

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.1>

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 впливу кутової швидкості на продуктивність трубчасто-гребневого живильника.

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

Методика. Аналітичний огляд літературних джерел. Аналітичні та експериментальні дослідження залежності продуктивності від кутової швидкості, конструктивних та технологічних параметрів живильника з урахуванням фізичних властивостей сипкого матеріалу.

Результати досліджень. Визначено критичну кутову швидкість труби, при якій матеріал не відривається від стінок. Розроблено математичну модель транспортування матеріалу з урахуванням параметрів живильника. Визначено ефективні значення кутової швидкості для досягнення максимальної продуктивності. Отримано залежності продуктивності від кутової швидкості труби. Проведено аналіз продуктивності 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 транспортування матеріалу і встановити зв'язок між робочими параметрами та продуктивністю живильника, визначити значення критичної кутової швидкості, які забезпечують ефективну роботу трубчасто-гребневого живильника.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності та функціональності трубно-гребневих живильників у промислових процесах, де використовуються сипкі матеріали. Результати досліджень представлено у вигляді графіків залежності продуктивності дозатора від кутової швидкості труби живильника. Це дозволяє аналізувати та порівнювати ефективність різних налаштувань живильника.

Ключові слова: аналітичне дослідження; трубно-гребневий живильник; кутова швидкість; сипкі матеріали; транспортування; витікання; притискання; продуктивність; 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 точне дозування 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 кутової швидкості на продуктивність трубчасто-гребневого живильника для ефективного транспортування сипких матеріалів.

Мета полягає у визначенні значень параметрів 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 кутовою швидкістю та продуктивністю дозатора;
- 2) встановити ефективні значення кутової швидкості, 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 (рис. 1). Переміщення матеріалу відбувається за рахунок взаємодії зсипання (скочування) матеріалу по поверхні гребня. Для зміни кількості матеріалу що виходить з живильника, змінюється її кутова швидкість. В роботі наведено аналітичні розрахунки для визначення продуктивності живильника та порівняння їх з показниками отриманими експериментально [2].

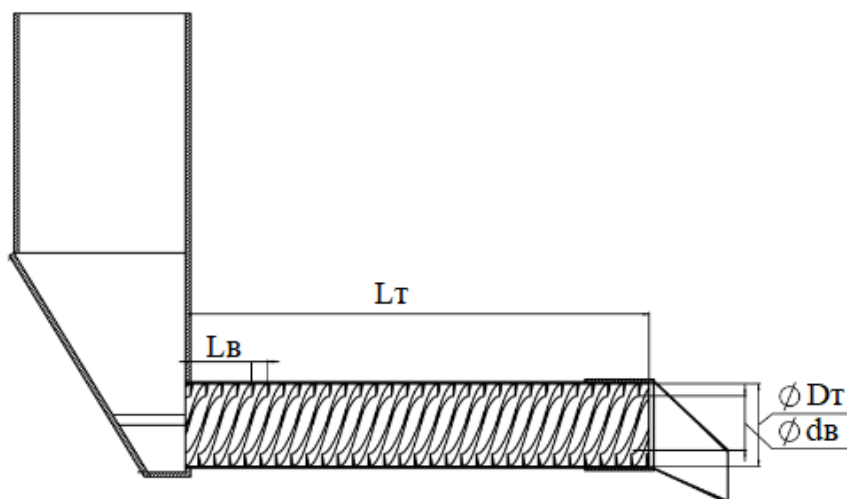


Рис. 1. Схема трубчасто-гребневого живильника

При обертанні труби з гребнями, зокрема заповненого сипким матеріалом, в його поперечному перерізі можна спостерігати такі режими руху матеріалу [1, 9]:

- рух із обваленням, при якому періодично відбувається перерозподіл матеріалу;
- циркуляційний рух, при якому матеріал утворює замкнутий циркуляційний контур.

При цьому частина матеріалу рухається або по відкритій поверхні викривленого сегмента, або знаходиться у польоті.

На рис. 2 приведена схема яка відображає рух частинки під дією сил які виникають на внутрішній поверхні труби з гребнями.

Критична швидкість, при якій кулі не відриватимуться від стінок навіть у найвищій точці E, визначиться з умови

$$P \leq mg, \quad (1)$$

де $P = m\omega^2 R$ – відцентрова сила; R – радіус труби; m – маса матеріалу; g – земне прискорення.

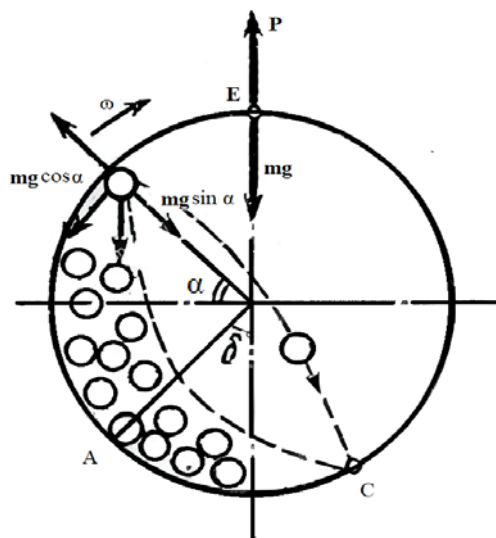


Рис. 2. Сили що діють на матеріал у фронтальному перерізі транспортуючого органу трубно-гребневого живильника

Таким чином, отримано наступну нерівність:

$$m\omega^2 R \leq mg. \quad (2)$$

Скасовуємо масу m :

$$\omega^2 R \leq g. \quad (3)$$

Вираз для критичної швидкості $\omega_{кр}$, при якій частинка матеріалу не відриватиметься:

$$\omega_{кр} = \sqrt{(g/R)}. \quad (4)$$

На практиці використовують більш просту формулу, оскільки ступінь заповнення труби переважно не перевищує 30% [4]. Отже, значення в дужках наближаться до одиниці.

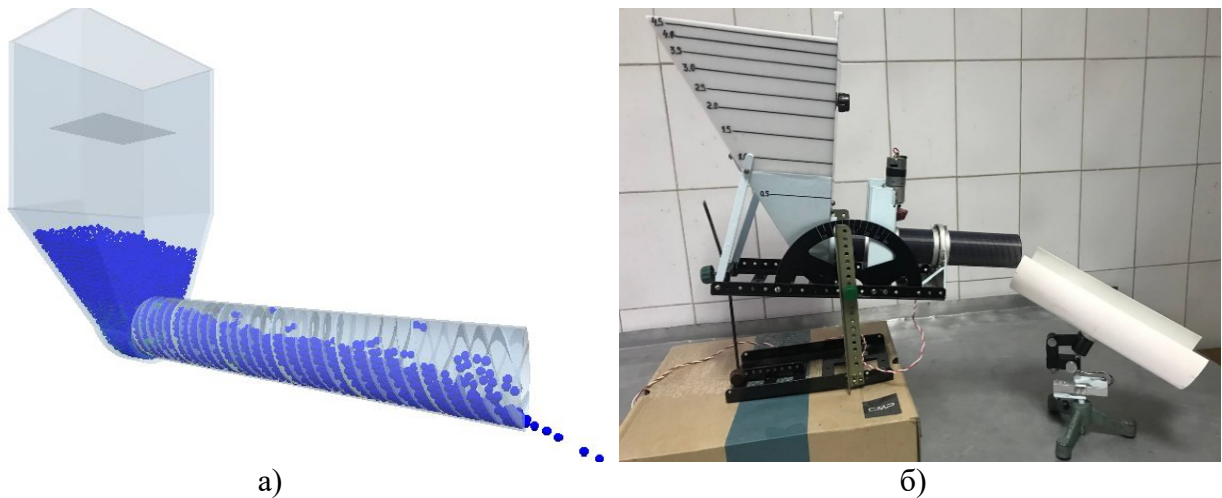
Враховуючи тертя між матеріалом та витком спіралі, а також кут нахилу витка спіралі та кут нахилу труби, можна розрахувати критичну кутову швидкість труби з більш точною формулою.

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{(g * \sin(\alpha) - \mu_{\tau} * g * (\cos(\theta)))}{R * \mu_{\tau} * \cos(\theta)}}, \quad (5)$$

де $\omega_{кр}$ – критична частота обертання труби (радіани/сек); g – прискорення вільного падіння (m/c^2); θ – кут нахилу труби та витка спіралі відповідно (градуси); α – кут нахилу витка спіралі (градуси); μ_{τ} – коефіцієнт тертя між матеріалом та трубою; μ_{τ} – коефіцієнт тертя між матеріалом та витком спіралі; R – радіус труби.

На рис. 3 зображено модель трубно-гребневого дозатору.

Продуктивність трубно-гребневого живильника – це величина, яка відображає результативність транспортування сипких матеріалів у відношенні до обсягу подачі матеріалу протягом певного часу. Вона враховує конструктивні особливості та технічні характеристики трубно-гребневого живильника.



а) б)
Рис. 3. Модель трубно-гребневого дозатору:
 а) 3D-модель; б) робочий прототип

Формула для обчислення продуктивності трубно-гребневого живильника:

$$Q = v \cdot m, \quad (6)$$

де m – масова витрата (масовий потік) матеріалу, кг/с; v – швидкість матеріалу в живильнику, м/с.

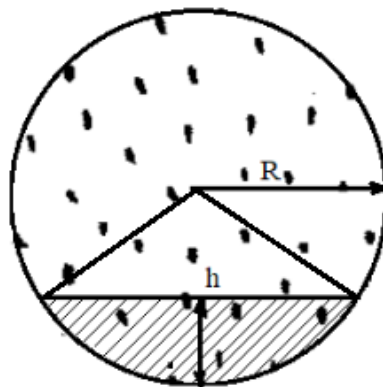


Рис. 4. Сегмент що заповнює сипкий матеріал

Для визначення маси сипкого матеріалу що виходить з живильника необхідно обрахувати площу що займає сипкий матеріал в на витку в трубі, для цього використано класичну формулу для знаходження площі сегмента кола [5]:

$$S = \frac{1}{2} r^2 (\theta - \sin(\theta)), \quad (7)$$

де S – площа сектора; r – радіус кола; θ – міра кута в секторі.

Звідси θ буде дорівнювати [5]:

$$\theta = 2 \arccos \left(1 - \frac{h}{2r} \right), \quad (8)$$

де h – висота одного шару сипкого матеріалу.

Радіус кола визначається з довжини витка спіралі оскільки в проекції сипкий матеріал займає меншу площу ніж є насправді.

$$r = \frac{L_B}{2\pi}, \quad (9)$$

де L_B – Довжина витка спіралі що контактує з сипким матеріалом.

Враховавши формулу (7) площі сегменту поперечного перерізу труби обраховано загальну масу частинок між витками:

$$m = \frac{S}{s_q} * \frac{L_B}{d_q} * m_q, \quad (10)$$

де s_q – площа однієї частинки сипкого матеріалу; $\frac{L_B}{d_q}$ – відношення, відстані між витками L_B до діаметру однієї частинки d_q , яке буде враховувати наповненість простору між витками; m_q – маса однієї частинки сипкого матеріалу.

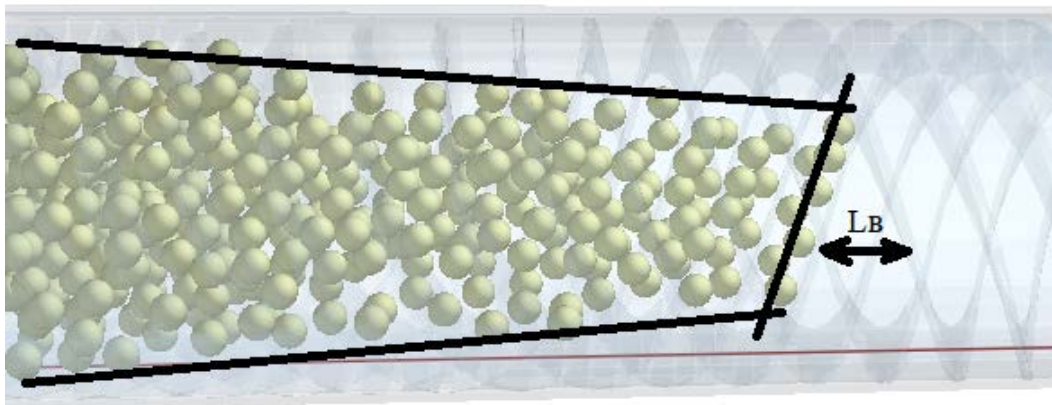


Рис. 5. Розподіл сипкого матеріалу на витках в трубі

Швидкість з якою один шар всипається з труби буде залежати від кількості витків та кутової швидкості труби при умові що забезпечується така швидкість при якій матеріал не прижимається до стінки труби.

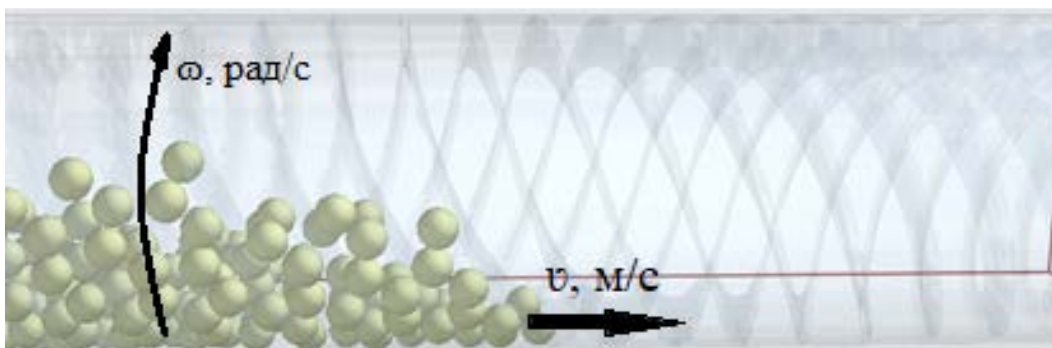


Рис. 6. Рух сипкого матеріалу в трубі

$$v = \frac{\omega * 60}{2\pi} * N_B, \quad (11)$$

де ω – кутова швидкість труби, рад/с; N_B – кількість витків.

Отже виходячи з вище сказаного продуктивність живильника буде дорівнювати.

$$Q = \frac{\omega * 60}{2\pi} * N_B * \frac{S}{s_{\text{ч}}} * \frac{L_B}{d_{\text{ч}}} * m_{\text{ч}}. \quad (12)$$

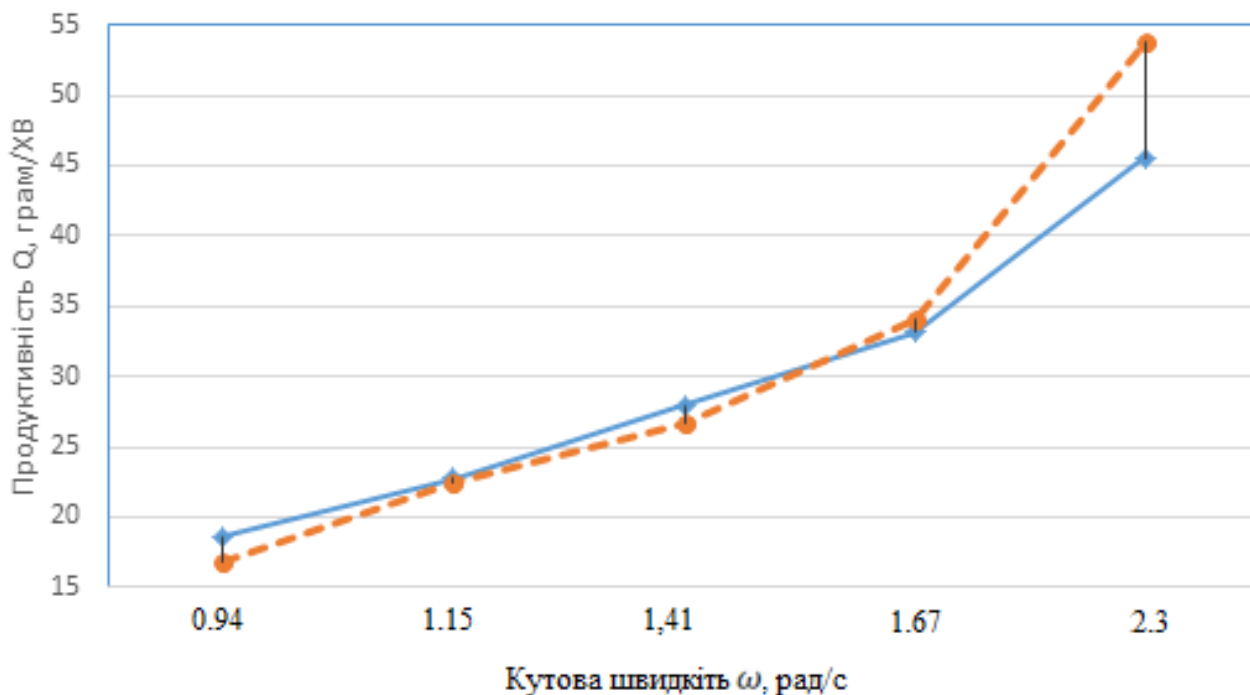
Для розрахунків було визначено наступні параметри сипкого матеріалу та живильника табл. 1.

Таблиця 1

Параметри сипкого матеріалу та живильника

Радіус однієї частинки $d_{\text{ч}}$, м	Насипна густина ρ кг/м ³	Кількість витків в трубі N_B , шт.	Вага однієї частинки $m_{\text{ч}}$, кг	Відстань між витками в трубі L_B , м	Діаметр труби D , м
0,0035	880	5	0,7	0,025	0,048

Результати аналітичних досліджень зображено на рис. 7.



----- значення експериментальних даних; ——— результати аналітичних розрахунків.

Рис. 7. Залежність продуктивності від кутової швидкості труби під час транспортування сипкого матеріалу

Отримані аналітичні та експериментальні залежності відображають характер руху сипкого матеріалу в трубі живильника і можуть використовуватися при розробці технологічного режиму в змішувальних комплексах. У діапазоні від 0,94 до 1,67 рад/с зміна продуктивності відбувається за лінійним законом.

Висновок:

1. В роботі проведено аналіз та аналітичне дослідження продуктивності трубно-гребневого живильника, призначеного для транспортування сипких матеріалів.

2. Визначено критичну кутову швидкість труби, при якій матеріал не відривається від стінок та враховано вплив фізичних властивостей матеріалу.

3. Розроблено математичну модель, яка враховує конструктивні та технічні параметри живильника, і описує процес транспортування матеріалу.

4. Застосування розробленої моделі дозволило визначити ефективні значення критичної кутової швидкості труби для досягнення максимальної продуктивності.

5. Проведено числові розрахунки та аналіз продуктивності з урахуванням конструктивних параметрів та властивостей сипкого матеріалу. Результати аналітичних розрахунків були порівняні з експериментальними даними, що свідчить про високу точність розробленої моделі.

6. Отримані залежності продуктивності від кутової швидкості труби дозволяють ефективно налаштовувати трубно-гребневий живильник для різних умов транспортування сипких матеріалів. Зазначені результати можуть бути використані для покращення технологічних процесів у галузях, де використовуються живильники для сипких матеріалів.

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 avtomatichnoho keruvannia zmishuvachem bezpererвної 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 sypkykh 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 vlastyvoli [Polymer materials for light industry products manufacturing and their physico-mechanical properties]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of Khmelnytskyi National University* [in Ukrainian].

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., Коробейніков 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 СХУ 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. Nychehlod, V. V., Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P. (2023). Pulsatsii zhyvlynykiv: porivniannia konstrukttsii shnekovoho ta trubchasto-hrebnevoho zhyvlynykiv [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 of Young Scientists and Students*, April 20, 2023, Kyiv (pp. 20–23). Kyiv: KNUITD [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. Zalutskiy, S. Z., Gevko, R. B., Gladjo, Y. B., Tkachenko, I. G., Klendiy, O. M. (2018). Rukh potoku sykoho materialu po poverkhni shneka z elastychnymy sektsiiamy, 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].

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 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., Гладьо 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 OLEKSII

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

KOVALOV YURI

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

RUBANKA MYKOLA

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

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**

The purpose of the study is an analytical investigation of the influence of rotation speed on the productivity of the tubular-comb feeder.

The object of the research is the process of transporting bulk materials in the tubular-comb feeder.

Methodology. Analytical review of literature sources. Analytical and experimental studies of the dependency of productivity on angular velocity, structural and technological parameters of the feeder, taking into account the physical properties of the bulk material.

Research results. The critical angular velocity of the tube, at which the material does not detach from the walls, has been determined. A mathematical model of material transportation considering feeder parameters has been developed. Effective values of angular velocity for achieving maximum productivity have been identified. Dependencies of productivity on the tube's angular velocity have been obtained. An analysis of productivity considering 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, feeder geometry, and operating parameters. It allowed describing the material transportation process and establishing the relationship between operating parameters and feeder productivity, determining the values of critical angular velocity ensuring the effective operation of the tubular-comb feeder.

Practical significance. The obtained results can be used to improve the efficiency and functionality of tubular-comb feeders in industrial processes involving bulk materials. The research results are presented in the form of graphs showing the dependency of feeder productivity on the rotation speed of the feeder tube. This allows analyzing and comparing the efficiency of different feeder settings.

Keywords: analytical investigation; tubular-comb feeder; angular velocity; bulk materials; transportation; dislodging; compression; productivity; efficiency; industrial processes; system design; system improvement.