

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.954.014-022.326.5:633.1

Д. О. БАННИКОВ

Кафедра будівельного виробництва та геодезії, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

АВАРІЇ ТА ВІДМОВИ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СИЛОСІВ ДЛЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Мета. Проаналізувати та узагальнити наявний ілюстративно-статистичний матеріал стосовно аварій та відмов сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. На основі цього сформулювати рекомендації щодо усунення встановлених причин та мінімізації їх наслідків в практиці експлуатації. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведена робота зі збору, накопичення, сортування та обробки наявного ілюстративно-статистичного матеріалу щодо аварійних випадків сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. При цьому до уваги приймалися дані як вітчизняних науковців і фахівців підприємств, так і закордонних дослідників. **Результати.** На основі наявних даних щодо аварійності сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками уточнено й доповнено класифікацію причин виникнення різноманітних аварій та відмов, а також сформульовано рекомендації щодо запобігання та усунення подібних випадків в майбутньому. Також окремо наголошено на необхідність проведення спеціальних перевірочних розрахунків у випадку встановлення в Україні сталевих силосних споруд закордонного виробництва. **Наукова новизна.** Уточнено теоретичні причини виникнення різноманітних аварійних ситуацій, характерних для України, із сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками для зберігання зернових культур. Зокрема виявлено проблему невідповідності в багатьох випадках проектних характеристик силосних конструкцій чинним нормативним документам України. **Практична значимість.** Результати проведеного аналізу з уточнення причин виникнення аварійних ситуацій зі сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками необхідно враховувати під час їх будівництва та розміщення в Україні. У разі виявлення будь-яких невідповідностей вітчизняній нормативній базі в галузі проектування та створення сталевих конструкцій необхідно вносити відповідні корективи в проектну документацію, конструкцію силосної ємності, хід робіт з монтажу та режим їх подальшої експлуатації.

Ключові слова: тонкостінний силос; аварія; відмова; сталеві конструкції

Вступ

В останні десятиріччя в Україні широкого розповсюдження набули сталеві тонкостінні циліндричні силоси, виконані по американській технології (Cao, & Zhao, 2018; Djelloul, & Mohammed, 2018; Ghali, 2014), для зберігання різноманітних видів зернових культур, переважно пшениці (рис. 1). Основна конструктивна особливість таких споруд полягає у застосуванні для стінок не гладких сталевих листів, як це традиційно прийнято у вітчизняній практиці, а тонкостінних гофрованих.

Для підвищення жорсткості такі листи нерідко об'єднуються в пакети до 5...6 штук, що дозволяє одночасно за рахунок збільшення сумарної товщини стінки досягти й потрібного

рівня несучої здатності конструкції. Так, наприклад, момент інерції в горизонтальному напрямку збільшується приблизно в 50...70 разів, а момент опору в 5...10 разів.

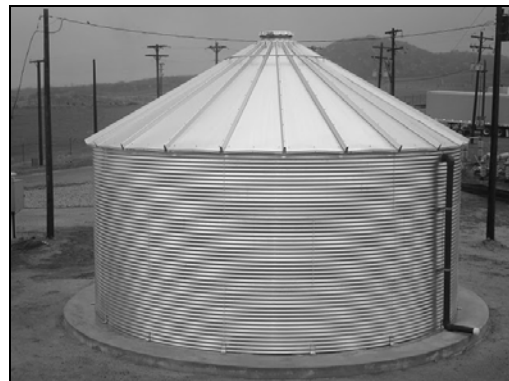


Рис. 1. Загальний вигляд сталевих тонкостінних силосів із гофрованою стінкою

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Зверху споруда накривається конусоподібною покрівлею, яка являє собою систему радіально розташованих балок, заповнених сталевими тонкостінними листами.

Діаметр силосів такої конструкції може сягати 30 м при висоті до 45 м. Тому вони є досить ефективними накопичувальними спорудами із значним об'ємом. Подібні силоси достатньо широко використовуються на різноманітних підприємствах, пов'язаних із тимчасовим складуванням та перевантаженням як сільськогосподарської продукції, так і дрібної промислової продукції. Здебільшого це транспортні вузли на зразок залізничних станцій, річкових і морських портів, тощо.

Незважаючи на вже досить значний накопичений досвід будівництва і експлуатації силосних споруд, подібної конструктивної схеми в практиці аварій та відмови їх не є рідким явищем. Автор вже висвітлював це питання в своїх попередніх роботах (Банников, 2009; Bannikov, 2011; Качуренко, & Банников, 2016). Проте з тих пір з'явився новий цікавий ілюстративно-статистичний матеріал, який дозволяє деякі аспекти даної проблеми заново проаналізувати та обговорити.

Мета

Проаналізувати та узагальнити наявний ілюстративно-статистичний матеріал стосовно аварій та відмов сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. Формулювання рекомендацій щодо усунення встановлених причин та мінімізації їх наслідків в практиці експлуатації.

Методика

Як і в започаткованому ще в роботі Банникова і Казакевича (2002) підходу до класифікації аварій сталевих силосних споруд, будемо поділяти всі наявні дані про них на три великі групи відповідно до основних чинників, що призвели до їх появи – помилки, пов'язані із проектуванням; помилки, пов'язані із виготовленням; помилки, пов'язані із експлуатацією.

Більшість зібраного автором ілюстративно-статистичного матеріалу щодо розглядуваної проблематики аварійності сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованою стінкою, була отримана на основі співпраці із різ-

номанітними підприємствами і фахівцями. Оскільки підняте питання є досить «вузьким» з точки зору можливості і необхідності висвітлення джерел та місць подібних аварійних ситуацій, то автор намагався надавати посилання тільки в тих місцях даної публікації, де це є вкрай необхідним або погодженим із фахівцями.

До таких джерел необхідно в першу чергу віднести звіти ВАТ Укрндіпроектстальконструкція імені В. М. Шимановського про виконані під керівництвом проф. О. І. Голоднова науково-дослідні роботи (Голоднов, 2009а, 2009б, 2009с). Вони в певній мірі є базовими для України з точки зору висвітлення розглядуваної проблематики.

Із закордонних фахівців слід відмітити роботи Ковалева і Панкратової (2009) та Марковича і Панкратової (2011), в яких наведені разом із значним фактичним матеріалом, також, і критичний аналіз поданої інформації щодо відхилень між розрахунковими схемами силосних конструкцій та їх дійсною роботою.

Окремо слід відмітити ілюстративно-статистичні матеріали, отримані від фахівців Воронежського філіалу корпорації «Рейкон Холдінг» (<http://reikonholding.com>) та ДП «Зернова столиця» (<https://zeo.ua>), які також наведені в даній публікації.

Результати

Поперед всього зазначимо, що загальна тенденція, яка зараз домінує в Україні по відношенню до сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованою стінкою, полягає в наступному. Силосні споруди закупаються вже готовими відповідно до каталогів закордонних виробників, в першу чергу Туреччини або Китаю. Задача вітчизняних фахівців полягає у вірному виборі готової споруди потрібного типу під конкретні місцеві умови, а також будівництва фундаменту та, за необхідності, розвантажувальної воронкоподібної частини для такої ємності. Нерідко при цьому створюються цілі силосні комплекси, що складаються із 4...5 та більше споруд, об'єднаних єдиною системою завантаження сипучого матеріалу.

1. Помилки проектування

Основною помилкою на етапі проектування сталевих силосних споруд є невірне або некоректне визначення діючих навантажень. Світо-

ва практика (наприклад, в роботі Gaylord E., Gaylord C., & Stallmeyer, 1997) вимагає врахування цілого спектру навантажень і впливів, які на додачу можуть викликати ще й появу специфічних ефектів.

Найбільш складним і одночасно основним видом навантажень в цьому ряду є дія сипучого матеріалу. Окрім статичного тиску, вона призводить до виникнення цілого ряду специфічних ефектів, на кшталт ударних навантажень при руйнуванні склепінь або глиб консолидованого сипучого матеріалу в споруді; циклічних динамічних навантажень завдяки пульсаційному вивантаженню сипучого; нерівномірному підвищенню тиску під час вивантаження сильно сегрегованого сипучого; навантаження від вибуху пиловидної фракції сипучого.

При цьому відносно основного виду навантажень – тиску від сипучого матеріалу – наявна досить велика дослідницька база, яка на сьогодні дозволяє доволі коректно розраховувати це навантаження. Зокрема в Україні є чинним спеціальний стандарт ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2014 (2015), який регламентує саме це питання. До речі, він містить зовсім інші розрахункові моделі сипучого середовища, порівняно із також чинними нормами ДБН В.2.2-8-98 (1998). Фактично ці два документи конфліктують між собою, адже вимагають проводити розрахунки за зовсім різними передумовами та виразами.

Проте навіть невірною врахування звичайного тиску сипучого матеріалу на стінки ємності вже досить для його руйнування, наприклад під час завантаження (рис. 2). У випадку ж силосного комплексу подібне руйнування однієї споруди практично завжди тягне за собою руйнування й інших споруд (рис. 3).



Рис. 2. Аварія сталевих силосів під час завантаження зерном



Рис. 3. Руйнування силосних комплексів

Досить часто, також, трапляються випадки, коли фізико-механічні характеристики сипучого матеріалу приймають за довідковими даними. Для різних видів сільськогосподарських культур такі дані, наприклад, наведені в нормах ДБН В.2.2-8-98 (1998). Проте вони є досить усередненими. Реальні ж характеристики не визначають, що додатково вносить погрішність в розрахункові значення навантаження від тиску сипучого.

Окремою проблемою є врахування снігових і вітрових навантажень. На думку фахівців, випадки маніпуляції із величинами природно-кліматичних навантажень на силосі є досить поширеним явищем у закордонних виробників, особливо в останні роки. При цьому для підвищення продаж знижують ціну, не оговорюючи, що дана модель спроектована для більш низьких навантажень. У вітчизняній практиці подібні розрахунки не перепроверяють на відповідність чинному нормативному документу ДБН В.1.2-2:2006 (2007) або просто ігнорують. Результатом є пошкодження корпусу силосів, а то

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

й відверте падіння від вітрового навантаження (рис. 4 і 5), або деформація криши силосу від снігового навантаження (рис. 6). Особливо це характерно для порожніх споруд за несприятливих погодних умов.

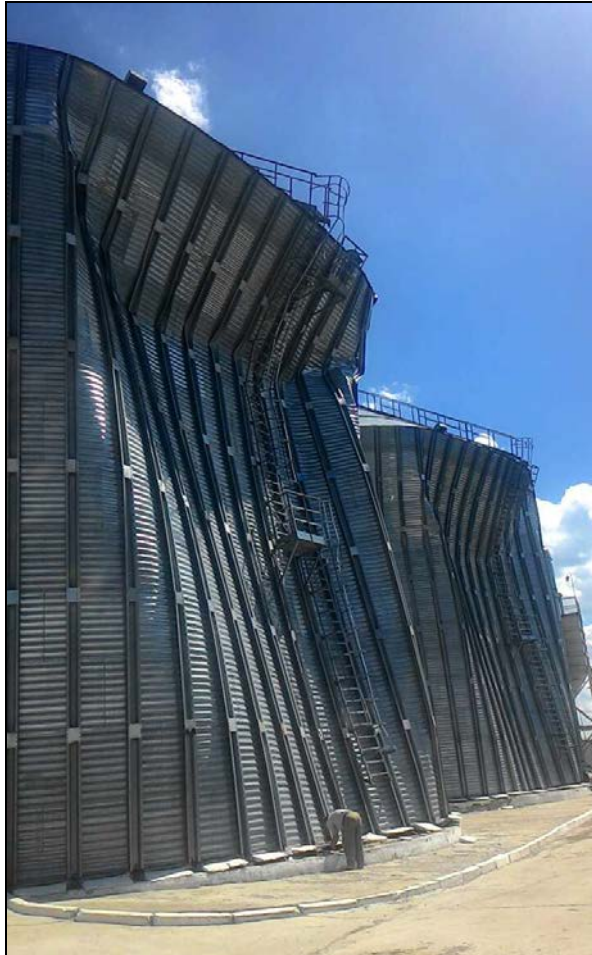


Рис. 4. Деформація корпусів силосів від вітрового навантаження

Наступним проблемним моментом при влаштуванні силосів в Україні є проектування і створення під них надійного фундаменту. При цьому, як і для будь-яких інших об'єктів, мають враховуватись не тільки фізико-механічні характеристики ґрунту в місці будівництва (пластичність, склад, рухомість, тощо), а також і рівень й агресивність ґрунтових вод по відношенню до застосованих будівельних матеріалів. Також не останню роль відіграє й можливий крен споруди від нерівномірного завантаження або особливостей ґрунтових умов. Однак саме для силосів про це чомусь часто забувають, вважаючи, що достатньо розрахувати фунда-

мент лише тільки на загальну масу завантаженого силосу, яку вважають рівномірно розподіленою. В результаті – аварія (рис. 7).



Рис. 5. Падіння силосу від вітрового навантаження



Рис. 6. Деформація криши силосу від снігового навантаження



Рис. 7. Деформація корпусу силосу внаслідок перекосу фундаменту

© Д. О. Банніков, 2019

Ще одним важливим аспектом при розробці проектною документації є врахування відповідності самих прийнятих перерізів несучих елементів вимогам чинних нормативних документів для сталевих конструкцій ДБН В.2.6-198:2014 (2014). Особливо це пов'язано із розрахунковими довжинами та гнучкостями опорних елементів, що можуть втрачати стійкість, призводячи до падіння споруди (рис. 8).



Рис. 8. Падіння силосної споруди внаслідок втрати стійкості опорними елементами

Останнім часом все більше фахівців звертають увагу ще на одну особливість роботи сталевих силосних споруд з гофрованими стінками. Завдяки відносно невеликій товщини самих стінок, а також перерізів інших несучих конструктивних елементів, в практиці все частіше проявляється таке явище як втомне руйнування. Особливо це характерно для елементів покрівлі, яка окрім знакозмінних зусиль від природно-кліматичних навантажень, зазнає ще й постійних згінних та крутильних деформацій від утворення розрідження в споруді під час його фільтраційного витoku (рис. 9).

Проте втомні розрахунки для силосних споруд досить часто просто не виконуються, оскільки дані щодо кількості циклів розвантаження/завантаження вкрай обмежені або взагалі відсутні. До того ж частина силосних споруд використовується для тривалого зберігання зернових культур, а в рік відбувається 4...5 їх циклів роботи. Інша частина застосовується для короткочасного зберігання. Для них кількість циклів становить 4...5 на день, тому їх конструкція повинна мати вищу несучу здатність.

Відомі випадки, коли менш «потужні» силосні конструкції, орієнтовані на довготривале зберігання, намагались використовувати інтенсивніше, з усіма вихідними наслідками.



Рис. 9. Руйнування криши силосної споруди внаслідок втомних деформацій

Окреме питання пов'язано із врахуванням сейсмічних навантажень на сталеві силосні споруди. Статистика щодо такого типу аварій силосів на тепер відсутня, проте коректне врахування сейсмічних впливів для подібних просторових конструкцій є досить складною задачею, виконання якої максимально точно може бути здійснено, мабуть, лише із застосуванням чисельних розрахункових методів, на кшталт методу скінчених елементів (МСЕ). При цьому, звісно ж, необхідно використовувати й відповідні апробовані програмні продукти, які реалізують МСЕ, як наприклад, проектно-обчислювальний комплекс SCAD for Windows (Карпиловский, Криксунов, Маляренко, Фиалко, Перельмутер, А. & Перельмутер М., 2015).

Додаткову невизначеність в проектні навантаження вносить так звана, техногенна сейсмічність, яка все частіше проявляється в промислових районах. Її врахування взагалі не регламентується жодними стандартами, та й дослідження в цьому напрямку практично відсутні.

Зовсім новим явищем, з яким зіштовхнулись фахівці під час експлуатації сталевих силосних конструкцій, є утворення ожеледного шару на покрівлі. Врахування подібного виду наванта-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

жень для ємнісних конструкцій, також, не передбачено ані чинними нормами щодо визначення навантажень ДБН В.1.2-2:2006 (2007), ані будь-якими іншими будівельними стандартами України.

Немає єдності серед фахівців відносно питання щодо типу сталей, які слід застосовувати для сталевих циліндричних тонкостінних силосів із гофрованими стінками. Так, частина фахівців схиляється до думки, що замість традиційних високоміцних сталей, краще використовувати сталі звичайної міцності. На їх думку, такі сталі мають значно більш виражені пластичні якості, що певним чином при роботі ємнісної конструкції нівелює ті наявні дефекти, які можуть бути закладені в споруду на стадії її подальшого виготовлення. Щоправда застосування таких сталей збільшує масу ємності на 5...10 т і потребує зменшення кроку розташування опорних елементів, що також не завжди передбачається на стадії проектування.

2. Помилки виготовлення

Наступним етапом життєвого циклу сталевих силосних конструкцій є їх виготовлення. При цьому нерідко вноситься додаткова кількість помилок, які надалі призводять до створення аварійних ситуацій. Уникнути більшості з них, на думку фахівців, дозволяє ретельний вибір монтажних організацій, які мають в своєму штаті бригади досить кваліфікованих робітників із певним стажем роботи і потрібним обладнанням.

Критичним фактором загальної довговічності силосу є фундамент, який має виконуватися із якісного бетону, що відповідає закладеному в проектну документацію (рис. 10). Також увагу необхідно приділяти герметичності, який може призводити до виникнення зайвих турбот при подальшій експлуатації споруд у випадку його невисокої якості. Типовою помилкою при цьому є застосування герметичності для вузького діапазону температур (наприклад, від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Між тим в умовах України цей діапазон є набагато ширшим – від $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Досить розповсюдженою проблемою монтажу сталевих силосів є розташування болтів без узгодження із проектом. При цьому нерідко має місце підрізка листів обшивки споруди «за місцем», наприклад для влаштування входних люків, що зменшує відстань між отворами болтів і кромкою листа (рис. 11). На практиці це

призводить до виключення із роботи частини болтів і створення потенційно аварійної ситуації, як наприклад, розрив обшивки (рис. 12).



Рис. 10. Повторне влаштування фундаменту у зв'язку із виявленням його невідповідності проектній документації



Рис. 11. Розташування входних люків з порушенням відстаней між болтовими отворами



Рис. 12. Розрив обшивки силосної споруди в місці розташування болтових отворів

Додаткові штучні концентратори напружень утворюються при виконанні під час монтажу зайвих надрізів, внаслідок помилки робітників (рис. 13).

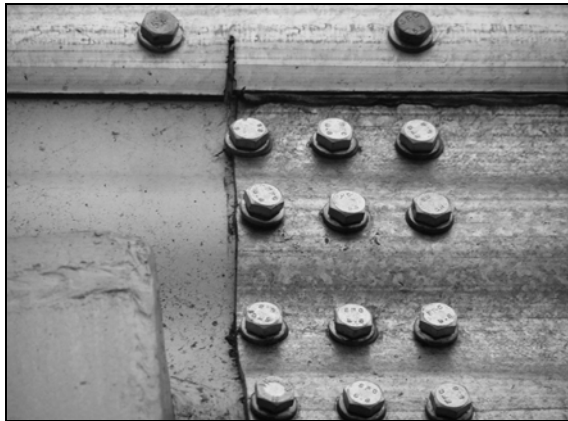


Рис. 13. Надріз несучого елемента силосної споруди в місці розташування болтових отворів

Також зустрічаються випадки, коли частина болтів в з'єднанні замінюється на болти більш низького класу (наприклад, класу 5.8 замість класу 8.8). При подальшій роботі силосної конструкції це проявляється досить чітко, коли частина болтів низької міцності «відстрілюється» від з'єднання (рис. 14).



Рис. 14. Руйнування частини низькоміцних болтів в болтовому з'єднанні

Додатково під час проведення монтажних робіт варто пам'ятати, що сталеві тонкостінні циліндричні силоси з гофрованими стінками нерідко мають значну висоту. При цьому можливим є накопичення відхилень в розмірах від проектних на досить суттєву величину. Якщо подібні відхилення мають однобічний характер, то можливо утворення так званої «елипсоїдності» на рівні верхньої грані обшивки, що при невеликих навантаженнях вже сприятиме втраті стійкості цією частиною конструкції (рис. 15).



Рис. 15. Деформація корпусу силосної споруди внаслідок її «елипсоїдності»

Окремою розповсюдженою проблемою є навмисне відхилення від проекту, пов'язане із бажанням зекономити на конструкції силосу. Так зустрічаються випадки зміни перерізу несучих стійок в конструкції, що відразу ж призводить до втрати їх стійкості в цьому місці – рис. 16.



Рис. 16. Втрата місцевої стійкості стінки в місці зміни перерізу підкріплюючих стійок

3. Помилки експлуатації

На жаль, навіть грамотно спроектований і змонтований силос не завжди може пробути в роботі тривалий період часу. Причиною цього стають помилки, які допускаються під час його експлуатації. Основними з них є три наступні.

По-перше, у випадку нерівномірного завантаження, особливо через бічні завантажувальні пристрої, за їх наявності, обшивка силосної споруди також починає деформуватись нерів-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

номірно. В результаті при значних перекосах конструкція може отримати нерівномірну деформацію (рис. 17) або взагалі перекинутися.



Рис. 17. Руйнування корпусу силосної споруди внаслідок нерівномірного завантаження

По-друге, у випадку швидкого вивантаження значних обсягів зернового матеріалу, який зберігається в силосній споруді, завдяки явищу фільтраційного витoku не завжди тиск всередині ємності може швидко стабілізуватись. В результаті утворюється розрідження, яке може втягувати кришу силосу всередину конструкції (рис. 18).



Рис. 18. Втягування крихи силосної споруди внаслідок утворення розрідження повітря при розвантаженні

По третє, суттєву небезпеку являють маси зернового матеріалу, які злежуються при тривалому зберіганні. За умови несприятливого температурно-вологісного режиму починаються процеси гниття і розкладання, які також перетворюють матеріал із сипучого на глибовий. В результаті при спробі розвантажити ємність, подібні агломерати вдаряють по обшивці силосу, призводячи до серйозних руйнувань (рис. 19).



Рис. 19. Руйнування обшивки силосної споруди внаслідок удару агломерату сипучого матеріалу при розвантаженні

В теперішній час для уникнення подібних порушень в експлуатації сталевих тонкостінних циліндричних силосів розроблені спеціальні системи автоматизованого контролю за режимом їх роботи. Такі системи (рис. 20) виконують відслідковування в режимі реального часу всіх основних параметрів, в тому числі й стану зернових культур, не дозволяючи оператору виконати помилкові дії. Проте на подібних системах часто економлять, особливо в Україні.

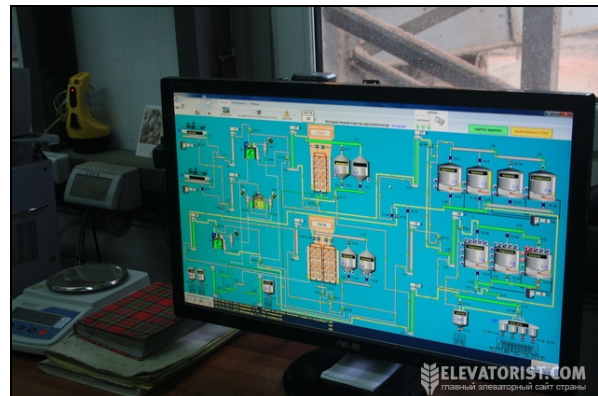


Рис. 20. Система автоматизованого керування режимом експлуатації сталевих силосних споруд для зернових культур

Підводячи підсумок, хотілося б привести одне жартівне твердження фахівців стосовно діагностування потенційного виникнення аварійної ситуації із сталевими циліндричними силосами із гофрованими стінками для зернових культур – перед аварією територія навколо споруди буде усяяна болтами. Проте доводити до цього, звісно ж, не варто.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, в даній публікації уточнено теоретичні причини виникнення різноманітних аварійних ситуацій, характерних для України, із сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками для зберігання зернових культур. Зокрема виявлено проблему невідповідності в багатьох випадках проектних характеристик силосних споруд чинним нормативним документам України.

Результати проведеного аналізу з уточнення причин виникнення аварійних ситуацій зі сталевими циліндричними тонкостінними силосами із гофрованими стінками необхідно врахувати під час їх будівництва та розміщення в Україні. У разі виявлення будь-яких невідповідностей вітчизняній нормативній базі в галузі проектування та створення сталевих конструкцій необхідно вносити відповідні корективи в проектну документацію, конструкцію силосної ємності, хід робіт з монтажу та режим їх подальшої експлуатації.

Висновки

На основі проведеного аналізу та виконаного узагальнення наявного ілюстративно-статистичного матеріалу стосовно аварій та відмов сталевих тонкостінних циліндричних силосів із гофрованими стінками слід сформулювати наступні рекомендації щодо усунення їх причин та мінімізації їх наслідків в практиці експлуатації:

1. Проектування силосів необхідно виконувати на доволі широкий спектр навантажень відповідно до чинних в Україні будівельних стандартів. До числа таких навантажень слід віднести навантаження від тиску сипучого матеріалу, снігові, вітрові і ожеледні навантаження, а також сейсмічні навантаження за їх наявності. Особливу увагу необхідно приділяти уточненню фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів і режиму завантаження або вивантаження ємностей.

2. У випадку встановлення в Україні готових силосних споруд, придбаних у закордонних організацій, варто силами вітчизняних проектних установ перепроверити конструкцію на відповідність чинній в Україні нормативній базі не тільки в частині навантажень, а в частині прийнятих конструкторських рішень.

3. Виготовлення і монтаж силосних споруд необхідно виконувати тільки силами спеціалізованих організацій, які мають в своєму штаті бригади досить кваліфікованих робітників із певним стажем роботи і потрібним обладнанням.

4. Для уникнення аварійних ситуацій під час експлуатації силосних споруд необхідно встановлювати на об'єктах спеціальні автоматизовані системи контролю за режимом їх роботи.

Наприкінці публікації автор хотів би висловити свою щирю подяку д.т.н., професору, с.н.с. ВАТ Укрндіпроектстальконструкція імені В. М. Шимановського Голоднову О. І. за люб'язно надані в свій час в розпорядження автора матеріали щодо дослідження причин аварійності сталевих тонкостінних циліндричних силосів із гофрованою стінкою разом із дозволом на їх відтворення та тиражування на розсуд автора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Bannikov, D. O. (2011). Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 5, 91-96.
- Caο, Q., & Zhao, Ya. (2018). Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology*, Vol. 327, 476-488. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.001>
- Djelloul, Z., & Mohammed, D. (2018). Contribution to the seismic behaviour of steel silos: full finite-element analysis versus the Eurocode approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, 757-773. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0062-z>
- Gaylord, E. H. Jr., Gaylord, C. N., & Stallmeyer, J. E. (Eds.) (1997). *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill.
- Ghali, A. (2014). *Circular Storage Tanks and Silos*. London: CRC Press. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1201/b16887>
- Банніков, Д. О., & Казакевич, М. И. (2002). Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов. *Металеві конструкції. Том 5, № 1*, 59-66.
- Банніков, Д. О. (2009). *Вертикальные жесткие стальные емкости: современные концепции формообразования*. Днепропетровск: Монолит.
- Голоднов, О. І. (2009а). *Дослідження причин руйнації будівельного об'єкту – силосу для зберігання сухого зерна на 5500 тонн (інв. № 9034, за технологічною схемою – ємність № 14, СМВУ*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- 220.14В12) пункту приймання та відвантаження зерна філії «Золотоніська» ТОВ СП «НІБУЛОН», розташованої за адресою вул. Залізнична, 38 в с. Вознесенське Золотоніського р-ну Черкаської обл. Київ: ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.
- Голоднов, О. І. (2009б). Дослідження причин появи пошкоджень будівельного об'єкту – силосу для оперативного зберігання зерна на 442 тонни (СМВУ 73.10.К45.В12), який розташований на території елеватору в с. Піщане Черкаської обл. Київ: ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.
- Голоднов, О. І. (2009с). Дослідження причин появи пошкоджень будівельного об'єкту – силосу № 3 для зберігання сухого зерна на 5649 тонн (СМВУ 220.15.В12), який розташований на території елеватору в с. Піщане Черкаської обл. Київ: ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.
- ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберігання та переробці зерна. (1998). Київ: Держбуд України.
- ДБН В.1.2-2:2006 (зі змінами). Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. *Норми проектування*. (2007). Київ: Держбуд України.
- ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. *Норми проектування*. (2014). Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2014. *Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари (EN 1991-4:2006, IDT)*. (2015). Київ: Мінрегіонрозвитку України.
- Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Маляренко, А. А., Фиалко, С. Ю., Перельмутер, А. В., & Перельмутер М. А. (2015). *SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++*. Москва: СКАД СОФТ.
- Качуренко, В. В. & Банников Д. О. (2016). *Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов*. Днепропетровск: Новая идеология.
- Ковалев, А. О., & Панкратова, Г. Е. (2009). *Долговечность инженерных силосных сооружений и причины их разрушения*. Москва: МГСУ.
- Маркович, А. С., & Панкратова, Г. Е. (2011). К вопросу повышения долговечности инженерных силосных сооружений. *Вестник Тамбовского государственного технического университета. Том 17, № 3, 775-779*.

Д. О. БАННИКОВ

Кафедра строительного производства и геодезии, Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

АВАРИИ И ОТКАЗЫ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СИЛОСОВ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Цель. Проанализировать и обобщить имеющийся иллюстративно-статистический материал относительно аварий и отказов стальных цилиндрических тонкостенных силосов с гофрированными стенками. На основе этого сформулировать рекомендации по устранению установленных причин и минимизации их последствий в практике эксплуатации. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведена работа по сбору, накоплению, сортировке и обработке имеющегося иллюстративно-статистического материала относительно аварийных случаев стальных цилиндрических тонкостенных силосов с гофрированными стенками. При этом во внимание принимались данные как отечественных ученых и специалистов предприятий, так и зарубежных исследователей. **Результаты.** На основе имеющихся данных относительно аварийности стальных цилиндрических тонкостенных силосов с гофрированными стенками уточнена и дополнена классификация причин возникновения различных аварий и отказов, а также сформулированы рекомендации по предупреждению и устранению подобных случаев в будущем. Также отдельно отмечена необходимость проведения специальных проверочных расчетов в случае установки в Украине стальных силосных сооружений зарубежного производства. **Научная новизна.** Уточнены теоретические причины возникновения различных аварийных ситуаций, характерных для Украины, со стальными цилиндрическими тонкостенными силосами с гофрированными стенками для хранения зерновых культур. В частности выявлена проблема несоответствия во многих случаях проектных характеристик силосных конструкций действующим нормативным документам Украины. **Практическая значимость.** Результаты проведенного анализа по уточнению причин возникновения аварийных ситуаций со стальными цилиндрическими тонкостенными силосами с гофрированными стенками необходимо учитывать во время их строительства и размещения в Украине. В случае

© Д. О. Банніков, 2019

выявления каких-либо несоответствий отечественной нормативной базе в сфере проектирования и создания стальных конструкций необходимо вносить соответствующие коррективы в проектную документацию, конструкцию силосной емкости, ход работ по монтажу и режим их дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: тонкостенный силос; авария; отказ; стальные конструкции

D. O. BANNIKOV

Department of Construction Production and Geodesy, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ACCIDENTS AND FAILURES OF STEEL THIN-WALLED CILINDRIC SILOS FOR GRAIN CULTURES

Purpose. To analyze and to summarize the available illustrative and statistical material on accidents and failures of steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls. On the basis of this, to formulate recommendations on eliminating of the established causes and minimizing their consequences in the practice of exploitation. **Methodology.** To achieve this goal, the work was done on collecting, accumulating, sorting and processing of existing illustrative and statistical material regarding accidental cases of steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls. At the same time, the data of both domestic scientists and specialists of enterprises, and foreign researchers were taken into account. **Findings.** Based on the available data on the accident rate of steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls, the classification of the causes of various accidents and failures has been clarified and supplemented, and recommendations have been formulated for preventing and eliminating such cases in the future. The need for special verification calculations in case of installation of steel silo structures of foreign manufacture in Ukraine is noted also separately. **Originality.** The theoretical reasons for the occurrence of various accident characteristic of Ukraine with steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls for storage of grain crops have been clarified. In particular, the problem of absence of corresponding in many cases of the design characteristics of silo structures with the current regulatory documents of Ukraine was revealed. **Practical value.** The results of the analysis to clarify the causes of accidents with steel cylindrical thin-walled silos with corrugated walls must be considered during their construction and placement in Ukraine. In the event of any discrepancies in the domestic regulatory framework in the field of design and creation of steel structures, it is necessary to make appropriate adjustments to the design documentation, the silo capacity structure, the progress of installation and the mode of their further exploitation.

Keywords: thin-walled silos; accidents; failures; steel structures

REFERENCES

- Bannikov, D. O. (2011). Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metalurgical and Mining Industry, Vol. 5*, 91-96. (in English)
- Cao, Q., & Zhao, Ya. (2018). Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology, Vol. 327*, 476-488. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.001> (in English)
- Djelloul, Z., & Mohammed, D. (2018). Contribution to the seismic behaviour of steel silos: full finite-element analysis versus the Eurocode approach. *Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 19*, 757-773. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0062-z> (in English)
- Gaylord, E. H. Jr., Gaylord, C. N., & Stallmeyer, J. E. (Eds.) (1997). *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill. (in English)
- Ghali, A. (2014). *Circular Storage Tanks and Silos*. London: CRC Press. Access Mode: DOI: <https://doi.org/10.1201/b16887> (in English)
- Bannikov, D. O., & Kazakevich, M. I. (2002). Osnovnye prichiny avarij zhestkih stal'nyh bunkerov i nizkih silosov. *Metalevi konstruktsii. Tom 5, № 1*, 59-66. (in Russian)
- Bannikov, D. O. (2009). *Vertikal'nye zhestkie stal'nye emkosti: sovremennye koncepcii formoobrazovanija*. Dnepropetrovsk: Monolit. (in Russian)
- Holodnov, O. I. (2009a). *Doslidzhennia prychnyn ruynatsii budivelnoho ob'ektu – sylosu dlia zberihannia sukhoho zerna na 5500 tonn (inv. № 9034, za tekhnolohichnoi skhemoiu – yemnist № 14, SMVU 220.14V12) punktu pryimannia ta vidvantazhennia zerna filii «Zolotoniska» TOV SP «NIBULON», roztashovanoi za adresoii vul.*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Zaliznychna, 38 v s. Voznesenske Zolotoniskoho r-nu Cherkaskoi obl. Kyiv: VAT Ukrndiproektstalkonstruktssiia im. V. M. Shymanovskoho. (in Ukrainian)

Holodnov, O. I. (2009b). *Doslidzhennia prychnyn poiavy poskodzhen budivelnoho ob'ektu – sylosu dlia operatyvnoho zberihannia zerna na 442 tonny (SMVU 73.10.K45.V12), yakyi roztashovanyi na terytorii elevatoru v s. Pishchane Cherkaskoi obl.* Kyiv: VAT Ukrndiproektstalkonstruktssiia im. V. M. Shymanovskoho. (in Ukrainian)

Holodnov, O. I. (2009c). *Doslidzhennia prychnyn poiavy poskodzhen budivelnoho ob'ektu – sylosu № 3 dlia zberihannia sukhoho zerna na 5649 ton (SMVU 220.15.V12), yakyi roztashovanyi na terytorii elevatoru v s. Pishchane Cherkaskoi obl.* Kyiv: VAT Ukrndiproektstalkonstruktssiia im. V. M. Shymanovskoho. (in Ukrainian)

DBN V.2.2-8-98. *Pidpriemstva, budivli ta sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna. (1998).* Kyiv: Derzhbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DBN V.1.2-2:2006 (zi zminamy). *Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. (2007).* Kyiv: Derzhbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DBN V.2.6-198:2014. *Stalevi konstruktssii. Normy proektuvannia. (2014).* Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DSTU-N B EN 1991-4:2014. *Yevrokod 1. Dii na konstruktssii. Chastyna 4. Bunkery i rezervuary (EN 1991-4:2006, IDT). (2015).* Kyiv: Minrehionrozvytku Ukrainy. (in Ukrainian)

Karpilovskij, V. S., Kriksunov, Je. Z., Maljarenko, A. A., Fialko, S. Ju., Perel'muter, A. V., & Perel'muter M. A. (2015). *SCAD Office. Versija 21. Vychislitel'nyj kompleks SCAD++.* Moskva: SKAD SOFT. (in Russian)

Kachurenko, V. V. & Bannikov D. O. (2016). *Konstruktivnye reshenija stal'nyh emkostej dlja sypuchih materialov.* Dnepropetrovsk: Novaja ideologija. (in Russian)

Kovalev, A. O., & Pankratova, G. E. (2009). *Dolgovechnost' inzhenernyh silosnyh sooruzhenij i prichiny ih razrushenija.* Moskva: MGSU. (in Russian)

Markovich, A. C., & Pankratova, G. E. (2011). *K voprosu povyshenija dolgovechnosti inzhenernyh silosnyh sooruzhenij. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tom 17, № 3, 775-779.* (in Russian)

Надійшла до редколегії 04.03.2019

Прийнята до друку 11.03.2019