

УДК 624.954

*Пічугін Сергій, д.т.н., професор*

*ORCID: 0000-0001-8505-2130, e-mail pichugin.sf@gmail.com*

*Оксененко Катерина, аспірант*

*ORCID: 0000-0002-5171-3583, e-mail shvadchenkokate@gmail.com*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

## РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ СИЛОСІВ

**Анотація.** Наведені переваги металевих силосів у порівнянні з залізобетонними. Розглянуто види силосів в залежності від конструкції стінки. Перераховані основні навантаження та впливи, які приймаються при розрахунку силосів. Проаналізовані нормативні документи, що регламентують питання проектування сталевих силосних ємностей на території України. Зроблено порівняння розрахунків горизонтальних та вертикальних тисків від дії сипучих матеріалів на стіни силосів за двома нормативними документами. Розгорнуто функцію резерву міцності для сталевих силосів.

**Ключові слова:** металевий силос, горизонтальний тиск сипучого матеріалу, вертикальний тиск від сил тертя сипучого, міцність конструкції силосу, надійність силосу.

*Pichugin Sergiy, Ph.D., professor,*

*ORCID: 0000-8505-2130, e-mail: pichugin.sf@gmail.com*

*Oksenenko Kateryna, graduate student*

*ORCID: 0000-0002-5171-3583, e-mail shvadchenkokate@gmail.com*

*National University " Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic "*

## CALCULATION OF STRENGTH AND RELIABILITY OF STEEL SILOS

**Abstract.** The advantages of metal silos in comparison with reinforced concrete are given. Types of silos depending on a wall design are considered. The main loads and influences which are accepted at calculation of silos are listed. The standard documents which regulates the design of steel silo tanks on the territory of Ukraine are analyzed. The calculations of horizontal and vertical pressures caused by the action of bulk materials on the walls of the silos were compared according to two normative documents. The strength reserve function for steel silo is given.

**Keywords:** metal silo, horizontal pressure due to bulk material, vertical pressure (due to friction forces), strength of the silo structure, silo reliability.

Довгий час для зберігання матеріалу використовували в основному залізобетонні конструкції. До них відносяться бункери та силоси, які використовуються в усіх галузях промисловості, сільськогосподарської та транспортної сфери. Металеві силоси для зберігання сипучих матеріалів почали використовувати відносно недавно, і вони вже підтвердили свою здатність задовольняти всі вимоги, які висуваються до складів такого типу. В порівнянні з залізобетонними силосами, вони мають такі переваги: можливість заводського виготовлення конструкцій; менша маса; простота транспортування; швидкість проведення монтажних робіт; менша вартість. На даний час металеві ємнісні конструкції для зберігання різних видів сипучих матеріалів є одними з найбільш розповсюджених типів будівельних конструкцій. Це підтверджує їх конструктивна різноманітність, що включає суцільні зварні, збірні та спіральні силоси. Одним з найбільш прогресивних типів тонкостінних просторових конструкцій є високо індустріальні та економічні металеві силоси

спірально-фальцевого типу. Циліндричний корпус такого силосу являє собою систему спірального з'єднання сталеві стрічки шляхом подвійного вальцювання [1].

Основними навантаженнями та впливами на силос є: горизонтальні та вертикальні (за рахунок тертя) навантаження від тиску сипких матеріалів з врахуванням центрального вивантаження силосу; власна вага конструкції; навантаження від снігу на покриття; вплив температури; навантаження від термопідвісок, навантаження від тиску вітру (для незаповненого силосу). Перераховані навантаження, за виключенням власної ваги, відносяться до тимчасових (довготривалим, та короткочасним) [2].

Основним нормативним документом в Україні, що регламентує питання проектування металевих конструкцій, в тому числі тонкостінних оболонок є ДБН В.2.6-198:2014 [3]. Цей документ містить загальні рекомендації щодо оцінки міцності та стійкості оболонок кручення. Іншими нормативними документами в Україні є ДБН В.2.2-8-98 [4], який регламентує питання проектування силосних ємностей, класифікацію їх конструкцій, визначення навантажень та зусиль в елементах, та ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [5], який визначає лише дії на ці конструкції. Ці два документи регламентують правила розрахунку навантажень від сипких матеріалів, які виникають в середині ємностей.

Для порівняння цих будівельних норм були визначені нормативні горизонтальні та вертикальні (за рахунок тертя) навантаження від тиску сипких матеріалів, що діють на стіни силосної ємності за обома стандартами. Для розрахунку був вибраний силос з наступними геометричними параметрами: діаметр 6, висота 15 м. Розміри силосу були вибрані з міркувань зведення розрахунків горизонтальних та вертикальних тисків за однією формулою.

В результаті порівняння двох нормативних документів, було виявлено, що розрахунок горизонтальних та вертикальних тисків на стіни силосів за ДБН В.2.2-8-98 має такі відмінності від ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012: не враховуються форми потоку в процесі вивантаження, не виконується поділ силосних конструкцій за гнучкістю, а отже розрахунок горизонтального та вертикального тисків для всіх типів конструкцій виконується за однією формулою. Також не враховується статистичний розкид характеристик сипких матеріалів, характеристичне значення питомої ваги для всіх зернових культур прийняте  $\gamma = 8 \text{ kH} / \text{m}^3$ , кут природного укосу та кут внутрішнього тертя відповідають одному значенню  $\varphi = 25^\circ$ . Також варто відзначити, що в ДБН В.2.2-8-98 наведений в таб. А.1 коефіцієнт тертя об стіни як для металевих, так і для бетонних силосів відповідає значенню  $\mu = 0,4$ .

Аналіз отриманих порівняльних розрахунків, з врахуванням всіх відмінностей, показав, що саме розкид характеристик сипких матеріалів значно впливає на величини горизонтального та вертикального тисків, які виникають в гнучкому бункері.

Одним з важливих техніко-економічних параметрів конструкцій є їхня надійність. Треба відмітити, що на сьогодні розрахунок надійності конструкцій сталевих силосів залишається актуальною областю досліджень. Враховуючи отримані результати розрахунків тисків сипкого матеріалу на ємність, проведено оцінювання надійності силосів на основі аналізу резерву міцності. В цьому випадку, основним навантаженням для силосу є випадковий тиск сипкого матеріалу. У роботі розглядалася осесиметрична задача, для силосу, який знаходиться в безмоментному напруженому стані, тому дотичні напруження не враховувалися. Імовірнісна природа тиску обумовлена статистичним розкидом характеристик сипкого матеріалу при лабораторних випробувань. До числа таких характеристик відносять: питому вагу  $\tilde{\gamma}$ , кут внутрішнього тертя  $\tilde{\varphi}$ , коефіцієнт бокового тиску  $\tilde{\lambda}$  і коефіцієнт тертя об стіну  $\tilde{\mu}$ .

Функція резерву міцності для сталевих силосів має вигляд

$$\tilde{Y}(\tilde{\sigma}_y, \tilde{\gamma}, \tilde{\mu}, \tilde{\lambda}) = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i \geq 0; \quad \tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_x^2 - \tilde{\sigma}_x \tilde{\sigma}_z + \tilde{\sigma}_z^2}. \quad (1)$$

Випадковими величинами у поставленій задачі оцінювання надійності є:  $\tilde{\sigma}_y$  – випадкова величина межі текучості сталі,  $\tilde{\sigma}_i$  – функція випадкової величини приведених напружень від зовнішнього навантаження і впливів об’ємного напружено-деформованого стану силосу,  $\tilde{\sigma}_x$  – випадкова величина кільцевих напружень,  $\tilde{\sigma}_z$  – випадкова величина повздовжніх напружень,

**Висновки:** Наведені переваги металевих силосів у порівнянні з залізобетонними. Розглянуто види силосів в залежності від конструкції стінки. Проаналізовані нормативні документи, що регламентують питання проектування сталевих силосних ємностей на території України. В результаті порівняння двох нормативних документів, було виявлено, що розрахунок горизонтальних та вертикальних тисків на стіни силосів за ДБН В.2.2-8-98 має ряд відмінностей від ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. На основі формул (1) були проведені розрахунки надійності силосів. Вони показали, що сталеві силоси, розраховані за діючими нормами, мають достатню надійність

#### Література

1. Pichugin S., Oksenenko K. (2019). *Comparative analysis of design solutions of metal silos*// *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2019. 53 (2). p.53. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890>.
2. S. Pichugin, K Oksenenko, M. Hajiyeu, M. Sulewska, *Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. ICSF 2021 Second international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters*
3. *Сталеві конструкції. Норми проектування: ДБН В.2.6-198:2014 – Видання офіційне.* – Київ, Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
4. *Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98.* – Офіц. видання. – К.: Держбуд України, 1998. – 41 с.
5. *ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Єврокод 1. Дії на конструкції. Ч. 4. Бункери і резервуари.* – К.: Мінбуд України, 2012. – 168 с.