рекомендации для приведения ограждающих конструкций в надлежащее состояние. Использование предлагаемого метода позволяет проводить в реальном времени температурные бесконтактные натурные обследования; обнаруживать скрытые дефекты строительства и определять сопротивление влагонепроницаемости ограждающих конструкций.



Тепловизионное обследование фасадной стены наружного силоса из монолитного железобетона													
Тепловизор: G/F100/R300	Дата и время инспекции: 20.05.2022, 17:47:17												
Условия: Скорость ветра 0,5 м/с; расстояние до объекта съемки от 5 до 40 м	Коэффициент излучения: $K = 0,95$												
Тепловизионное изображение: Пример 4.gtsi	Визуализация												
Графический анализ													
<p>Контур - Линия 1</p> <p>Макс.: 26,3°C Мин.: 23,2°C Сред.: 24,1°C</p>	<p>Профиль прямоугольника - Прямоугольник 1</p> <p>Макс.: 26,3°C Мин.: 23,2°C Сред.: 24,6°C</p>												
Описание дефекта	Данные в точках												
<p>Обнаружены области с разницей температур более 2,5°C. На данном участке качественное состояние наружной стены оценивается как неудовлетворительное.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Точка</th> <th>T, °C</th> <th>E</th> <th>Tс, °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A!</td> <td>26,3</td> <td>0,95</td> <td>23,0</td> </tr> <tr> <td>a!</td> <td>23,2</td> <td>0,95</td> <td>23,0</td> </tr> </tbody> </table>	Точка	T, °C	E	Tс, °C	A!	26,3	0,95	23,0	a!	23,2	0,95	23,0
Точка	T, °C	E	Tс, °C										
A!	26,3	0,95	23,0										
a!	23,2	0,95	23,0										

Признаки установления качественного состояния фасадной стены наружного силоса из монолитного железобетона

Разница между максимальной и минимальной температурами на наружной поверхности стены силоса, °С	Степень повреждения наружной стены силоса, %	Качественное состояние наружной стены силоса
≤1,5	0–5	Удовлетворительное (наличие микротрещин, рекомендуется нанесение герметизирующей краски)
1,5 < 2,5	5–60	Ослабленное (усиление разрушительных процессов, рекомендуется герметизация повреждений)
>2,5	60–100	Неудовлетворительное (необходимо проведения работ по санированию)

Тепловизионный контроль включает в себя:

- измерение и запись изображений температурных полей поверхности обследуемых участков ограждающих конструкций силосного корпуса;
- запись в память компьютера изображений температурных полей и обработку результатов тепловизионной съемки с помощью программного обеспечения;
- анализ результатов тепловизионной съемки, полученных после компьютерной обработки, и их распечатку на бумажном носителе в виде отчета;
- выявление зон теплотехнических неоднородностей ограждающих конструкций зданий элеваторов (стенowych панелей, обнаружение скрытых дефектов при строительстве силосных корпусов) [10–12].

Способ определения степени повреждения силосов элеватора из монолитного железобетона запатентован и может быть эффективно использован при их обследовании.

Литература

1. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях / С.Н. Леонович [и др.]. — Минск, БНТУ, 2016. — 204 с.
2. Кириленко, А. М. Диагностика железобетонных конструкций и сооружений / А. М. Кириленко. — Москва: Архитектура-С, 2013. — С. 297–303.
3. Шилин, А. А. Ремонт железобетонных конструкций / А. А. Шилин. — 2010. — 519 с.
4. Изделия железобетонные для силосных сооружений элеваторов и зерноперерабатывающих предприятий. Общие технические условия : ГОСТ 25627-83 ; введ. 01.01.1984.
5. Методика диагностики герметичности наружных швов (стыков) силосов элеваторов с использованием тепловизионного оборудования : М-КОЭ-29/2014.
6. Временная методика производственных испытаний на водонепроницаемость стен сборных железобетонных силосов / ЦНИИЭПсельстрой, ЦНИИПромзернопроект, НИИМосстрой. — М., 1977.
7. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна. Актуализированная редакция СНиП 2.10.05-85 (с Изменением №1) : СП 108.13330.2012.
8. Вавилов, В. П. Тепловизоры и их применение / В. П. Вавилов, А. Г. Климов. — М. : Интел универсал, 2010.
9. NS9500STD-B (NS9500 Standard) Multi-Function Report Generator Program. — Режим доступа: <https://www.infrared.avio.co.jp/en/support/thermo/download/ns9500std-dl/>.
10. Тепловые характеристики зданий — Качественное обнаружение тепловых неоднородностей в ограждающих конструкциях — Инфракрасный метод (ISO 6781:1983 изменен) : Международный стандарт CEN EN 13187-1998.
11. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л. М. Пухонто. — М. : Изд-во АСВ, 2004.
12. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций : ГОСТ Р 54852-2021. ■