

УДК 624.042

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.59.919

РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕХІДНОЇ ЗОНИ СИЛОСІВ ІЗ КОНІЧНИМ ДНИЩЕМ ВІДПОВІДНО ДО НОРМ EUROCODE

МАХІНЬКО А. В.¹, *докт. техн. наук, с.н.с.*,
МАХІНЬКО Н. О.^{2*}, *докт. техн. наук, доц.*

¹ Інжинірингова фірма «ЕТУАЛЬ», вул. Бортницька, 1, Петропавлівське, Бориспільський р-н, Київська обл., 08316, Україна, тел. +38 (050) 480-46-31, e-mail: pasargada1981@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9147-7087

^{2*} Кафедра комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів, Національний авіаційний університет, пр. Гузара Любомира, 1, 03058, Київ, Україна, тел. +38 (050) 304-50-72, e-mail: nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

Анотація. Постановка проблеми. В умовах сьогодення продовольча безпека світу – це одна з головних проблем політичної, економічної та наукової спільноти, й нещодавня криза з експортом українського зерна тільки інтенсифікує актуальність проблеми. Невід'ємною частиною цієї проблеми стало створення сучасних надійних та безпечних силосів для зберігання зерна. **Мета.** Ця стаття, залишаючи поза увагою фінансову меркантильність окремих виробників силосів, ставить собі за мету дати роз'яснення вітчизняним проектувальникам низки положень нового ДБН В.2.6-221:2021, пов'язаних із проектуванням силосів із конічним днищем. Зокрема, проектування одного з найвідповідальніших вузлових з'єднань у місці переходу циліндричної частини силосної ємності у конічну розвантажувальну воронку. **Методологія.** Для цього використовується загальна ідеологія та методологія методу граничних станів, реалізованих у нормах проектування Eurocode через систему часткових коефіцієнтів надійності, а також класичні методи будівельної механіки, які не знаходили до цього часу свого логічного відображення у системі будівельного нормування сучасної України. **Результати.** Як результат – чіткі рекомендації із проектування перехідного з'єднання силосів із конічним днищем відповідно до загальноєвропейських норм Eurocode та ДБН В.2.6-221:2021 та роз'яснення «особливих» моментів, які не висвітлені належним чином в обох нормативних документах. **Висновки.** Наведені в статті рекомендації та роз'яснення, по-перше, пришвидшують упровадження в інженерну практику нового ДБН В.2.6-221:2021, гармонізованого із системою стандартизації Eurocode, по-друге, дозволяють досягти більш надійних та безпечних проектних рішень у галузі силособудування, по-третє, нівелюють хронічний проектний страх сучасного українського інженера перед європейською школою будівельного нормотворення.

Ключові слова: сталевий силос; конічне днище; перехідне з'єднання; граничний стан пластичності; втрата стійкості при боковому випучуванні; міцність при локальному згині; ефективний переріз перехідного з'єднання

DESIGN OF TRANSITION JUNCTIONS OF SILOS' CONICAL HOPPERS ACCORDING TO EUROPEAN STANDARD EUROCODE

МАХІНЬКО А.В.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
МАХІНЬКО Н.О.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ ETUAL LLC, 1, Bortnytska St., Petropavlivske, Boryspil district, Kyiv region, 08316, Ukraine, tel. +38 (050) 480-46-31, e-mail: pasargada1981@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9147-7087

^{2*} Computer Technologies of Airport Construction and Reconstruction Department, National Aviation University, 1, Liubomyra Huzara Ave., Kyiv, 03058, Ukraine, tel. +38 (050) 304-50-72, e-mail: nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

Abstract. Problem statement. Today, the food security of the world is one of the main issues for the political, economic and scientific community, and the recent crisis with the export of Ukrainian grain only intensifies the urgency of the problem. The important part of this issue is creation of reliable and safe grain storage silos. An analysis of recent accidents in silos, especially with conical hoppers, revealed a range of imperfections in outdated regulatory practices that Ukraine inherited from the Soviet building norm system. A limited list of agricultural crops, ignoring the statistical spread of their physical and mechanical characteristics, not differentiating between the stress-strain state for filling and discharge silos, the absolute absence of guidelines and recommendations for the design of principal connections - this is

a far from complete list of shortcomings and omissions of outdated Soviet standards. With the entry into force of the new Ukrainian norm DBN V.2.6-221:2021 “Designs of steel silos with a corrugated wall for grain”, the situation should have changed. Firstly, the new standards take into account the world experience in design, construction and fabrication of silos, and secondly, they have a direct and legitimate reference to the necessary standards of the Eurocode system, in which a modern engineer can find answers to a wide range of practical questions. Unfortunately, the introduction of this, without exaggeration, modern and extremely important standard into construction practice is constantly ignored. On the one hand, this is due to the unwillingness of Ukrainian manufacturers to switch to new European and more rigid requirements for reliability and safety, on the other hand, the fear of Ukrainian engineers in front of the complex and extensive Eurocode standardization system. **The purpose of the article** (ignoring the financial commercialism of individual silo manufacturers) is explain to domestic designers a few provisions of the new DBN V.2.6-221:2021 related to the design of silos with a conical hopper. In particular, the design of one of the very important units at the point of transition of the cylindrical part of the silo to the conical hopper. **Methodology.** For this, the general ideology and methodology of the limit state method, implemented in the Eurocode standards through the system of partial reliability factors, as well as classical methods of structural mechanics, which are still not reflected in the system of building regulation of modern Ukraine, are used. **Results.** As a result, clear recommendations for the design of the transition junction of silos with a conical hopper in accordance with Eurocode and DBN V.2.6-221:2021, as well as clarification of “special” points that are not properly covered in both regulations. **Conclusion.** The recommendations and explanations given in the article, firstly, accelerate the introduction of the new DBN V.2.6-221:2021 into engineering practice, which is harmonized with the Eurocode system, and secondly, allow to achieve more reliable and safe design solutions in the field of silos fabrication, in thirdly, they deactivate the chronic design fear of Ukrainian engineer before the European school of building standards.

Keywords: *steel silo; conical hoppers; transition junctions; plastic limit state; out-of-plane buckling; local flexure at the transition; effective section of the transition junction*

Постановка проблеми. Аналіз останніх аварій силосів, особливо з конічним днищем, дозволив виявити спектр недосконалостей архаїчної нормативної практики, яка дісталась Україні у спадок від радянської системи нормотворення. Обмежений перелік сільськогосподарських культур, ігнорування статистичним розкидом їх фізико-механічних характеристик, нерозмежування напружено-деформованого стану для режимів завантаження та розвантаження силосів, повна відсутність настанов та рекомендацій із проєктування найвідповідальніших з’єднань – ось далеко не повний перелік недоліків та недоглядів застарілого радянського нормативу.

Із набранням чинності принципово нового нормативного документа ДБН В.2.6-221:2021 «Конструкції силосів сталевих з гофрованою стінкою для зерна» ситуація повинна була б змінитися.

По-перше, нові норми враховують величезний світовий досвід із проєктування, зведення та експлуатації силосів, а, по-друге, мають пряме й правочинне посилення на необхідні стандарти системи загальноєвропейського нормування Eurocode, в якій сучасний інженер може

знайти відповіді на широке коло практичних питань.

На жаль, впровадження цього без перебільшення сучасного й вкрай важливого нормативу в повсякденність будівельного проєктування та виробництва постійно ігнорується. З одного боку, це викликано небажанням українських виробників переходити на нові європейські, більш жорсткі вимоги надійності та безпеки, з іншого, – острахом українських інженерів перед складною та розкладженою системою нормування Eurocode.

Аналіз останніх досліджень. Питання дослідження ємностей для зберігання зерна довгий час залишається у фокусі уваги багатьох дослідників [1–5]. Варто відмітити також актуальні праці закордонних учених, що спираються на застосування загальноєвропейських норм Eurocode [6–9].

Мета й завдання. Мета статті – дослідження роботи перехідної зони силосу з конічним днищем, зокрема вузлового з’єднання у місці переходу циліндричної частини у конічну розвантажувальну воронку. Основне завдання – отримання практичних рекомендацій із проєктування даного з’єднання силосів відповідно до

загальноєвропейських норм Eurocode та ДБН В.2.6-221:2021 [10, 11].

Виклад матеріалу. Опорне кільце жорсткості належить до одного із найвідповідальніших елементів силосної ємності, в якому діють надзвичайно великі зусилля стиску (рис. 1).

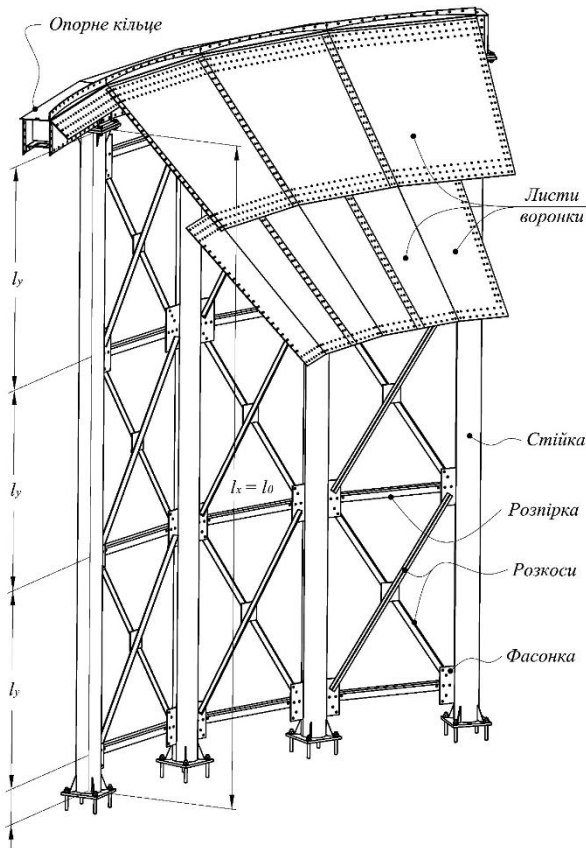


Рис. 1. Схематичний вигляд опорної частини силоса з конічною воронкою

– Відповідно до термінології ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1 [12] опорне кільце має назву «transition ring» (перехідне кільце), оскільки не виконує перерозподілу вертикальних зусиль між силосною ємністю та стійками опорної частини, а тільки сприймає зусилля стиску в кільцевому напрямі. Це зумовлено тим, що вертикальні ребра жорсткості силосної ємності співвісні із стійками опорної частини і тому всі вертикальні зусилля передаються від ребер на стійки без будь-якого перерозподілу в опорному кільці. Саме кільце підлягає перевіркам:

- граничний стан міцності за стиску в кільцевому напрямі;
- граничний стан міцності за розтягу в меридіональному напрямі;

- граничний стан втрати стійкості з площини кільця;
- граничний стан втрати стійкості при бічному випучуванні.
- граничний стан міцності при локальному згині.

Перевірка несної здатності опорного кільця жорсткості виконується на основі максимальних зусиль і напружень, знайдених на основі теоретичного методу [12] та скінченноелементного розрахунку повної комп'ютерної моделі.

Ефективний поперечний переріз опорного кільця складається з таких елементів прямокутної форми: виступ (с), хопер (h), кільце (r) та юбка (s). Вживання терміна «ефективний» зумовлено тим, що розрахункова довжина вказаних елементів не обов'язково збігається з геометричною, тобто за стиску опорного кільця можуть існувати такі ділянки, які не будуть брати участі в його роботі (рис. 2).

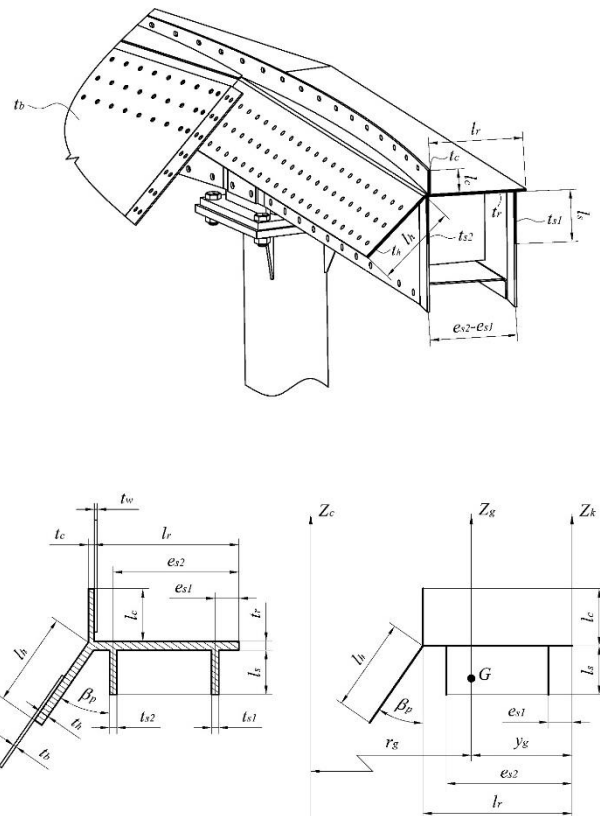


Рис. 2. Розрахункова схема опорного кільця жорсткості днища

Відповідно до цього, ефективна довжина кожного з елементів завжди менша його геометричної довжини, а тому й конструювати кільце з елементів із довжинами, більшими за ефективну, нерационально. До основних геометричних характеристик ефективного перерізу належать площа A_b та момент інерції $J_{b,z}$ відносно вертикальної осі Z_g , яка проходить через центр ваги (точка G) перерізу (рис. 2)

$$A_b = A_c + A_h + A_{s1} + A_{s2} + A_r, \quad (1)$$

$$J_{b,z} = J_{c,z} + J_{h,z} + J_{s1,z} + J_{s2,z} + J_{r,z}, \quad (2)$$

де $A_c, A_h, A_{s1}, A_{s2}, A_r$ та $J_{c,z}, J_{h,z}, J_{s1,z}, J_{s2,z}, J_{r,z}$ – відповідно площі та моменти інерції відносно осі Z_g окремих елементів опорного кільця.

Зауважимо, що для обчислення площ та моментів інерції таких елементів кільця як виступ, хопер і юбка необхідно оперувати розрахунковою довжиною елемента $\ell_{p,\epsilon}$, яка дорівнює меншій з геометричної ℓ_ϵ та ефективної $\ell_{e,\epsilon}$ довжин (індекс $\epsilon = c \wedge h \wedge r \wedge s1 \wedge s2$).

$$\ell_{e,c} = 0.778 \sqrt{\frac{d_c \cdot t_c}{2 \cdot \cos \beta_b}} \quad (3)$$

$$\ell_{e,\epsilon} = 0.389 \cdot (1 + 3\alpha_b^2 - 2\alpha_b^3) \cdot \sqrt{\frac{d_c \cdot t_\epsilon}{2 \cdot \cos \beta_b}} \quad (4)$$

$$\alpha_b = \frac{t_c}{\sqrt{t_h^2 + t_{s1}^2 + t_{s2}^2}}. \quad (5)$$

Для елемента кільця ефективна довжина $\ell_{e,r}$ збігається з геометричною ℓ_r довжиною, а його ефективна площа визначається за окремим виразом із понижувальним коефіцієнтом відповідно до норм [12]:

$$A_r = \ell_r \cdot t_r / \eta_r. \quad \eta_r = 1 + 1.6 \cdot \ell_r / d_c. \quad (6)$$

Розрахункове значення зусилля стиску, на яке виконується перевірка несної

здатності опорного кільця в кільцевому напрямі, визначається відповідно до [12] з урахуванням усереднених нормальних тисків на циліндричну частину корпусу силосу та листи воронки у місці перехідного з'єднання:

$$N_{\theta,Ed} = \frac{d_c}{2} \cdot [N_{\phi h,Ed} \sin \beta_b - P_{nc} \cdot \ell_{p,c} - P_{nh} \cdot \ell_{p,h} \cdot (\cos \beta_b - \mu_{heff} \sin \beta_b)], \quad (7)$$

де $N_{\phi h,Ed}$ – зусилля розтягу в меридіональному напрямі; P_{nc} – розрахункове значення локального нормального тиску на вертикальну ділянку опорного кільця (елемент виступ) безпосередньо над перехідним з'єднанням; P_{nh} – розрахункове значення локального нормального тиску на похилу ділянку опорного кільця (елемент хопер) безпосередньо під перехідним з'єднанням.

Розрахункове нормальне напруження в опорному кільці:

$$\sigma_{\theta,Ed} = \frac{N_{\theta,Ed}}{\eta_{\theta,Ed} \cdot A_b}, \quad (8)$$

де $\eta_{\theta,Ed}$ – понижувальний коефіцієнт площі ефективного перерізу:

$$\eta_{\theta,Ed} = 1 + 0.6 \cdot \ell_r / d_c. \quad (9)$$

Перевірка граничних станів опорного кільця виконується за чотирма наведеними вище критеріями (А – Е).

А. Критичний фактор опорного кільця у пружній стадії за стиску в кільцевому напрямі розраховується за виразом

$$K_{R,p1} = \sigma_{\theta,Ed} / \sigma_{p,Rd}, \quad (10)$$

де $\sigma_{p,Rd}$ – розрахунковий опір опорного кільця для пружної стадії роботи:

$$\sigma_{p,Rd} = \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M0} \cdot K_F}, \quad (11)$$

де $f_{y,b}$ – межа плинності сталі опорного кільця.

В. Критичний фактор опорного кільця у пружній стадії за розтягу в меридіональному напрямі розраховується за виразом:

$$K_{R,p2} = N_{\phi,Ed} / N_{\phi,Rd}, \quad (12)$$

де $N_{\phi,Rd}$ – розрахунковий опір (рис. 3), що визначається як:

$$N_{\phi,Rd} = \frac{\sigma_{p,Rd} \cdot \ell_{o\phi} + p_{nc} \cdot \ell_{oc}}{\sin \beta_b} + \frac{p_{nh} \cdot \ell_{oh} \cdot (\cos \beta_b - \mu_{heff} \cdot \sin \beta_b)}{\sin \beta_b}. \quad (13)$$

Невідомі геометричні параметри оцінюються за формулами:

$$\ell_{o\phi} = \frac{2}{d_c} \cdot (r + \ell_{oc} \cdot t_c + \ell_{oh} \cdot t_h + A + \ell_{os1} \cdot t_{s1} + \ell_{os2} \cdot t_{s2}), \quad (14)$$

$$\ell_{oc} = 0,975 \cdot \sqrt{0,5 \cdot d_c \cdot t_c}, \quad (15)$$

$$\ell_{os1} = 0,975 \cdot \psi_{0b} \cdot \sqrt{0,5 \cdot d_c \cdot t_{s1}}, \quad (16)$$

$$\ell_{os2} = 0,975 \cdot \psi_{0b} \cdot \sqrt{0,5 \cdot d_c \cdot t_{s2}},$$

$$\ell_{oh} = 0,975 \cdot \psi_{0b} \cdot \sqrt{\frac{d_c \cdot t_h}{2 \cdot \cos \beta_b}}, \quad (17)$$

$$\psi_{0b} = 0,7 + 0,6 \cdot \alpha_b^2 - 0,3 \cdot \alpha_b^3. \quad (18)$$

С. Критичний фактор втрати стійкості опорного кільця у горизонтальній площині розраховується як:

$$K_{R,p3} = \sigma_{\theta,Ed} / \sigma_{ip,Rd}, \quad (19)$$

де $\sigma_{ip,Rd}$ – розрахунковий опір втрати стійкості:

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1} \cdot K_F} \cdot \frac{4 \cdot E_s \cdot J_{b,z}}{A_b \cdot (0,5 \cdot d_c + \ell_r - y_g)^2}. \quad (20)$$

Д. Критичний фактор втрати стійкості при бічному випучуванні:

$$K_{R,p4} = \sigma_{\theta,Ed} / \sigma_{op,Rd}, \quad (21)$$

де $\sigma_{op,Rd}$ – розрахунковий опір втрати стійкості при бічному випучуванні

$$\sigma_{op,Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1} \cdot K_F} \cdot k_{op} \cdot E_s \cdot \left(\frac{t_r}{\ell_r} \right)^2, \quad (22)$$

де понижувальний коефіцієнт k_{op} , для знаходження якого можна скористатися такою формульною процедурою:

$$\eta_{op,c} = 0,5 \cdot \left[(t_c / t_r)^{2,5} + (t_h / t_r)^{2,5} + (t_{s1} / t_r)^{2,5} + (t_{s2} / t_r)^{2,5} \right], \quad (23)$$

$$\eta_{op,s} = 0,43 + 0,1 \cdot \left(\frac{d_c}{40 \cdot \ell_r} \right)^2, \quad (24)$$

$$k_{op,c} = 1,154 + 1,12 \cdot \ell_r / d_c, \quad (25)$$

$$k_{op,s} = 0,385 + 0,64 \cdot \sqrt{\ell_r / d_c}, \quad (26)$$

$$k_{op} = \frac{\eta_{op,c} \cdot k_{op,c} + \eta_{op,s} \cdot k_{op,s}}{\eta_{op,c} + \eta_{op,s}}. \quad (27)$$

Е. Критичний фактор міцності при локальному згині опорного кільця є додатковою характеристикою несної здатності перехідного з'єднання. Він розраховується з метою уникнення циклічної пластичності і втомного руйнування елементів перехідного з'єднання силоса у разі його довготривалої експлуатації. Можна сказати, що цей показник більше належить до листів воронки перехідної зони. Проте процедура оцінювання критичного фактора оперує геометричними характеристиками поперечного перерізу опорного кільця. Для оцінювання критичного фактора можна застосувати вираз:

$$K_{R,p5} = |\sigma_{b,Ed}| / \sigma_{p,Rd}, \quad (28)$$

де $\sigma_{p,Rd}$ – розрахунковий опір за формулою (11); $\sigma_{b,Rd}$ – локальне напруження згину у верхній частині воронки:

$$\sigma_{b,Ed} = \frac{6}{\Delta_{bb}} \cdot [M_{b,Ed} \cdot (a_{2b} - 2 \cdot a_{1b} \cdot \eta_{bb}) - N_{b,Ed} \cdot \rho_{bb} \cdot (a_{3b} - 2 \cdot a_{2b} \cdot \eta_{bb})] - \frac{6}{t_h^2} \cdot F_{bh} \cdot x_{bh}. \quad (29)$$

Процедура оцінювання складових цього виразу виглядає так:

$$x_{bc} = 0,276 \cdot \sqrt{d_c \cdot t_c} \leq \ell_{p,c},$$

$$x_{bh} = 0,276 \cdot \sqrt{\frac{d_c \cdot t_h}{\cos \beta_b}} \leq \ell_{p,h}, \quad (30)$$

$$F_{bc} = 2 \cdot x_{bc} \cdot p_{nc}, \quad (31)$$

$$F_{bh} = 2 \cdot x_{bh} \cdot p_{nh} \times$$

$$\times (0,85 - 0,15 \cdot \mu_{heff} \cdot \operatorname{ctg} \beta_b), \quad (32)$$

$$N_{b,Ed} = N_{\phi h,Ed} \cdot \sin \beta_b - F_{bc} - F_{bh}, \quad (33)$$

$$M_{b,Ed} = F_{bc} \cdot x_{bc} - F_{bh} \cdot x_{bh}, \quad (34)$$

$$\rho_{bb} = 0,78 \cdot \sqrt{0,5 \cdot d_c}, \quad \eta_{bb} = \sqrt{t_h \cdot \cos \beta_b}, \quad (35)$$

$$a_{1b} = t_c^{1,5} + t_{s1}^{1,5} + t_{s2}^{1,5} + t_h^{1,5} / \cos \beta_b + A_b / \rho_{bb}, \quad (36)$$

$$a_{2b} = t_h^2 + t_{s1}^2 + t_{s2}^2 - t_c^2, \quad (37)$$

$$a_{3b} = t_c^{2,5} + t_{s1}^{2,5} + t_{s2}^{2,5} + t_h^{2,5} \cdot \sqrt{\cos \beta_b}, \quad (38)$$

$$\Delta_{bb} = 2 \cdot a_{1b} \cdot a_{3b} - a_{2b}^2. \quad (39)$$

Висновки. Наведені у статті рекомендації та роз'яснення, по-перше, пришвидшують упровадження в інженерну практику нового ДБН В.2.6-221:2021 [11], гармонізованого із системою стандартизації Eurocode [10], по-друге, дозволяють досягти більш надійних та безпечних проєктних рішень у галузі силособудування, по-третє, нівелюють хронічний проєктний страх сучасного українського інженера перед європейською школою будівельного нормотворення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Махінко А. В., Махінко Н. О. Сталеві ємності для зберігання зерна. Київ : Вид-во «Сталь», 2021. 365 с.
2. Качуренко В. В., Банников Д. О. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов. Днепропетровск : Новая идеология, 2016. 168 с.
3. Гячев Л. В. Основы теории бункеров. Новосибирск : НГУ, 1992. 312 с.
4. Brown C. J., Nielsen J. Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour and Design. London and New York : CRC Press, 2019. 856 p.
5. Iwicki P., Rejowski K., Tejchman J. Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on FE analyses versus Eurocode 3 approach. *Engineering Failure Analysis*. 2015. Vol. 57, pp. 444–469.
6. Vidal P., Guaita M., Ayuga F. Analysis of Dynamic Discharge Pressures in Cylindrical Slender Silos with a Flat Bottom or with a Hopper : Comparison with Eurocode 1. *Biosystems Engineering*. 2005. Vol. 91, iss. 3. Pp. 335–348.
7. Couto A., Ruiz A., Aguado P. J. Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1. Part 4. *Powder Technology*. 2013. Vol. 237. Pp. 450–467.
8. Moazezi A., Maleki M. S. Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads : FE analyses versus Eurocode provisions. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 37. Pp. 106282.
9. Rejowski K., Iwicki P., Tejchman J., Wójcik M. Buckling resistance of a metal column in a corrugated sheet silo-experiments and non-linear stability calculations. *Thin-Walled Structures*. 2023. Vol. 182. Pp. 110206.
10. EN 1993-4-1:2007. Eurocode 3 : Design of steel structures. Part 4-1: Silos. Brussels : CEN, 2007. 114 p.
11. ДБН В.2.6-221:2021. Конструкції силосів з гофрованою стінкою для зерна. Основні положення. Київ : Мінрегіон, 2022. 7 с.
12. ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:2012. Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій. Частина 4-1. Силоси. Київ : Мінрегіон, 2013. 178 с.

REFERENCES

1. Makhinko A.V. and Makhinko N.O. *Stalevi yemnosti dlya zberihannya zerna* [Steel silos for grain storage]. Kyiv : "Stal" Publ., 2021, 365 p. (in Ukrainian).
2. Kachurenko V.V. and Bannikov D.O. *Konstruktivnyye resheniya stal'nykh yemkostey dlya sypuchikh materialov* [Structural solutions of steel silos for for bulk materials]. Dnepropetrovsk : Novaya Ideologiya, 2016, 168 p. (in Russian).
3. Gachev L.V. *Osnovy teorii bunkerov* [Fundamentals of bunker theory]. Novosibirsk : NGU Publ., 1992, 312 p. (in Russian).
4. Brown C.J. and Nielsen J. *Silos : Fundamentals of Theory, Behaviour and Design*. London and New York : CRC Press Publ., 2019, 856 p.

5. Iwicki P., Rejowski K. and Tejchman J. Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on FE analyses versus Eurocode 3 approach. *Engineering Failure Analysis*. 2015, vol. 57, pp. 444–469.
6. Vidal P., Guaita M. and Ayuga F. Analysis of Dynamic Discharge Pressures in Cylindrical Slender Silos with a Flat Bottom or with a Hopper : Comparison with Eurocode 1. *Biosystems Engineering*. 2005, vol. 91, iss. 3, pp. 335–348.
7. Couto A., Ruiz A. and Aguado P.J. Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1. Part 4. *Powder Technology*. 2013, vol. 237, pp. 450–467.
8. Moazezi A. and Maleki M.S. Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads : FE analyses versus Eurocode provisions. *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 37, pp. 106282.
9. Rejowski K., Iwicki P., Tejchman J. and Wójcik M. Buckling resistance of a metal column in a corrugated sheet silo-experiments and non-linear stability calculations. *Thin-Walled Structures*. 2023, vol. 182, pp. 110206.
10. EN 1993-4-1:2007. Eurocode 3 : Design of steel structures. Part 4-1 : Silos. Brussels : CEN Publ., 2007, 114 p.
11. *DBN V.2.6-221:2021. Konstruktsiyi sylosiv z hofrovanoyu stinkoyu dlya zerna. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.6-221:2021. Structures of steel silos with a corrugated wall for grain. Basic provisions]. Kyiv : Minregion Publ., 2022, 7 p. (in Ukrainian).
12. *DSTU-N B EN 1993-4-1:2012. Yevrokod 3. Proektuvannya staleyvykh konstruktsiy. Chastyna 4-1. Sylosy* [DSTU-N B EN 1993-4-1:2012. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 4-1. Silos]. Kyiv : Minregion Publ., 2013, 178 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.01.2023.