

**Сергій Олексійко<sup>1</sup>, Світлана Ющенко<sup>2</sup>, Михайло Руденко<sup>3</sup>, Володимир Гречка<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [sv.oleks@ukr.net](mailto:sv.oleks@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439). SCOPUS Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [rasssveta@ukr.net](mailto:rasssveta@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

ResearcherID: [F-7741-2014](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020). SCOPUS Author ID: [57190373626](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020)

<sup>3</sup>старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [rudenko\\_bear@ukr.net](mailto:rudenko_bear@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792). SCOPUS Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

<sup>4</sup>асистент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vovagrechka87@gmail.com](mailto:vovagrechka87@gmail.com)

## ПРОЄКТ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЗМАТИЧНОГО БУНКЕРА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

*Недоліком конструкцій призматичних бункерів для сипучих продуктів є їх обвалення при експлуатації внаслідок відриву воронки в місці її приєднання до вертикальної частини. Для забезпечення надійної роботи призматичних бункерів запропоновано конструктивне рішення, за яким вертикальні ребра жорсткості плоских панелей воронки з'єднуються із замкнутим по периметру опорним ребром із профільної труби. Використання блочної конструкції бункерів перетворює процес спорудження на монтажному майданчику із будівництва на складання із блоків із підвищеним ступенем заводської готовності, що дозволяє зменшити вартість монтажних робіт.*

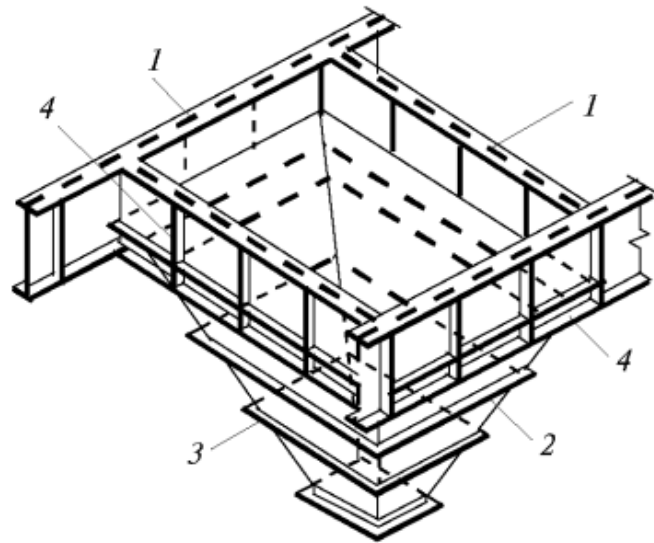
**Ключові слова:** призматичний бункер; розрахункова схема; проектування; напружений стан; металоємність; блочна конструкція; монтаж.

Рис.: 9. Табл.: 1. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Стальні бункери з плоскими стінками призначені для зберігання і вивантаження сипучих матеріалів та відрізняються різноманіттям об'ємно-планувальних та конструктивних рішень. Їх проектують з урахуванням навантажень від тиску сипучого матеріалу, власної маси конструкції, а також снігового, вітрового та тимчасових навантажень на перекриття. На сьогодні пошук найкращих конструктивних форм таких виробів, більш точний облік характеру і значень діючих навантажень, використання більш точних методів розрахунку дозволяють конструктору економити метал, усуваючи залишковий запас міцності, зменшуючи масу металу в невантажених частинах виробу.

Водночас виконання монтажних робіт зі спорудження бункерів на будівельних майданчиках ускладнюється необхідністю виконання висотних робіт, погодними умовами, недостатністю необхідного обладнання тощо. Таким чином, забезпечення якісних і кількісних показників при спорудженні бункерних ємностей, до яких можна віднести мінімальну металоємність конструкції, підвищення ступеня заводської готовності, транспортельність елементів конструкції, підвищення працездатності зварної конструкції, зниження трудомісткості її виготовлення та монтажу і, як наслідок, розміри необхідних капіталовкладень, цілком визначаються якістю проєкту як самої конструкції, так і проєкту технологічного процесу її виготовлення.

**Постановка проблеми.** Пірамідально-призматичний бункер (рис. 1) складається з верхньої призматичної частини та нижньої частини, яка має форму усіченої піраміди [1]. Вертикальні стінки бункера утворюються переважно бункерними несучими балками та мають горизонтальні та вертикальні ребра жорсткості. Обшивка воронки укріплюється звичайно тільки горизонтальними ребрами жорсткості.



*Рис. 1. Пірамідально-призматичний бункер:*

*1 – вертикальна стінка бункера (бункерна балка); 2 – воронка; 3 – ребра жорсткості воронки; 4 – вертикальні і горизонтальні ребра жорсткості бункерної балки*

Джерело: [1].

Питання проектування і підходи до вирішення конструктивного оформлення бункерів детально висвітлено в роботах численних авторів, зокрема [1-4]. Але очевидним недоліком таких конструкцій є з'єднання бічних панелей під прямим кутом, що викликає нерівномірність напружено-деформованого стану і, як наслідок, виникнення аварійних ситуацій, причини яких детально проаналізовані в роботі [5]. Разом з тим у практиці проектування використовується прийом, коли розмірні параметри елементів конструкції, наприклад, товщина листової обшивки, приймається, виходячи із досвіду проектування [3], а решта конструктивних елементів виявляються «прив'язаними» до неї: кількість поясів орєбрення, розміри профілів і т. ін. Це, у свою чергу, залишає поза увагою вирішення питання зниження металоємності конструкції.

Разом з цим при проектуванні конструкцій бункерів зовсім поза увагою також залишаються питання, які безпосередньо пов'язані з роботами зі спорудження на будівельних майданчиках та з транспортуванням до них складових конструктивних елементів від заводу-виробника.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Разом із зазначеними вище роботами, присвяченими питанням проектування конструкцій призматичних бункерів, концепція проектування сталевих ємнісних конструкцій для сипких матеріалів уточнюється і надалі [6]. Однак досвід експлуатації таких споруд супроводжується наявною статистикою їх відмов та аварій.

З цього погляду особливу увагу на себе звертають роботи Д. Баннікова, який провів узагальнення причин аварійних ситуацій [7-9]. З погляду інженерної діяльності інтерес насамперед становлять технічні причини, що передбачають надалі втручання у конструктивну схему бункерів для підвищення їхньої експлуатаційної надійності.

Автор зазначає, що одна з основних специфічних причин відмови та аварій сталевих ємнісних конструкцій для сипких матеріалів пов'язана з неправильним визначенням навантажень на конструкцію. При цьому він розглядає приклад обвалення бункера ємністю близько 150 м<sup>3</sup> для зберігання цементу, що трапилося після кількох днів його експлуатації: при черговому завантаженні стався відрив воронки в місці її приєднання до вертикальної частини.

Другою основною помилкою виготовлення сталевих ємнісних конструкцій для сипких матеріалів, на переконання ученого, є відступ від проєкту та виконання ряду вузлів або елементів конструкції не за проєктом.

Розробки, які дозволили суттєво покращити конструктивно-технологічні показники бункерних ємнісних конструкцій, представлені в роботі [10]. Дослідником пропонується використання багатошарової складної конструкції та передбачається використання сталевих гофрованих листів, що направлено на вирішення питання зниження металоємності. При проведенні досліджень автором використовувався метод комп'ютерного моделювання на основі одного із сучасних чисельних методів будівельної механіки – методу скінчених елементів.

Картини напружено-деформованого стану ємності, що розглядалась у роботі [10], представлені на рис. 2. Темнішим ділянкам відповідає вищий рівень напружень.

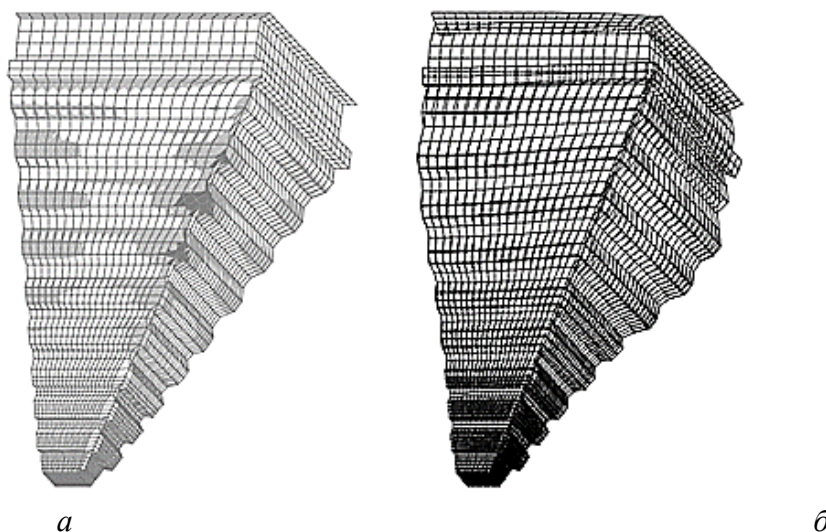


Рис. 2. Напружений (а) та деформований стан (б) бункерної ємності [10]

У зазначеній роботі вказано, що металоємність споруди може бути зменшена за теоретичними підрахунками на величину до 1,5 раза.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Таким чином, незважаючи на велику кількість наукових робіт, присвячених розробці проєктів конструкцій призматичних бункерів, та наявність статистичних даних про основні причини руйнування таких конструкцій, на сьогодні досі відсутній комплексний підхід до вирішення питання забезпечення надійної роботи конструкції за рахунок пошуку кращих конструктивних форм, технологій її виготовлення та монтажу.

**Мета роботи.** У зв'язку з цим, метою цієї роботи є розробка конструкції призматичного бункера, яка дозволяє забезпечити експлуатаційну надійність, виробничу технологічність та мінімальні супутні витрати, пов'язані зі спорудженням конструкції на будівельному майданчику.

**Виклад основного матеріалу.** Робота виконувалась у межах співпраці з ТОВ “КРОК-УКРЗАЛІЗБУД” при реалізації проєкту реконструкції зерносушильного комплексу в смт Мала Дівиця Прилуцького району Чернігівської області.

Тиск сипучого матеріалу залежить від висоти його стовпа у сховищі, фізико-механічних властивостей та кута нахилу до горизонту площини, що розглядається. Вертикальний  $q^H$  і горизонтальний  $p^H$  нормативний тиск сипучого матеріалу в бункерах визначається за формулами [1]:

$$q^H = \gamma u; \quad (1)$$

$$p^h = k\gamma y, \quad (2)$$

де  $y$  – відстань від поверхні сипучого матеріалу до перерізу, що розглядається;

$k$  – відношення горизонтального тиску до вертикального,  $k = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ ;

$\gamma$  – питома вага матеріалу, для зерна  $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$  [1];

$\varphi$  – кут природного укосу,  $\varphi = 25^\circ$  [1].

Основний нормативний тиск сипучого матеріалу, який діє перпендикулярно похилій поверхні воронки  $p_n^\alpha$  (рис. 3), визначається за формулою:

$$p_n^\alpha = m_0 q^h, \quad (3)$$

де  $m_0 = \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha$ .

Розрахункові навантаження від тиску сипучих матеріалів визначаються множенням нормативних тисків на коефіцієнт надійності за навантаженням  $\gamma_f$ , який для бункерів рівний 1,2 [5].

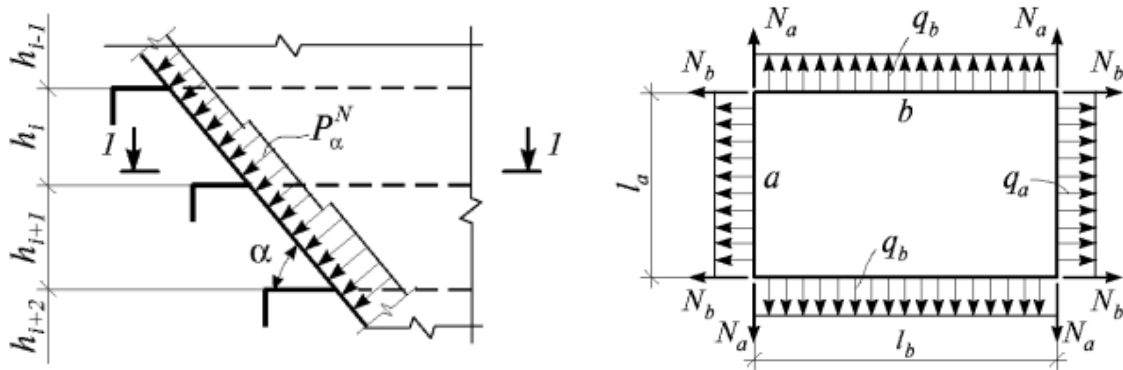


Рис. 3. Розрахункова схема воронки з ребрами жорсткості

Джерело: [1].

Бункер, що проектується, має висоту призматичної частини 3400 мм, розміри в плані, враховуючи припуски на виготовлення та зазори при монтажі на повздовжні та поперечні балки опорної рами (з метою зниження металоємності бункера [5]), міжосьова відстань між якими має розміри 2500×4300 мм, по внутрішньому обміру 2185×3985 мм, висоту воронки 1600 мм, випускний отвір 600×600 мм (рис. 4).

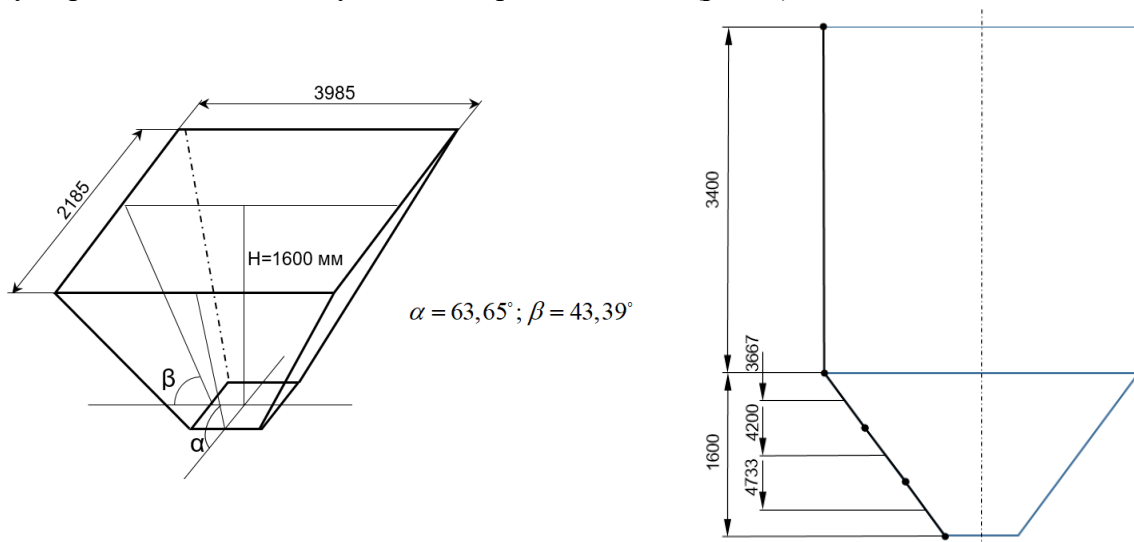


Рис. 4. Розмірні параметри бункера

Плоскі стінки бункерів розраховуються як однопролітні пластинки, розрахункові навантаження у яких визначають, виходячи із припущення їх шарнірного закріплення на нерухомих опорах (ребрах), під дією рівномірно розподіленого навантаження (рис. 5).

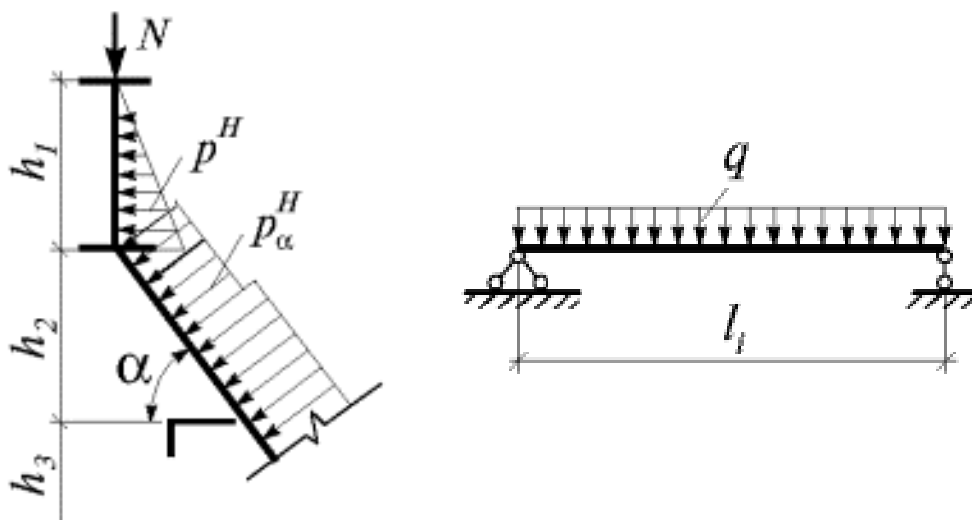


Рис. 5. Розрахункова схема навантажень на стінки бункера

Джерело: [1].

Для скорочення підрахунків зусилля визначимо тільки для нижньої (третьої) панелі:

$$q^H = 1,2 \cdot 800 \cdot 4,733 = 4543,68 \text{ кгс/м}^2;$$

$$k = \text{tg}^2(45^\circ - 25^\circ/2) = 0,406;$$

$$m_0^\alpha = \cos^2 63,65^\circ + 0,406 \cdot \sin^2 63,65^\circ = 0,523;$$

$$m_0^\beta = \cos^2 43,39^\circ + 0,406 \cdot \sin^2 43,39^\circ = 0,720.$$

Основні нормативні тиски сипучого матеріалу, які діють перпендикулярно похилій верхній воронки широкої сторони  $p_n^\alpha$  та похилій поверхні воронки вузької сторони  $p_n^\beta$ :

$$p_n^\alpha = m_0^\alpha q^H = 0,523 \cdot 4543,68 = 2376,34 \text{ кгс/м}^2;$$

$$p_n^\beta = m_0^\beta q^H = 0,720 \cdot 4543,68 = 3271,45 \text{ кгс/м}^2.$$

На лінії з'єднання призматичної частини з воронкою:

$$p^H = 1,2 \cdot 0,406 \cdot 800 \cdot 3,4 = 1325,18 \text{ кгс/м}^2.$$

Отримані значення навантажень використали для моделювання напруженого стану в конструкціях бункерів за допомогою програмних продуктів ANSYS та Autodesk Inventor. Бралася до уваги також і власна вага конструкції. Проектування здійснювалось відповідно до вимог ДБН В.2.6-198:2014 “Сталеві конструкції. Норми проектування” [11].

Так, шляхом моделювання напруженого стану в конструкціях бункерних ємностей виявили місця концентрації напружень, встановили значення величин деформування елементів конструкцій, визначили оптимальні варіанти конструктивного оформлення, зокрема, розмірні параметри та схему розташування вертикальних і поперечних ребер жорсткості.

Для прикладу, за одним із розглянутих варіантів конструкції бункера з розташуванням панелей у призматичній частині під кутом  $90^\circ$  одна до одної має місце значне перевищення напружень у вузлах (рис. 6). При цьому забезпечується нормальна робота плоских панелей, які складаються з листової обшивки та приварених до неї вертикальних та горизонтальних ребер жорсткості.

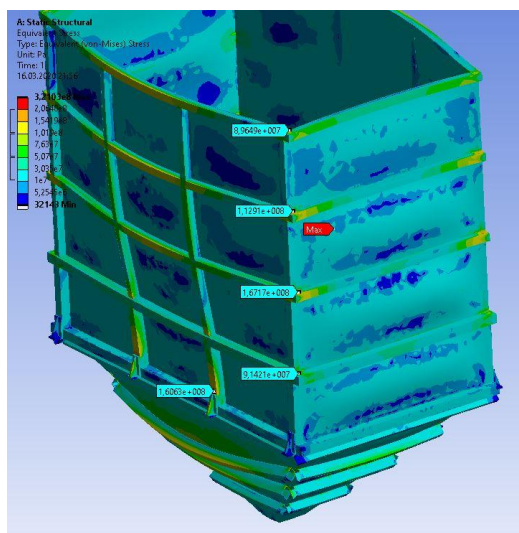


Рис. 6. Моделювання напруженого стану в конструкції бункера відходів (ANSYS)  
Джерело: розроблено авторами.

При дослідженні варіантів конструктивного оформлення бункерних ємностей остаточно прийняли варіант конструкції, зображений на рис. 7. За прийнятим варіантом у призматичній частині всі плоскі панелі з каркасом оребрення, виконаного із профільної труби, з'єднуються в кутах зі скругленням радіусом 500 мм. Аналогічно виконується з'єднання панелей воронки.

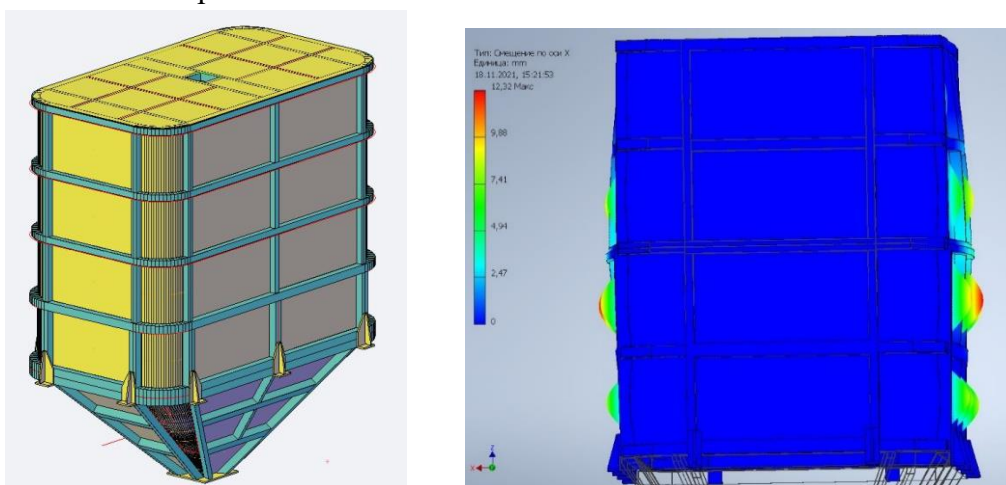


Рис. 7. Компонування конструкції бункера прийнятого варіанта та напружений стан  
Джерело: розроблено авторами.

У розробленій конструкції, виконаній зі сталі С245, товщина листової обшивки воронки 4 мм, вертикальні ребра жорсткості з труби прямокутної 100×60×4 мм, 100×50×5 мм, горизонтальні ребра жорсткості з труби квадратної 100×5 мм, опорне ребро з труби квадратної 100×8 мм.

Нижній блок призматичної частини має товщину листової обшивки першого ярусу 4 мм, другого – 3 мм. Вертикальні ребра жорсткості з труби прямокутної 100×50×5 мм, 80×40×3 мм, горизонтальні ребра – з труби квадратної 100×5 мм та 80×3 мм.

Верхній блок вертикальної частини має товщину листової обшивки 3 мм. Вертикальні ребра жорсткості з труби прямокутної 80×40×3 мм, горизонтальні ребра – з труби квадратної 80×3 мм.

Таким чином, використання різнорозмірної труби для каркаса жорсткості та листа різної товщини дозволило знизити металоемність конструкції.

Як зазначалось вище, ретельної уваги вимагає опрацювання конструкції вузла спряження призматичної частини та воронки, щоб запобігти відриву останньої під вагою сипучого матеріалу.

Для запобігання такого явища в запропонованій конструкції воронки використовується конструктивне рішення, за яким вертикальні ребра жорсткості плоских панелей з'єднуються із замкнутим по периметру опорним ребром з профільної труби (рис. 8).

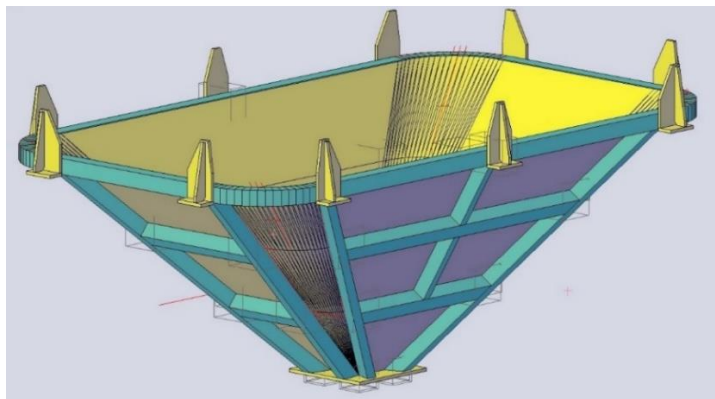


Рис. 8. Конструкція воронки

Джерело: розроблено авторами.

До ребра, у свою чергу, приварені опорні лапи, за рахунок яких на першопочатковому етапі спорудження бункера здійснюється монтаж воронки на повздовжні та поперечні балки опорної рами.

Призматичний бункер, спроектований відповідно до рекомендацій традиційного підходу [3] має об'єм  $35 \text{ м}^3$  та масу  $4,25 \text{ т}$ , що в сукупності на комплекс блока відвантаження зерносушильного комплексу становить  $12,75 \text{ т}$ . Якщо врахувати масу двотаврових балок (двотавр №24у загальною масою  $876,96 \text{ кг}$ ) опорної рами та вагу кожного бункера за прийнятим варіантом ( $3,433 \text{ т}$ ), то отримуємо масу  $11,176 \text{ т}$ , що на  $12 \%$  менше. Загальний вигляд блоку відвантаження та схема його монтажу зображені на рис. 9.



Рис. 9. Схема монтажу (а) та загальний вигляд спорудженого блока відвантаження (б)

Джерело: розроблено авторами.

Ще однією специфічною особливістю розробки є використання блочної конструкції бункерів. Такий підхід перетворює процес спорудження на монтажному майданчику з будівництва у складання з блоків із підвищеним ступенем заводської готовності.

Розглянутий вище варіант стосується бункерів, які мають розміри, що дозволяють здійснити їхнє перевезення на автомобільному транспорті без будь-яких обмежень.

У випадку, якщо розміри окремих блоків будуть більшими за габаритні обмеження транспортних засобів, на монтажному майданчику після загального контрольного складання на заводі-виробнику укрупнювальне складання як призматичної частини, так і воронки може бути виконане з окремих плоских панелей, розміри яких визначаються із міркувань габаритних обмежень транспортних засобів.

Визначення основних показників, які використовуються при порівняльній оцінці ефективності інженерних рішень, методами техніко-економічного аналізу досить ускладнене [12]. Звичайно, поза увагою не повинен залишатись аспект розмірів капіталовкладень не тільки на реалізацію виробництва, але й на монтаж конструкції.

Крім того, істотним фактором, який впливає на кінцеву вартість металоконструкцій будівель і споруд, є територіальна віддаленість об'єкта від заводу-виробника. Витрати на доставку металоконструкцій в умовах завищених цін на перевезення автомобільним і залізничним транспортом нерідко спричиняють суттєві збитки. Додатково виникають витрати на доставку необхідного устаткування, інструментів, матеріалів, а також робітників, що виробляють роботи вахтовим методом на віддаленому об'єкті.

Кількісне оцінювання якості проекту ми пропонуємо здійснити за витратами ресурсів на монтаж, оскільки очевидно, що при меншій масі конструкції вона має і меншу вартість, але за прийнятим варіантом конструкції виникають додаткові витрати на спорудження опорної рами з балок двотаврового перерізу. Порівняльний розрахунок вартості монтажу проведено у програмному комплексі «Будівельні технології: Кошторис 8». Результати розрахунку наведені в таблиці.

Таблиця

*Порівняння вартості монтажу бункера за традиційним та запропонованим підходом*

№ з/п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Загальна вартість, грн			Витрати праці робітників, не зайнятих обслуговуванням машин, люд/год	
					Всього	заробітної плати	експлуатації машин	тих, що обслуговують машини	
								на одиницю	всього
<b>Призматичний бункер, спроектований відповідно до рекомендацій традиційного підходу</b>									
1	E9-4-4	Монтаж бункерів і силосів стаціонарних	т	12,75	154535	42316	98952	48,4800	618,12
		<b>Разом прямих витрат на монтаж</b>			<b>154535</b>	42316	44143	42,0813	536,54
							98952		<b>618,12</b>
							44143		<b>536,54</b>
<b>Розроблена конструкція призматичного бункера</b>									
1	E9-18-1	Монтаж балок на відмітці до 25 м масою до 1 т	т	0,877	3499	1239	1880	22,8800	20,07
							755	10,7232	9,40
2	E9-4-4	Монтаж бункерів і силосів стаціонарних	т	10,299	124828	34182	79930	48,4800	499,30
		<b>Разом прямих витрат на монтаж</b>			<b>128327</b>	35421	35657	42,0813	433,40
							81810		<b>519,37</b>
							36412		<b>442,80</b>

Як видно з представлених у таблиці результатів, загальна вартість монтажу блока відвантаження із трьох призматичних бункерів за прийнятим варіантом конструкції на 26208 грн менше. Разом з тим зменшуються і витрати праці, що скорочує тривалість робіт.

**Висновки.** Аналіз існуючих досліджень у сфері спорудження призматичних бункерів та основних задач при їх проектуванні, виготовленні та монтажу дозволив виділити напрями покращення експлуатаційних характеристик таких конструкцій та вдосконалення їх з погляду технологічності виробництва.



Для забезпечення експлуатаційної надійності бункерних ємностей розроблено рішення, що передбачає використання в конструкції воронок бункерів вертикальних ребер жорсткості, які забезпечують спільну роботу її листової частини з каркасом жорсткості.

Використання блочного принципу спорудження бункерних ємностей дозволяє підвищити ступінь заводської готовності відправочних елементів і зменшити витрати праці на монтажних майданчиках.

### Список використаних джерел

1. Металлические конструкции : справ. проект. : в 3 т. / под ред. В. В. Кузнецова. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – Т.2 : Стальные конструкции зданий и сооружений. – 512 с.
2. Металлические конструкции. Общий курс : учебник для вузов / под общ. ред. Е. И. Беленя. 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 560 с.
3. Лихтарников, Я. М. Расчет стальных конструкций : справ. пособ. / Я. М. Лихтарников, В. М. Клыков, Д. В. Ладыженский. – К. : Изд-во “Будівельник”, 1975. – 350 с.
4. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров. – М. : Стройиздат, 1983. – 200 с.
5. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций : пер. с польск. / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. – М. : Стройиздат, 1978. – 183 с.
6. Ягофаров Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2006. – 234 с.
7. Банников Д. О. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 59-66.
8. Банников Д. О. Сопоставительный анализ конструктивных схем стальных бункерных емкостей / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2007. – Т. 13, № 3. – С. 163-172.
9. Банников Д. О. Анализ причин аварий стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 5. – С. 91-95.
10. Банников Д. О. Проективання сталевих бункерних ємностей за панельною конструктивною схемою / Д. О. Банников // Металеві конструкції. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 107-104.
11. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – [Чинний від 2015-01-01]. – Вид. офіц. – Київ, 2014. – 201 с.
12. Лихтарников, Я. М. Металлические конструкции. Методы технико-экономического анализа при проектировании / Я. М. Лихтарников. – М. : Стройиздат, 1968. – 264 с.

### References

1. Kuznetsov, V. V. (Ed.) (1998). *Metallicheskie konstruksii (Spravochnik proektirovshchika): [Metal structures (Designer's guide)]. Stalnye konstruksii zdaniy i sooruzhenii [Steel structures of buildings and structures]* (Vol. 2). ASV.
2. Belenya, Ye. I. (ed.) (1986). *Metallicheskie konstruksii. Obshchii kurs: uchebnik dlia vuzov [Metal structures. General course: textbook]*. Stroiizdat.
3. Lihtarnikov, Ya. M., Klykov, V. M., & Ladyzhenskiy, D. (1975). *Raschet stalnyh konstruksiy. Spravochnoe posobie [Design of steel structures. Reference guide]*. Budivelnik.
4. *Rukovodstvo po raschetu i proektirovaniu zhelezobetonnyh, stalnyh i kombinirovannyh bunkerov [Guidelines for the calculation and design of reinforced concrete, steel and combined bunkers]* (1983). Stroiizdat.
5. Augustin, Ya., & Shledzevskiy, E. (1978). *Avarii stalnyh konstruksiy [Damages of steel structures]*. (Transl.). Stroiizdat.
6. Yagofarov, H., & Sobakin, N. N. (2006). *Osnovy teorii proektirovaniya listovyh metallicheskikh konstruksiy. Piramidalno-prizmaticheskii bunker [Fundamentals of the theory of designing sheet metal structures. Pyramidal-prismatic bunker]*. Ekaterinburg.
7. Bannikov, D.O., & Kazakevich, M.I. (2002). *Osnovnye prichiny avariyn zhestkiy stalnyh bunkerov i nizkiy silosov [The main causes of breakdown rate in strong steel bunkers and small silos]. Metalevi konstruksii – Metal structures*, 5(1), 59–66.

алмазу в буровому інструменті пов'язана з певними необхідними умовами. У промислових умовах методом спонтанного синтезу вдалось виростити крупні монокристали октаедричного габітусу типу Ib з мінімальною кількістю включень металу-розчиннику та ростових дефектів. Проте такі кристали повинні бути не лише візуально досконалі, вони повинні витримувати експлуатаційне навантаження та технологічні режими виготовлення коронок. Дослідженню впливу одного з таких технологічних етапів, а саме хіміко-термічній обробці і присвячена наукова робота.

**Постановка проблеми.** Використання в технологічному процесі виготовлення бурових коронок є хіміко-термічна обробка кристалів, що дозволяє очистити їхні поверхні від залишків металу-розчинника, отримати більш розвинену поверхню, що покращує взаємодію зі зв'язкою, частково стравити дефектний поверховий шар, що сприяє зміцненню кристалу. Проте вплив цієї технологічної операції на фізико-механічні властивості монокристалів алмазу фактично є малодослідженим, особливо для кристалів нового покоління.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При виборі інструменту для буріння різноманітних гірських порід із різним значенням характеристик тріщиностійкості слід зауважити, що чим більш крихкою та твердою є порода, тим вищої якості повинні бути алмази, що використовуються. Питанню вибору конструктивних характеристик залежно від властивостей гірських порід присвячено велику кількість наукових праць [1-6].

Забезпечення високого рівня ефективності алмазного буріння може дати лише впровадження новітніх алмазозберігаючих технологій. Однак такі технології можуть бути реалізовані лише за рахунок використання відповідного типу та розміру монокристалів алмазів, що мають достатній рівень фізико-механічних властивостей, а саме міцності та твердості.

Багаторазове збільшення працездатності коронок при використанні алмазів підвищеної міцності відмічалось не лише при бурінні твердих порід XI...XII категорії, але й більш м'яких порід X категорії, це дозволяє збільшити глибину одного проходу і досягти швидкості виробітки до 100 мкм/об [2].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Таким чином, є необхідність дослідити вплив хіміко-термічної обробки на міцність, як основний показник працездатності таких кристалів у буровому інструменті.

**Метою статті** є дослідження статичної міцності та отримання залежності цього показника від розмірів кристалу після хіміко-термічної обробки.

**Виклад основного матеріалу.** Монокристали синтетичного алмазу типу Ib були отримані в апараті високого тиску типу «тороїд» шляхом спонтанної розчин-розплавної кристалізації. Дослідну партію монокристалів було отримано в декілька завантажень. Після витравлення з матриці (рис. 1) їх було поділено на групи відповідно до розмірів, форми та наявності металевих включень. Первинний візуальний огляд [7; 8] монокристалів алмазу типу Ib, що мають малі розміри, був зроблений із використанням біологічного мікроскопу фірми Skydust модель XSP-1406 із максимальним збільшенням 1200 оснащений цифровою приставкою 5МП.

Виготовлена партія кристалів становила 166 штук. Візуальний огляд показав, що кристали мають форму дуже близьку до октаедра. На поверхні було виявлено наступні дефекти: притуплення вершин гранями куба, притупленні або здвоєні граней, сходинок росту та нерівності поверхні, що мають хвилястий характер (рис. 1). Якщо перша група дефектів пов'язана з режимами синтезу, то останній ймовірно пов'язаний із процесом відокремлення кристалу від матриці розплавом.

8. Bannikov, D.O., & Kazakevich, M.I. (2007). Sopostavitelnyi analiz konstruktivnykh shem stalnykh bunkernykh emkostey [Comparative analysis of structural schemes of steel bunker tanks]. *Metalevi konstruktsii – Metal structures*, 13(3), 163-172.
9. Bannikov, D.O. (2011). Analiz prichin avariiv stalnykh emkostnykh konstruktivnykh dlya sypuchih materialov [Analysis of the causes of damages in steel tank structures for bulk materials]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and mining industry*, (5), 91-95.
10. Bannikov, D.O. (2011). Proektuvannya stalevuh yemnostei za panelnoiu konstruktivnoiu shemoiu [Design of steel bunker tanks according to the panel constructive scheme]. *Metalevi konstruktsii – Metal structures*, 179(2), 107-104.
11. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2014). *Steel structures. Design norms* (DBN V.2.6-198:2014).
12. Lihtarnikov, Ya.M. (1968). *Metallicheskie konstruktsii. Metody tehniko-ekonomicheskogo analiza pri proektirovanii* [Metal structures. Methods of technical and economic analysis in the designing]. Stroiizdat.

Отримано 25.11.2021

UDC 624.954

**Serhii Oleksiienko<sup>1</sup>, Svitlana Yushchenko<sup>2</sup>, Mykhailo Rudenko<sup>3</sup>, Volodymyr Grechka<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [sv.oleks@ukr.net](mailto:sv.oleks@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439). SCOPUS Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [rasssveta@ukr.net](mailto:rasssveta@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

ResearcherID: [F-7741-2014](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020). SCOPUS Author ID: [57190373626](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020)

<sup>3</sup>Senior Lecturer of Welding Technologies and Construction Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [rudenko\\_bear@ukr.net](mailto:rudenko_bear@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792). SCOPUS Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

<sup>4</sup>Assistant of Welding Technologies and Construction Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [vovagrechka87@gmail.com](mailto:vovagrechka87@gmail.com)

## PROJECT OF PRISMATIC BUNKER STRUCTURE AND ESTIMATION OF ACCEPTED SOLUTIONS EFFICIENCY

*The ensuring of the minimum metal consumption of the structure, the reducing the labour-intensiveness of its manufacture and assembly in the construction of steel prismatic bunkers, designed for storage and unloading of free-flowing materials, are entirely determined by the quality of the design structure.*

*The disadvantage of bunker designs is the connection of the side panels at right angles, which causes the unevenness of the stress-strain state and, as a consequence, the occurrence of emergencies.*

*Some studies suggest that one of the main specific causes of bunker breakdowns and damages is related to incorrect determination of structural loads. A number of authors propose the use of multilayer complex design with the utilization of corrugated steel sheets, which directed to address the issue of reducing metal consumption.*

*Today there is still no complex approach to solving the problem of ensuring the reliable operation of the structure owing to searching the best structural forms, technologies for its manufacture and assembly.*

*In this connection, the purpose of this work is to develop the design of the prismatic bunker, which allows to ensure operational reliability, production manufacturability and minimal attended costs associated with the construction of the structure on the building site.*

*By means of modeling the stress state in the structures of bunker tanks, the optimal constructive design options were determined, particularly, dimensional parameters and layout of vertical and stiffening plates.*

*To ensure the operational reliability of bunker tanks, a solution has been developed that provides for the use of stiffening plates in the design of bunker funnel, which ensure the combined work of its sheet part with the stiffening frame. Use of the block principle of construction of bunker tanks allows to increase a degree of factorial readiness of dispatch elements and to reduce labour-intensiveness on assembly sites.*

**Keywords:** prismatic bunker; calculated scheme; projecting, stress state; metal consumption; block structure; assembly.

Fig.: 9. Table: 1. References: 12.