

УДК 624.954

## ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ЄМНІСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

к.т.н., доц. Банніков Д.О.

*Дніпропетровській національній університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*

### 1. Проблема проектування надійних та довговічних ємнісних конструкцій

Для зберігання більшості сипучих матеріалів використовуються спеціально призначені для цього ємнісні будівельні конструкції. Традиційно їх прийнято поділяти на два різновиди – бункера та силоси (рис. 1), хоча у принциповому відношенні їх робота та конструктивна схема практично тотожні.

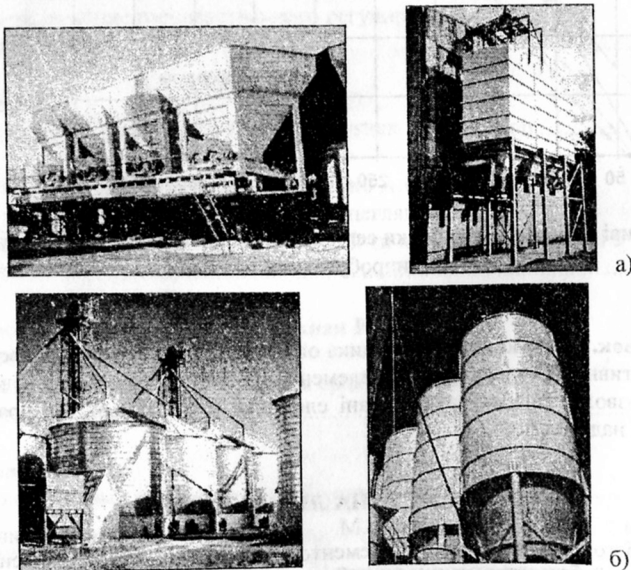


Рис. 1. Ємності для сипучих матеріалів:  
а) – бункерні; б) - силосні

Методологія проектування таких конструкцій викладена в ряді нормативних документів [1 – 3] та додатково представлена у спеціальній фаховій літературі [4 – 8].

Проте, на жаль, ємнісні конструкції для сипучих матеріалів не є достатньо надійними та довговічними, про що свідчать як звіти щодо їх експлуатації [9, 10], так і наявна статистика відмов та аварій [11, 12]. Як було показано в роботах автора [13 – 15] основна причина такої ситуації полягає в недосконалості ряду аспектів існуючої методики проектування, а точніше її теоретичній основі.

## **2. Сучасні теоретичні підходи до проектування ємнісних конструкцій**

Зважаючи на описану вище проблему, автором були проведені багаторічні комплексні дослідження особливостей роботи та експлуатації сталевих ємнісних конструкцій. Вони включали як теоретичні розробки стосовно оптимізації зовнішньої геометричної форми таких споруд [16 - 18], вдосконалення їх конструктивного рішення [19 - 24], дослідження взаємодії із сипучою середою [25 - 28], так і експериментальні роботи, спрямовані на перевірку побудованих моделей та сформульованих рекомендацій [29 - 33].

Узагальнення отриманих результатів дозволило розробити нову, сучасну та більш теоретично обґрунтовану концепцію проектування сталевих ємнісних споруд для сипучих матеріалів, названу автором концепцією формоутворення. Вона містить не тільки ті аспекти, на які традиційно рекомендується звертати увагу при розробці таких конструкцій, а й ряд додаткових, які не знайшли опису у нормативній та довідковій літературі, але постійно турбують інженерів-проектувальників.

Однак, більшість цих аспектів представлені суто у науковому вигляді та потребують певних навичок для їх застосування. У зв'язку з цим автором розроблено більш конкретну й придатну для безпосереднього практичного використання інженерну методику, яка дозволяє її пряме застосування в інженерній практиці. Її викладенню і присвячена дана публікація.

## **3. Сутність інженерної методики проектування ємнісних конструкцій**

Розроблена інженерна методика проектування сталевих ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів складається із окремих частин. Під час проектування рекомендації кожної з них мають виконуватись як у вказаній нижче послідовності, так і вибірково, за бажанням інженера.

### **3.1. Визначення властивостей сипучого матеріалу**

Процес проектування вертикальної сталеві ємності для сипучих матеріалів слід розпочинати не з визначення її геометричних розмірів, як це рекомендує традиційний підхід до проектування, а з визначення основних фізико-механічних властивостей сипучого матеріалу, для зберігання якого дана ємнісна споруда передбачається. Адже саме властивості сипучого матеріалу дозволять в подальшому грамотно та ефективно обрати необхідні розміри й форму конструкції.

Більшість необхідних характеристик сипучих матеріалів є достатньо відомими і наведені в багатьох фахових довідкових виданнях (див.,

наприклад, [4 – 8]. Проте, на жаль, ці дані не дуже добре узгоджуються між собою. Тому в достатньо відповідальних випадках необхідно провести попереднє практичне визначення цих властивостей.

До потрібних фізико-механічних характеристик сипучих матеріалів належать наступні шість параметрів: щільність  $\gamma$ , розмір зерна  $d$ , кут зовнішнього тертя сипучого матеріалу  $\alpha$  стінки ємності  $\phi$ , кут внутрішнього тертя між зернами сипучого матеріалу  $\psi$ , кут природного відкосу сипучого матеріалу  $\chi$  і кут укладки зерен сипучого матеріалу  $\beta$ .

Щільність сипучого матеріалу визначається за загальновідомими методами, наприклад, простим зваженням. При цьому отримують величину насипної щільності, якої здебільшого виявляється досить. Однак, якщо матеріал схильний до ущільнення під час довготривалого зберігання, то його перед випробуванням також слід штучно ущільнити навантаженням, яке приблизно відповідає рівню передбачуваного в ємності.

В якості розміру зерна сипучого матеріалу слід приймати найбільший розмір при витягнутій формі зерна. Це дасть можливість в подальшому коректно визначити розмір випускного отвору ємності та запобігти утворенню сводів під час вивантаження матеріалу.

Наступні три параметри – кути зовнішнього та внутрішнього тертя, а також кут природного відкосу, можуть бути визначені за достатньо апробованими і відомими методиками, наведеними, наприклад в рекомендаціях [34].

Найбільші складнощі може викликати визначення останнього параметру – кута укладки зерен сипучого матеріалу. Адже цей параметр почав використовуватись досить недавно, тому у довідковій літературі про нього немає відомостей. Проте в роботі [35] представлена розроблена методика, яка дозволяє з необхідним ступенем точності провести потрібні вимірювання. Вона є досить простою та не передбачає використання складного обладнання.

Визначені таким чином фізико-механічні характеристики сипучого матеріалу дозволяють перейти до наступного етапу проектування ємнісної конструкції, пов'язаного із визначенням її зовнішньої форми та основних геометричних розмірів.

Замітимо, що якщо передбачається зберігання декількох видів сипучих матеріалів, то слід визначати вказані характеристики для всіх них. Проте обирати з них “найбільші” або “найменші” значення не слід, оскільки тиск сипучого матеріалу не є лінійною функцією від цих параметрів.

### **3.2. Вибір зовнішньої форми і призначення габаритних розмірів**

Цей етап розпочинається із визначення необхідного обсягу зберігасмого сипучого матеріалу. Як правило, він задається інженерами-технологами.

Далі виходячи з габаритів площадки розташування ємнісної конструкції та технологічних можливостей по її виготовленню, слід визначити форму ємності в плані (кругла чи квадратна). Приймати несиметричні або витягнуті форми не рекомендується, оскільки це веде до підвищених матеріаловитрат.

Після цього виходячи з габаритів супутнього технологічного обладнання визначають приблизний розподіл всього об'єму сипучого матеріалу між верхньою та нижньою частинами ємності та розраховують за відомими

геометричними співвідношеннями [8] первісні геометричні розміри споруди. Форму випускної частини при цьому слід приймати з лінійним нахилом граней (утворюючої) воронки.

Окремо визначають розмір випускного отвору – за рекомендаціями [8], який слід приймати не менше, ніж 10 розмірів діаметра зерна сипучого матеріалу для запобігання активним пульсаціям під час вивантаження, а краще – не менше, ніж 20 таких розмірів.

Далі визначають оптимальну форму нижньої випускної частини смності з урахуванням її взаємодії із сипучим матеріалом за виразом (1):

$$R(y) = \frac{r}{\sqrt[4]{1 + 2 \cdot \pi^2 \cdot \gamma \cdot g \cdot \frac{r^4 \cdot \cos \phi}{\operatorname{tg}(\beta + \psi)} \cdot y}}, \quad (1)$$

де  $r$  – первісно визначена ширина випускного отвору;

$g$  – прискорення вільного падіння.

У випадку декількох сипучих матеріалів отримують, відповідно, декілька залежностей. Графічно вони можуть бути побудовані в будь-якій придатній для цього комп'ютерній програмі і будуть мати вигляд кривих, зображених на рис. 2.

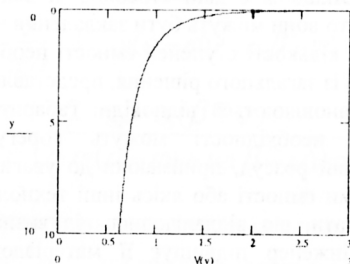


Рис. 2. Форма нижньої частини смнісної конструкції

Оскільки отримана форма буде мати вигляд швидко звужуваної воронки, то за графіком слід визначити кут нахилу її основної частини, який треба співставити із кутом природного відкосу сипучого матеріалу. Згідно з існуючими рекомендаціями [8] для повного спорожнення смності він має бути на  $5 - 10^\circ$  вище, ніж кут нахилу обшивки воронки. При цьому слід звернути увагу на те, що у випадку пірамідальної форми кут нахилу ребра піраміди до горизонту  $\zeta$ , виявляється нижчим, за кут нахилу її бокових граней  $\alpha$ . Тому саме на нього і слід орієнтуватись. Для його визначення може бути використаний вираз (2):

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Таким чином отримана крива має бути апроксимована однією або декількома похилими ділянками з відповідними обраними кутами нахилу до горизонту.

Далі слід провести оптимізацію висот окремих частин отриманої форми ємності. У випадку двоступінчастої ємності це може бути зроблено за виразами (3) і (4), для верхньої та нижньої частин, відповідно, де у випадку круглої форми ємності в цих виразах в знаменнику коефіцієнт 4 слід замінити на  $\pi$ :

$$y_1^{opt} = 3 \sqrt{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot t_2 \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - a_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot (a_0^2 \cdot y_1 + a_0 \cdot y_1^2 / \operatorname{tg} \alpha + y_1^3 / (3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha))}{4 \cdot (a_0 + y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (4)$$

При цьому в першому наближенні товщини верхньої та нижньої частин можуть бути прийняті однаковими, тоді у вказаних виразах вони скоротяться і фігурувати не будуть. Якщо ж є дані стосовно їх величин, наприклад, за досвідом проектування, то вони можуть бути закладені в наведені вирази.

У випадку більшої кількості ступеней ємності необхідні вирази можуть бути виведені додатково із загального рішення, представленого в роботі [16].

Таким чином, встановлюються відповідні габаритні розміри ємнісної конструкції, які при необхідності можуть корегуватись інженером-проектувальником на свій розсуд, приймаючи до уваги, наприклад, місцеві обмеження за габаритами ємності або якісь інші технологічні умови. Однак при цьому слід пам'ятати, що віддаляючись від визначених оптимальних розмірів конструкції, інженер підвищує її матеріаломісткість. Особливо небажаним при цьому виявляється розвиток вертикальної частини по висоті, тобто проектування вузьких та високих споруд, оскільки вони є найнеекономічнішими за своєю формою. Не слід, також, надавати перевагу ємностям без вертикальної частини. Вони хоча і виявляються більш раціональними за високі ємності, однак не набагато.

### 3.3. Визначення тиску сипучого матеріалу

Наступним етапом проектування вертикальної ємнісної споруди для сипучих матеріалів є обчислення навантажень.

Стосовно визначення традиційних типів навантажень, як наприклад власна вага обладнання, розташованого над ємнісною спорудою, або снігові й вітрові навантаження можна рекомендувати відомі нормативні документи або довідники [4 – 8].

Основним технологічним навантаженням є тиск сипучого матеріалу на стінки конструкції. У сформованій за вказівками попереднього підрозділу

споруді небезпечними виявляються два розрахункових режими – статичне зберігання сипучого матеріалу та момент початку його вивантаження. В другому випадку тиск суттєво підвищується, тому, як правило він і буде визначальним. Проте розрахунки рекомендується вести для обох режимів.

Для цього за визначеними фізико-механічними характеристиками сипучого матеріалу розраховують величину коефіцієнтів нормального тиску за виразом (5) для випадку статичного зберігання матеріалу і виразом (6) для випадку початку його вивантаження:

$$k_n = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta - \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (5)$$

$$k_n^{em} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta + \psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta + \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}. \quad (6)$$

При цьому для кожної зі ступеней ємності ці коефіцієнти набудуть різного значення, оскільки до складу їх виразів входить кут нахилу стінки до горизонталі. У випадку двоступінчастої ємності коефіцієнти мають бути уточнені за виразами (7) і (8):

$$k_{n1} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{\left(r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (7)$$

$$k_{n2} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{r \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}. \quad (8)$$

Тепер можна отримати залежності тиску сипучого матеріалу з глибиною за виразами  $P_{ni}(y) = k_{ni} \cdot P_{ei}(y)$  для кожної з частин двоступінчастої ємності, а також розрахувати його найбільше значення. При цьому вирази для визначення вертикального тиску будуть мати вигляд (9) і (10) для верхньої та нижньої частин ємності, відповідно:

$$P_{e2}(y) = \frac{\gamma \cdot g}{k_2} \cdot (1 - e^{-k_2 \cdot y}), \quad (9)$$

$$P_{e1}(y) = \gamma \cdot g \cdot \left(r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot \frac{1}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha}} + C \cdot \left(r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^{k_1 - 2}. \quad (10)$$

Ці вирази можуть здатися дещо складними, проте вони, як показує досвід автора, можуть бути інтерпретовані у графічному вигляді за допомогою сучасних спеціалізованих математичних пакетів комп'ютерних програм.

Для випадку багатоступінчастої споруди, з кількістю конструктивних частин три і більше вирази для визначення тиску сипучого матеріалу можуть бути отримані за методикою, наведеною в роботах [25 – 28].

Доцільним може виявитися, також, визначення тиску сипучого матеріалу за традиційними існуючими підходами, відповідно до рекомендацій робіт [4 – 8]. Остаточний вибір розрахункового підходу залишається за інженером-проектувальником.

#### 3.4. Вибір конструктивного рішення

Конструктивне рішення смісної будівельної споруди для сипучих матеріалів рекомендується обирати із використанням запропонованої автором роботи панельної конструктивної схеми [20 – 24]. При цьому доцільно призначати розміри окремої панелі такими, щоб вони відповідали розмірам окремої частини конструкції. При значних розмірах ємності цього може виявитися недостатнім і може знадобитись розбити окрему стінку на 2 – 3 самостійні панелі. Остаточна розбивка на панелі може бути відкоригована після проведення розрахунку її елементів.

Кожну панель рекомендується виконувати за двошаровою схемою із використанням гофрованих сталевих листів – рис. 3.

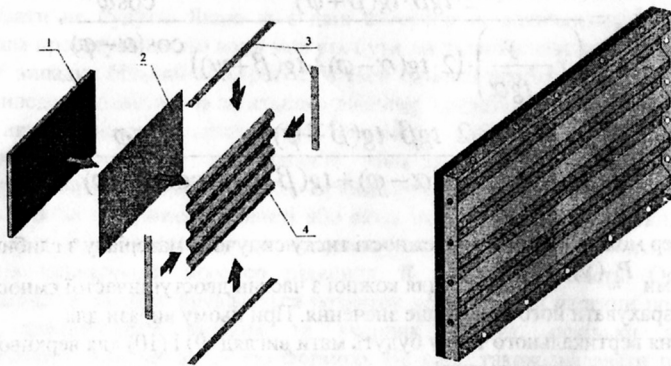


Рис. 3. Конструктивна схема панелі:

- 1 – футерувальний шар, 2 – внутрішній плоский лист,
- 3 – обв'язувальний елемент, 4 – зовнішній профільований лист

За бажанням інженера-проектувальника панельна схема допускає використання підкріплюючих ребер жорсткості, які встановлюються між обв'язувальними елементами панелі. Така схема буде більш наближеною до традиційної конструктивної схеми із використанням окремих підсилюючих ребер жорсткості. Проте форму поперечного перерізу ребер слід приймати замкненою, краще у вигляді V-подібних елементів, що надасть конструкції низки переваг, наведених в роботі [36].

### 3.5. Розрахунок конструкції ємності

Для визначення напружено-деформованого стану елементів сконструйованої таким чином споруди рекомендується використання методу скінчених елементів на базі одного з багатьох сучасних спеціалізованих пакетів, наприклад, неодноразово використаного автором в ході виконаних ним досліджень проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows. Рекомендації із побудови і дискретизації розрахункових моделей, постановки опор та завдання навантажень, відладки моделей та аналізу отриманих результатів наведені в монографії автора [37].

Зазначимо, що більшість сучасних проектно-обчислювальних комплексів дозволяє разом із розрахунком вихідного варіанту проводити проектні розрахунки з визначення необхідних розмірів поперечних перерізів несучих конструктивних елементів. При цьому використовуються відомі критерії перевірки міцності, стійкості та жорсткості.

Для добору поперечних перерізів несучих елементів конструкції можуть бути використані, також, і існуючі теоретичні підходи. Так, у випадку застосування панельної конструктивної схеми із ребрами жорсткості розрахунок може проводитись за рекомендаціями діючої методики [4 - 8].

Розрахунок гофрованих панелей може бути виконаний за допомогою наявних рекомендацій, наведених, наприклад, в роботах [38 - 40].

Окремих питань при розрахунках є питання щодо визначення кількості високоміцних болтів, якими з'єднуються окремі панелі між собою. Проте, за винайденими в ході чисельного моделювання зусиллями у відповідних зонах конструкції, такі розрахунки можуть бути виконані і відомими апробованими методиками [41 - 43]. Там же можна відшукати і рекомендації стосовно технології їх використання.

### 4. Заключні зауваження

На основі авторської теоретичної концепції формування сталевих ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів в даній роботі наведена сутність розробленої інженерної методики проектування споруд такого класу. Вона включає в себе п'ять основних етапів, за допомогою яких формується більш раціональна, довговічна та більш ефективна за цілою низкою експлуатаційних показників ємнісна споруда: визначення властивостей сипучого матеріалу, вибір зовнішньої форми і призначення габаритних розмірів конструкції, визначення ризику сипучого матеріалу, вибір конструктивного рішення та розрахунок конструкції ємності. Для кожного з цих етапів сформульовані рекомендації мають достатньо простий, придатний для безпосереднього практичного використання вигляд. Вони передбачають наочне представлення у вигляді рафіків за допомогою сучасних спеціалізованих пакетів комп'ютерних програм.

В цілому представлена методика проектування ґрунтується на сучасних теоретичних засадах та новітніх наукових розробках в сфері ємнісних іудівельних конструкцій. В теперішній час вона прийнята до впровадження в проектну практику низкою ведучих проектно-конструкторських організацій та проходить стадію апробаційної перевірки.

**ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА**

1. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП П-23-81\*. – [Чинний від 1983-01-02]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
2. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98. – [Чинний від 1998-01-07] – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с.
3. Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85. – [Чинний від 1987-01.01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
4. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величина, В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
5. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – [2-е изд.] – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
6. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
7. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: в 3 т. / Под ред. В. В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. - 1998. – 526 с.
8. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
9. Технические решения по ликвидации дефектов бункеров склада товарного глинозема Николаевского глиноземного завода / Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта. – Свердловск, 1982. – 20 с.
10. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 т. / ОАО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». – Днепропетровск, 1997. – 226 с.
11. 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.
12. Bannikov D. O. Features of Failures of Steel Bunkers (of pyramidally-prismatic type) / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 10<sup>th</sup> Polish-Ukrainian sem “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warszawskie Politechnik. – 2002. – Vol. II. – P. 650 – 657.
13. Банников Д. О. Основные проблемы проектирования стальных бункеров транспортной эстакады / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Тематич. вип зб.: Автомобільні дороги та транспортне будівництво. – К.: Нац. трансп ун-т. – 2002. - № 64. -- С. 86 -- 89.
14. Bannikov D. O. Design problems of steel bunkers / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 12<sup>th</sup> Polish-Ukrainian sem. “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warsaw University of Technology. – 2004. - Vol. II. – P. 559 – 564.
15. Банников Д. О. Направления совершенствования современной концепции проектирования жестких стальных бункеров / Д. О. Банников, М. И.

- Казакевич // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2003. – Вип. 1. – С. 130 – 136.
16. Банников Д. О. Выбор рациональной геометрической формы емкостей для сыпучих материалов / Д. О. Банников // Proc. of 13<sup>th</sup> Polish-Ukrainian sem. "Theoretical Foundations of Civil Engineering". – Warsaw: Warsaw University of Technology. – 2005. – P. 53 – 60.
  17. Банников Д. О. Снижение площади коррозионного износа стальных емкостных конструкций / Д. О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2005. – Вип. 9. – С. 136 – 145.
  18. Банников Д. О. Частное решение оптимизации геометрической формы бункеров и силосов / Д. О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2007. – Вип. 18. – С. 154 – 160.
  19. Банников Д. О. Модернизация конструктивной схемы стальных емкостей / Д. О. Банников // Наук.-техн. зб.: Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – К.: Нац. трансп. ун-т. – 2006. – № 73. – с. 30 – 35.
  20. Банников Д. О. Новая конструкция бункерной емкости из стальных панелей / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, Л. М. Рабер // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 6. – С. 98 – 102.
  21. Банніков Д. О. Напружено-деформований стан сталевий панелі бункерної ємності / Д. О. Банніков // Зб. наук. робіт ДНУ: Методи розв'язання прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2006. – Вип. 7. – С. 3 – 10.
  22. Декл. пат. 69817 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Металева ємність для сипучих матеріалів із окремих панелей / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявитель и патентообладатель Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – № 200331211224; заявл. 09.12.03; опубл. 15.09.04, Бюл. № 9.
  23. Декл. пат. 70576 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Вузол з'єднання стінових панелей металевих ємностей для сипучих матеріалів / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявитель и патентообладатель Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – № 20031211267; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
  24. Декл. пат. 70577 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Вузол кріплення футерівки металевих ємностей для сипучих матеріалів / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявитель и патентообладатель Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – № 20031211268; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
  25. Банніков Д. О. Континуальна модель тиску сипучого матеріалу в замкненій ємнісній конструкції / Д. О. Банніков // Збірник наук. праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди". – Рівне. – 2008. – Вип. 17. – С. 333 – 340.
  26. Банніков Д. О. Особливості розподілу тиску сипучого матеріалу в одноступінчастих ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Збірник наукових праць ПолтНТУ: серія "Галузеве машинобудування, Будівництво". – Полтава: вид-во ПолтНТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 79 – 87.

27. Банніков Д. О. Тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастих ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 23. – С. 143 – 149.
28. Банніков Д. О. Визначення коефіцієнта бокового тиску сипучого матеріалу в замкненій посудині / Д. О. Банніков // Журнал “Металеві конструкції”. – 2008. – Том 14, № 2. – С. 113 – 123.
29. Банников Д. О. Исследование угла укладки зерен сыпучего материала на модели емкости / Д. О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 22. – С. 94 – 100.
30. Банников Д. О. Планирование и проведение исследований по экспериментальному изучению сыпучих материалов в емкостных конструкциях / Д. О. Банников // Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – Днепропетровск: изд-во ПГАСА. – 2008. – Вип. 47. – С. 40 – 52.
31. Банников Д. О. Особенности процесса разгрузки бункерных емкостей / Д. О. Банников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 5. – С. 131 – 135.
32. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів / Д. О. Банніков // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. – № 4. – С. 79 – 88.
33. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження статичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції / Д. О. Банніков // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2009. – Вип. 26. – С. 103 – 111.
34. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров / Центр. н.-и. и проек.-эксперим. ин-т пром. зданий и сооруж. – М.: Стройиздат, 1978. – 29 с.
35. Гячев Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 312 с.
36. Банников Д. О. Сопоставительный анализ конструктивных схем стальных бункерных емкостей / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції, 2007. – Том 13. - № 3. – С. 163 – 172.
37. Банников Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. – Днепропетровск: Наука и образование, 2003. – 150 с.
38. Корнеев М. М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию / М. М. Корнеев. – К., 2003. – 547 с.
39. Андрианов И. В. Расчет прочности ребристых оболочек инженерных конструкций / И. В. Андрианов, В. А. Лесничая, В. В. Лобода, Л. И. Маневич. – К.- Донецк: Выща школа, 1986. – 104 с.
40. Енджиевский Л. В. Нелинейные деформации ребристых оболочек / Л. В. Енджиевский. – Красноярск: изд-во Краснояр. ун-та, 1982. – 296 с.
41. Рабер Л. М. Соединения на высокопрочных болтах. Диагностика. Ремонт. Повышение надежности конструкций / Л. М. Рабер. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 124 с.

42. Тарасенко В. П. Інструкція із застосування високоміцних болтів у мостах, що експлуатуються / В. П. Тарасенко, Л. М. Рабер, В. П. Орленко, В. І. Борщов, М. Д. Костюк, Г. О. Лінник, Б. В. Савчинський, М. В. Тарасенко, В. Рикіна, В. О. Курач. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2003. – 112 с.
43. Вейтблат Б. М. Высокопрочные болты в конструкциях мостов / Б.М. Вейтблат. – М.: Транспорт, 1971. – 152 с.