

УДК 621:542.3

СТАЦЕНКО В. В., БІЛА Т. Я., БУРМІСТЕНКОВ О. П.

Київський національний університет технологій та дизайну

АНАЛІЗ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ НА ВИХОДІ БУНКЕРІВ

Мета. Вивчення впливу фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу на характер його руху на виході бункеру.

Методика. У роботі використані методи математичного моделювання та регресійного аналізу.

Результати. Визначено характерні особливості основних режимів руху матеріалу – нормального та гідравлічного. Наведено математичні моделі руху сипких матеріалів в конічно-циліндричних бункерах, проаналізовано вплив параметрів бункера та частинок на швидкість їх руху. Розроблено стенд та проведені експериментальні дослідження швидкості витікання матеріалів з бункерів, результати яких наведено у роботі.

Наукова новизна. Отримані математичні моделі руху сипких матеріалів у конічних та циліндричних бункерах. Встановлено залежності між фізико-механічними параметрами частинок та швидкістю їх руху.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють прогнозувати продуктивність бункерного обладнання для різних видів сипких матеріалів.

Ключові слова: бункер, сипкий матеріал, аналіз руху, моделювання.

Вступ. У легкій, хімічній та харчовій промисловостях, в сільському господарстві та інших галузях широко використовуються бункерні пристрої для зберігання, перевезення та накопичення сипких матеріалів. В одних випадках сипкі матеріали з бункерів надходять на ваговимірювальні та пакувальні пристрої (зважування та пакування круп, цукру, борошна, тощо), в інших - дозуються та у вигляді окремих компонентів подаються в змішувачі для приготування певних композицій для виробництва різноманітної продукції (плівок, труб, взуття, тощо).

Сучасні підприємства використовують автоматизовані лінії безперервного приготування сипких композицій з подальшим зважуванням і пакуванням або виготовленням виробів, в яких у багатьох випадках бункерні пристрої являються початковою ланкою. До такого обладнання висуваються високі вимоги узгодженості роботи кожного елемента технологічного процесу, а, отже, і до характеру руху сипкого матеріалу від бункера до останньої ланки (змішувача або пакувального агрегату).

Завдання дослідження процесу витікання сипкого матеріалу з бункера є актуальним, не дивлячись на численні роботи в цьому напрямку [1, 2]. Подальше вивчення цього процесу для отримання математичного опису взаємозв'язку структури потоку, сформованого бункером з певними геометричними параметрами, та фізико-механічними властивостями матеріалу дозволить врахувати вплив бункерних пристроїв на загальний технологічний процес та забезпечити умови автоматизації комплексів для безперервного приготування композицій сипких матеріалів.

Постановка завдання. Основним завданням дослідження є вивчення характеру руху сипкого матеріалу з бункера та вплив на нього фізико-механічних властивостей матеріалу та конструктивних параметрів бункера. Для визначення кількісних параметрів процесу

необхідно провести математичне моделювання плинусипкого матеріалу на виході з бункера з урахуванням різних режимів витікання.

Результати та їх обговорення. Бункери є першою ланкою технологічних комплексів для змішування сипких матеріалів. Вони забезпечують зберігання та надходження частинок сипкого матеріалу на вхід живильників та пристроїв дозування. В переважній кількості випадків бункер являє собою ємність із випускним отвором радіусом R , що забезпечує переміщення частинок під дією сил гравітації на вхід наступних пристроїв у технологічному комплексі (рис. 1). Розрізняють [3] два основні режими руху (плину) частинок (рис. 2): нормальний та гідравлічний.

Найчастіше використовують перший режим (нормальний), що має місце в бункерах, із кутом нахилу стінок у рекомендованих межах. За нормальної течії сипкого матеріалу в центральній частині бункера (рис. 2,а) над випускним отвором утворюється потік матеріалу, що складається з частинок, які рухаються вертикально вниз. Біля бічних стінок виникають застійні зони із значно меншою швидкістю частинок, які поступово скочуються у центральну зону. В результаті в центрі поверхні сипкого матеріалу утворюється воронка.

Гідравлічний рух виникає у випадках, коли кут нахилу бічних стінок перевищує деяке граничне значення або коли сипкий матеріал має високу вологість і за властивостями наближається до рідини. При гідравлічному плинні сипкий матеріал рухається у бункері послідовно, шар за шаром, при цьому у верхньому шарі воронка не утворюється. Частинки матеріалу рухаються практично з однаковими швидкостями у всьому об'ємі бункера і поява застійних зон не спостерігається (рис. 2,б).

Нормальний та гідравлічний рухи матеріалу принципово відрізняються, але мають і деякі загальні риси: в першому випадку рух частинок обмежений стінками бункера, а у другому – нерухомими частинками сипкого матеріалу.

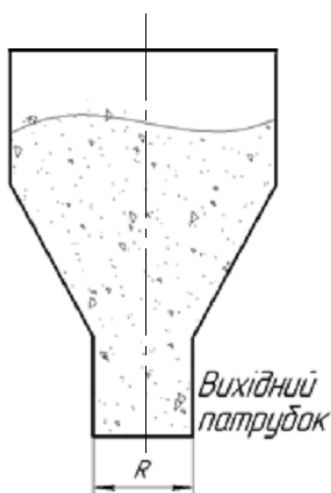
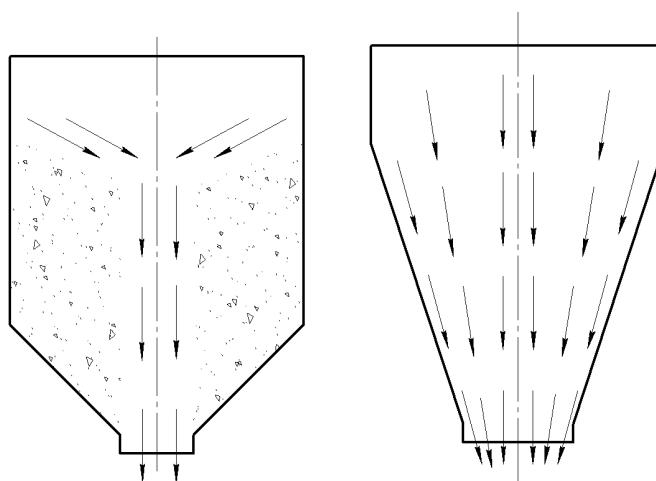


Рис. 1. Розташування матеріалу в бункері



а) нормальний рух

б) гідравлічний рух

Рис. 2. Види руху сипкого матеріалу в бункері

Процес руху частинок залежить від їх фізико-механічних властивостей, геометричних розмірів, форми, зв'язаності частинок та вологості оточуючого середовища. Характерною

особливістю руху сипкого матеріалу є можливість виникнення склепінь, що призводить до переривання потоку матеріалу і, як наслідок, необхідності корегування режимів роботи іншого обладнання технологічного комплексу. Для бункерів найбільш вірогідним є утворення склепінь в зоні випускного отвору. Значно зменшити вірогідність виникнення цього явища можна двома способами: правильним вибором розмірів випускного отвору та використанням спеціальних механічних пристроїв (активаторів). Водночас, збільшення розміру випускного отвору призводить до відповідного збільшення об'ємної продуктивності на виході бункера, а використання активаторів – до виникнення пульсацій у потоці матеріалу.

Таким чином, можна сформулювати основні вимоги до роботи бункерного обладнання:

- забезпечення заданої продуктивності;
- забезпечення мінімальної величини пульсацій потоку матеріалу;
- мінімальне зменшення вірогідності утворення склепінь (уникнення ситуації розриву потоку матеріалу).

Практична реалізація зазначених вимог потребує створення математичної моделі руху частинок на виході бункера, яка б враховувала конструктивні параметри обладнання та властивості частинок сипкого матеріалу.

Відомо декілька підходів [3, 4], що дозволяють визначити швидкість частинок на виході бункера.

У випадку гідравлічного витікання характер руху частинок наближається до характеру плину рідини, що дозволяє з певним наближенням застосовувати закони Торічеллі та Пуазейля.

Відповідно до закону Торічеллі швидкість потоку матеріалу визначається за формулою:

$$v = \lambda \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

h – висота шару матеріалу в бункері, м ;

λ – коефіцієнт витікання (0,55..0,65 для легкосипких матеріалів; 0,3..0,5 для кускових матеріалів неправильної форми; 0,2..0,25 для пилоподібних матеріалів).

Закон Пуазейля дозволяє визначити витрату рідини у трубці, що рухається під дією різниці сил тиску

$$Q(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l (P_2(t) - P_1(t))}, \quad (2)$$

$P_1(t) = 0$ – тиск в нижній точці трубки, Па;

$P_2(t)$ – тиск в верхній точці трубки, який визначається рівнем рідини, що знаходиться у ємності (h);

l – довжина трубки, м ;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

r – радіус трубки, м.

У випадку витікання матеріалу з бункера різниця тисків визначається кількістю матеріалу, що знаходиться над вихідним отвором. Отже, і при використанні закону Торічеллі, і при використанні закону Пуазейля, швидкість потоку залежить від величини рівня матеріалу над випускним отвором.

Для визначення характеру руху потоку складемо рівняння балансу матеріалу:

$$Q(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (3)$$

де V – об'єм матеріалу в бункері.

Враховуючи, що бункер в більшості випадків має циліндричну та конічну частини, складемо диференціальні рівняння для кожної з таких ємностей (рис. 3, 4).

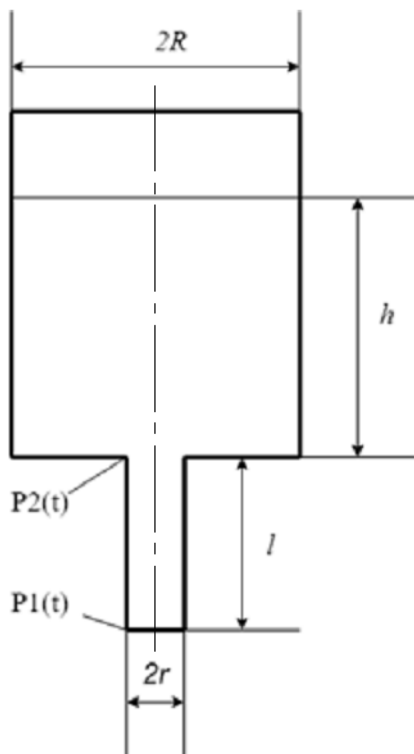


Рис.3. Бункер циліндричної форми

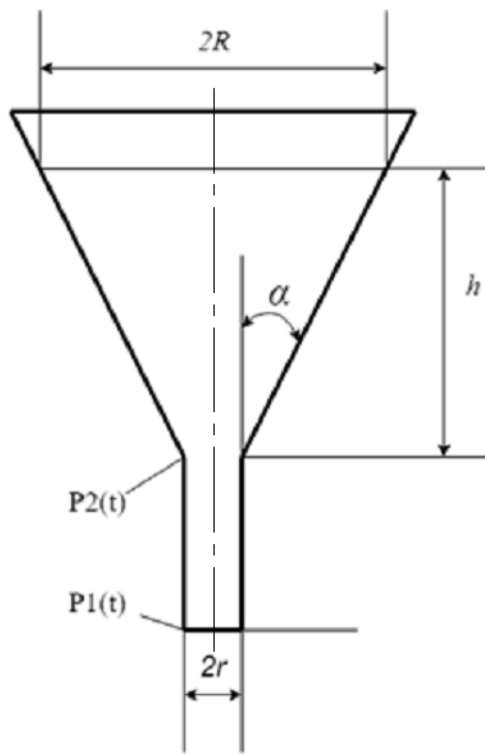


Рис.4. Бункер конічної форми

Для циліндричної ємності рівняння приймає вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} P2(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g \frac{V(t)}{\pi R^2} \quad (4)$$

Його розв'язком є експоненціальна залежність, що показана на рис. 5 наступному рисунку.

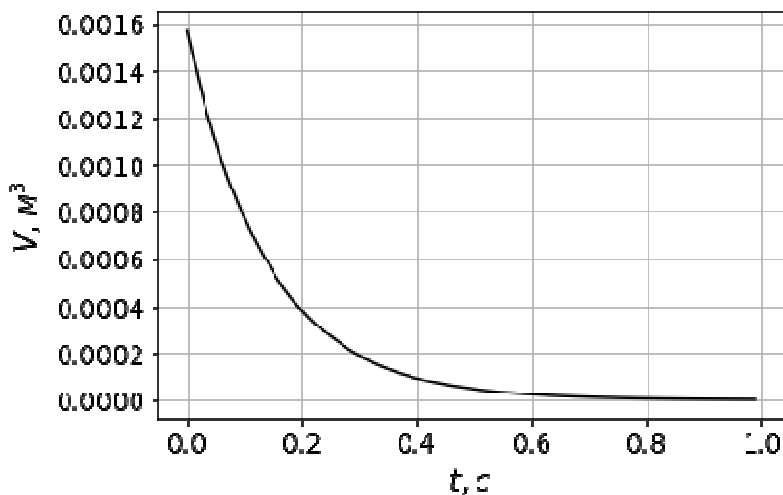


Рис.5. Зміна об'єму матеріалу в бункері циліндричної форми

У випадку усіченого конуса необхідно врахувати, що його поперечний перетин є змінною величиною. Для цього запишемо формулу для визначення об'єму усіченого конуса:

$$V(t) = \frac{1}{3} \pi h (r^2 + rR(t) + R(t)^2) \quad (5)$$

де $R = tg\alpha h + r$

Відповідно, диференціальне рівняння приймає вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) \quad (6)$$

де $h(t)$ визначається як розв'язок наступного рівняння

$$\pi tg^2 \alpha h^3 + 3\pi tg\alpha r h^2 + 3\pi r^2 h - 3V = 0 \quad (7)$$

В цьому випадку характер витрати матеріалу наближається до лінійного.

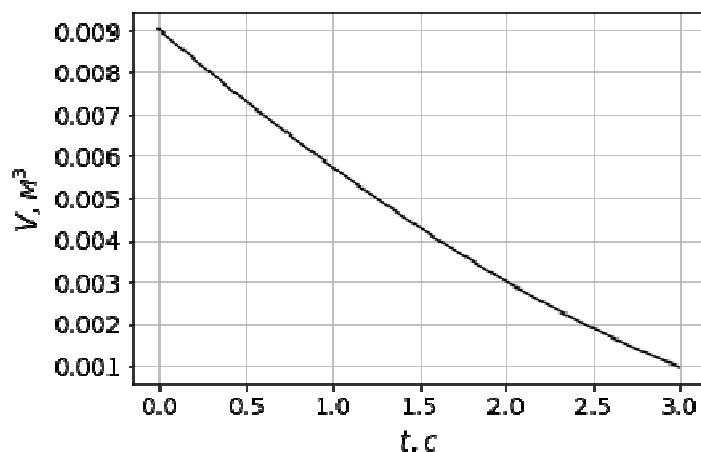


Рис.6. Зміна об'єму матеріалу в бункері конічної форми

Також відома [3] формула, що дозволяє визначити швидкість у випадку нормального витікання:

$$v = \lambda \sqrt{3,2gR}, \quad (8)$$

де R – гідравлічний радіус отвору, м.

В цьому випадку вплив параметрів сипкого матеріалу враховується коефіцієнтом λ , а гідравлічний радіус отвору бункера враховує діаметр отвору та розмір частинок матеріалу. Для отвору у вигляді кола його можна визначити за формулою:

$$R = \frac{D - a}{4}, \quad (9)$$

де a – розмір частинки, D – діаметр отвору бункера.

Враховуючи, що рівняння балансу матеріалу (3) залишається незмінним, для випадку нормальної течії отримаємо диференціальне рівняння у вигляді:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \pi R^2 v = \pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR}. \quad (10)$$

Всі величини у правій частині рівняння є сталими та не залежать від часу. Таким чином, розв'язком рівняння буде лінійна залежність:

$$\int_0^{t_{\square}} dV = \pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR} \int_0^{t_{\square}} dt, \quad (11)$$

$$V = \pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR} t_{\square}. \quad (12)$$

Відповідно, вираз для визначення часу витікання заданої кількості матеріалу з бункера можна записати у наступному вигляді:

$$t_{\max} = \frac{m}{\pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR} \rho}, \quad (13)$$

де m – маса матеріалу в бункері;

ρ – насипна густина матеріалу.

Всі наведені співвідношення є емпіричними і враховують параметри сипкого матеріалу у вигляді узагальнюючих коефіцієнтів (λ , R). На практиці характер взаємодії частинок залежить як від їх геометричних розмірів та властивостей, так і від вологості оточуючого середовища.

Отримані аналітичні залежності дозволяють висунути гіпотезу, що під час витікання сипкого матеріалу з бункера будуть проявлятися як властивості, що характерні для рідини, так і властивості, характерні для ідеального сипкого матеріалу.

Для перевірки гіпотези проведені експериментальні дослідження відповідно наступної послідовності.

- 1) У бункер із закритим вихідним отвором завантажувалась задана кількість сипкого матеріалу.
- 2) Під вихідним отвором бункера була розташована ємність із датчиком маси, який був під'єднаний через АЦП до мікроконтролера.
- 3) Відкривався вихідний отвір бункера, сипкий матеріал потрапляв у ємність, а мікроконтролер зчитував сигнал датчика маси через задані проміжки часу.
- 4) Дослід повторювався по десять разів для трьох різних матеріалів і двох бункерів різної форми.

У таблиці 1 наведені параметри сипких матеріалів, що досліджувались.

Таблиця 1

Параметри сипких матеріалів

	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3
Розмір частинки, мм	2,9 – 3,8	~1,7	~2,2
Кут природнього укосу, град	35,0	41,9	30,7
Насипна густина, кг/м ³	815	770	850

Аналіз результатів досліджень (рис. 7,8,9) свідчить, що залежність між масою матеріалу, який витік з бункера, та часом, є лінійною. Тобто для її апроксимації можна використати лінійне рівняння регресії.

Точками на графіках показані експериментальні дані, суцільними лініями – результати розрахунків за отриманими рівнянням регресії.

Матеріал 1. Рівняння регресії:

$$m = 0,0986t + 12,037 \quad (14)$$

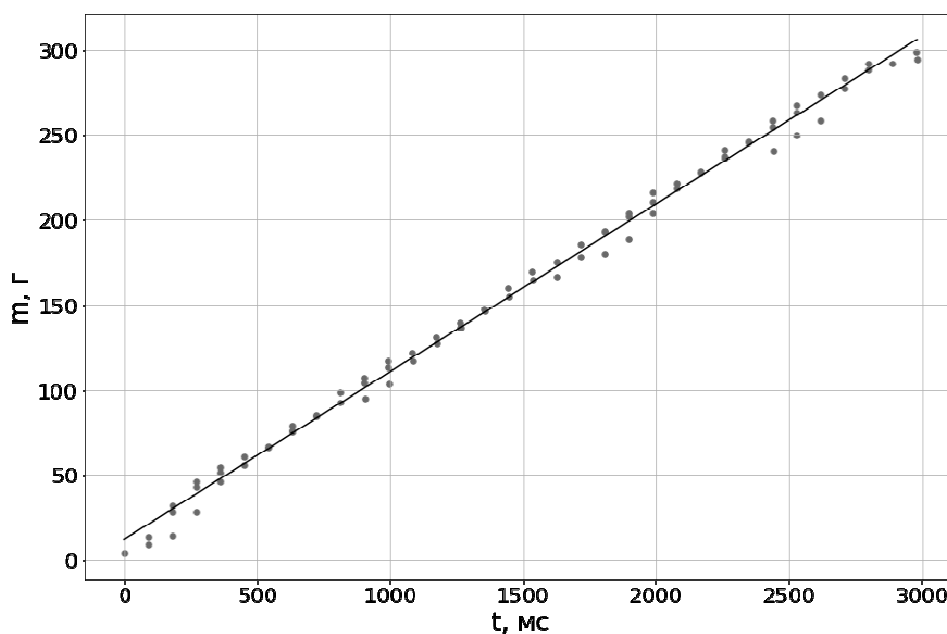


Рис.7. Зміна маси матеріалу 1, який витік з бункера, у часі

Матеріал 2. Рівняння регресії:

$$m = 0,0894t + 12,954 . \quad (15)$$

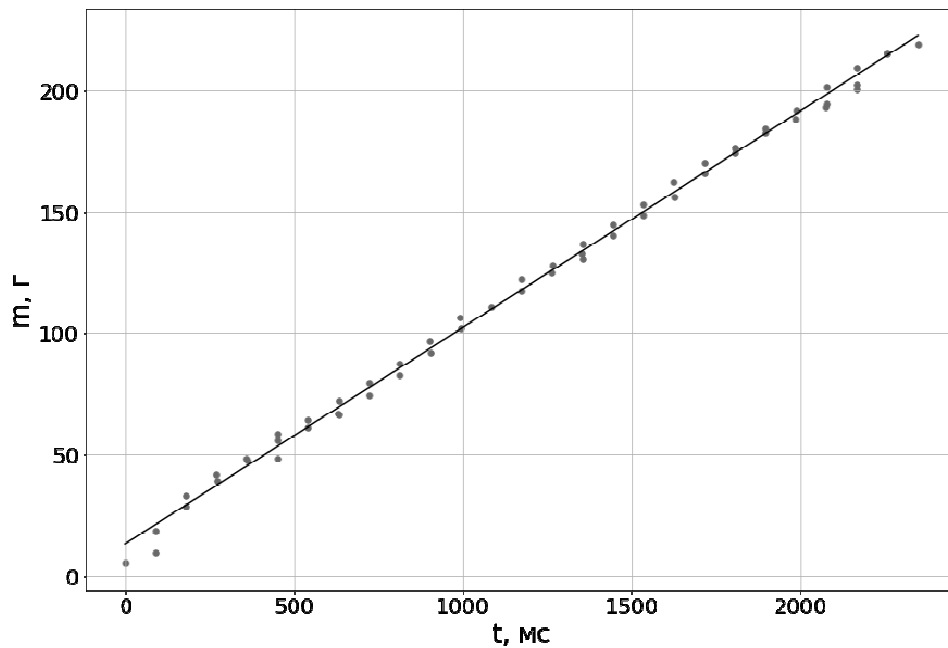


Рис.8. Зміна маси матеріалу 2, який витік з бункера, у часі

Матеріал 3. Рівняння регресії:

$$m = 0,111t - 1,841 . \quad (16)$$

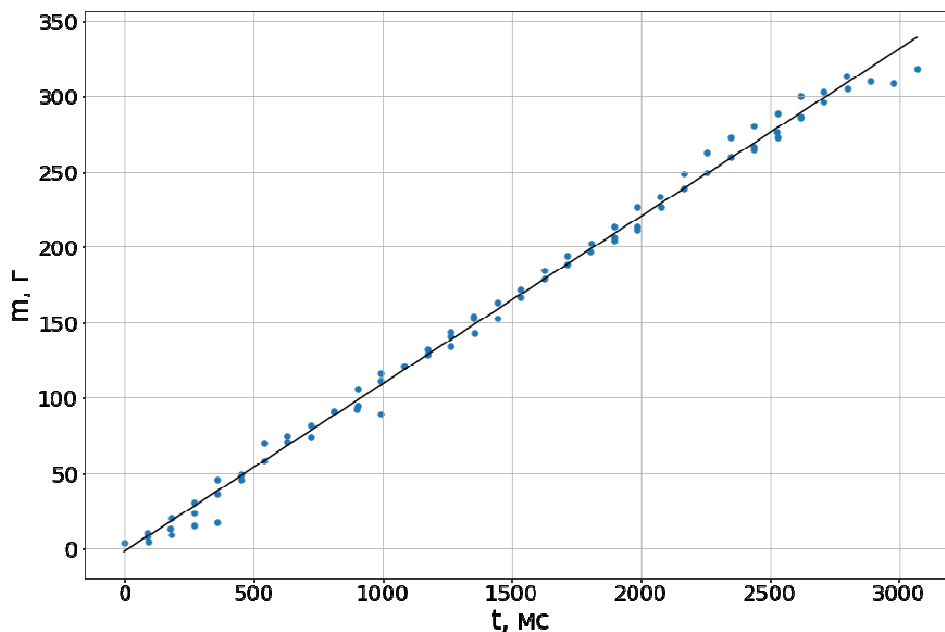


Рис.9. Зміна маси матеріалу 3, який витік з бункера, у часі

У таблиці 2 наведено швидкість витікання матеріалів з бункера.

Таблиця 2

Швидкість витікання матеріалів з бункера

	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3
Швидкість витікання, кг/с	0,0986	0,0784	0,0894

Для визначення взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та швидкістю потоку, розрахуємо коефіцієнти кореляції (Пірсона) між:

- швидкістю потоку та кутом природнього укоосу;
- швидкістю потоку та розміром частинок;
- швидкістю потоку та насипною густиною.

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

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \tag{17}$$

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

Результати розрахунків:

- 1) Коефіцієнт кореляції між швидкістю потоку та насипною густиною

$r_p = 0,603$.

2) Коефіцієнт кореляції між швидкістю потоку та кутом природнього укосу $r_{\phi} = 0,65$.

3) Коефіцієнт кореляції між швидкістю потоку та розміром частинок $r_a = 0,962$.
Перевіримо взаємозв'язок між отриманими експериментальними даними та рівнянням (8).

Визначаємо гідравлічний радіус отвору для всіх трьох матеріалів (9) та розраховуємо швидкість матеріалу на виході з бункера (8) таблиця 3.

Таблиця 3

Швидкість матеріалу на виході з бункера

	Гідравлічний радіус, м	Швидкість матеріалу, м/с
Матеріал 1	0,0044	0,2232
Матеріал 2	0,0048	0,2334
Матеріал 3	0,0047	0,2303

Розраховуємо коефіцієнт кореляції між швидкостями руху матеріалу, які отримані експериментально, і визначені за рівнянням (8):

$$r_v = -0,961$$

Коефіцієнт кореляції, що дорівнює 0,961 свідчить, що при моделюванні руху сипкого матеріалу з бункера, можна використовувати нормальний закон плинності середовища, який і визначатиме продуктивність бункера.

Висновки:

- 1) За нормальної течії сипкого матеріалу його швидкість на виході бункера є сталою та не залежить від кількості матеріалу в бункері.
- 2) Існує лінійна залежність між розміром частинок матеріалу та швидкістю його руху ($r_a = 0,962$).
- 3) Насипна густина та кут природнього укосу меншою мірою впливають на швидкість руху матеріалу ($r_p = 0,603, r_{\phi} = 0,65$).

Література

1. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов. – Барнаул: АПИ, 1986. – 84с.
2. Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ: КНУТД, 2017. – 220с.
3. Глобин А. Н. Дозаторы: монографія / А. Н. Глобин, И. Н. Краснов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 384с.
4. Stanley Middleman. An Introduction to

References

1. Nyachev L. (1986). Osnovy teoryy bunkerov y sylosov [Bunkers and silos theory fundamentals]. Barnaul: APY. [in Russian].
2. Statsenko V. V., Burmistenkov O. P., Bila T. Y. (2017). Avtomatyzovani komplekxy bezperervnoho pryhotuvannya kompozycij sypkyy materialiv: monohrafiya [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyuiv: KNUTD [in Ukrainian].
3. Hlobyn A. N., Krasnov Y. N. (2016). Dozatory: monohrafiyya [Dosers]. M.-Berlyn: Dyrekt-Medya. [in Russian].

Fluid Dynamics: Principles of Analysis and Design: John Wiley & Sons, 1997. – 528p.

4. Stanley Middleman. (1997). An Introduction to Fluid Dynamics: Principles of Analysis and Design: John Wiley & Sons. [in English]

STATSENKO V. V.
statsenko.v@knutd.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>
Researcher ID: C-3646-2017
Kiev National University of Technologies & Design

BURMISTENKOV O. P.
burmistenkov.op@knutd.edu.ua ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>
Researcher ID: T-5180-2018
Kiev National University of Technologies & Design

BILA T. Y.
bila.ty@knutd.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>
Researcher ID: T-5276-2018
Kiev National University of Technologies & Design

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВЫХОДЕ БУНКЕРОВ СТАЦЕНКО В. В., БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Изучение влияния физико-механических свойств сыпучего материала на характер его движения на выходе бункера.

Методика. В работе использованы методы математического моделирования и регрессионного анализа.

Результаты. Определены характерные особенности основных режимов движения материала - нормального и гидравлического. Приведены математические модели движения сыпучих материалов в конически-цилиндрических бункерах, проанализировано влияние параметров бункера и частиц на скорость их движения. Разработан стенд и проведены экспериментальные исследования скорости истечения материалов из бункеров, результаты которых представлены в работе.

Научная новизна. Получены математические модели движения сыпучих материалов в конических и цилиндрических бункерах. Установлены зависимости между физико-механическими параметрами частиц и скоростью их движения.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют прогнозировать производительность бункерного оборудования для различных видов сыпучих материалов.

Ключевые слова: бункер, сыпучий материал, анализ движения, моделирование.

THE BULK MATERIALS MOVEMENT ANALYSIS AT THE BUNKERS OUTLET STATSENKO V. V., BURMISTENKOV O. P., BILA T. Y.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. The study of the bulk material physics and mechanical properties influence on the its movement nature at the bunker outlet.

Methodology. We used the mathematical modeling and regression analysis methods.

Findings. The characteristic features of the material main movement modes (normal and hydraulic) are defined. Mathematical models of the bulk materials movement in conical-cylindrical bunkers are given, the bunker and particles parameters influence on their velocity is analyzed. An equipment was developed and experimental studies of the materials discharge rate from bunkers were carried out, the results are presented in the work.

Originality. Mathematical models of the bulk materials movement in conical and cylindrical bunkers are obtained. The dependences between the particles physic-mechanical parameters and their movement speed are established.

Practical value. The results obtained allow us to predict the bunker equipment performance of for various bulk materials types.

Keywords: bunker, bulk material, motion analysis, modeling.