

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.954.014.2-417.2

В. В. КАЧУРЕНКО<sup>1\*</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівельні конструкції», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 532 54 46, ел. пошта valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

<sup>2\*</sup>Каф. «Будівельні конструкції», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

## КОНСТРУКЦІЯ РАЦІОНАЛЬНОГО СТАЛЕВОГО ГОФРОВАНОГО ПРОФІЛЮ

**Мета.** У роботі проводиться виклад результатів пошуку нових, більш економічних конструктивних рішень металевих силосів, а саме: аналіз існуючих типів поперечного перерізу профілів сталеві стінки такого силосу та розроблення менш матеріалоємного перерізу гофрованого профілю. **Методика.** Для досягнення поставленої мети досліджені існуючі типи профілів ємнісних конструкцій та їх напружено-деформований стан при дії навантаження. Аналіз виконувався за результатами обчислювальних експериментів. Об'єктом для дослідження були математичні комп'ютерні моделі. Розрахунки проведено з використанням методу скінчених елементів. Для обчислювального експерименту був використаний проектно-обчислювальний комплекс Structure CAD для Windows. **Результати.** У роботі були отримані дані, що дозволяють оцінити роботу профілів та знайти більш ефективний тип поперечного перерізу з точки зору його матеріалоємності. У процесі спільного дослідження авторами був розроблений новий тип профілю для ємнісних конструкцій, що має більш високу ефективність використання та вузол кріплення окремих сталевих листів із даним типом профілю. Обидва рішення прості в монтажі, надійні в експлуатації та можуть бути виготовлені в умовах сучасного промислового виробництва з використанням стандартного обладнання, матеріалів і комплектуючих. **Наукова новизна.** Авторами запропонований новий тип поперечного перерізу профілю гофра для сталевих стінок силосних споруд, який має підвищену несучу здатність і жорсткість та надає можливість зменшити товщину металу, не змінюючи при цьому несучу спроможність конструкції, чим знижує матеріаломісткість всієї конструкції. Для цього та подібних типів профілів сконструйований та запропонований варіант вузлового кріплення окремих гофрованих листів на болтах із подовжувачем фланцем, який дає можливість влаштування з'єднання при невеликих розмірах хвилі гофра, де недостатньо відстані для розміщення шапки болта між окремими гофрами. **Практична значимість.** Застосування запропонованих рішень дозволяє підвищити економічність, технологічність та ремонтпридатність конструкції стінок сталевих силосів. Отримані в дослідженнях результати свідчать про перспективність подальшого розвитку науково-дослідних робіт із пошуку нових, більш економічних рішень сталеві гофрованої стінки для силосних споруд, а також інших способів зменшення матеріалоємності конструкцій для зберігання сипучих матеріалів.

*Ключові слова:* силос; ємнісна споруда; стінка силосу; гофрований профіль; економічність; новий тип профілю; вузол кріплення

### Вступ

У найбільш широкому і загальному визначенні ємності, призначені для зберігання і перевантаження різних сипучих матеріалів, називаються силосами і бункерами. Бункери та силоси мають давню історію застосування. Археологічні розкопки і древні тексти свідчать, що прототипи сучасних силосів використовувались в Древній Греції ще наприкінці 8-го століття до нашої ери [15]. Звісно вони кардинально відрізнялись від ємностей сьогодення, проте цей приклад свідчить, що ще в стародавності люди

переїмалися такою проблемою, як зберігання сипучих матеріалів. Актуальне це питання і сьогодні.

Будівництво силосів і бункерів, яким вони є зараз, почалося у XIX столітті одночасно з розвитком гірничорудної промисловості. З часом найбільш широке застосування цей вид конструкцій знайшов у сільському господарстві, де з року в рік необхідно зберігати тисячі тонн зернових матеріалів [17]. Прогрес не стоїть на місці. За останні 20 років вигляд ємностей для зберігання набув найрізноманітніших

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

форм і може бути виконаний з найрізноманітніших матеріалів – від класичних силосів із залізобетону до рукавів з полімерних матеріалів [12]. Проте на сьогодні лідируючі позиції в українській агропромисловості займають саме сталеві циліндричні силоси.

Повноправними системами для зберігання зернових культур стали силоси саме зі сталевими гофрованими стінками [11, 13]. Для більшої стійкості від дії навантаження від сипучого матеріалу для таких стінок використовують спеціальні зносостійкі сталі [1]. Де-факто сучасним стандартом для корпусів універсальних металевих вентильованих силосів зазвичай є хвилясті панелі [16]. Така форма профілю витримує дуже великі навантаження, які виникають під час експлуатації силосів і передаються на вертикальні стійки (ребра жорсткості), без додаткового потовщення стінки і зайвої витрати металу. В Україні панелі з хвилястого профілю використовуються для будівництва металевих силосів порівняно недавно. Відсутність повноцінної нормативної бази та інформації, пов'язаної з особливостями виготовлення, проектування та експлуатації таких сховищ – основна причина ускладнень, пов'язаних з впровадженням металевих зерносховищ, адже досвіду роботи з ними у фахівців України практично не було.

### Мета

Загальними критеріями щодо зберігання зерна є високотехнологічність, надійність і, звичайно, економічна вигідність як для виробника, так і для споживача. Метою цієї роботи є пошук нових, більш економічних конструктивних рішень металевих силосів, а саме сталевій гофрованої стінки такого силосу, оскільки вона порівняно з плоскою стінкою має більшу міцність на розрив і вигин. В цей час існує надзвичайно велике різноманіття поперечного перерізу профілю гофра [14] для стінки силосів, одним з яких є хвилястий профіль, що використовується для будівництва силосів порівняно недавно і запозичений нашими підприємствами із зарубіжного досвіду. Проте дослідження щодо економічності за рахунок зменшення матеріалоемності таких профілів активно не виконувались. Тому основну увагу авторів привернув аналіз існуючих профілів та пошук нового,

менш матеріалоемного перерізу гофрованого профілю, який би дозволив при зменшенні товщини витримувати ті ж навантаження, що і його аналоги і при цьому задовольняти вимоги міцності та жорсткості.

### Методика

Дослідження виконувались за допомогою математичного моделювання [3]. Логічність і формалізованість комп'ютерних моделей дозволяють визначити основні фактори, що впливають на властивості досліджуваного об'єкта-оригіналу, зокрема дослідити відгук модельованої фізичної системи на зміни її параметрів і початкових умов. Розрахунки виконано з використанням методу скінченних елементів. Для обчислювального експерименту був використаний проектно-обчислювальний комплекс Structure CAD для Windows (SCAD) [4], реалізований як інтегрована система міцнісного аналізу та проектування конструкцій на основі методу скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє визначити напружено-деформований стан конструкцій від статичних і динамічних впливів, а також виконати низку функцій проектування елементів конструкцій.

Комп'ютерне моделювання полягало в проведенні серії обчислювальних експериментів, метою яких був аналіз, інтерпретація і зіставлення результатів моделювання з реальною поведінкою досліджуваного об'єкта, подальше уточнення моделі. У процесі дослідження побудовано просторові геометричні моделі. Застосовувані експериментальні комп'ютерні моделі відповідають вимогам, що висувуються до створення моделі в МСЕ, а саме: за необхідною густотою сітки скінченних елементів (СЕ) [2], типом та розміром СЕ, способом розміщення СЕ та їх орієнтації по відношенню до потоків основних напружень.

Варто зауважити, що досліджувані об'єкти моделювались у вигляді циліндричного кільця з гофрованими стінками, на які передається навантаження від сипучого матеріалу – зерна. Більш детально вигляд розрахункових моделей та опис обчислювального експерименту наведено в попередніх роботах авторів [9, 10]. Всі розрахунки були виконані згідно з вимогами чинних нормативних документів [5, 6] та проведені для восьми різних типів профілів гофра,

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

переріз яких зображено на рис. 1. Для їх порівняльного аналізу профілі були з однаковою висотою гофра (44 мм), довжиною хвилі (138 мм) і товщиною листа (1 мм). Для кожного типу профілю був проаналізований напружено-деформований стан при дії навантаження. Величини навантаження визначалися відповідно до ДБН [5] за виразом (1):

$$P_h^n = \frac{\gamma \rho}{f} \left( 1 - e^{-\lambda f z / \rho} \right), \quad (1)$$

де  $\gamma$  – питома вага зерна;  $\rho$  – гідравлічний радіус поперечного перерізу силосу, м,  $\rho = A/U$ , ( $A$ ,  $U$  – площа і периметр поперечного перерізу силосу відповідно);  $f$  – коефіцієнт тертя зерна по металу.

Рівномірно розподілений по периметру горизонтальний тиск сипучих матеріалів (кгс/м<sup>2</sup>) на стіні силосів визначається на глибині  $Z$  (м) від верху насипу.

При цьому нехтувати тертям матеріалу по стіні неприпустимо, оскільки це призводить до значних помилок. Внаслідок тертя засипки об стінки вертикальні і горизонтальні тиски зростають непропорційно по висоті: по мірі збільшення глибини приріст тиску зменшується. При цьому передбачається, що відношення горизонтального тиску до вертикального – величина постійна.

Таким чином, горизонтальний тиск на стіну силосу залежить від зовнішнього кута тертя зерна об стіну, щільності продукту, діаметра і висоти силосу.

Експериментальні дослідження виконувалися для декількох комбінацій висоти та діаметра силосу.

Слід звернути увагу, що останній тип профілю (рис. 1, *є*) є авторським рішенням, варіант якого виник після аналізу роботи всіх попередніх поперечних перерізів профілів.

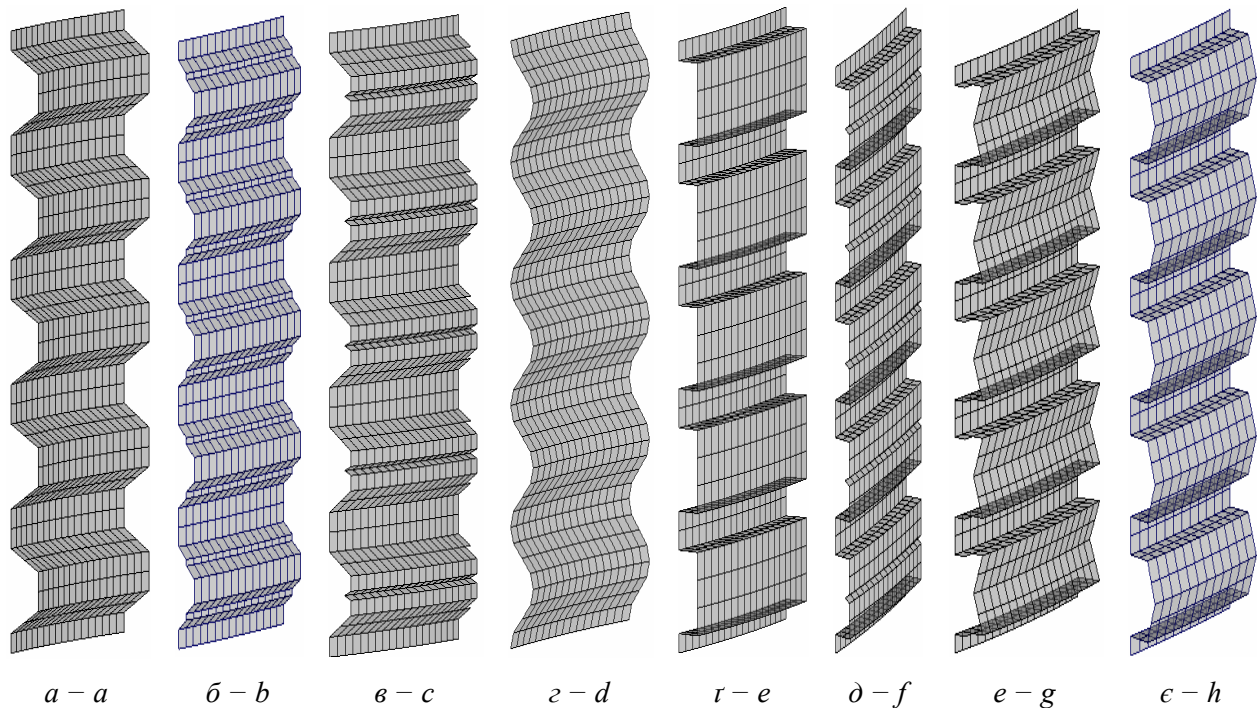


Рис. 1. Досліджувані типи гофрованих профілів:

*a* – коритний; *b* – коритний з підсиленням горизонтальним ребром; *c* – коритний з підсиленням вертикальним ребром; *d* – хвилястий; *e* – квадратний; *f* – квадратний з підсиленням вертикальним ребром; *g* – шедовий; *h* – новий

Fig. 1. Research types of corrugated profiles:

*a* – channel; *b* – channel with an enhanced horizontal edge; *c* – channel with an enhanced vertical edge; *d* – corrugated; *e* – quadrate; *f* – quadrate with an enhanced vertical edge; *g* – shed; *h* – new

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

## Результати

Для кожного з вищенаведених типів профілів були обчислені основні геометричні характеристики, що відіграють найбільшу роль при роботі ємнісних конструкцій під навантаженням – площа поперечного перерізу  $A$  і момент опору в горизонтальному напрямку  $W$ . Розглядалася одна хвиля гофра.

Також був додатково обчислений параметр  $\rho = W/A$ , що характеризує ефективність використання профілю. Отримані результати наведено в табл. 1 в порядку збільшення коефіцієнта ефективності.

Таблиця 1

## Геометричні характеристики гофрованих профілів

Table 1

## Geometrical characteristics of corrugated profiles

№ п/п	Тип профілю	Площа перерізу, $A$ , см <sup>2</sup>	Момент опору, $W$ , см <sup>3</sup>	Коефіцієнт ефективності, $\rho$
1		1,666	1,502	0,902
2		2,342	2,260	0,965
3		1,892	2,108	1,114
4		2,360	2,725	1,155
5		2,260	2,764	1,223
6		1,992	2,570	1,290
7		1,892	2,619	1,384
8		2,342	3,705	1,582

З табл. 1 видно, що з усіх досліджуваних профілів мінімальну площу перерізу має хвилястий профіль № 1, проте найбільше значення мінімального моменту опору має новий тип профілю № 8. Найгіршим за цим показником виявився хвилястий профіль № 1. Про це саме свідчить і параметр  $\rho$ , який характеризує відношення мінімального моменту опору до площі

перерізу гофра. Якщо порівняти між собою ці два типи профілів, то виходить, що за геометричними характеристиками новий тип переважає хвилястий профіль на 75 %.

У процесі спільної роботи авторів був розроблений новий тип профілю для ємнісних конструкцій, що має більш високу ефективність використання (в табл. 1 профіль № 8). Він дозволяє забезпечувати необхідну міцність з меншою товщиною металу порівняно з традиційними хвилястим і коритним профілями, які зазвичай застосовуються в силосних ємностях.

Такий профіль, що містить систему виконаних по площі листа гофрів, має прямокутний їх переріз по всій довжині сталевго листа і відрізняється від найбільш близького квадратного профілю (№ 5) тим, що посилюється вигином однієї з полиць у вигляді двосхилого даху. Виконання вигину подібної форми забезпечує конструкції підвищену несучу здатність і жорсткість.

На рис. 2, наведеному нижче, видно, що кожен гофр такого профілю складається з системи пластин, в яких паралельно осі  $x-x$  розташовані пластини позиції 1 в одній площині. У перпендикулярному напрямку від пластин 1 розміщуються пластини 2 і 5. Пластини 2 і 5 з'єднуються між собою пластинами 3 і 4, які розміщуються з нахилом відносно осі  $x-x$  в дзеркальній орієнтації одна до одної і утворюють переріз, подібний до абрису двоскатного даху будинку. Кут нахилу пластин 3 і 4 однаковий і може варіюватися залежно від параметрів передбачуваного сипучого матеріалу і сфери його використання.

Звичайно, порівняно з коритним профілем матеріаломіцність окремого гофра дещо збільшується, але з урахуванням того, що новий профіль дає можливість зменшити товщину самого металу  $S$  не змінюючи при цьому несучу здатність конструкції, матеріаломіцність всієї конструкції в загальному зменшується.

Профільований лист простий в монтажі, надійний в експлуатації і може бути виготовлений в умовах сучасного промислового виробництва з використанням стандартного обладнання, матеріалів і комплектуючих.

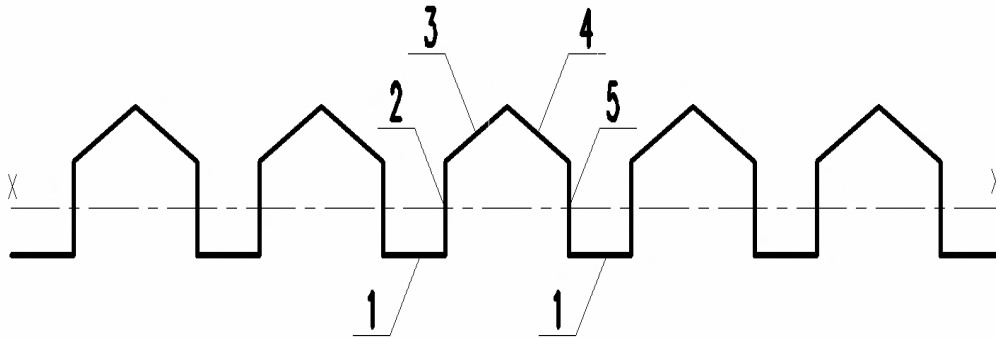


Рис. 2. Загальний вигляд поперечного перерізу конструкції профілю підвищеної жорсткості

Fig. 2. General view of the structural cross section of a profile with high rigidity

Крім того, порівнюючи цей тип профілю з подібними йому квадратним № 5 і шедовим № 2 (див. табл. 1) можна говорити про технологічні переваги нового профілю. Оскільки кут перегину листа металу при виготовленні зменшується, то це позитивно впливає на здатність матеріалу не утворювати тріщини.

Авторами подана патентна заявка [7] на гофрований профіль нового типу і в цей час ведеться оформлення авторських прав.

При використанні гофрованого профілю нового типу окремим питанням стала можливість забезпечення надійного стикового вузла кріплення листів між собою. Основна складність при цьому полягала в тому, що стандартний типовий вузол для подібних конструкцій не може бути використаний, оскільки в цьому випадку не вистачає достатньої відстані для розміщення шапки болта між окремими гофрами.

Ймовірним рішенням у цьому випадку може бути запропонований нижче на рис. 3 варіант, який покращує технологічність збірки і підвищує ремонтпридатність конструкції вузла і споруди в цілому.

Особливість цього вузла полягає в тому, що для забезпечення надійної роботи з'єднання і коректної передачі зусиль на листи використовується болт спільно з подовжуючим фланцем, який дає можливість розташувати шапку болта на потрібній відстані від гофра листа для того, щоб уникнути зминання і при цьому передати стягуюче зусилля на елементи, що скріплюються.

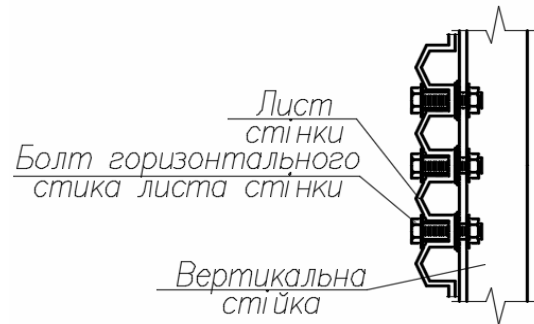


Рис. 3. Загальний вигляд стикового кріплення гофрованих листів

Fig. 3. General view of the butt fastening of corrugated sheets

Детально конструкція вузла наведена на рис. 4.

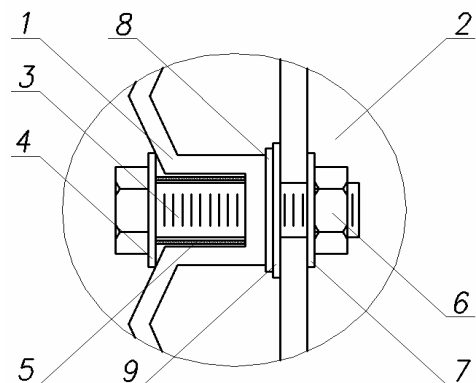


Рис. 4. Стиковий вузол кріплення гофрованого профілю нового типу

Fig. 4. Mount pickup fitting of a corrugated profile of a new type

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Вузол складається із стінової гофрованої панелі 1, вертикальної стійки 2, болта 3, металевих шайб 4 і 7, подовжуючого фланця 5, гайки 6, ущільнюючої шайби 8, пружної прокладки із полімерного матеріалу 9.

З'єднання виконується таким чином. Стінові панелі 1, виконані із профільованих сталевих листів, кріпляться до вертикальної стійки 2 за допомогою болта 3 з нанесеною різьбою на одному кінці стержня для подальшого затягування шестигранною гайкою 6. Попередньо болт 3 вставляється у подовжуючий фланець 5 для того, щоб була можливість відвести шапку болта разом із шайбою 4 на потрібну для кріплення відстань. Металеві шайби 4 і 7 підкладають під гайку і головку болта для створення більшої площі опорної поверхні, запобігання самовідгвинчування кріпильної деталі. Збільшення площі притиску дозволяє застосувати більше зусилля затяжки, оберігає поверхню елементів, що скріплюються, від пошкоджень, збільшує ступінь ущільнення з'єднання з прокладкою 8. Для герметичності з'єднання використовується прокладка 8, виконана із полімерного матеріалу, та ущільнююча шайба 9 на металевій основі. В результаті при затягуванні болтів 3 гайкою 6 утворюється щільне болтове з'єднання, яке придатне для застосування у випадку, коли головка болта 3 не може розташовуватися безпосередньо між хвилями гофра.

Таким чином досягається можливість улаштування болтових з'єднань при невеликих розмірах хвилі гофра, виключення протікання води в болтових з'єднаннях у процесі експлуатації і підвищення надійності і герметичності таких з'єднань. Крім цього покращується технологічність збірки і підвищується ремонтпридатність конструкції.

Це рішення також патентується авторами [8], і може з успіхом застосовуватися в практиці для проектування і будівництва більш економічних і менш матеріалоемних конструкцій для сипучих матеріалів.

#### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано новий тип поперечного перерізу профілю гофра для сталевих стінок силосних споруд, який має підвищену несучу здатність і жорсткість та дає можливість зменшити

товщину металу, не змінюючи при цьому несучу спроможність конструкції, чим знижує матеріаломісткість всієї конструкції.

Для цього та подібних типів профілів сконструйовано та запропоновано варіант вузлового кріплення окремих гофрованих листів на болтах з подовжуючим фланцем, який дає можливість влаштування з'єднання при невеликих розмірах хвилі гофра, де недостатньо відстані для розміщення шапки болта між окремими гофрами.

Обидва рішення прості в монтажі, надійні в експлуатації і можуть бути виготовлені в умовах сучасного промислового виробництва з використанням стандартного обладнання, матеріалів і комплектуючих. Крім цього при їх застосуванні збільшується економічна вигідність, покращується технологічність збірки і підвищується ремонтпридатність конструкції.

#### Висновки

На підставі виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Застосування запропонованих рішень дозволяє підвищити економічність, технологічність та ремонтпридатність конструкції стінок сталевих силосів.

2. Отримані в дослідженнях результати свідчать про перспективність подальшого розвитку науково-дослідних робіт з пошуку нових, більш економічних рішень сталевій гофрованої стінки для силосних споруд, а також інших способів зменшення матеріалоемності конструкцій для зберігання сипучих матеріалів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акимов, И. В. Повышение износостойкости графитизированной стали / И. В. Акимов // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 6 (48). – С. 81–87. doi: 10.15802/stp2013/19678.
2. Банников, Д. О. Корректировка результатов расчета напряжений по МКЭ методом HSS / Д. О. Банников, А. Э. Гуслистая // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 134–141.
3. Босов, А. А. Математичне моделювання планування експериментів / А. А. Босов, В. В. Артемчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 118–121.
4. Вычислительный комплекс / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко [и др.]. – Москва : СКАД СОФТ, 2007. – 590 с.
  5. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. – На заміну СНиП 2.10.05-85. : введ. 1998–01–07. – Київ : Держбуд України, 1998. – 39 с.
  6. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – На заміну СНиП II-23-81\* : введ. 2011–01–12. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.
  7. Заявка на винахід в Укрпатент «Сталевий листовий гофрований профіль». – № а 2015 03703 від 20.04.2015 р. – 1 с.
  8. Заявка на корисну модель в Укрпатент «Болтове з'єднання з подовжуючим фланцем». – № u 2015 04467 від 20.04.2015 р. – 1 с.
  9. Качуренко, В. В. Эффективный гофрований профіль для сталевих емностей / В. В. Качуренко, Д. О. Банніков // Будів. вир-во. – 2014. – № 56. – С. 56–60.
  10. Качуренко, В. В. Особливості моделювання тиску сипучого матеріалу на гофровані сталеві елементи / В. В. Качуренко, Д. О. Банніков // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2014. – Вип. 28. – С. 367–376.
  11. Куприевич, А. Б. Про отечественные металлические силосы. Особенности проектирования и строительства / А. Б. Куприевич // Зерно. – 2011. – № 10. – С. 121–126.
  12. Шкорупеев, Д. Г. Как в Украине локализуется заграничное зернохраниение / Д. Г. Шкорупеев // Зерно. – 2012. – № 5. – С. 184–187.
  13. Antonowicza, R. Analysis of loads and structural capacity of steel silo with corrugated wall for pelleted material / R. Antonowicza, C. Bywalskia, M. Kaminskia // J. of Civil Engineering and Management. – 2014. – Vol. 20. – Iss. 3. – P. 372–379. doi: 10.3846/13923730.2014.906497.
  14. Bródka, J. Blachy fałdowe w budownictwie stalowym / J. Bródka, R. Garncarek, K. Miłaczewski. – Warszawa : Arcady, 1984. – 152 p.
  15. Buxton, D. R. Silage science and technology / D. R. Buxton, R. E. Muck, J. H. Harrison. – Madison, Wisconsin, USA, 2003. – 897 p.
  16. Nemeth, C. Silo with a Corrugated Sheet Wall / C. Nemeth, J. Brodniansky // Slovak J. of Civil Engineering. – 2013. – Vol. 21. – Iss. 3. – P. 19–30. doi: 10.2478/sjce-2013-0013.
  17. Sloane, E. An age of barns / E. Sloane. – New York : Funk, 2001. – 351 p.

В. В. КАЧУРЕНКО<sup>1\*</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительные конструкции», Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепрпетровск, Украина, 49010, тел. +38 (097) 532 54 46, эл. почта valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

<sup>2\*</sup>Каф. «Строительные конструкции», Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепрпетровск, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

## КОНСТРУКЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО ГОФРИРОВАННОГО ПРОФИЛЯ

**Цель.** В работе проводится изложение результатов поиска новых, более экономичных конструктивных решений металлических силосов, а именно: анализ существующих типов поперечного сечения профилей стальной стенки такого силоса и разработки менее материалоемкого сечения гофрированного профиля.

**Методика.** Для достижения поставленной цели исследованы существующие типы профилей емкостных конструкций и их напряженно-деформированное состояние при воздействии нагрузки. Анализ выполнялся по результатам вычислительных экспериментов. Объектом для исследования были математические компьютерные модели. Расчеты проведены с использованием метода конечных элементов. Для вычислительного эксперимента был использован проектно-вычислительный комплекс Structure CAD для Windows.

**Результаты.** В работе были получены данные, позволяющие оценить работу профилей и найти более эффективный тип поперечного сечения с точки зрения его материалоемкости. В процессе совместного исследования авторами был разработан новый тип профиля для емкостных конструкций, который имеет более высокую эффективность использования и узел крепления отдельных стальных листов с данным типом профиля. Оба решения просты в монтаже, надежны в эксплуатации и могут быть изготовлены в условиях современного промышленного производства с использованием стандартного оборудования, стандартных материалов и комплектующих. **Научная новизна.** Предложен новый тип поперечного сечения профиля

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

гофра для стальных стенок силосных сооружений, который имеет повышенную несущую способность и жесткость и позволяет уменьшить толщину металла, не изменяя при этом несущую способность конструкции, чем уменьшает материалоемкость всей конструкции. Для этого и подобных типов профилей сконструирован и предложен вариант узлового крепления отдельных гофрированных листов на болтах с удлиняющим фланцем, который дает возможность устройства соединения при небольших размерах волны гофра, где мало расстояния для размещения шапки болта между отдельными гофрами. **Практическая значимость.** Применение предложенных решений позволяет повысить экономичность, технологичность и ремонтпригодность конструкции стенок стальных силосов. Полученные в исследованиях результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшего развития научно-исследовательских работ по поиску новых, более экономичных решений стальной гофрированной стенки для силосных сооружений, а также других способов уменьшения материалоемкости конструкций для сохранения сыпучих материалов.

*Ключевые слова:* силос; емкостное сооружение; стенка силоса; гофрированный профиль; экономичность; новый тип профиля; узел крепления

V. V. KACHURENKO<sup>1\*</sup>, D. O. BANNIKOV<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Building Structures», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 532 54 46, e-mail valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

<sup>2\*</sup>Dep. «Building Structures», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

## RATIONAL STEEL CORRUGATED PROFILE DESIGN

**Purpose.** The work sets forth the search results of new, more efficient design solutions for metal silos, namely, the analysis of existing types of profiles cross-section in a steel wall of such silo and development of less material-intensive section of corrugated profile. **Methodology.** To achieve the set goal there were researched the existing types of capacitive structure profiles and their strain-stress state under the load. The analysis was performed on the results of computational experiments. The prototype object was mathematical computer models. The calculations were made using the finite-element method. For computational experiment there was used the design-computing system Structure CAD for Windows. **Findings.** In this work there were obtained the data allowing to assess work of the profiles and to find more effective type of cross-section in terms of its material consumption. In the process of joint study of the authors a new type of profile for capacitive structures was developed; it has higher utilization efficiency and the attachment point of individual steel sheets with this type of profile. Both solutions are easy to install, reliable in operation and can be manufactured in the conditions of modern industrial production using standard equipment, materials and components. **Originality.** A new type of corrugated profile cross-section for steel silo walls was proposed; it has higher load carrying capacity and rigidity and allows reducing the metal thickness without changing the structure carrying capacity that results in material consumption reduction of the whole structure. For this and similar types of profiles there was designed and proposed the attachment point of individual corrugated sheets screwed with extending flange, which enables the unit connection in case of small size corrugations, where the distance is not sufficient to accommodate the bolt cap between the individual corrugations. **Practical value.** Application of the proposed solutions can increase efficiency, manufacturability and maintainability of steel silo wall structures. The results obtained during the research show promise for further development of research on finding new and more economic solutions for corrugated steel silo wall design, as well as other ways to reduce material consumption of bulk material storage structures.

*Keywords:* silo; capacitive structure; silo wall; corrugated profile; efficiency; a new type of profile; attachment point

### REFERENCES

1. Akimov I.V. Povysheniye iznosostoykosti grafitizirovannoy stali [Increasing of wear resistance of the graphitized steel]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 81-87. doi: 10.15802/stp2013/19678.



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

2. Bannikov D.O., Guslistaya A.E. Korrektirovka rezultatov rascheta napryazheniy po MKE metodom HSS [Correcting accounting results of tension using FEM by HSS method]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 134-141.
3. Bosov A.A., Artemchuk V.V. Matematychno modeliuвання planuvannya eksperymentiv [Mathematical modeling of experiments planning]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 118-121.
4. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A. *Vychislitelnyy kompleks* [Computing complex]. Moscow, SKAD SOFT Publ., 2007. 590 p.
5. *DBN V.2.2-8-98 Pidpryemstva, budivli i sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna* [SCS V. 2.2-8-98. Enterprises, buildings and structures for the storage and processing of grain]. Kyiv, Derzhbud Ukrainy Publ., 1998. 39 p.
6. *DBN V.2.6-163:2010 Stalevi konstruksii. Normy proektuvannya, vyhotovlennia i montazhu* [SCS V. 2.6-163:2010. Steel construction. The standards for the design, fabrication and installation]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2011. 202 p.
7. *Zaiavka na vynakhid v Ukrpatent «Stalevyi lystovyi hofrovanyi profil» № a 2015 03703 vid 20.04.2015 r.* [Application for the invention in Ukrpatent «Steel sheet corrugated profile!» no. u 2015 03703 from 20.04.2015]. 1 p.
8. *Zaiavka na korynsnu model v Ukrpatent «Boltove ziednannia z podovzhuiuchym flantsem» № u 2015 04467 vid 20.04.2015 r.* [The application for a utility model in Ukrpatent «Bolted connection with odourous flange» no. u 2015 04467 from 20.04.2015]. 1 p.
9. Kachurenko V.V., Bannikov D.O. Efektyvnyi hofrovanyi profil dlia stalevykh yemnostei [Efficient corrugated profile for stainless steel containers]. *Budivelnne vyrobnytstvo – Construction Operations*, 2014, no. 56, pp. 56-60.
10. Kachurenko V.V., Bannikov D.O. Osoblyvosti modeliuвання tysku sypuchoho materialu na hofrovani stalevi elementy [Features of modeling the pressure of granular material in corrugated steel elements]. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Facilities*, 2014, issue 28, pp. 367-376.
11. Kuprievich A.B. Pro otechestvennyye metallicheskiye silosy. Osobennosti proyektirovaniya i stroitelstva [About domestic metal silos. Features of design and construction]. *Zerno – Grain*, 2011, no. 10, pp. 121-126.
12. Shkorupeyev D.G. Kak v Ukraine lokaliziruyetsya zagranichnoye zernokhraneniye [As in Ukraine the overseas grain storage are localized]. *Zerno – Grain*, 2012, no. 5, pp. 184-187.
13. Antonowicza R., Bywalskia C., Kaminskia M. Analysis of loads and structural capacity of steel silo with corrugated wall for pelleted material. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2014, vol. 20, issue 3, pp. 372-379. doi: 10.3846/13923730.2014.906497.
14. Bródka J., Garncarek R., Miłaczewski K. *Blachy fałdowe w budownictwie stalowym*. Warszawa, Arcady Publ., 1984. 152 p.
15. Buxton D.R., Muck R.E., Harrison J.H. *Silage science and technology*. Madison, Wisconsin, USA, 2003. 897 p.
16. Nemeth C., Brodniansky J. Silo with a Corrugated Sheet Wall. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2013, vol. 21, issue 3, pp. 19-30. doi: 10.2478/sjce-2013-0013.
17. Sloane E. *An age of barns*. New York, Funk Publ., 2001. 351 p.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. В. В. Кулябком (Україна)*

Надійшла до редколегії: 23.06.2015  
 Прийнята до друку: 18.08.2015