

УДК 624.014.2

doi:10.31650/2707-3068-2024-28-172-182

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТАЛЕВИХ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ**Пічугін С.Ф.**, д.т.н., професор,

pichugin.sf@gmail.com ORCID 0000-0001-8505-2130,

Оксененко К.О., аспірантка,

shvadchenkokate@gmail.com ORCID 0000-0002-5171-3583

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Анотація. У статті описано розроблену методику оцінювання надійності інноваційних металевих спірально-фальцевих силосів на основі аналізу резерву міцності з врахуванням складного напружено-деформованого стану. За цією методикою проведено оцінювання надійності силосу ємністю 1020 м³. Силосна конструкція завантажувалась різними сипучими матеріалами, статистичні характеристики яких було зібрано і узагальнено. Результати визначення основних значень параметрів оцінювання надійності силосу представлено у табличній формі. На основі отриманих даних побудовано графіки зміни напружень та характеристики безпеки в залежності від розкиду характеристик сипучого матеріалу. Обґрунтовано висновок про достатню надійність конструкцій металевих спірально-фальцевих силосів, розрахованих за діючими нормами.

Ключові слова: металевий силос, спірально-фальцевий силос, сипучий матеріал, оцінювання надійності, характеристика безпеки.

Вступ. Одним з важливих техніко-економічних параметрів будівельних конструкцій є їхня надійність. Відповідно до будівельних норм ДБН [1], надійність об'єкта визначається як властивість виконувати задані функції протягом розрахункового строку експлуатації, вона включає основні компоненти – безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, живучість. Для сталевих силосів найбільше значення має безвідмовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку. Загалом усі підходи до визначення надійності будівельних конструкцій можна умовно поділити на дві групи [2]: 1) метод часткових коефіцієнтів надійності (граничних станів) [3]; 2) ймовірнісний метод (метод на основі теорії надійності).

Сучасні норми проектування будівельних конструкцій враховують ймовірнісний характер навантажень та несучої здатності конструкцій тільки в частині обробки вихідних даних. Метод граничних станів, який закладений в нормах проектування, є напів-ймовірнісним, при цьому надійність конструкцій при проектуванні забезпечується за допомогою використання відповідних коефіцієнтів запасу: коефіцієнтів надійності за навантаженням та за матеріалом, коефіцієнту умов роботи, коефіцієнту надійності за призначенням. Деякі з цих коефіцієнтів не мають достатнього теоретичного та експериментального обґрунтування.

Розрахунок будівельних конструкцій, який відображає їх реальну поведінку при експлуатації, повинен базуватися на теорії надійності, заснованій на ймовірнісних методах. Це дозволить дати більш об'єктивну оцінку конструкцій стосовно їх придатності до експлуатації. Методи теорії надійності дають теоретичну основу для правильної організації збирання та обробки статистичних даних, які відносяться до впливів на споруду, характеристик матеріалів та конструкцій та інших розрахункових параметрів. Ці методи найбільш точно відображають ймовірнісну природу основних розрахункових величин та взаємозв'язок між зовнішніми впливами та міцністю конструкцій. Це обумовлено тим, що всі міцнісні, геометричні та деформаційні характеристики конструкцій, а також всі впливи на них є випадковими величинами або випадковими процесами.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Оцінюванням надійності силосних конструкцій займається ряд науковців [2-7]. У роботі Дітлевсена О. та ін. [4] йдеться про

використання даних щодо тиску, які були отримані в експериментах, для оцінки параметрів емпіричної стохастичної моделі навантаження силосу. Отримана модель навантаження силосу досліджується з точки зору її впливу на надійність конструкції. Голота М. та ін. [5] займаються геометричними недосконаlostями, але з огляду на їх вплив при вітровому навантаженні на силосну конструкцію. Лапко А. у дослідженні [6] вивчає температурний вплив на силосну конструкцію. Висновками його роботи є те, що теплові дії можуть мати значний вплив на надійність конструкції силосу, а в деяких випадках можуть призвести до серйозних пошкоджень конструкції, якщо розподіл температури в системі оцінений неправильно. Треба відзначити праці Махінько А.В., Махінько Н.О., присвячені надійності сталевих листових конструкцій [7-8]. Зокрема, у роботі [7] розрахунок надійності багатоболтових з'єднань металевих силосів показав, що при незначній кількості болтів «заміни» саме вони виступають основною причиною відмови з'єднання, проте при зростанні кількості непроєктних болтів механізм руйнування буде залежати від імовірного об'єднання навантаження і міцності.

Виділення не роз'язаних раніше частин загальної проблеми. Не дивлячись на наявність досліджень надійності металевих силосів, надійність саме спіраль-но-фальцевих силосів не досліджена.

Постановка завдання. Завданням цієї статті є розроблення і застосування методики оцінювання надійності металевих спіраль-но-фальцевих силосів.

Основний матеріал і результати. Конструктивні рішення оболонки силосів спіраль-но-фальцевого типу суттєво відрізняються від збірних металевих силосів із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях та зварних листових ємностей.

Конструкція спіраль-но-фальцевого силосу була розроблена у 1968 році німецьким вченим Ксавером Ліппом, який використовував спеціальне обладнання для обробки листового металу і застосував його для зведення спіраль-но-навивних силосів [9]. Корпус силосу являє собою систему спірального з'єднання сталевих стрічки шляхом подвійного вальцювання з одночасним формуванням фальцевого ребра замкнутого типу. Фальцевий замок розташований ззовні стінки силосу під незначним кутом до горизонтальної площини й утворює кільцеві ребра.

Розвиток застосування спіраль-но-фальцевих силосів стримується через відсутність експериментальних досліджень елементів цих сталевих листових конструкцій. Тому в лабораторії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» були проведені експериментальні дослідження елементів конструкції спіраль-но-фальцевих силосів [9,10]. Експериментальні дослідження підтвердили високу міцність та надійну роботу стінки спіраль-но-фальцевого силосу при експлуатаційних та підвищених навантаженнях.

Основне навантаження на силосну ємність – це випадковий тиск сипучого матеріалу. Імовірна природа тиску обумовлена статистичним розкидом характеристик сипучого матеріалу, що виявляється лабораторними випробуваннями. До числа таких характеристик відносять: питому вагу $\tilde{\gamma}$, кут внутрішнього тертя $\tilde{\lambda}$, коефіцієнт бокового тиску $\tilde{\varphi}$ і коефіцієнт тертя об стіну $\tilde{\mu}$. Процедура кількісної оцінки статистичних характеристик сипучого матеріалу наведена в ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [11]. У табл. 1 наведені статистичні характеристики деяких сільськогосподарських культур. Верхні $\gamma_b, \lambda_b, \mu_b$ та нижні $\gamma_t, \lambda_t, \mu_t$ межі, математичні очікування $\bar{\gamma}, \bar{\lambda}, \bar{\mu}$ та коефіцієнти варіації $V_\gamma, V_\lambda, V_\mu$ різних сипучих матеріалів розраховувались відповідно до [11].

Таблиця 1 – Статистичні характеристики сипучих матеріалів

Най-ня	Питома вага γ , кН/м ³				Коефіцієнт бічного тиску λ				Коефіцієнт тертя об стіну μ			
	γ_b	γ_t	$\bar{\gamma}$	V_γ	λ_b	λ_t	$\bar{\lambda}$	V_λ	μ_b	μ_t	$\bar{\mu}$	V_μ
Пшениця	7,5	9,0	8,25	0,071	0,49	0,6	0,54	0,08	0,33	0,44	0,39	0,11
Кукурудза	7,0	8,0	7,5	0,052	0,46	0,6	0,54	0,1	0,29	0,45	0,37	0,17
Ячмінь	7,0	8,0	7,5	0,052	0,53	0,65	0,59	0,08	0,28	0,38	0,34	0,11
Соя	7,0	8,0	7,5	0,052	0,57	0,7	0,63	0,08	0,33	0,44	0,39	0,11
Примітки: коефіцієнт тертя об стіну визначався для типу стіни D2												

Наведених статистичних характеристик достатньо для одержання оцінки надійності конструкції сталевого спірального-фальцевого силосу. Оцінювання надійності металевого спірального-фальцевого силосу будемо проводити на основі аналізу резерву міцності $\tilde{Y}$ у техніці випадкових величин з урахуванням напружено-деформованого стану наступним чином [12]:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i \geq 0. \quad (1)$$

Випадковими величинами у поставленій задачі оцінювання надійності є: $\tilde{\sigma}_y$ – випадкова величина межі текучості сталі, $\tilde{\sigma}_i$ – випадкова величина фібрових напружень в стінці силосу.

Фіброві напруження визначаються за формулою:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_u^2(\xi) - \tilde{\sigma}_u(\xi)\tilde{\sigma}_k(\xi) + \tilde{\sigma}_k^2(\xi)}, \quad (2)$$

де $\tilde{\sigma}_u(\xi)$, $\tilde{\sigma}_k(\xi)$ – відповідно випадкові величини фібрових поздовжніх та кільцевих напружень в середині обичайки, які визначаються за формулами:

$$\tilde{\sigma}_u(\xi) = \pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t}, \quad \tilde{\sigma}_k(\xi) = \tilde{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\tilde{N}_1}{t}, \quad (3)$$

де $\tilde{\omega}(\xi)$, $\tilde{M}(\xi)$ – відповідно випадкові величини прогину та поздовжнього згинаючого моменту в середині обичайки, $\tilde{N}_1$ – випадкова величина поздовжніх зусиль, E – модуль пружності матеріалу оболонки, ν – коефіцієнт Пуассона, t – товщина стінки.

Випадкові величини прогину та поздовжнього згинаючого моменту в середині обичайки визначаються за формулами:

$$\tilde{\omega}(\xi) = \frac{(\tilde{P} + \nu \tilde{N}_1 / r - e_p \tilde{P}_1) r^2}{Et} \cdot \left[1 + \frac{2\beta n_3(\xi)}{\frac{t}{A} n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)} \right], \quad (4)$$

$$\tilde{M}(\xi) = -\frac{(\tilde{P} + \nu \tilde{N}_1 / r - e_p \tilde{P}_1)}{2\beta} \cdot \frac{n_4(\xi)}{\frac{t}{A} n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)}, \quad (5)$$

де A – площа поперечного перерізу шпангоута (фальцевого ребра), e_p – відстань від лінії прикладання дотичних зусиль до середньої поверхні оболонки, r – радіус силосу.

Випадкова величина поздовжніх зусиль визначається за формулою відповідно до ДБН В2.2-8-98 [13]: $\tilde{N}_1 = \rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G$.

Горизонтальний та вертикальний тиск зерна визначаються виразами:

$$\tilde{P} = \sum \tilde{P}_h = \tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}), \quad \tilde{P}_1 = \tilde{P}_f = \tilde{\mu} \tilde{P}_h$$

де $\tilde{P}_h = \frac{\tilde{\gamma} \rho}{\tilde{\mu}} (1 - e^{-\tilde{\lambda} \tilde{\mu} z / \rho})$ – рівномірно розподілений по периметру випадковий горизонтальний

тиск сипучих матеріалів на стіні силосів на глибині z (м) від верху засипу, a_1 – коефіцієнт місцевого підвищення тиску, що приймається згідно з вимогами 4.11. в залежності від відношення h/d , K_{t1} – коефіцієнт, що враховує матеріал стінки та приймається згідно з 4.18. [13].

Оскільки вираз $e_p \tilde{P}$ враховує початкові нерівності оболонки, вважаємо його незначним та не враховуємо в розрахунках.

Невідомі $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, \beta$ визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} n_1(\xi) &= V_2(\xi) \cdot V_3(\xi) - V_1(\xi) \cdot V_4(\xi), \\ n_2(\xi) &= V_2^2(\xi) + 4V_4^2(\xi), \\ n_3(\xi) &= V_1(\xi) \cdot V_2(\xi) + 4V_3(\xi) \cdot V_4(\xi), \\ n_4(\xi) &= V_2(\xi) n_2(\xi) - V_1(\xi) n_1(\xi) - V_3(\xi) n_3(\xi), \\ n_5(\xi) &= n_1(\xi) V_3(\xi) - n_2(\xi) V_4(\xi) - \frac{1}{4} n_3(\xi) V_1(\xi), \\ \beta &= 4 \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 t^2}}, \end{aligned}$$

де $V_1(\xi_i), V_2(\xi_i), V_3(\xi_i), V_4(\xi_i)$ – фундаментальні функції Крилова О.М.

Оскільки вираз $e_p \tilde{P}$ враховує початкові нерівності оболонки, вважаємо його незначним та не враховуємо в розрахунках.

Функція резерву міцності для сталевго силосу має вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(\tilde{\sigma}_y, \tilde{\gamma}, \tilde{\mu}, \tilde{\lambda}) &= \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i = \\ &= \tilde{\sigma}_y - \sqrt{\left[\pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t} \right]^2 - \left[\pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t} \right] \cdot \left[\tilde{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\tilde{N}_1}{t} \right]} \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Вважаючи функцію резерву міцності лінійною, одержуємо вираз для її математичного очікування:

$$\begin{aligned}\bar{Y} &= \bar{R} - \bar{S} = \bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_y - \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2} = \\ &= \bar{\sigma}_y - \sqrt{\left[\pm \frac{6M(\xi)}{t^2} - \frac{N_1}{t} \right]^2 - \left[\pm \frac{6M(\xi)}{t^2} - \frac{N_1}{t} \right] \cdot \left[\bar{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{N_1}{t} \right] + \left[\bar{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{N_1}{t} \right]^2} \geq 0.\end{aligned}\quad (7)$$

Стандарт резерву міцності визначається відповідно як:

$$\hat{Y} = \sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}, \quad (8)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{dY}{d\sigma_y} \Big|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y}, \quad A_2 = \frac{dY}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}}, \quad A_3 = \frac{dY}{d\mu} \Big|_{\mu = \bar{\mu}}, \quad A_4 = \frac{dY}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}}.$$

Отримуємо:

$$A_1 = \frac{dY}{d\sigma_y} \Big|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y} = 1, \quad (9)$$

$$\begin{aligned}A_2 &= \frac{dY}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2}} \cdot \\ &\cdot 2 \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \left[-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{n1}) + \frac{\nu(\rho z - \rho B/\lambda)}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho z - \frac{\rho B}{\lambda}}{t} \right] - \\ &- \left\langle \left[\bar{\sigma}_u \cdot \left(-\frac{\nu(\rho z - \rho B/\lambda)}{t} + \frac{1}{t} \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{n1}) + \frac{\nu(\rho z - \rho B/\lambda)}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right) \right] \right\rangle + \\ &+ \left\langle \left[\bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{n1}) + \frac{\nu(\rho z - \rho B/\lambda)}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho z - \frac{\rho B}{\lambda}}{t} \right) \right] \right\rangle + \\ &+ 2 \cdot \bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{\nu(\rho z - \rho B/\lambda)}{t} + \frac{1}{t} \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{n1}) + \frac{\nu(\rho z - \rho B/\lambda)}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right)\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}
A_3 = \frac{dY}{d\mu} \Big|_{\mu = \bar{\mu}} &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2}} \cdot \\
&\cdot 2 \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \left[-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot F_2 \right] + \frac{\rho C}{\lambda t} \right] - \\
&- \left\langle \left[\bar{\sigma}_u \cdot \left(\frac{\nu \rho C}{\lambda t} + \frac{1}{t} \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right) \right] \right. \\
&\left. + \left[\bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot F_2 \right] + \frac{\rho C}{\lambda t} \right) \right] \right\rangle + \\
&+ 2 \cdot \bar{\sigma}_k \cdot \left(\frac{\nu \rho C}{\lambda t} + \frac{1}{t} \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right)
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
A_4 = \frac{dY}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}} &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2}} \cdot \\
&\cdot 2 \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \left[-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho E}{t} \right] - \\
&- \left\langle \left[\bar{\sigma}_u \cdot \left(-\frac{\nu E}{t} + \frac{1}{t} \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right) \right] \right. \\
&\left. + \left[\bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho E}{t} \right) \right] \right\rangle + \\
&+ 2 \cdot \bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{\nu E}{t} + \frac{1}{t} \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right)
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\text{де } F_1 = 1 + \frac{2\beta n_5(\xi)}{t n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)}; \quad F_2 = \frac{n_4(\bar{\xi})}{t n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2} n_3(\bar{\xi})}; \quad B = \frac{dP_h}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \left(\frac{\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right);$$

$$C = \frac{dP_h}{d\mu} \Big|_{\mu = \bar{\mu}} = \left(-\frac{\bar{\gamma} \rho}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \bar{\lambda} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right); \quad D = \frac{dP_h}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}} = \bar{\gamma} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)};$$

$$E = \frac{dN_z}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}} = - \frac{\rho \left(\frac{\bar{\gamma}\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot e^{\left(-\frac{\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right)}{\lambda^2} - \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot z \cdot e^{\left(-\frac{\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\lambda}$$

Характеристика безпеки силосу дорівнює:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}}. \quad (13)$$

На основі одержаних формул були проведені розрахунки надійності спірально-фальцевого силосу. Для розрахунків була прийнята реальна силосна конструкція з наступними вихідними даними: h – висота корпусу 20м, d – діаметр силосу 8м, t – товщина стінки нижніх ярусів 0,004м, сталь класу DX51D+Z140 – математичне очікування межі текучості $\bar{R} = 352,5 \text{ МПа}$, коефіцієнт варіації $V = 0,083$. В таблиці 2 наведені результати розрахунку оцінювання надійності силосу на основі аналізу резерву міцності з урахуванням складного напружено-деформованого стану. Силосна конструкція завантажувалась різними сипучими матеріалами, характеристики матеріалів взяті з табл. 1.

Таблиця 2 – Результати розрахунку надійності металевого спірально-фальцевого силосу з урахуванням напружено-деформованого стану

Параметри розрахунку надійності	Кукурудза	Соя	Пшениця	Ячмінь
$\bar{\sigma}_y$, МПа	352,0	352,0	352,0	352,0
$\bar{\sigma}_k$, МПа	67,47	67,41	71,35	73,78
$\bar{\sigma}_u$, МПа	-121,00	-126,76	-131,74	-127,03
$\bar{\sigma}_i$, МПа	165,4	170,75	178,45	175,94
$\bar{Y}$, МПа	186,6	181,25	173,54	176,06
A_1 , МПа	1	1	1	1
A_2 , м	17 973,36	18 270,3	17 470,04	19 387,00
A_3 , МПа	-150,6	-169,88	-155,72	-186,4
A_4 , МПа	-92,02	-68,15	-100,33	-77,69
$A_1^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2$, МПа	853 574,66	853 574,66	853 574,66	853 574,66
$A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$, МПа	49 134,66	50 771,43	104 715,83	57 170,32
$A_3^2 \cdot \hat{\mu}^2$, МПа	89 728,86	53 111,57	44 629,13	48 601,82
$A_4^2 \cdot \hat{\lambda}^2$, МПа	24 693,54	11 797,84	18 784,29	13 445,70
$\hat{Y}$, МПа	31,9	31,13	31,96	31,19
β	5,85	5,82	5,43	5,64
$P(\beta)$	2,57x10⁻⁹	3,02x10⁻⁹	2,9x10⁻⁸	8,82x10⁻⁹

Відповідно до ДБН В.1.2-14:2018, табл. Б.2 рекомендована величина характеристики безпеки (дальності відмови) β для розрахованого силосу (клас наслідків СС2, категорія відповідальності конструкції А, усталена розрахункова ситуація) повинна відповідати значенню $\beta=4,27$, таким чином, за результатами проведених розрахунків можна стверджувати, що надійність розглянутої силосної ємності забезпечена.

На рисунку 1 можна спостерігати графіки залежностей напружень та характеристики безпеки в залежності від розкиду характеристик сипучого, в якості якого для прикладу використано зерно пшениці.

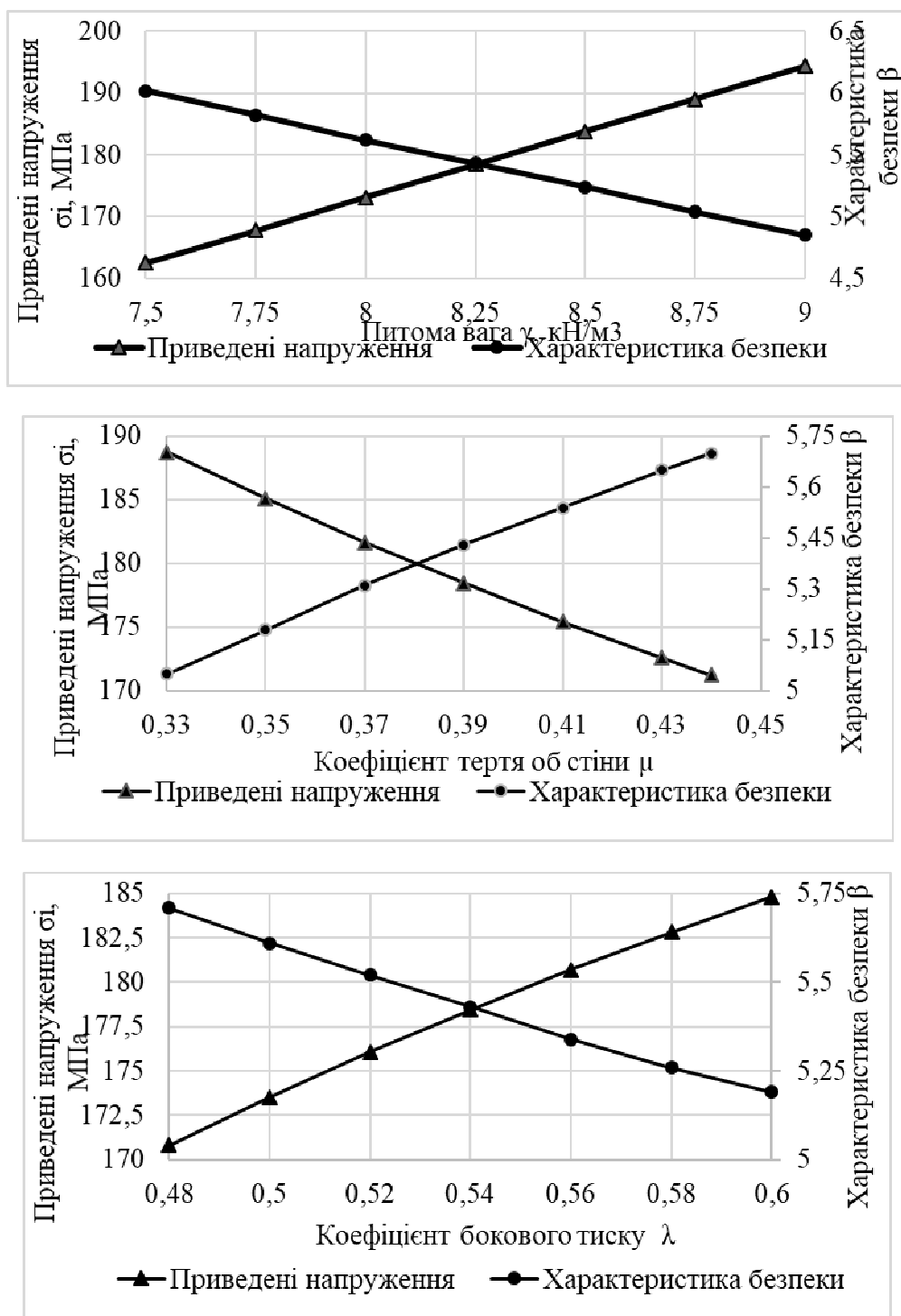


Рис. 1. Графіки напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик сипучого (пшениці)

Графіки (рис.1) показують, що напруження у стінці силосу зростають при збільшенні питомої ваги та коефіцієнту бокового тиску та зменшення напружень при збільшенні коефіцієнта тертя об стіни. На графіках спостерігається лінійна тенденція зменшення характеристики безпеки при збільшенні напружень в стінці силосу.

Висновки. Описано розроблену методику оцінювання надійності металевих спіральнo-фальцевих силосів на основі аналізу резерву міцності з врахуванням складного напружено-деформованого стану. Проведено оцінювання надійності силосу за розробленою методикою. За результатами розрахунків: представлено у табличній формі значення основних параметрів розрахунку надійності; побудовано графіки напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик сипучого матеріалу; одержано чисельні оцінки надійності спіральнo-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами. Обчислені результати підтвердили високу надійність металевих спіральнo-фальцевих силосів.

Література

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель та споруд. К:Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. 30 с.
2. Casciati F., G. Sacchi. On the reliability theory of the structures. 15th Polish Solid Mechanics Conference. Zakopane, 1973. P. 291-298.
3. Пічугін С.Ф. Етапи розвитку загальної методики розрахунку будівельних конструкцій. Полтава: АСМІ, 2024. – 400 с.
4. Ditlevsen, O., Christensen, C., & Randrup-Thomsen, S. Empirical stochastic silo load model. III: Reliability applications. Journal of engineering mechanics. 1995. Vol. 121, No. 9. P. 987-993. DOI: 10.5281/zenodo.556256
5. Gołota M., Winkelmann K., Górski J., Mikulski T. Reliability of a silo structure with initial geometric imperfections loaded with pressure below atmospheric and wind. Computer Methods in Mechanics. 2011. P. 1-6.
6. Lapko, A. Thermal fields in grain during storage-their sources and effects on silo structure reliability. International agrophysics. 2005. Vol. 19, No. 2. P. 141 – 146.
7. Махінько А. В., Махінько Н. О. Практичні підходи до розрахунку надійності багатоболтовах з'єднань листів корпусу силосних ємностей. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2020. Вип. № 24. С. 91 – 97.
8. Махінько А., Махінько Н., Воронцов О. Надійність та безпечна експлуатація ємностей для зберігання зерна. Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022): зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнар. наук.-техн. конф., м. Полтава, 20–22 черв. 2022 р. м. Полтава, 2022. С. 75–77.
9. Пічугін С., Дмитренко А., Оксененко К., Експериментальне дослідження елементів конструкції металевих спіральнo-фальцевих силосів. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2022. Вип. 26. С. 135-144. doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144.
10. Пічугін С., Шульгін В., Оксененко К. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану стінки сталевого спіральнo-фальцевого силосу. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2023. Вип. 27. С. 94-103. doi:10.31650/2707-3068-2023-27-94-103.
11. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари. К. : Мінрегіонбуд, 2012. 180 с.
12. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій. Полтава. ТОВ «АСМІ». 2016. 520 с.

13. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберігання та переробці зерна. К.: Держбуд України. 1998. 41 с.

References

- [1] DBN V.1.2-14:2018. The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures. K: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. 2018. 30 p.
- [2] Casciati F., G. Sacchi. On the reliability theory of the structures. 15th Polish Solid Mechanics Conference. Zakopane, 1973. P. 291-298.
- [3] Pichugin S.F. Development Stages of General Methodology for Building Structure Calculation. Poltava. LLC ASMI. 2024. 400 p.
- [4] Ditlevsen, O., Christensen, C., & Randrup-Thomsen, S. Empirical stochastic silo load model. III: Reliability applications. Journal of engineering mechanics. 1995. Vol. 121, No. 9. P. 987-993. DOI: 10.5281/zenodo.556256
- [5] Gołota M., Winkelmann K., Górski J., Mikulski T. Reliability of a silo structure with initial geometric imperfections loaded with pressure below atmospheric and wind. Computer Methods in Mechanics. 2011. P. 1-6.
- [6] Lapko, A. Thermal fields in grain during storage-their sources and effects on silo structure reliability. International agrophysics. 2005. Vol. 19, No. 2. P. 141 – 146.
- [7] Makhinko A. V., Makhinko N. O. Practical approaches to calculating the reliability of multi-bolted joints of sheets of the silo body. Modern building structures of metal and wood. 2020. Issue No. 24. C. 91 - 97.
- [8] Makhinko A., Makhinko N., Vorontsov O. Reliability and safe operation of grain storage tanks. Complex composite structures of buildings and structures under martial law (CSCS-2022): a collection of scientific papers based on the materials of the XIV International Scientific and Technical Conference, Poltava, June 20-22. 2022. Poltava, 2022. C. 75-77.
- [9] Pichugin S.F., Dmytrenko A.O., Oksenenko K.O. Experimental study of structure elements of metal spiral-fold silos. Modern building structures made of metal and wood. 2022. Issue 26. P. 135-144. doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144.
- [10] Pichugin S.F., Shulhin V.V., Oksenenko K.O. Experimental study of wall stress-strain state of a steel spiral-fold silos. Modern building structures made of metal and wood. 2023. Issue 27. P. 94-103. doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144.
- [11] DSTU-N B EN 1991-4: 2012 Eurocode 1: Actions on structures – Part 4: Silos and tanks. K.: Minregionbud, 2012. 180 с.
- [12] Pichugin S.F. Reliability calculation of building structures. Poltava. LLC ASMI. 2016. 520 p.
- [13] DBN V.2.2-8-98. Enterprises, buildings and structures for storage and processing of grain. Kyiv: Derzhbud. 1998. 41 с.

THE RELIABILITY ANALYSIS OF METAL SPIRAL-FOLD SILOS

Pichugin S., DSc, Professor

pichugin.sf@gmail.com ORCID 0000-0001-8505-2130,

Oksenenko K., graduate student,

shvadchenkokate@gmail.com ORCID 0000-0002-5171-3583

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

Annotation. The term «object reliability» is given in accordance with the current standards. The two main methods for determining the reliability of building structures are presented. Specific design features of spiral-fold silos and a brief history of their development are described. The results of experimental studies of spiral-fold silo structures are presented. The statistical characteristics of bulk materials are presented. A methodology for reliability analysis of metal spiral-fold silos based on the analysis of the strength reserve with consideration of the complex stress-strain state has been developed. This methodology was used to analyze the reliability of a silo with a capacity of 1020 m³. The silo structure was loaded with various bulk materials, the statistical characteristics of which were analyzed. The results of determining the main values of the parameters for the reliability analysis of the silo are presented in tabular form. In accordance with DBN B.1.2-14:2018, Table B.2, the recommended value of the safety characteristic (failure rate) β for the calculated silo (consequence class CC2, structural responsibility category A) should correspond to the value $\beta=4,27$, thus, the results of the calculations confirmed that the reliability of the considered silo is ensured. Based on the results, the plots of stress and safety characteristics depending on the variation of characteristics of wheat were constructed. The graphs showed that the stresses in the silo wall increase with an increase in the density and lateral pressure coefficient and decrease with an increase in the coefficient of friction against the walls. The graphs show a linear tendency to decrease the safety characteristic with increasing stresses in the silo wall. The general conclusion about the sufficient reliability of the structures of metal spiral-fold silos that were calculated according to current standards is proved.

Keywords: metal silo, spiral-fold silo, bulk material, reliability analysis, safety characteristic.