

## **РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ І СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ БУНКЕРА З АНТИСЕГРЕГАЦІЙНИМ ПРИСТРОЄМ**

*З метою поліпшення умов зберігання та розвантаження сипких будівельних матеріалів запропонована конструкція бункера, обладнаного антисегрегаційним пристроєм. Розроблена методика розрахунку необхідної кількості робочих органів залежно від конструкції та об'єму бункера, й одержані вирази для визначення потужності, що витрачається на переміщення робочого органа в сипкому матеріалі.*

*Ключові слова: будівельна суміш, бункер, активаторний пристрій, розвантаження.*

*С целью улучшения условий хранения и разгрузки сыпучих строительных материалов предложена конструкция бункера, оборудованного антисегрегационным устройством. Разработана методика расчета необходимого количества рабочих органов в зависимости от конструкции и объема бункера, и получены выражения для определения мощности, которая затрачивается на перемещение рабочего органа в сыпучем материале.*

*Ключевые слова: строительная смесь, бункер, активаторное устройство, разгрузка.*

*With the purpose of improving the conditions of keeping and unloading loose building materials the design of a bunker, equipped with anti-segregation device, is offered. The method of calculating the necessary amount of operating bodies depending on a bunker's design and volume is developed. Formulas were obtained for determining the power consumed on moving the operating body in loose material.*

*Key words: building mix, bunker, activation device, unloading.*

**Постановка проблеми.** Будівельна галузь України на сьогодні розвивається досить стрімко. Збільшення обсягів будівництва вимагає від будівельних компаній застосування все більш сучасних технологій, що дозволяють підвищити швидкість виконання робіт і поліпшити їх якість. При цьому використання сухих будівельних сумішей істотно змінює вигляд будівельних робіт [1]. Замість традиційної суміші піску й цементу, що готується безпосередньо перед початком робіт і дозується зі значними похибками, будівельники частіше застосовують саме сухі будівельні

суміші, виготовлені в промислових умовах. Переваги їх використання очевидні: правильне співвідношення складових (в'яжуче: цемент, гіпс, вапно або їх комбінації; нейтральні наповнювачі для забезпечення оптимального об'єму; спеціальні модифікуючі домішки, що надають суміші необхідні властивості), легкість приготування – для готовності продукту потрібно лише додати в нього воду й перемішати, гарантії якості.

**Аналіз останніх досліджень і виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Суха будівельна суміш – це приготовлений у заводських умовах, суворо віддозований відповідно до рецепту набір компонентів, який призначений для виконання певного виду будівельних або ремонтних робіт [2]. При виготовленні цих будівельних матеріалів в'яжучі речовини, такі як цемент, вапно або гіпс, доставляються на завод сухих сумішей і завантажуються в бункери-силоси. Після змішування готові суміші також накопичуються в бункерах. Останнім часом велика увага приділяється безтарному зберіганню готових сумішей та їх компонентів [3]. Безтарний спосіб дозволяє зменшити втрати матеріалу й скоротити витрати таропакувальних засобів. Однак, незважаючи на всі переваги безтарного способу зберігання сипких матеріалів, існує достатня кількість проблем, що виникають в основному при зберіганні й випуску багатокомпонентних сумішей [4]. Тривале зберігання цих матеріалів у ємностях впливає на якість готового продукту і тому знижує економічну ефективність технологічного процесу [5]. Основним недоліком цього є сегрегація – зниження однорідності суміші та утворення агломератів одного компонента. З метою боротьби з указаним явищем бункерні пристрої обладнуються активаторами, котрі встановлюються на випускний отвір і обладнуються вібробуджувачем [6 – 8]. Але поряд із перевагами даного конструктивного рішення (висока швидкість випуску матеріалу, широка номенклатура сипких матеріалів, відносна простота конструкції) наявні й певні недоліки, а саме: високий рівень шумового навантаження та пилоутворення, необхідність застосування віброізолюючих пристроїв, недостатній ресурс роботи обладнання.

**Формулювання цілей статті.** Метою даного дослідження є підвищення ефективності випуску сипких будівельних матеріалів із бункерних пристроїв за умови забезпечення необхідної однорідності складу сумішей.

Шляхом розв'язання поставленого завдання може бути обладнання бункерів зводоруйнуючими пристроями з ефектом змішування сипких матеріалів. Антисегрегаційний пристрій-активатор у цьому випадку може бути виконаний у вигляді кількарівневого обертового робочого органа. У даній статті будуть обґрунтовані основні конструктивні параметри робочого органа та досліджені витрати потужності під час роботи запропонованого обладнання.

**Виклад основного матеріалу.** Бункер з антисегрегаційним пристроєм, використання якого дозволить запобігти сегрегації суміші, працює таким чином (рис. 1). Суміш зберігається у бункері 1 необхідний за технологічним процесом термін. При розвантаженні бункера відкривається затворний пристрій 2, після чого вмикається двигун привода 3. Через редуктор 4 та роздавальний шківний механізм 5 обертальний рух може передаватися окремо до кожного з робочих органів 6, 7, 8.

Перевага почергового вмикання муфт полягає в тому, що за рахунок селективного поярусного включення робочих органів по всій порожнині бункера знижується енергоємність їх переміщень, а можливість установлення робочих органів різної форми забезпечує регулювання інтенсивності впливу на матеріал. Перевагою також є те, що із включенням кожного робочого органа розширюється вертикальний стікаючий стовп сипкої маси.

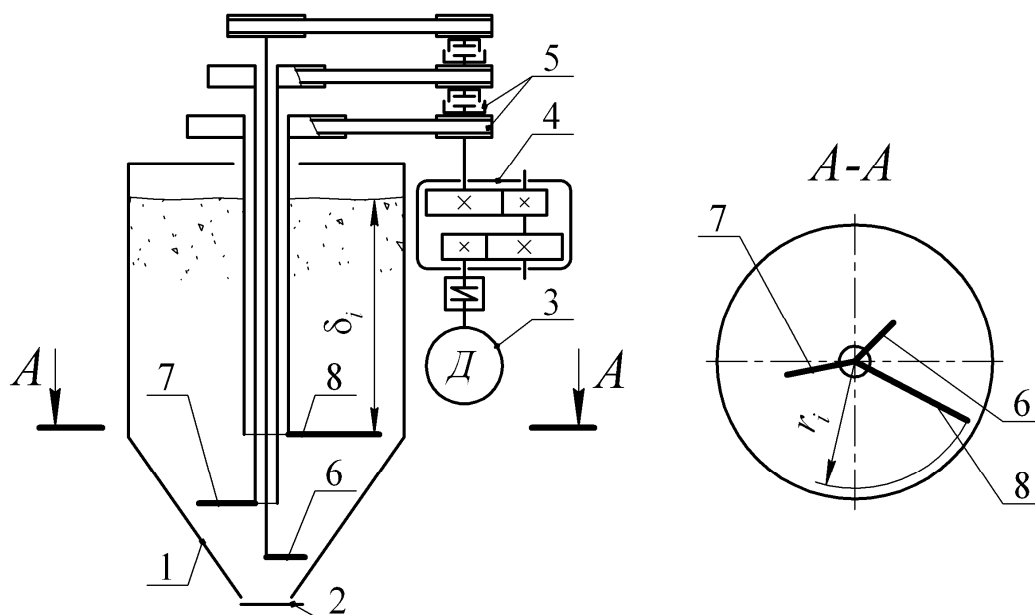


Рисунок 1 – Схема бункера з антисегрегаційним пристроєм:

- 1 – бункер; 2 – затворний пристрій; 3 – двигун привода; 4 – зубчастий редуктор;  
5 – роздавальний шківний механізм; 6, 7, 8 – робочі органи

Для забезпечення стабільності випуску сипкого вантажу з бункера при мінімальних енерговитратах необхідне розпушення його в місцях з найбільшою ймовірністю зависання. Розташування робочих органів залежить від конструкції ємності, фізико-механічних властивостей матеріалу та параметрів його стану в ємності. Згідно з літературними даними [9, 10] горизонтальна  $p_z$  і вертикальна  $p_e$  складові тиску сипкої суміші в бункері залежать від її параметрів таким чином:

$$p_z = \frac{\rho g \xi}{f} \left( 1 - e^{-kf \frac{\delta}{\xi}} \right), \quad p_e = \frac{\rho g \xi}{fk} \left( 1 - e^{-kf \frac{\delta}{\xi}} \right), \quad (1)$$

де  $\delta$  – глибина шару, м;  $\rho$  – густина матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $k = \text{tg}\left(\left(\frac{\pi}{4}\right) - \left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)$  – коефіцієнт пропорційності;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, рад;  $\xi$  – гідравлічний радіус, м;  $f$  – коефіцієнт зовнішнього тертя.

Ступінь розрихлення матеріалу залежить від кількості робочих елементів на одиницю висоти бункера. Виходячи із цього, кількість робочих органів на одиницю висоти бункера  $Z$  можливо представити за допомогою наступної залежності:

$$Z = \frac{k}{\omega} p_z, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності,  $\text{с}\cdot\text{рад/кг}$ ;  $p_z$  – горизонтальний тиск суміші в бункері, Па;  $\omega$  – кутова швидкість робочого органа,  $\text{рад/с}$ .

Звідси кількість робочих органів на висоту  $h$  при  $Z = \text{const}$  буде визначатися з такого співвідношення:

$$N = Z \cdot h. \quad (3)$$

Якщо  $Z \neq \text{const}$ , то  $N$  можливо знайти з наступних міркувань. Розглянемо на висоті  $h$  бункера елементарну ділянку  $dh$  з інтенсивністю розташування  $Z$ . Цій ділянці буде відповідати кількість робочих органів  $dN$ . Одержимо диференціальне рівняння

$$dN = Z \cdot dh. \quad (4)$$

Підставивши замість  $Z$  та  $p_z$  вирази (1) і (2), одержимо

$$dN = \left( \frac{k \cdot k_2}{\omega} - \frac{k \cdot k_2}{\omega} e^{-k_3 h} \right) \cdot dh, \quad (5)$$

де коефіцієнти  $k_2 = \frac{\rho g \xi}{f}$ ,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-2}$ ;  $k_3 = \frac{f}{\xi} \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)$ ,  $\text{м}^{-1}$ .

Для того щоб знайти шукану кількість робочих органів у потрібному інтервалі по висоті бункера від  $h_1$  до  $h_2$ , знайдемо визначений інтеграл даного рівняння

$$\int_{h_1}^{h_2} dN = \int_{h_1}^{h_2} k \left( \frac{k_2}{\omega} - \frac{k_2}{\omega} e^{-k_3 h} \right) dh. \quad (6)$$

Звідси

$$N = k \frac{k_2}{\omega} \left( (h_2 - h_1) + \frac{1}{k_3} e^{-k_3 (h_2 - h_1)} \right). \quad (7)$$

Складність геометрії ємності також впливає на зводоутворення в сипкій суміші. Так, у місцях зміни поперечного перетину бункера спостерігається зависання матеріалу. Тому розміщення робочих органів по висоті ємності варто здійснювати з урахуванням таких місць, додатково запроектувавши в них робочий елемент.

Розглянемо питання визначення сил опорів, що діють на робочий орган, а відповідно й потужності, необхідної для приведення в рух антисегрегаційного пристрою-активатора.

Визначимо потужність  $P_i$ , котра витрачається на переміщення в сипкому матеріалі робочого органа довжиною  $r_i$  на глибині  $\delta_i$  (рис. 1).

$$P_i = F_i \omega r_i, \quad (8)$$

де  $F_i$  – сумарна сила опору, що діє на  $i$ -й робочий орган із боку суміші, Н;  $\omega$  – кутова швидкість активатора, рад/с.

Загальну силу опору  $F_i$  можемо розкласти на складові: силу лобового опору  $F_n$  і силу тертя по бічній поверхні робочого органа  $F_\tau$ .

Величина лобового опору визначається зусиллям  $F_{руйин}$ , необхідним для руйнування структури сипкої суміші, та величиною сили  $F_{верт}$  від дії вертикального тиску з боку матеріалу, що контактує з робочим органом.

Руйнування структури сипкого матеріалу відбувається на певній відстані  $l_{руйин}$  від поверхні робочого органа (рис. 2). З прямокутного трикутника  $OAB$  маємо

$$l_{руйин} = \frac{d (1 - \sin(\alpha/2))}{2 \sin(\alpha/2)}, \quad (9)$$

де  $d$  – діаметр робочого органа, м;  $\alpha$  – кут утворення застійної зони перед робочим органом, рад.

Процес руйнування структури сипкого матеріалу відбувається у два етапи [11]. Спочатку нерухомий шар суміші деформується матеріалом застійної зони, а потім уже поверхнею робочого органа. У першому випадку на нерухомий шар діє сила внутрішнього тертя  $F_{руйин}^{внут}$ , в другому – зовнішнього тертя по робочому органу  $F_{руйин}^{зовн}$ .

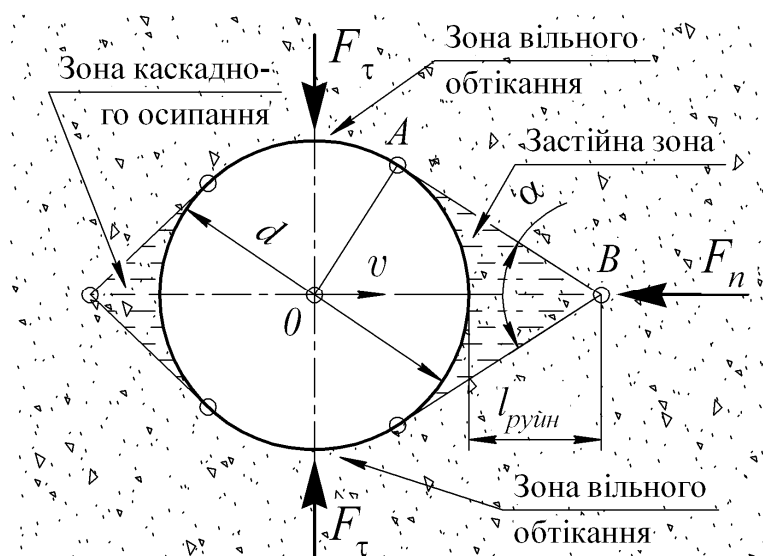


Рисунок 2 – Схема сил, які діють на робочий орган круглого перетину під час руху зі швидкістю  $v$  в сипкому середовищі

Указані складові можливо визначити за такими залежностями [3]:

$$F_{руйн}^{внут} = p_z L_1 l_{руйн} f_{внут}, \quad F_{руйн}^{зовн} = p_z L_2 l_{руйн} f, \quad (10)$$

де  $L$  – периметр міделевого перетину відповідного елемента обтікання, м;  $f_{внут}$  і  $f$  – відповідно коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя.

Силу вертикального тиску знайдемо за формулою

$$F_{верт} = p_v S_M, \quad (11)$$

де  $p_v$  – вертикальний тиск на робочий орган, Па;  $S_M$  – площа міделевого перерізу, м<sup>2</sup>,  $S_M = r_i \cdot d$ .

Таким чином, після підстановки всіх складових і перетворень маємо вираз для сили лобового опору, що діє на робочий орган,

$$F_n = 2\rho g \xi d^2 \left( 1 - e^{-kf \frac{\delta}{\xi}} \right) (1 + \sin(\alpha/2)) \left( \frac{d + r_i}{d} + \frac{\sin(\pi - \alpha/2) f_{внут}}{2f} \right). \quad (12)$$

Сила тертя по бічній поверхні визначається розмірами та формою профілю робочого органа й відрізняється в застійній та зонах вільного обтікання (рис. 2). У застійній зоні перед робочим органом шар сипкого матеріалу здійснює найбільший тиск на робочий орган (позначимо силу опору, яка виникає внаслідок цього, як  $F_{\tau 1}$ ). Далі, з переходом у зону вільного обтікання, потік сипкої суміші вирівнюється, при цьому тиск на робочий орган зменшується (тут силу опору позначимо як  $F_{\tau 2}$ ).

Якщо розглядати сипкий матеріал як пружне тіло [12], величину деформованого шару  $\delta_{деф}$  правомірно пов'язати з розмірами перетину робочого органа за наступним співвідношенням:

$$\delta_{деф} = k_4 \cdot d, \quad (13)$$

де  $k_4$  – коефіцієнт пропорційності.

Аналізуючи рис. 2, знайдемо вирази для  $F_{\tau 1}$  і  $F_{\tau 2}$ :

$$F_{\tau 1} = \frac{r_i E d^2 f_{внут}}{16 \delta_{деф}} \sin(\alpha/2), \quad F_{\tau 2} = \frac{r_i E d^2 f}{\delta_{деф}} \left( \frac{1 - 3 \cos(\alpha/2) \cdot \sin(\alpha/2)}{2 \sin(\alpha/2)} \right), \quad (14)$$

де  $E$  – модуль пружності сипкого матеріалу, Па.

Таким чином, повна сила опору, що діє на робочий орган під час його руху в сипкому середовищі, становить

$$F_i = 2\rho g \xi d^2 \left( 1 - e^{-kf \frac{\delta}{\xi}} \right) (1 + \sin(\alpha/2)) \left( \frac{d + r_i}{d} + \frac{\sin(\pi - \alpha/2) f_{внут}}{2f} \right) + \\ + dr_i \frac{E}{k_4} \left( \frac{f_{внут} \sin(\alpha/2)}{8} + \frac{f}{2 \sin(\alpha/2)} - \frac{3f \cos(\alpha/2)}{2} \right). \quad (15)$$

З урахуванням формули (8) маємо вираз для визначення потужності, що витрачається на переміщення  $i$ -го робочого органа в сипкому матеріалі,

$$P_i = 2\omega r_i \rho g \xi d^2 \left( 1 - e^{-kf \frac{\delta}{\xi}} \right) \left( 1 + \sin(\alpha/2) \right) \left( \frac{d + r_i}{d} + \frac{\sin(\pi - \alpha/2) f_{\text{внут}}}{2f} \right) + \quad (16)$$

$$+ d\omega r_i^2 \frac{E}{k_4} \left( \frac{f_{\text{внут}} \sin(\alpha/2)}{8} + \frac{f}{2\sin(\alpha/2)} - \frac{3f \cos(\alpha/2)}{2} \right).$$

Сумарна потужність  $P$ , необхідна для роботи активатора, буде визначатися як сума елементарних потужностей для кожного працюючого в даний час робочого органа.

**Висновки.** Запропонована конструкція бункера для зберігання сипких будівельних сумішей, обладнаного антисегрегаційним пристроєм. Його застосування значно підвищує ефективність випуску сумішей і при цьому забезпечує необхідну однорідність сипкого матеріалу.

Розроблена методика розрахунку необхідної кількості робочих органів залежно від конструкції та об'єму бункера. Одержані вирази для визначення потужності, що витрачається на переміщення робочого органа в сипкому матеріалі.

Використання бункера запропонованої конструкції на підприємствах із виготовлення сухих будівельних сумішей дозволить знизити час розвантаження та підвищити якість суміші на виході з бункера.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. ССС: просто добавь воды. Рынок сухих строительных смесей в Украине динамично развивается. – [Електронний ресурс]. – [Цит. 31.08.2008 р.]. – Режим доступу: <http://www.liga.net/smi/show.html?id=131137>. – Назва з титул. екрана.
2. Сухие смеси. – [Електронний ресурс]. – [Цит. 31.08.2008 р.]. – Режим доступу: <http://www.decoratingflat.ru/news/2007/08/03/suhie-smesi.htm>. – Назва з титул. екрана.
3. Оборудование для переработки сыпучих материалов / В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев, М.А. Промтов, А.С. Тимонин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 208 с.
4. Дженике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов / Э.В. Дженике.; пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 184 с.
5. Зенков П.Л. Механика насыпных грузов / П.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 326 с.
6. Бункерный активатор. – [Електронний ресурс]. – [Цит. 30.09.2008 р.]. – Режим доступу: [http://www.nevic.ru/bunk\\_act.htm](http://www.nevic.ru/bunk_act.htm). – Назва з титул. екрана.
7. Оборудование для хранения муки и других сыпучих продуктов. – [Електронний ресурс]. – [Цит. 30.09.2008 р.]. – Режим доступу: <http://www.agro-don1.narod.ru/hranenie.htm>. – Назва з титул. екрана.

8. Виброактиватор АВ-2-600-260. – [Электронный ресурс]. – [Цит. 30.09.2008 г.]. – Режим доступа: [http://www.vibromash.kz/3/1\\_4.doc](http://www.vibromash.kz/3/1_4.doc). – Назва з титул. екрана.

9. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

10. Ширко И.В. Механика гранулированных сред / И.В. Ширко. – М. : Мир, 1985. – 220 с.

11. Демин О.В. Совершенствование методов расчета и конструкций лопастных смесителей : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (химической промышленности)" / О.В. Демин. – Тамбов, 2003. – 16 с.

12. Вервейко Н.Д. Вдавливание тонкого осесимметричного тела в полупространство из связного сыпучего материала / Н.Д. Вервейко, А.Л. Фролов // Вестник ВГУ. – Воронеж, 2002. – № 1. – С. 99 – 101.