

УДК 621.8

ВОЛЯНИК О. Ю., КОВАЛЬОВ Ю. А., РУБАНКА М. М.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОГО ЖИВИЛЬНИКА ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

**Метою роботи** є аналітичне дослідження кута нахилу трубчасто-гребневого живильника на розподілення сипкого матеріалу в трубі.

**Об'єктом дослідження** є процес транспортування сипких матеріалів в трубно-гребневому живильнику.

**Методика.** Аналітичний огляд літературних джерел. Аналітичні та експериментальні дослідження залежності кута нахилу на розподілення сипкого матеріалу в трубі живильника, дослідження конструктивних та технологічних параметрів живильника з урахуванням фізичних властивостей сипкого матеріалу.

**Результати досліджень.** Визначено критичний кут нахилу труби, при якому сипкий матеріал всипається з труби без її обертання. Розроблено математичну модель транспортування матеріалу з урахуванням параметрів живильника. Визначено ефективні кут нахилу в залежності від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу. Отримано залежності кута нахилу живильника від розподілення сипкого матеріалу в трубі. Проведено аналіз розсипання сипкого матеріалу в трубі з урахуванням конструктивних параметрів та властивостей сипкого матеріалу. Результати аналітичних розрахунків підтверджено експериментально.

**Наукова новизна.** Розроблено математичну модель, яка враховує фізичні властивості матеріалу, геометрію живильника та робочі параметри. Вона дозволила описати процес розсипання сипкого матеріалу в трубі живильника та визначити значення критичного кута нахилу, який забезпечить ефективну роботу трубчасто-гребневого живильника.

**Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для підвищення функціональності трубно-гребневих живильників у промислових процесах, де використовуються сипкі матеріали. Результати досліджень представлено у вигляді графіків залежності кута нахилу живильника від розподілення сипкого матеріалу в трубі. Це дозволяє більш точніше прогнозувати габарити транспортувального елемента в залежності від технічного процесу.

**Ключові слова:** аналітичне дослідження; трубно-гребневий живильник; кут нахилу; сипкі матеріали; транспортування; витікання; розсипання; ефективність; промислові процеси; проектування систем; вдосконалення систем.

**Вступ.** Основною функцією живильника є транспортування сипкого матеріалу (наприклад, порошку або грануляту) від бункера до змішувача [6, 7] для виготовлення продукту відповідної якості. Живильники використовуються у різних галузях промисловості, де якісне транспортування сипких матеріалів є ключовим етапом виробничого процесу [3].

Живильники дозволяють регулювати кількість матеріалу, що подається, і змінювати її в залежності від вимог виробництва [8]. Це дозволяє підтримувати стабільність та якість виробництва, уникати витрат матеріалу та забезпечувати економічну ефективність процесу.

Одним з видів живильників є трубно-гребневі живильники, які використовуються для транспортування сипких матеріалів. Вони забезпечують безперервне постачання матеріалу з використанням принципу обертання труби на стінках якої розташовані гребні (спіральні витки).

**Постановка задачі.** Задачею цієї роботи є аналітичне дослідження впливу кута нахилу живильника на довжину розсипання сипкого матеріалу в трубі.

**Мета** полягає у визначенні значень параметрів транспортувального елементу трубчасто-гребневого живильника, при яких досягається максимальна продуктивність процесу транспортування. При цьому необхідно:

1) розробити математичну модель трубно-гребневого живильника, враховуючи взаємодію матеріалу з органом транспортування. Встановити залежності між кутом нахилу транспортувального елементу та розсіпанням сипкого матеріалу в ньому;

2) встановити ефективні значення кута нахилу живильника, при яких досягається найвища продуктивність процесу транспортування;

3) проаналізувати результати та зробити висновки щодо раціональних параметрів трубно-гребневого живильника.

#### **Результати досліджень.**

В даній роботі розглядаються трубно-гребневий живильник [1, 7], який має трубу з довжиною  $L_T$  та діаметром  $D_T$ , в середині якої розташовані гребні на бічних поверхнях труби на відстані  $L_B$  (рисунок 1). Переміщення матеріалу відбувається за рахунок взаємодії зсипання (скоочування) матеріалу по поверхні гребня. Для зміни кількості матеріалу що виходить з живильника, змінюється її кутова швидкість та кут нахилу живильника. В роботі наведено результати комп'ютерного моделювання для визначення критичного кута нахилу живильника та порівняння їх з показниками отриманими експериментально[2].

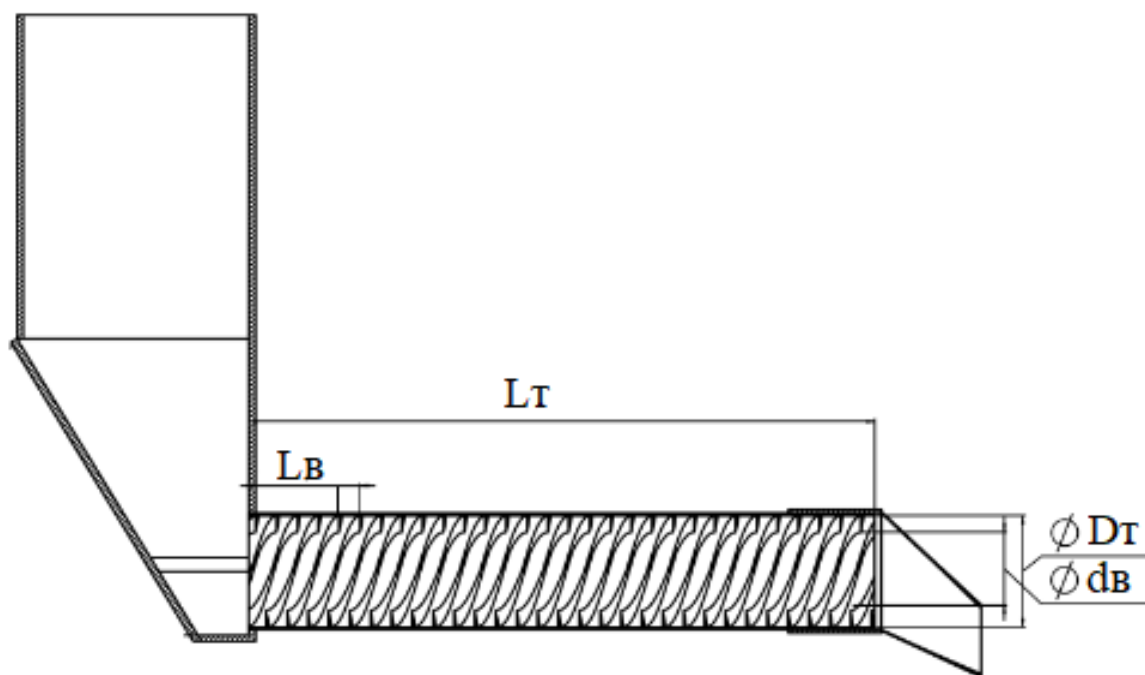


Рис. 1. Схема трубчасто-гребневого живильника

Основною вхідною характеристикою сипкого матеріалу під час досліджень є кут природного відкосу [1, 9]:

Кут природного відкосу – це найбільший кут, який може утворитися природним насипанням сипкого матеріалу у стані рівноваги з горизонтальною площиною. Кут природного відкосу залежить від фізико-механічних властивостей часток, таких як розмір, форма, густина, поверхневий стан та вологість.

Зі зменшенням розміру частинок кут природного відкосу стає меншим, оскільки дрібніші частинки мають менше зчеплення між собою і легше переміщуються одна відносно одної. Для сипких матеріалів, які не мають зчеплення (тобто, без когезії), кут природного відкосу не перевищує кута внутрішнього тертя між частинками. Це означає, що частинки можуть переміщуватися одна відносно одної до тих пір, поки кут нахилу поверхні не досягне цього критичного значення.

Кут природного відкосу можна визначити транспортером або за допомогою спеціалізованих приладів, які вимірюють нахил поверхні матеріалу в стані рівноваги. Крім того, його можна розрахувати за допомогою математичних формул, враховуючи фізичні властивості часток. Однією з таких формул є:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{h}{l},$$

де  $h$  – висота насипаного сипкого матеріалу;  
 $l$  – довжина розсипання сипкого матеріалу.

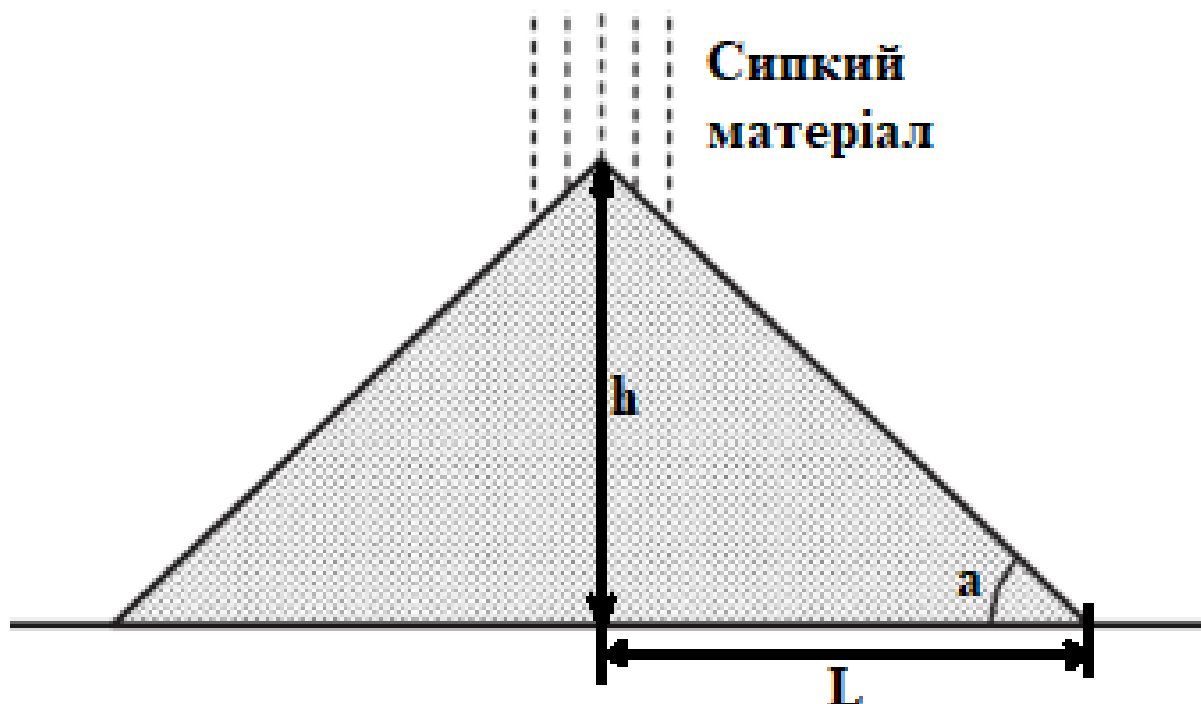


Рис. 2. Схема конуса який утворює насипний матеріал

Оскільки в трубі присутні гребні які затримують сипкий матеріал під час руху кут природного відкосу не буде дорівнювати критичному куту висипання з труби.

Програмне забезпечення в якому побудована модель не дозволяє змінювати кут нахилу живильника, для того щоб забезпечити ефект нахилу труби під час дослідження сила тяжіння по осі  $X$  збільшувалась а осі  $Y$  зменшувалась, при цьому їх результуюча дорівнює завжди має дорівнювати  $9,8 \text{ м/с}^2$  (рис. 3).

На рисунку 3 зображено модель трубно-гребневого живильника.

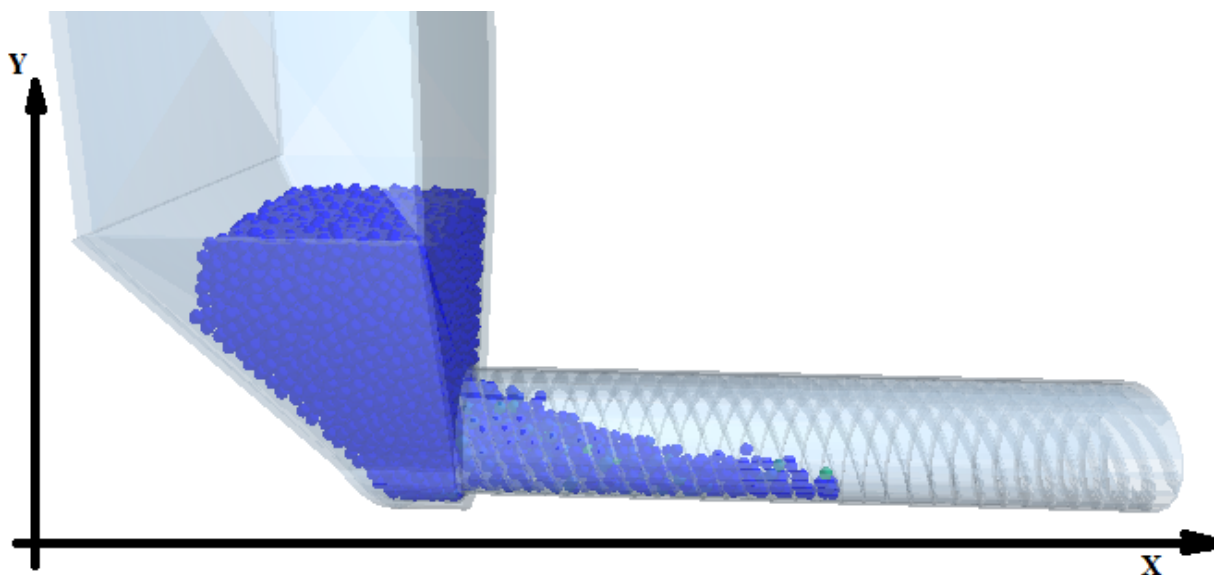


Рис. 3. Модель переміщення сипкого матеріалу у трубчасто-гребневому живильнику

Дані які обрано для експериментальних досліджень приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Результати експериментальних досліджень**

| Номер експерименту №                    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8   |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Значення кута нахилу живильника $\beta$ | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45  |
| Значення сили тяжіння по осі X          | 1,08 | 1,63 | 2,17 | 2,72 | 3,26 | 3,81 | 4,35 | 4,9 |
| Значення сили тяжіння по осі Y          | 8,71 | 8,16 | 7,62 | 7,07 | 6,53 | 5,98 | 5,44 | 4,9 |

Довжина розсіпання сипкого матеріалу в лабораторній установці визначався різниці між загальною довжиною труби  $L_T$  та відстанню від її кінця до першої частинки сипкого матеріалу яка утворює кут природнього відкосу  $L_3$ . Кут нахилу живильника встановлювався за допомогою транспортера який розташований на лабораторній установці [1] (рис. 4).

Для експерименту обрано гранули полівінілхлориду (ПВХ) характеристики якого (таблиця 2) були задані в модель дослідження. Цей матеріал був обраний через значну насипну густину  $1200 \text{ кг/м}^3$ , це дозволить знизити вплив електростатичної сили між сипким матеріалом та транспортувальним елементом живильника та як наслідок підвище достовірність проведених експериментів на лабораторному стенді. Оскільки форма частинки ПВХ має переважно округлу форму, доцільним рішенням буде спростити форму в математичній моделі до сферичної (рис. 5). Це дозволить збільшити швидкість обрахунку завдяки зниженню складності геометричних розрахунків та більш ефективному використанню ресурсів комп'ютерного моделювання. Сферична форма є простою для математичного опису, що

сприяє точності розрахунків та зменшує кількість ітерацій, необхідних для досягнення стабільного результату.

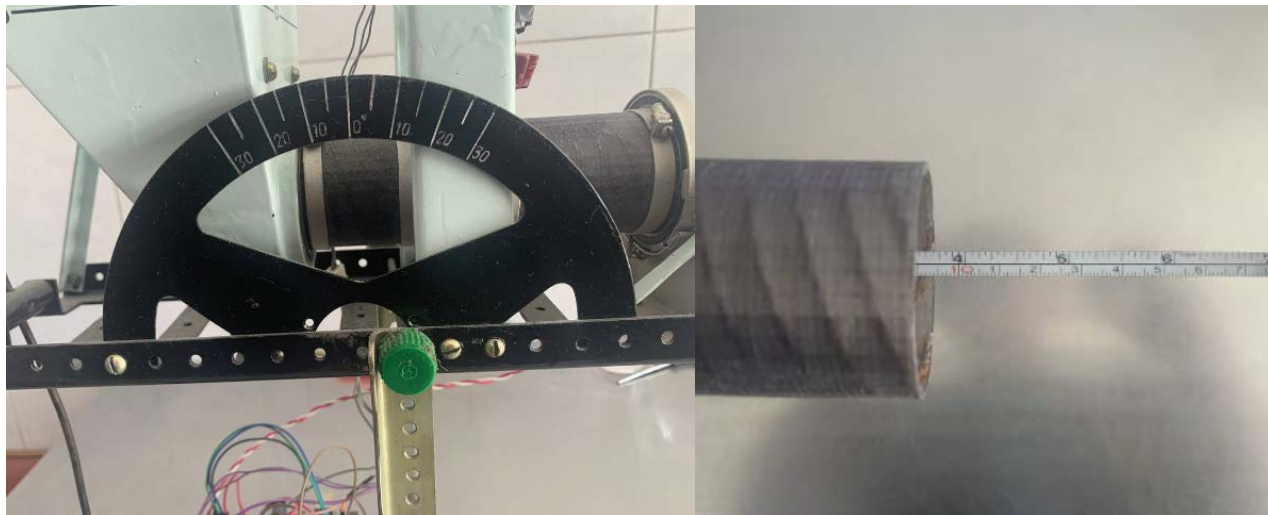


Рис. 4. Лабораторна установка для проведення експериментальних досліджень

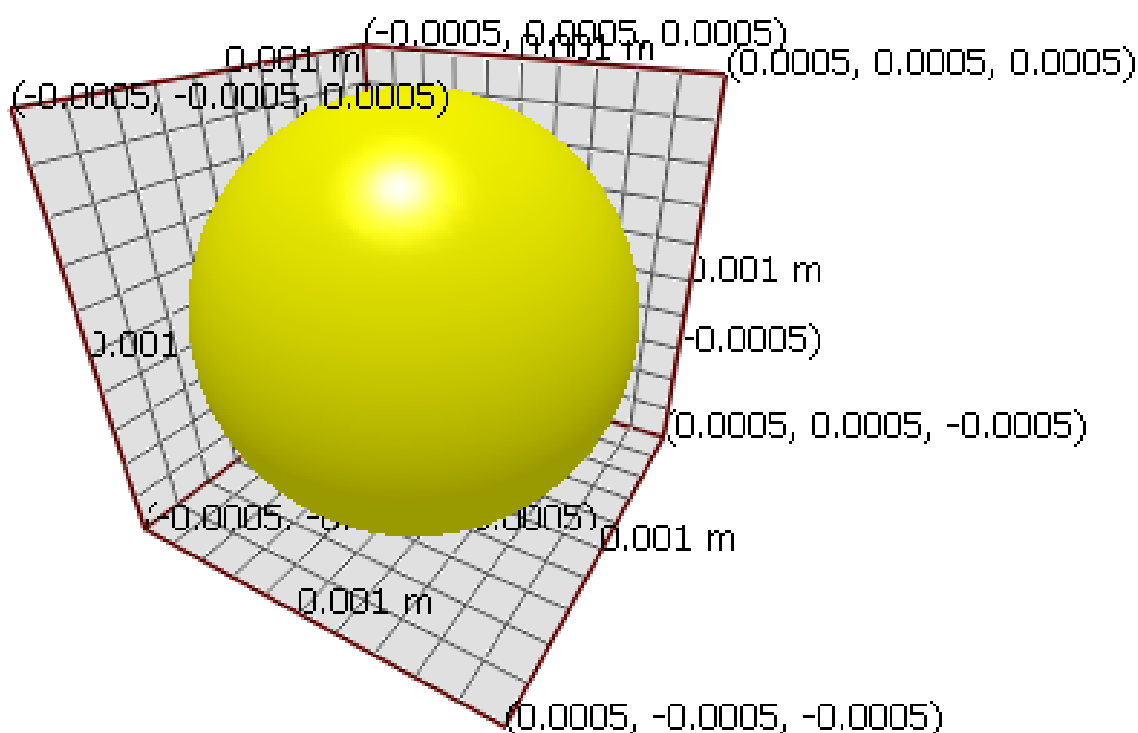


Рис. 5. Загальний вигляд частинки сипкого матеріалу математичної моделі

Характеристики живильника та властивості сипкого матеріалу, який було обрано для досліджень приведено в таблиці 2.

Результати аналітичних та експериментальних досліджень зображено на рис. 6.

Таблиця 2

Характеристики живильника та властивості сипкого матеріалу

| Довжина труби живильника<br>Lt, м. | Діаметр труби живильника<br>a Dт, м. | Насипна густина сипкого матеріалу $\rho$<br>кг/м <sup>3</sup> | Вага однієї частинки $m_{\text{ч}}$ , кг | Величина частинок dч,<br>м | Кут природного відкосу $\alpha$ ,<br>град. |
|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| 0,22                               | 0,05                                 | 1200                                                          | $6.29 \times 10^{-7}$                    | 0.0009-0.0011              | 30                                         |



Рис. 6. Залежність продуктивності від кутової швидкості труби під час транспортування сипкого матеріалу

Отримані аналітичні та експериментальні залежності відображають характер розсипання сипкого матеріалу в трубі живильника і можуть використовуватися при виборі основних конструктивних характеристик живильника. Пунктирними лініями відображено точки початку самостійного витоку сипкого матеріалу з труби, для експерименту початок витоку починається при 40 градусах а для моделі 35 градусів нахилу живильника. Також разом з цим точки залежності, отримані за допомогою математичної моделі, мають більш лінійний характер, перша точка розсипання починається з 0.110 м а початок висипання з труби починається при 35 град. Це пов'язано з тим що математична модель забезпечує ідеальні умови розсипання сипкого матеріалу за рахунок відсутності електростатичних сил які виникають під час руху сипкого матеріалу, відсутність злежуваності сипкого матеріалу та ідеальності форми частинок що в свою чергу зменшую внутрішнє тертя сипкого матеріалу.

**Висновок:**

1. В роботі проведено аналіз та аналітичне дослідження розсипання сипкого матеріалу в трубі в залежності від кута нахилу живильника, призначеного для транспортування сипких матеріалів.
2. При заданих параметрах визначено критичний кут нахилу труби, при якому матеріал починає постійно висипатися з труби.



3. Розроблено математичну модель, яка враховує конструктивні та технічні параметри живильника, и описує процес розсіпання сипкого матеріалу в трубі.

4. Застосування розробленої моделі дозволяє визначити ефективні значення критичного кута нахилу труби для в залежності від габаритів труби.

5. Результати досліджень дозволять більш раціонально підбирати геометричні розміри транспортувального елемента живильника.

## References

1. Nychehlod, V., Burmistenkov, O., Statsenko, V., Bila, T., Statsenko, D. (2023). Determining the pattern of loose material movement in screw and tubular-comb feeders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (126)), 22–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291680>.
2. Antomonov, M. Yu., Korobeynikov, G. V., Khmelnytska, I. V. (2021). Matematychni metody obrobлення ta modeliuvannia rezultativ eksperymentalnykh doslidzhen [Mathematical methods for processing and modeling experimental research results]. *Olympiyska Literatura*. 216 p. [in Ukrainian].
3. Bila, T. Ya., Statsenko, V. V. (2006). Kompiuterne modeliuvannia systemy avtomatychnoho keruvannia zmishuvachem bezperervnoi dii [Computer modeling of continuous-action mixer automatic control system]. *Visnyk of the Daliian University = Bulletin of SNU named after Dalia*, 1, 9–12 [in Ukrainian].
4. Tsyz, I. Ye., Didukh, V. F. (2017). Dozuvannia syppykh zv'iaznykh materialiv pid chas vyrobnytstva orhano-mineralnykh dobryv: monohrafiia [Dosage of bulk binders in the production of organo-mineral fertilizers: monograph]. *Lutsk: RVV Lutsk NTU*. 184 p. [in Ukrainian].
5. Borovik, V. N., Yakovets, V. P. (2004). Kurs vyshchoi heometrii: navch. posibnyk [Higher Geometry Course]. *Sumy: VTD "Universitetska Kniga"*. 464 p. [in Ukrainian].
6. Polischuk, O. S., Karmalita, A. K., Burmistenkov, O. P. (2018). Polimerni materialy dlia vyrobnytstva vyrobiv lehkoï promyslovosti ta yikh fizyko-mekhanichni vlastyvosti [Polymer materials for light industry products manufacturing and their physico-mechanical properties]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of Khmelnytskyi National University* [in Ukrainian].
7. Nychehlod, V. V., Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P. (2023). Pulsatsii zhyvylnykyv: porivniannia konstruktsii shnekovoho ta trubchasto-hrebnevoho zhyvylnykyv [Pulsations of feeders: a comparison of screw and tubular-comb feeders designs]. *Electromechanical, Information Systems and Nanotechnology: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference*

## Література

1. Nychehlod V., Burmistenkov O., Statsenko V., Bila T., Statsenko D. Determining the pattern of loose material movement in screw and tubular-comb feeders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 6 (1 (126)). P. 22–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291680>.
2. Антомонов М. Ю., Коробейников Г. В., Хмельницька І. В. Математичні методи оброблення та моделювання результатів експериментальних досліджень. *Олімпійська література*, 2021. 216 с.
3. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування змішувачем безперервної дії. *Вісник СНУ ім. Даля*. 2006. № 1. С. 9–12.
4. Цизь І. Є., Дідух В. Ф. Дозування сипких зв'язних матеріалів під час виробництва орґано-мінеральних добрив: монографія. *Луцьк: РВВ Луцького НТУ*, 2017. 184 с.
5. Боровик В. Н., Яковець В. П. Курс вищої геометрії: навч. посібник. *Суми: ВТД "Університетська книга"*, 2004. 464 с.
6. Поліщук О. С., Кармаліта А. К., Бурмістенков О. П. Полімерні матеріали для виробництва виробів легкої промисловості та їх фізико-механічні властивості. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018.
7. Ничеглод В. В., Стаценко В. В., Бурмістенков О. П. Пульсації живильників: порівняння конструкцій шнекового та трубчасто-гребневого живильників. *Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології: матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної*

of Young Scientists and Students, April 20, 2023, Kyiv (pp. 20–23). Kyiv: KNUTD [in Ukrainian].

8. Rohatynskiy, R. M. (1997). Doslidzhennia protsesiv transportuvannia vantazhiv mobilnymy hvyntovymy konveieramy [Research of cargo transportation processes by mobile screw conveyors]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho ahrarnoho universytetu "Suchasni problemy silskohospodarskoho mashynobuduvannia"* = Collection of Scientific Works of the National Agrarian University "Modern Problems of Agricultural Engineering", 1, 69–73[in Ukrainian].

9. Zalutskyi, S. Z., Gevko, R. B., Gladio, Y. B., Tkachenko, I. G., Klendiy, O. M. (2018). Rukh potoku sypkoho materialu po poverkhni shneka z elastychnymy sektiiami, shcho perekryvaiutsia mizh soboiu [Movement of bulk material flow on the surface of a screw with overlapping elastic sections]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv* = Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes, 11, 81–90 [in Ukrainian].

Інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Київ, 20 квітня 2023 року. Київ: КНУТД, 2023. С. 20–23.

8. Рогатинський Р. М. Дослідження процесів транспортування вантажів мобільними гвинтовими конвеєрами. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування"*. Київ: Видавництво НАУ, 1997. Том 1. С. 69–73.

9. Залуцький С. З., Гевко Р. Б., Гладько Ю. Б., Ткаченко І. Г., Клендій О. М. Рух потоку сипкого матеріалу по поверхні шнека з еластичними секціями, що перекриваються між собою. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 81–90.

**VOLIANYK OLEKSIY**

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Head of Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>  
Scopus Author ID: 57915800600  
Researcher ID: I-7967-2018  
E-mail: [volianyko.oy@knutd.edu.ua](mailto:volianyko.oy@knutd.edu.ua)

**KOVALEV YU**

Candidate of Sciences in Engineering (PhD), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-2321-6763>  
Scopus Author ID: 57221091874  
Researcher ID: AAP-5469-2021  
E-mail: [kovalov.ya@knutd.edu.ua](mailto:kovalov.ya@knutd.edu.ua)

**RUBANKA M**

Candidate of Sciences in Engineering (PhD), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-2367-0333>  
Scopus Author ID: 57200296022  
Researcher ID: AAN-2604-2021  
E-mail: [rubanka.mm@knutd.edu.ua](mailto:rubanka.mm@knutd.edu.ua)

**VOLIANYK O. Y., KOVALEV Yu. A., RUBANKA M. M.**

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**ANALYTICAL STUDY OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE TUBULAR-COMB FEEDER FOR FLUID MATERIALS**

**Purpose:** The purpose of this work is to analytically study the angle of inclination of a tubular-crest feeder on the distribution of bulk material in the tube.

**Object of study:** The object of the study is the process of transporting bulk materials in a tubular-crest feeder.



**Methodology:** Analytical review of literature sources. Analytical and experimental studies of the dependence of the angle of inclination on the distribution of bulk material in the feeder tube, studying the structural and technological parameters of the feeder taking into account the physical properties of the bulk material.

**Research results:** The critical angle of inclination of the tube has been determined, at which the bulk material falls out of the tube without its rotation. A mathematical model of material transportation has been developed taking into account the parameters of the feeder. Effective angles of inclination have been determined depending on the physical and mechanical properties of the bulk material. Dependencies of the feeder's inclination angle on the distribution of bulk material in the tube have been obtained. An analysis of the spreading of bulk material in the tube considering the structural parameters and properties of the bulk material has been conducted. The results of analytical calculations have been experimentally confirmed.

**Scientific novelty:** A mathematical model has been developed that takes into account the physical properties of the material, the geometry of the feeder, and the operating parameters. It allows describing the process of spreading bulk material in the feeder tube and determining the critical angle of inclination that ensures the efficient operation of the tubular-crest feeder.

**Practical significance:** The obtained results can be used to enhance the functionality of tubular-crest feeders in industrial processes where bulk materials are used. The research results are presented in the form of graphs showing the dependence of the feeder's inclination angle on the distribution of bulk material in the tube. This allows for more accurate prediction of the dimensions of the transportation element depending on the technical process.

**Keywords:** Analytical study, tubular-crest feeder, angle of inclination, bulk materials, transportation, outflow, spreading, efficiency, industrial processes, system design, system improvement.