

УДК 725.36:69.059.22

*М.В. Бібік, к.т.н., доцент
В.М. Бібік, ст. викладач
Р.М. Ульченко, магістрант
І.О. Бібік, студентка*

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

КЛАСИФІКАЦІЯ АВАРІЙ ТА ПОШКОДЖЕНЬ СТАЛЕВИХ СИЛОСІВ

Проаналізовано причини, що викликали аварії та пошкодження металевих силосів; на прикладах розглянуто принципи їх належної експлуатації.

Ключові слова: сталевий силос, аварії, руйнування.

УДК 725.36:69.059.22

*Н.В. Бибики, к.т.н., доцент
В.Н. Бибики, ст. преподаватель
Р.М. Ульченко, магистрант
И.А. Бибики, студентка*

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

КЛАССИФИКАЦИЯ АВАРИЙ И ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЬНЫХ СИЛОСОВ

Проанализированы причины, вызывающие аварии и повреждения металлических силосов; на примерах рассмотрены принципы их должной эксплуатации.

Ключевые слова: стальной силос, аварии, разрушения.

UDC 725.36:69.059.22

*Nikolay Bibik, PhD, Associate Professor
Vladimir Bibik, senior lecturer
Ruslana Ulchenko, master student
Inna Bibik, student*

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

CLASSIFICATION OF FAILURES AND DAMAGES OF STEEL SILOS

Causes of silo damages and collapse were analyze; foundations of their correctly maintenance were examined.

Keywords: steel silo, damages, collapse.

Вступ. На сьогоднішній день особливе місце в практичній діяльності займають проекти з будівництва металевих силосів. Розвиток малих фермерських господарств призвів до виникнення гострої потреби в елеваторах із силосами невеликої місткості. Залізобетонні елеватори не можуть задовольнити потреби в зберіганні врожаю та конкурувати зі швидкістю зведення сталевих силосів. Силос – спеціальна конструкція, яка піддається нестандартним умовам завантаження, що спричинює появу маловивчених видів відмов. Досвід експлуатації конструкцій подібного типу показує, що термін служби їх несучих елементів й елементів

конструкцій, як правило, виявляється нижчим від нормативного. Аварії та руйнування металевих силосів є однією з актуальних проблем сучасності через дефіцит знань щодо зберігання матеріалу в ємності силосної конструкції та її роботи.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Ряд зарубіжних та вітчизняних науковців займалися дослідженням цієї проблеми, зокрема Дж.В. Карсон [9, 11], В.В. Єрастов [6], О.А. Підгородецький [3], Д.О. Банніков [10] й інші. На сьогодні дослідники запропонували ряд класифікацій аварій силосних конструкцій, розглянуто чимало аспектів кожного з видів аварій.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Регулярна повторюваність аварій та руйнувань силосних споруд указують на те, що існуючі методи розрахунку і проектування таких конструкцій не враховують усі особливості їх роботи. Наявні відомості та дослідження в галузі аварій металевих силосних конструкцій потребують чіткої структуризації та узагальнення.

Постановка завдання. Завданням цієї роботи є аналіз останніх досліджень із теми й узагальнення відомостей щодо аварій металевих силосних конструкцій.

Основний матеріал і результати. Класифікація аварій та пошкоджень сталевих силосів за їх причинами передбачає поділ на чотири основні групи: помилки проектування, зведення й експлуатації, специфічні та інші причини (див. рис. 1). Розглянемо детальніше кожен з груп.

1. Помилки проектування

1.1. Неврахування всіх діючих навантажень (технологічних, температурних, від локального тиску тощо). На сьогодні практично не вивчено одну з основних причин пошкодження стін металевих силосів із хвилястим профілем – перевищення розрахункового тиску при випуску зерна, а також нерівномірність та циклічність цього завантаження, які не враховані при розрахунку. Відомо тільки, що протягом усього періоду зберігання зерна навантаження пульсують, при цьому цикли пульсації змінюються в процесі витікання зерна із силоса від декількох секунд до декількох годин при одночасній зміні навантаження у значних діапазонах.

Ефект неврахування температурних навантажень можна розглянути на прикладі аварії сталевих силосів для зберігання зольного шлаку, що сталася в Карсоні (США) у 2000 році [9]. Під час розслідування з'ясувалося, що силос має недостатній запас міцності й проектувальник не врахував ефект так званого «термічного розширення». Стіни розширювалися протягом дня від високої температури повітря і стискувалися вночі, коли температура знижувалась. Матеріал усередині силоса розсипався на величину розширення стінки, а коли стінка поверталася до початкового положення, чинив їй опір, що призводило до збільшення напруження розтягу в стінці. І так кожного дня.



а



б



в



г



д



е



ж



з

**Рис. 2 – Приклади аварій та пошкоджень силосів від різних причин:
а, б – від проблеми масового потоку при розвантаженні;
в, г – через втрату стійкості ребер жорсткості; д – від розриву циліндричної оболонки (вибух); е – через помилку проектування фундаментів; ж – від термічного розширення сипучого матеріалу; з – внаслідок землетрусу**

1.2. Використання неправильних (табличних) властивостей сипучого матеріалу та нехтування експериментальними дослідженнями його властивостей. Необхідно володіти інформацією про реологічні властивості матеріалу і форму потоку, яка утвориться в силосі; оскільки реологічні властивості можуть змінюватися в часі (зміна вологості, розмірів частинок матеріалу, температури), слід упевнитися, що силос був спроектований з урахуванням цих чинників.

Не маючи повних характеристик матеріалу, який буде зберігатися в запроектованому силосі, конструктор може вдатися до табличних значень норм, котрі враховують лише кут тертя стінки для певного матеріалу без розгляду його вологості, розміру часток і т.д. Наприклад, якщо фактичний кут тертя об стіни виявиться меншим від проектного значення, на стіни силоса буде передаватися менше вертикальне навантаження, в результаті чого збільшиться навантаження на його воронку [9].

До проектних помилок також можна додати застосування нових конструкцій без експериментальної перевірки, відсутність лабораторних випробувань, експериментальної перевірки отриманих даних і т.д.

1.3. Помилкові розрахункові передумови (неправильна модель потоку (розвантаження) сипучого матеріалу). Функціональні вимоги до конструкції силосів диктує форма потоку сипучого матеріалу (масовий або конічний потік). Завдання інженера-конструктора полягає не тільки в тому щоб утворився обраний тип потоку, але також щоб конструкція здатна була витримати навантаження, викликані цією течією.

Якщо масовий потік сировини виникає в силосі, який конструктивно був призначений для конічного виток, або якщо розташування локального піка тиску, що розвивається там, де канал воронки потоку перетинає стіну силоса, відрізняється від проектного, наслідки можуть бути руйнівними [9].

Воронки завантаження і розвантаження зерна повинні проектуватися по центру, якщо це можливо. У разі ексцентричного розташування розвантажувальних воронок, потрібно перевіряти силос на нерівномірні умови навантаження від дії згинальних моментів.

1.4. Невдалі конструктивні рішення вузлів та з'єднань, нераціональна геометрія, форма воронки. Такого роду проектні помилки призводять до концентрації та збільшення напружень у конструкціях.

1.5. Помилки проектування основ і фундаментів (нерівномірне осідання тощо). Силос – відносно «тонка» конструкція, якщо порівнювати її висоту з діаметром. У результаті цього виникають значні осьові навантаження на основу конструкції від маси сировини та власної ваги конструкції. Фундамент силоса потребує більше уваги, ніж фундамент звичайної будівельної конструкції. У процесі завантаження на початку експлуатації слід контролювати осідання фундаменту і при виявленні відхилень, що перевищують норму, вживати заходів щодо вирівнювання

силоса. В окремих випадках осадка фундаментів відбувається й через декілька років, тому важливо здійснювати постійний контроль [7].

Нерівномірне розміщення сипучого матеріалу в процесі заповнення може стати причиною нерівномірного розподілу тиску на фундамент. Бічні навантаження в результаті сильного вітру спричиняють той же ефект. Місцеві механічні перенапруження ґрунту під фундаментом можуть викликати перекіс або навіть руйнування об'єкта [7].

2. Помилки зведення

2.1. Несанкціоновані зміни в проекті. Необхідно узгоджувати зміни в проекті силосної конструкції з проектувальником, перш ніж вони будуть реалізовані. Серед таких помилок найчастіше зустрічаються: невідповідність міцнісних характеристик використаних матеріалів нормам, використання болтів заниженого класу міцності, що призводить до розриву місць з'єднань [6]; установлення додаткових елементів та обладнання (наприклад, втома металу від вібраторів, змонтованих зовні), що призводить до утворення зосереджених несиметричних навантажень тощо.

2.2. Низький рівень кваліфікації робітників та порушення технологічної послідовності монтажу. У цьому випадкові помилки виникають безпосередньо в процесі зведення силоса і його несучої конструкції. До таких помилок належать: низька якість розмітки, відхилення елементів від проектного положення при монтажі, низька якість виконання зварних швів, порушення технологічної послідовності.

Серед найпоширеніших дефектів при збиранні силоса також наявні невідповідність розташування анкерних кріплень, що призводить до спотворення форми бічної поверхні силоса, деформації ребер жорсткості та зниження несучої здатності; недотримання величин зазорів.

2.3. Відсутність авторського нагляду. Відсутність авторського нагляду не дозволяє своєчасно виявити й усунути помилки пп. 2.1 і 2.2.

2.4. Пошкодження елементів при транспортуванні та зберіганні. Сталеві силоси – нестандартні й часто негабаритні ємності, що потребують вузькоспеціальних умов для транспортування до місця їх монтажу. Серед пошкоджень елементів при транспортуванні можна виділити різноманітні місцеві й загальні прогини та викривлення елементів, втрату стійкості, руйнування антикорозійного покриття й ін.

3. Помилки експлуатації

Правильне проектування, виготовлення та монтаж силосної конструкції повинні стати запорукою довгої служби. Але не завжди забезпечення цих аспектів може гарантувати безаварійне майбутнє силоса. Не менш важливим є правильна експлуатація силосної конструкції. До помилок експлуатації відносять такі.

3.1. Недотримання технології завантаження-розвантаження (асиметричний потік сипучого матеріалу). Завантаження і розвантаження – одні з найважливіших процесів в експлуатації силоса. Для

силосів, які мають декілька випускних воронок (наприклад, силоси із плоским дном для зберігання зерна), існують жорсткі вимоги щодо черговості випуску сипучого матеріалу. Розвантаження заповненого силоса в першу чергу повинне відбуватися через центральну воронку, і тільки після витікання з неї зерна можна відкривати бокові воронки, причому пристінні воронки – в останню чергу. Більшість аварій відбуваються через недотримання цих простих правил. Асиметричний потік зерна або несиметричне навантаження може викликати у силосі вм'ятину, вигин і навіть руйнування [7].

3.2. Неправильне використання. До помилок такого типу відносять зберігання в силосі непроектного матеріалу, переповнення силоса, зміну напрямку потоку і навантаження. Усе це може призвести до незапланованих наслідків, пошкодження та руйнування.

3.3. Непроєктні навантаження. Як приклад можна навести встановлення в процесі експлуатації додаткового обладнання, що спричиняє утворення зосереджених несиметричних навантажень.

3.4. Фізичний знос, корозія та ерозія елементів. Стіни силосів тоншають від корозії й ерозії та із часом гірше здатні сприймати прикладене навантаження, ніж коли були новими. Це являє собою чималу проблему при роботі з абразивними матеріалами чи використанні вуглецевої сталі в агресивних середовищах. Спіткати це може, наприклад, спеціальні старіючі сталі. Абразивний знос поверхневого шару повинен бути знятий, щоб не розповсюджувався глибше в матеріал і не послаблював його структуру [7].

Для захисту від корозії широкого використання набуло цинкове покриття елементів силоса. Його товщина варіюється залежно від виробника від 270 до 450 гр/м².

3.5. Відсутність регулярного технічного обслуговування. Технічне обслуговування силоса має забезпечуватися власником чи користувачем. До робіт з технічного обслуговування відносять регулярну профілактику: періодичні перевірки, очищення, ремонт стінок та облицювання, захист матеріалу, профілактичне обслуговування систем вентиляції (вентиляційних отворів на даху, живильників, воріт і т.п.).

3.6. Відсутність періодичного технічного огляду (обстеження) та профілактичних ремонтів, несвоєчасне реагування на пошкодження. Цей напрямок обслуговування включає в себе пошук ознак дефектів і пошкоджень, таких як деформації, нахили, тріщини та своєчасне реагування на них під час технічного огляду й періодичних обстежень.

4. Специфічні та інші причини

4.1. Вибух. Внутрішні вибухи й розриви в основному відбуваються саме в силосних та бункерних конструкціях, вони (вибухи) рідко зустрічаються в традиційних каркасних конструкціях. Існує декілька версій щодо того, що саме спричинює вибух. Теоретичні дослідження

поток тиску на силос припускають виникнення зосередженого тиску в обмеженій зоні стінки і подальший розрив циліндричної оболонки (рис. 2, д). Деякі силоси піддаються вибуху метану, що виникає від ферментації (бродиння) заготовленого корму (зерна). Також однією з причин вибуху є загорання пилу, яке може бути спровоковане зовнішньою іскрою [2, 7].

4.2. Природні катаклізми (землетрус, ураган, повінь) та ударні впливи. Якщо силосна конструкція проектується в сейсмічно небезпечній місцевості, вона повинна бути розрахована на сейсмічні навантаження. Наземний землетрус має три складові навантаження – у вертикальному та двох горизонтальних напрямках. Ефект вертикального сейсмічного навантаження на силоси порівняно важкої структури зазвичай невеликий, у той час як ефект від бічних навантажень може бути суттєвим, особливо на високі силоси, що містять важкий матеріал. Величина горизонтальних сейсмічних навантажень пропорційна вазі силоса.

Висновки:

1. Наведено узагальнену класифікацію причин аварій, пов'язаних із сталевими силосами.
2. Розглянуто помилки, допущені під час проектування, зведення та експлуатації силоса, а також специфічні причини аварій силосів.
3. Серед найпоширеніших помилок проектування розрізняють: неправильне призначення геометричних розмірів силоса, неповноту наявної інформації щодо завантаження і розвантаження силоса, типу матеріалів або сумішей, для зберігання котрих він призначений, неправильне визначення навантажень, невідповідність розрахункової моделі існуючій споруді.
4. Серед найпоширеніших помилок, допущених під час зведення силоса, розрізняють: несанкціоновані зміни проекту, низький рівень кваліфікації робітників, використання недопустимих матеріалів з метою здешевлення процесу будівництва.
5. Для безпечної і довгострокової експлуатації власник силоса має забезпечувати регулярні профілактичні роботи, зокрема періодичні перевірки, ремонт стінок та облицювання, захист матеріалу.
6. Дослідження причини аварій сталевих силосів і їх узагальнення дозволить установити й усунути найбільш небезпечні помилки, що дозволить підвищити надійність та довговічність таких конструкцій.

Література

1. Amit Bijon Dutta. *Study of Types of Failures in Silos*// GRA - Global research analysis. Nov 2013. ISSN No 2277 – 8160. – pp. 41 – 43.
2. Blight G.E. Marcel Dröttboom. *Violent Failure of a Grain Silo* / G.E. Blight, V. Hoogendijk // *Bulk Solids Handling*. May 2011.
3. Подгородецкий, О.А. *Актуальные вопросы обеспечения эксплуатационной надёжности силосов* / О.А. Подгородецкий // *Хранение и переработка зерна*. – 2011.
4. Стариков, М. *Хранение зерна. Что нужно знать про металлические силосы* / М. Стариков // *Зерно*. – 2011.

5. *Jim Durack. A challenge for designers of steel silos // Australian Bulk Handling Review. July /August 2010.*
6. *Об аварии силоса ООО «Комби С» / В.В. Ерастов, А.В. Ерастов, Н.М. Коешов, В.Ф. Артемьев // Мордовский государственный университет. – 2010.*
7. *Cause of Damage and Failures in Silo Structures/ Adem Dogangun; Zeki Karaca; Ahmet Durmus; and Halil Sezen, M.ASCE // Journal of performance of constructed facilities. – 2009.*
8. *Adam J. SADOWSKI, J. Michael ROTTER. Eccentric discharge buckling of a very slender silo// Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia. – 2009. –pp. 2557 – 2568.*
9. *John W. Carson, Tracy Holmes. Silo Failures: Why Do They Happen? // TASK Quarterly 7. – July 2003. – No 4. – Pp. 499 – 512.*
10. *Казакевич, М.И. Основные причины аварий жёстких стальных бункеров и низких силосов / М.И. Казакевич, Д.О. Банников // Металлические конструкции. – 2002. – №1. – С. 59 – 66.*
11. *John W. Carson. Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned // Jenike&Johanson Incorporated. – 2000.*
12. *Juan Ravenet. Silo problems // Bulk Solids Handling.– 1981. – №4. – Pp. 667 – 679.*
13. *Nar Sripadanna, P.E. Collapse and the Local Buckling of Structures // Grain Silo Collapse – Wind or Other Phenomenon.*

Надійшла до редакції 26.03.2014
©М.В. Бібік, В.М. Бібік, Р.М. Ульченко, І.О. Бібік