

УДК 621.6

НИЧЕГЛОД В. В., БУРМІСТЕНКОВ О. П., СТАЦЕНКО В. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ БУНКЕРА НА ХАРАКТЕР ПРОТІКАННЯ ПОРОШКОВИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета.** Дослідження витікання порошкових матеріалів різної величини з бункерів, встановлення характеру їх руху та визначення взаємозв'язків між параметрами бункера, його продуктивністю та фізико-механічними характеристиками сипких матеріалів.

**Методика.** Використання дослідного стенду для дослідження факторів що впливають на характер протікання сипкого матеріалу та чисельної оцінки взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та продуктивністю за допомогою коефіцієнтів кореляції Пірсона.

**Результати досліджень.** Визначено ознаки що впливають на характеристики протікання матеріалу різної величини через бункери різних форм. Наведено математичні моделі руху сипких матеріалів в бункерах різних форм, проаналізовано вплив габаритів бункера та характеристик частинок на швидкість їх руху. Проведені експериментальні дослідження швидкості витікання матеріалів з бункерів, результати яких наведено у роботі.

**Наукова новизна.** Отримано математичну модель руху сипкого матеріалу в бункерах різних форм. Встановлено залежності між фізико-механічними параметрами частинок з різною дисперсністю та швидкістю їх руху.

**Практична значимість.** Розвиток техніки передбачає значне підвищення продуктивності технологічних процесів, неперервне підвищення якості продукції що випускається. Важливим елементом розвитку сучасного виробництва є вдосконалення методів та впровадження їх в обладнання для підвищення ефективності дозування сипкої продукції, які забезпечують максимально швидке та точне дозування. Дослідження такого напрямку як дозування сипкого матеріалу є невід'ємною складовою легкої, хімічної та харчової промисловостей. Отримані результати дозволять прогнозувати якість дозування та продуктивність бункерного обладнання для сипких матеріалів з різними характеристиками. В подальшому дозволить більш доцільно підбирати габарити бункерного обладнання для дозування конкретного сипкого матеріалу.

**Ключові слова:** стенд; сипкий матеріал; аналіз руху; моделювання бункер.

**Вступ.** Розрізняють [2] два режими руху матеріалу: нормальний та гідравлічний. Нормальний характеризується постійною швидкістю руху частинок на виході бункера, тобто продуктивність не залежить від кількості матеріалу в бункері. За гідравлічного режиму характер руху частинок наближається до руху рідини, і швидкість витікання стає функцією рівня матеріалу у бункері. Таким чином, для визначення характеру руху необхідно дослідити залежність продуктивності бункера від часу.

Сипкий матеріал вимірюють в міліметрах [6] та ділять на ряд категорій: пилевидні – 0,05; порошковидні – 0,05...0,5; дрібнозернисті – 0,5...2,0; крупнозернисті – 2...10; дрібнокускові – 11...60; середньокускові – 60...160; крупнокускові – 160...320; особливо крупні – > 320.

**Постановка завдання.** Основним завданням дослідження є вивчення характеру руху порошковидного сипкого матеріалу з бункера та порівняння його фізико-механічних властивостей та характеру руху з сипким матеріалом більшої дисперсії.

**Результати досліджень.** Рухомість сипких матеріалів визначається кутом  $\varphi$  природного укосу. Вільно насипаний сипкий вантаж на горизонтальну площину утворює конус, у якого кут нахилу твірної до горизонтальної площини є кут природного укосу матеріалу в стані спокою  $\varphi$ . При русі матеріалу на стрічці або полотні транспортера внаслідок поштовхів та коливань кут природного укосу значно зменшується. Такий кут називається кутом природного укосу матеріалу в русі  $\varphi$ .

Також результати аналітичних досліджень свідчать, що процес витікання сипких матеріалів залежить як від їх фізико-механічних властивостей, та і від геометричних параметрів бункера. Ці залежності можна визначити на основі інформації про величину продуктивності бункера та її зміну у часі [8].

З метою проведення зазначених досліджень у роботі використано дослідний стенд, структурна схема якого показана на рис. 1.

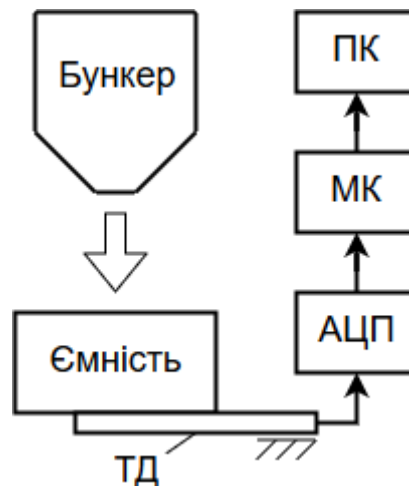


Рис. 1. Структурна схема стенду для визначення продуктивності бункера

До складу стенду входять: бункер, ємність для сипкого матеріалу, тензометричний датчик (ТД), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), мікроконтролер (МК) та персональний комп'ютер (ПК). Ємність для сипкого матеріалу закріплена безпосередньо на ТД, таким чином, її маса визначає величину сигналу ТД. Бункер розміщено безпосередньо над ємністю. Якщо вихідний патрубок бункера відкритий, сипкий матеріал під дією сили тяжіння висипається у ємність та змінює її масу. МК через АЦП зчитує сигнал датчика маси та передає його для збереження та подальшого аналізу до ПК.

Конструкція стенду практично не створює обмежень на форму та розміри бункерів, які використовуються під час дослідження. Закріпити над ємністю можна практично будь-який бункер. Основною умовою, яку необхідно враховувати, є відповідність маси сипкого матеріалу та припустимих навантажень на тензодатчик[8].

При проведенні досліджень використовувались бункери двох конструкцій, що представлені на рис. 2,а та рис. 2,б.

Бункер рис. 2,а складається із однієї циліндричної зони та конічної зони, циліндрична та конічна зони з'єднані між собою за допомогою шийки. Бункер рис. 2,б має одну циліндричну зону та зону із параболічним нахилом бічних стінок. При проведенні досліджень кожен з бункерів повністю завантажувався сипким матеріалом, що гарантувало під час витікання матеріалу роботу бункера з наповненням всіх можливих комбінацій зон.

Порядок проведення досліджу:

- 1) Здійснювалось калібрування системи. Для цього визначався сигнал ТЗ, що відповідав порожній ємності.
- 2) Завантажувався сипкий матеріал у бункер.
- 3) Запускався процес вимірювання. МК через задані проміжки часу (0,09с) через АЦП зчитував сигнали тензодатчика.
- 4) Відкривався вихідний патрубок бункера.
- 5) Процес вимірювання припинявся після витікання всього матеріалу у ємність.

б) Дослід повторювався по три рази для трьох порошковидних матеріалів та трьох дрібнозернистих матеріалів і двох бункерів різної форми (рис. 2,а та рис. 2,б).

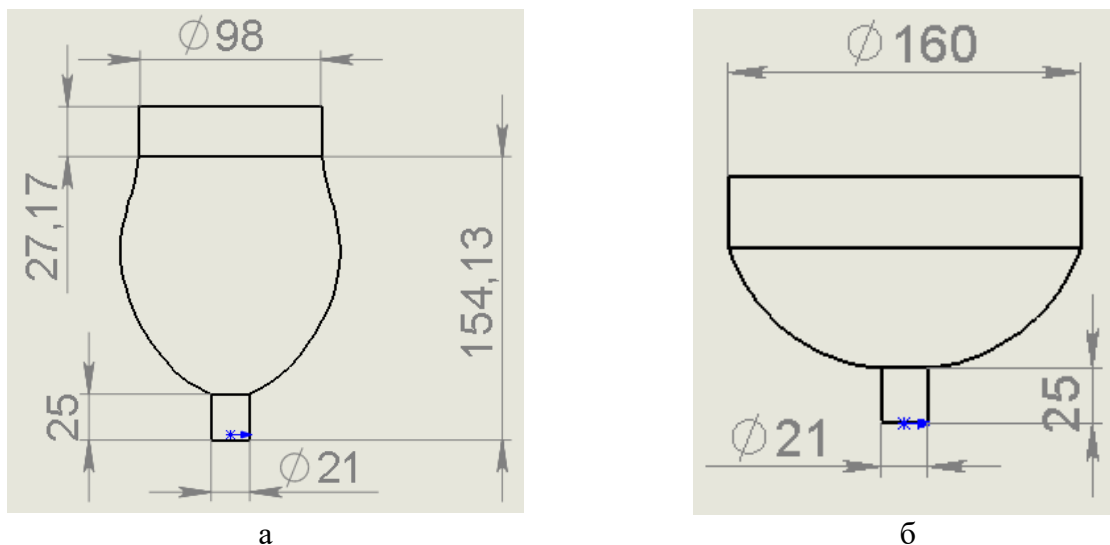


Рис. 2. Бункери із змінним кутом нахилу бічних стінок

Параметри сипких матеріалів, що визначались при проведенні експериментальних досліджень наведені у табл. 1. До них відносяться: розміри частинок, насипна густина та кут природнього укосу. Слід зазначити, що при проведенні аналітичних досліджень, в тому числі з використанням МДЕ, параметрами, що характеризують взаємодію частинок між собою та з поверхнею бункера, є коефіцієнти тертя ковзання та кочення. Також вони значною мірою визначають продуктивність бункера. Визначення значень цих коефіцієнтів при проведенні експериментальних досліджень є технічно складним завдання, оскільки вони залежать від зовнішніх умов. З іншого боку, результати аналітичних розрахунків свідчать, що кут природнього укосу матеріалу визначається сукупною дією всіх його властивостей. Таким чином, взаємозв'язок між продуктивністю бункера та кутом природнього укосу характеризує вплив властивостей матеріалу на продуктивність [8].

Таблиця 1

Параметри сипких матеріалів

Назва параметра	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3	Матеріал 4	Матеріал 5	Матеріал 6
Розмір частинки, мм	0,1–0,4	~0,125	0,2–1	2,9–3,8	~1,7	~2,2
Кут природнього укосу, град	25	45	38	35	41,9	30,7
Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	1300–1500	800	720	815	770	850

Результати експерименту складались зі значень про поточний момент часу та відповідний йому сигнал датчика маси. Після завантаження даних у ПК здійснювалась їх попередня обробка, яка складалась з трьох операцій.

1) Визначався момент початку надходження сипкого матеріалу у ємність. Всі попередні дані, які були зняті для порожньої ємності, з подальших розрахунків виключались.

2) Визначався момент завершення надходження матеріалу у ємність. Всі подальші дані також виключались із розрахунків.

3) Для кожного інтервалу часу, в які знімались сигнали датчика маси, визначалось середнє значення результатів трьох вимірювань.

Результати досліджень для бункера рис. 3, а та всіх шести матеріалів показані на рис. 3–8. Аналіз результатів свідчить, що залежність між масою матеріалу, який витік з бункера, та часом, є лінійною. Тому для її апроксимації методом найменших квадратів були розраховані коефіцієнти лінійного рівняння регресії.

На графіках точками показані експериментальні дані, суцільними лініями – результати розрахунків за отриманим рівнянням регресії.

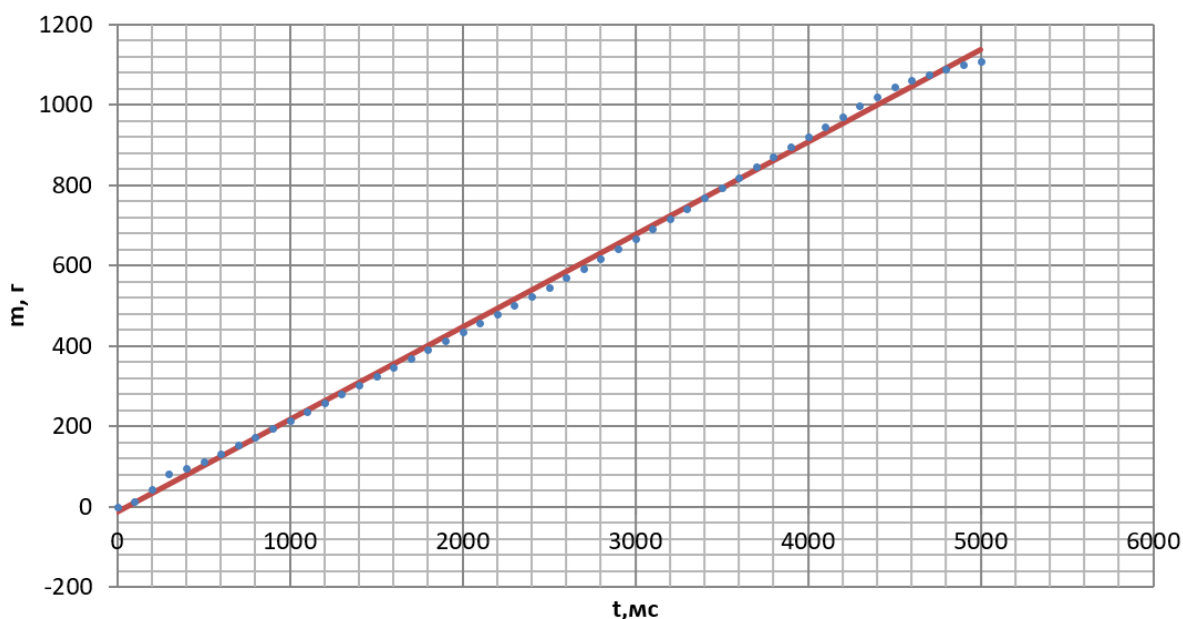


Рис. 3. Залежність між масою матеріалу 1 у ємності та часом витікання з бункера

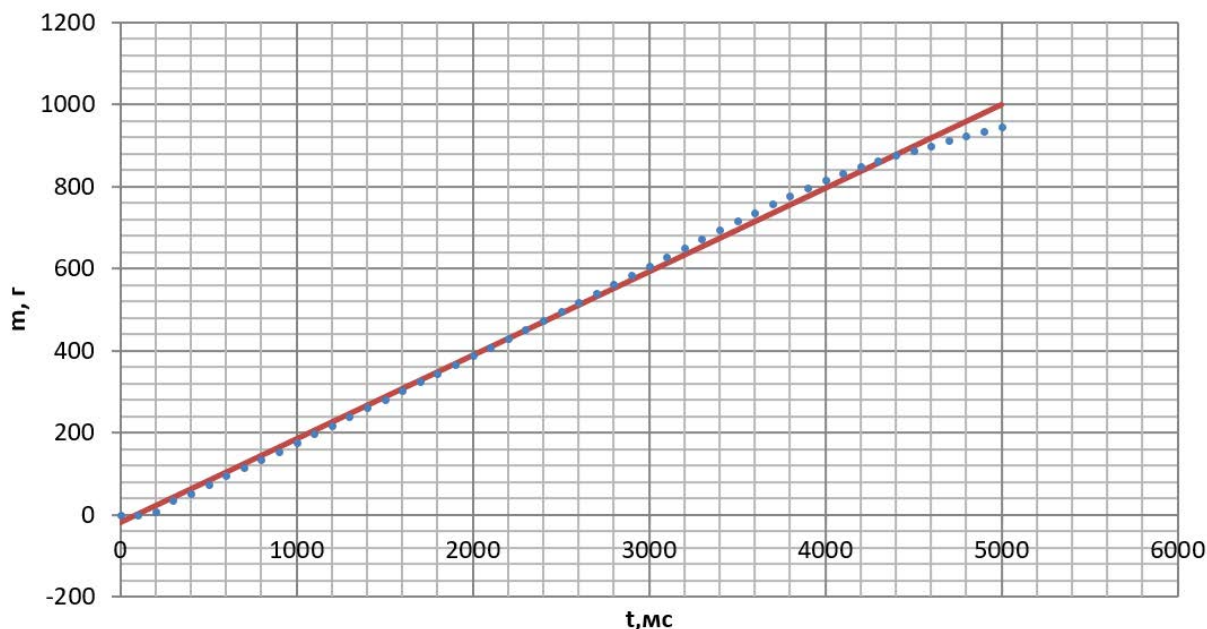


Рис. 4. Залежність між масою матеріалу 2 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 1:

$$m = 0,2303t - 14,284. \quad (1)$$

Рівняння регресії для матеріалу 2:

$$m = 0,1199t + 34,302. \quad (2)$$

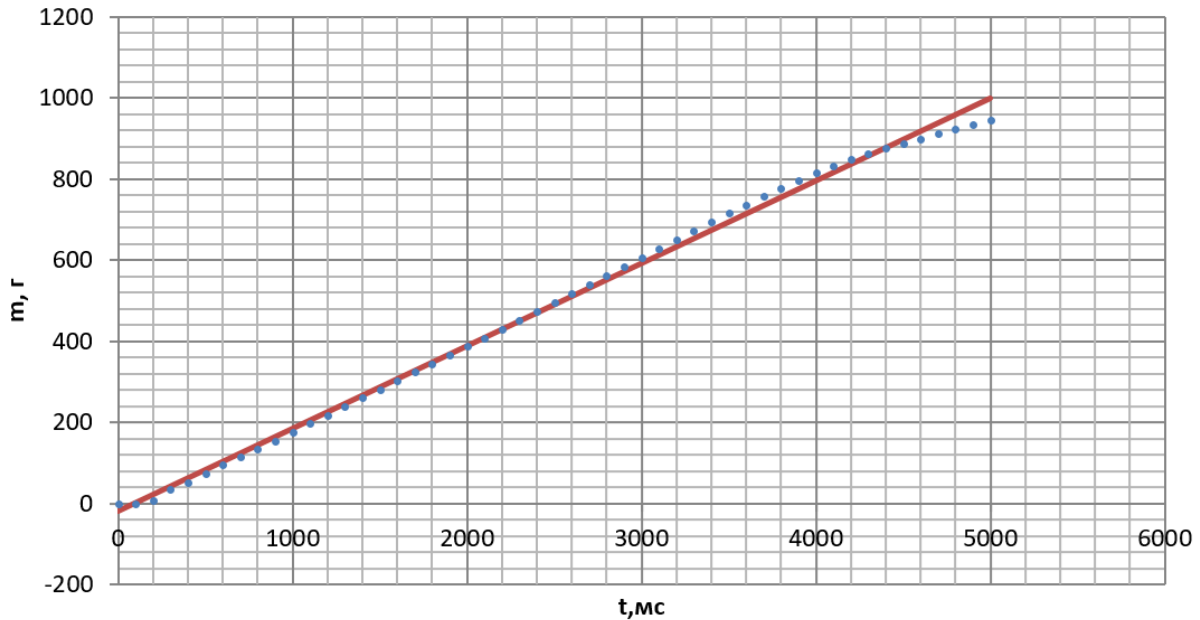


Рис. 5. Залежність між масою матеріалу 3 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 3:

$$m = 0,2039t - 19,56. \quad (3)$$

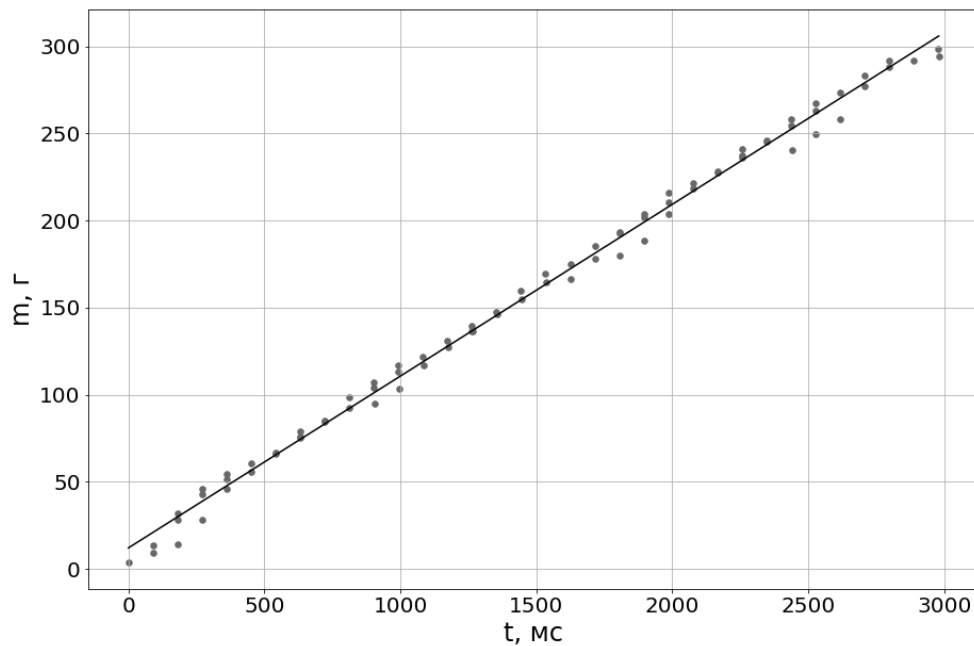


Рис. 6. Залежність між масою матеріалу 4 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 4:

$$m = 0,0986t + 12,037. \quad (4)$$

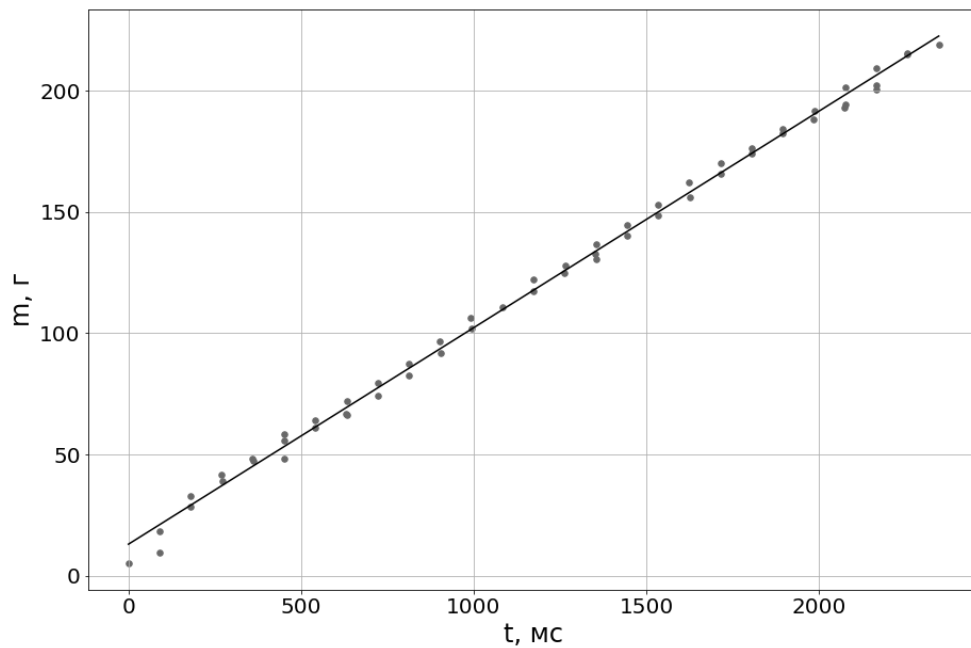


Рис. 7. Залежність між масою матеріалу 5 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 5:

$$m = 0,2039t - 19,56. \quad (5)$$

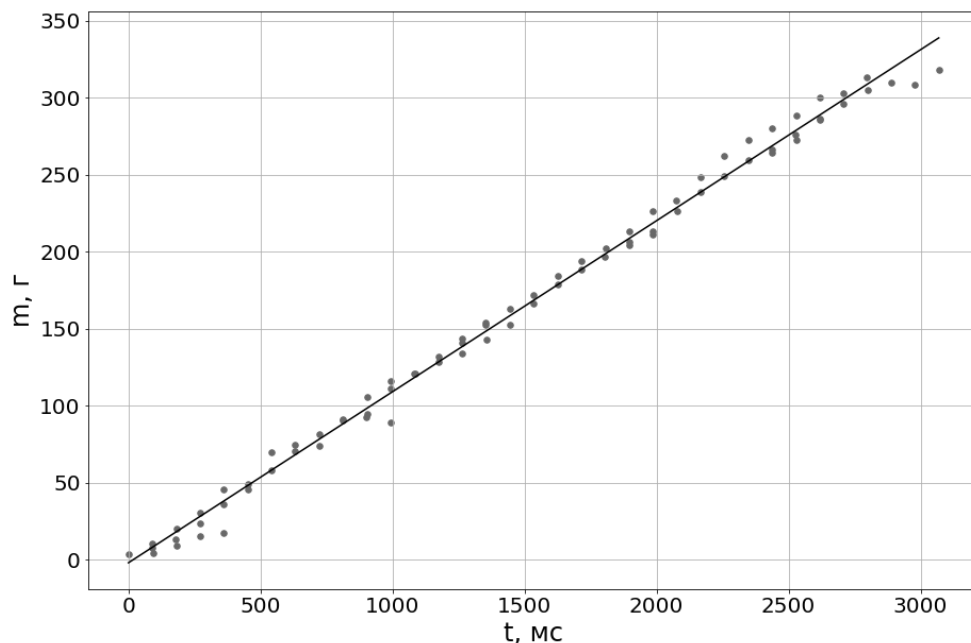


Рис. 8. Залежність між масою матеріалу 6 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 6:

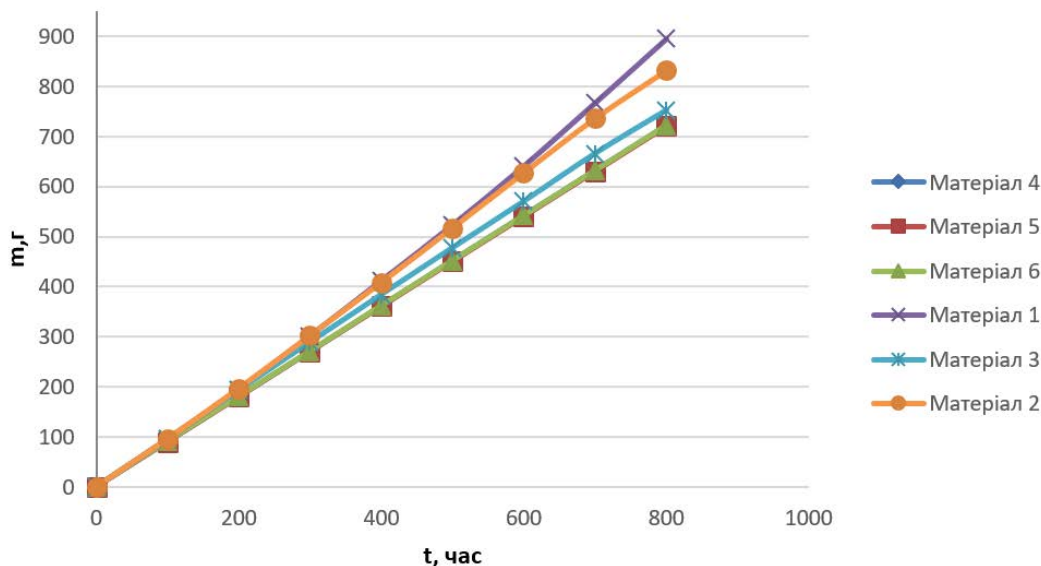
$$m = 0,111t - 1,841. \quad (6)$$

Коефіцієнти рівнянь регресії при змінній  $t$  характеризують швидкість зміни маси ємності з матеріалом, тобто продуктивність бункера. У табл. 2 наведені значення продуктивності бункера для всіх трьох типів матеріалу.

Таблиця 2

**Продуктивність конічного бункера для різних матеріалів**

Назва параметра	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3	Матеріал 4	Матеріал 5	Матеріал 6
Продуктивність, кг/с	0,201	0,184	0,1131	0,0986	0,0894	0,0911



**Рис. 9. Загальний графік залежності між масою усіх матеріалів у ємності та часом витікання для конічного бункера**

Чисельна оцінка взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та продуктивністю, здійснювалась за допомогою коефіцієнтів кореляції (Пірсона) [1] між:

- Кутом природнього укосу та продуктивністю.
- Розміром частинок та продуктивністю.
- Насипною густиною продуктивністю.

Коефіцієнт кореляції Пірсона характеризує існування лінійної залежності між двома величинами ( $x$ ,  $y$ ) та визначається за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x}) \sum(y_i - \bar{y})}} \quad (7)$$

де  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – вибіркові середні.

Результати розрахунків для порошковидних матеріалів:

- 1) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та насипною густиною  $r_p = 0,433$ .
- 2) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та кутом природнього укосу  $r_\varphi = -0,638$ .
- 3) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та розміром частинок  $r_a = -0,89816$ .

Результати розрахунків для дрібнозернистих та крупнозернистих матеріалів:

- 1) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та насипною густиною  $r_p = 0,988$ .
- 2) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та кутом природнього укосу  $r_\varphi = -0,976$ .
- 3) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та розміром частинок  $r_a = -0,212$ .

Результати дослідження витікання матеріалу із конічного бункера дозволяють зробити наступні висновки:

- 1) Швидкість витікання матеріалу з бункера залежить від насипної густини.
- 2) Існує залежність, чим менший діаметр частинки матеріалу тим більшу роль в швидкості витікання матеріалу з бункера відіграє насипна густина матеріалу і навпаки.
- 3) Існує залежність між кількістю матеріалу в бункері і його продуктивністю.
- 4) Для даних габаритів бункера та характеристики насипної густини матеріалів швидкість витікання з конічного бункера збільшується по мірі зменшення матеріалу в ньому.
- 5) Продуктивність бункера практично не залежить від розміру сипкого матеріалу що з нього витікає.

### References

### Література

1. Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P., Bila, T. Y. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperervnogo pryhotuvannia kompozytsii sypkykh materialiv: monohrafiia [Automated complexes for continuous preparation of compositions of loose materials: monograph]. Kyiv: KNUTD. 220 p. [in Ukrainian].
1. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія. Київ: КНУТД, 2017. 220 с.
2. Globin, A. N., Krasnov, I. N. (2016). Dozatory: monografija [Dozatory: monografiya]. Moscow-Berlin: Direct-Media. 384 p. [in Russian].
2. Глобин А. Н., Краснов И. Н. Дозаторы: монография. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. 384 с.
3. Belaya, T. Ya. (1985). Razrabotka centrobeznyh ustrojstv nepreryvnogo dejstvija dlja smeshenija sypuchih materialov: avtoref. diss. k-ta tehn. nauk [Development of continuous centrifugal devices formixing bulk materials: abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences]. Kyiv [in Russian].
3. Белая Т. Я. Разработка центробежных устройств непрерывного действия для смешения сыпучих материалов: автореф. дисс. к-та техн. наук. Киев, 1985.
4. Burmistenkov, O. P., Statsenko, V. V. (2019). Doslidzhennia roboty systemy keruvannia produktyvnistiu tarilchastoho zhyvylnyka bezperervnoi dii [Study of the performance management system of a continuous plate feeder]. VIII Ukrainian-Polish scientific dialogues: materials of the international conferences = VIII Ukrainko-Polski naukovy dialohy: materialy mizhnar. konf. (October 16–19, 2019. Khmelnytsky–Kamyanets-Podilsky) [in Ukrainian].
4. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Дослідження роботи системи керування продуктивністю тарілчастого живильника безперервної дії. VIII Українсько-Польські наукові діалоги: матеріали міжнар. конф. (16–19 жовтня 2019 р., Хмельницький–Кам'янець-Подільський).
5. Burmistenkov, O. P., Bila, T. Ya., Statsenko, V. V. (2019). Doslidzhennia enerhoefektyvnosti obladnannia dlia zmishuvannia sypkykh materialiv [Investigation of energy efficiency of equipment fo rmixing bulk materials]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dizainu. Serii: Tekhnichni nauky = Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Sciences Series, 4(136): 42–48 [in Ukrainian].
5. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження енергоефективності обладнання для змішування сипких матеріалів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2019. № 4(136). С. 42–48.
6. Vidineev, Yu. D. (1988). Sovremennye metody ocenki kachestva nepreryvnogo dozirovaniya [Modern methods for assessing the quality of continuous dosing]. Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva imeni D. I. Mendeleeva = Journal of the All-Union Chemical Society named after D. I. Mendeleev, 33(4): 397–404 [in Russian].
6. Видинеев Ю. Д. Современные методы оценки качества непрерывного дозирования. Журн. Всесоюз. хим. общ-ва им. Д. И. Менделеева. 1988. Т. 33, № 4. С. 397–404.
7. Gavva, O. M., Derenivska, A. V. (2014). Liniini vahovi dozuvalni prystroi dyskretnoi dii dlia sypkoi produktsii
7. Гавва О. М., Деренівська А. В. Лінійні вагові дозувальні пристрої дискретної дії для



- (obgruntuvannia ratsionalnykh parametriv) [Line arweight dosing device softdiscrete action for bulk products (substantiat of rational parameters)]. *Упаковка = Packaging* [in Ukrainian].
8. Bila, T. Ya., Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P. (2018). Analiz rukhu sypkoho materialu na vykhodi bunkeriv [Analysis of the movement of loose material at the exit of bunkers]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dizainu. Serii: Tekhnichni nauky = Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Sciences Series*, 4(124): 85–95 [in Ukrainian].
9. Hyachev, L. (1986). *Osnovy teoryy bunkerov y sylosov* [Bunkers and silos theory fundamentals]. Barnaul: APY [in Russian].
10. Statsenko, V. V., Bila, T. Ya., Burmistenkov, O. P. (2018). Analiz rukhu sypkoho materialu na vykhodi bunkeriv [Analysis of movement of loose material at the exit of bunkers]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dizainu. Serii: Tekhnichni nauky = Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Sciences Series*, 4(124): 85–95 [in Ukrainian].
- сипкої продукції (обґрунтування раціональних параметрів). *Упаковка*. 2014.
8. Біла Т. Я., Стаценко В. В., Бурмістенков О. П. Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2018. № 4 (124). С. 85–95.
9. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов. Барнаул: АПИ, 1986. 84 с.
10. Стаценко В. В., Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2018. № 4. С. 85–95.

**NYCHEGLOD VOLODYMYR**  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-5252-5341>  
E-mail: [nicheglod.vv@knuud.edu.ua](mailto:nicheglod.vv@knuud.edu.ua)

**BURMISTENKOV OLEKSANDR**  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>  
Scopus Author ID: 57210341826  
Researcher ID: T-5180-2018  
E-mail: [burmistenkov.op@knuud.edu.ua](mailto:burmistenkov.op@knuud.edu.ua)

**STATSENKO VOLODYMYR**  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Department of Computer Engineering and Electromechanics,  
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>  
Scopus Author ID: 57210344190  
Researcher ID: C-3646-2017  
E-mail: [statsenko.v@knuud.edu.ua](mailto:statsenko.v@knuud.edu.ua)

**NYCHEGLOD V. V., BURMISTENKOV O. P., STATSENKO V. V.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

## **RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE BUNKER ON THE CHARACTER OF THE FLOW OF POWDERED FLOOR MATERIALS**

**Purpose.** Study of the outflow of powder materials of different sizes from bunkers, establishing the nature of their movement and determining the relationships between the parameters of the bunker, its performance and physical and mechanical characteristics of bulk materials.

**Method.** The use of an experimental bench for the study of factors affecting the nature of the flow of bulk material and the numerical assessment of the relationship between the parameters of bulk materials and performance using Pearson correlation coefficients.

**Research results.** The characteristics affecting the characteristics of the flow of material of different sizes through bunkers of different shapes have been determined. Mathematical models of the movement of loose materials in bunkers of various shapes are presented, the influence of the dimensions of the bunker and the characteristics of particles on the speed of their movement is analyzed. Experimental studies of the flow rate of materials from bunkers were conducted, the results of which are presented in the work.

**Scientific novelty.** A mathematical model of the movement of loose material in bunkers of various shapes was obtained. The dependences between the physical and mechanical parameters of particles with different dispersion and their speed of movement have been established.

**Practical significance.** The development of technology involves a significant increase in the productivity of technological processes, a continuous increase in the quality of products produced. An important element of the development of modern production is the improvement of methods and their implementation in equipment to increase the efficiency of dosing of bulk products, which ensure the fastest and most accurate dosing. Research in such a direction as bulk material dosing is an integral part of the light, chemical and food industries. The obtained results will make it possible to predict the quality of dosing and the performance of bunker equipment for loose materials with different characteristics. In the future, it will allow to more expediently select the dimensions of the bunker equipment for dosing specific loose material.

**Keywords:** stand; loose material; motion analysis; bunker simulation.