



УДК 621.867

С. І. Пастушенко¹, д.т.н.

ORCID: 0000-0002-1996-3558

М. Б. Клендій¹, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-8271-5381

О. М. Троханяк², к.т.н.

ORCID: 0000-0002-4671-5824

¹Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

²Національний університет біоресурсів і природокористування України
e-mail: klendiy@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ КРУТНОГО МОМЕНТУ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА З ЛОПАТЕВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Анотація. У статті досліджено вплив параметрів транспортування сипкого матеріалу та конструктивних параметрів конвеєра з лопатевим робочим органом на величину крутного моменту. Як альтернативу гвинтовому транспортуючому органу у вигляді гелікоїда розглянуто каскадний транспортуючий орган у вигляді плоских лопатей, окреслених по еліпсу. Каскадний (лопатевий) робочий орган по чергово транспортує частинку з однієї лопаті на іншу, переміщуючи її, чи піднімаючи її на потрібну висоту. Проведено повнофакторний експеримент з визначення залежності крутного моменту від зміни трьох основних факторів: внутрішнього діаметра труби D , коефіцієнта заповнення конвеєра ψ та частоти обертання лопатевого робочого органу n , побудовані аналітичні регресійні рівняння та поверхні відгуку.

Встановлено, що запропонований лопатевий робочий орган може конкурувати з гвинтовим робочим органом у перевантажувальних конвеєрах завдяки технологічності конструкції та простоті виготовлення.

Ключові слова: гвинтовий конвеєр, лопатевий робочий орган, крутний момент, внутрішній діаметр труби, коефіцієнт заповнення конвеєра, частота обертання лопатевого робочого органу, рівняння регресії.

Постановка проблеми. Створення нових і удосконалення існуючих конструкцій транспортно-технологічних сільськогосподарських машин сприяє розвитку виробництва продукції, модернізації та механізації



технологічних процесів, підвищенню продуктивності праці. Гвинтові робочі органи транспортно-технологічних машин – складова комплексної механізації й автоматизації виробництва. Від раціонального вибору окремих типів цих механізмів та їх конструктивних параметрів залежить високопродуктивна робота підрозділів і підприємств у цілому.

Тому на даний час основним завданням при створенні та обґрунтуванні параметрів нових конструкцій транспортно-технологічних сільськогосподарських машин і їх робочих органів, які забезпечують розширення технологічних можливостей, є розроблення таких конструкцій, які б забезпечили зменшення енерго- і матеріальних ресурсів з покращеними умовами їх експлуатації, широку багатофункціональність, механізацію й автоматизацію виробничих процесів, високу продуктивність, безвідмовність, ремонтпридатність, можливість їх комплектування на базі модульного принципу.

Аналіз останніх досліджень. Найбільш дослідженим є рух частинок по горизонтальній площині у вигляді шорсткого диска, який обертається навколо вертикальної осі. Використання таких дисків із прикріпленими до них лопатками має місце у розсіювальних апаратах відцентрового типу. Робочі органи із горизонтальною віссю обертання у вигляді валу і прикріпленими до нього плоскими лопатками використовуються для розкидання органічних добрив. Вони можуть також служити для перемішування частинок або метання їх у відцентровому напрямі. Цікавим з теоретичної точки зору і можливості практичного застосування є дослідження закономірностей руху матеріальних частинок по кромці похилої площини у вигляді еліпса, яка обертається навколо осі вертикального обмежуючого циліндра.

Складний рух частинок по шорстких поверхнях робочих органів сільськогосподарських машин розглянуто в фундаментальних працях [1, 2]. В них досліджено рух частинки по горизонтальному диску, що обертається навколо вертикальної осі, як без лопаток, так і з лопатками найпростіших конструкцій. В праці [3] розглянуто рух частинки по плоскому диску, який обертається навколо осі, нахиленої до горизонту. Досліджено закономірності руху частинки по диску як без лопаток, так і з прямолінійними лопатками, розташованими в радіальному напрямі від осі обертання. Дослідження, подібні до наших проведені в праці [4]. В ній досліджено відносний рух частинки в широкому діапазоні кутів нахилу площини до осі обертання, починаючи із горизонтального положення і закінчуючи вертикальним. Розробку лопатевого робочого органу транспортера-змішувача розглянуто в праці [5].

Формулювання мети статті. Метою дослідження було встановлення впливу параметрів транспортування сипкого матеріалу та конструктивних параметрів конвеєра з лопатевим робочим органом на величину крутного моменту.

Основна частина. Як альтернативу гвинтовому транспоруючому органу у вигляді гелікоїда розглянуто каскадний транспоруючий орган у вигляді плоских лопатей, окреслених по еліпсу (рис. 1).



Рисунок 1. Каскадний (лопатевий) робочий орган

Теоретичні дослідження показали, для повного обертання частинки по еліпсу потрібно забезпечити кутову швидкість ω обертання лопатевого органу. Тоді частинка починає ковзати по еліпсу, проходячи по черзі найнижчу і найвищу точки. Роль коефіцієнта тертя f частинки по поверхні лопаті і f_R – по поверхні обмежувального циліндра, аналогічна гвинтовому робочому органу. Тобто для ефективного підйому матеріалу, необхідно зменшувати коефіцієнт тертя f і збільшувати коефіцієнт тертя f_R . Каскадний робочий орган по чергово транспортує частинку з однієї лопаті на іншу, піднімаючи її на потрібну висоту. Запропонований каскадний робочий орган може конкурувати з гвинтовим робочим органом у перевантажувальних конвеєрах завдяки технологічності конструкції і простоті виготовлення.

Для проведення досліджень виготовлено каскадний робочий орган та стендове обладнання для дослідження робочих органів гвинтових конвеєрів.

Схема стенду для дослідження гвинтових конвеєрів (рис. 2) виконано у вигляді рами 1, на яку жорстко встановлено циліндричну трубу 2, в середині якої встановлено гвинтовий робочий орган – вал 3 в якому по його довжині виконано рівномірно збільшений крок гвинтової канавки 4 шириною більшою товщини гвинтової спіралі 5 в сторону подачі сипкого матеріалу. Крім цього в тілі валу по периферії гвинтової канавки 4 виконані конусні призматичні отвори 6 рівномірно по довжині з неробочої сторони спіралі 5. Конусні призматичні отвори є у взаємодії з клинами 7, які також є у взаємодії з основою спіралі 5 по її довжині з неробочої сторони, яка жорстко закріплена до валу 3 клинами 7 за допомогою гвинтів 8, які загвинчені в тіло валу перпендикулярно до його поверхні по центру клинів.

При цьому вал 3 під'єднаний до валу електродвигуна 9, який в свою чергу під'єднаний до перетворювача частот 10 відомої конструкції, який під'єднаний до персонального комп'ютера 11 для заміру витрат електроенергії в електродвигуні в залежності від зусилля транспортування.

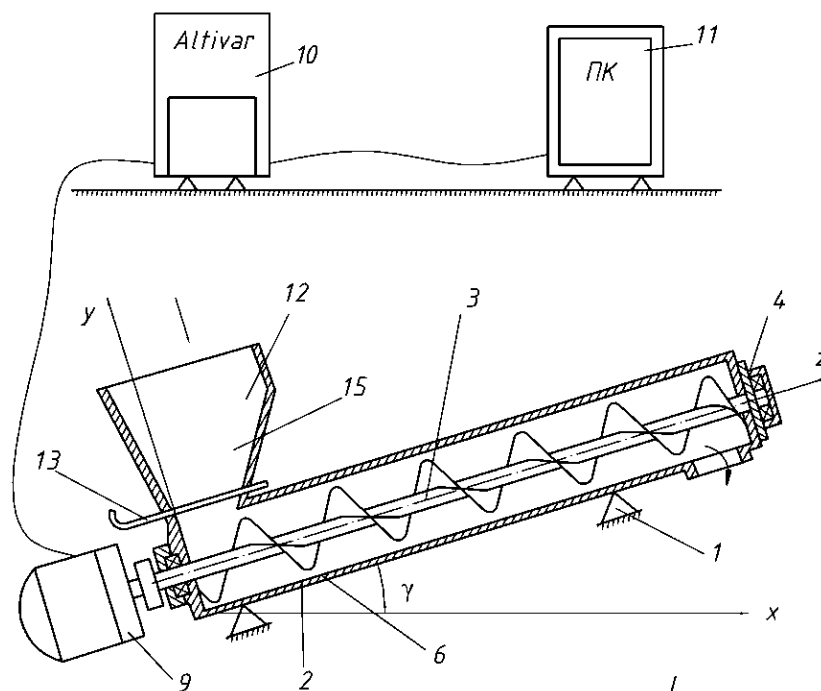


Рисунок 2. Схема стенду для дослідження гвинтових конвеєрів

Для дослідження навантаження гвинтового конвеєра використовують бункер 12 з шибером 13, лопатевий робочий орган, який розташований в транспортній циліндричній трубі 2 під кутом до горизонту. Лопатевий робочий орган приводиться в рух електродвигуном 9, а сигнали на його керування подаються з персонального комп'ютера 11 через перетворювач частоти 10, датчик частоти обертання валу 14 електродвигуна, який підключений до перетворювача частоти 10 і персонального комп'ютера 11.

На рис. 3 представлено загальний вигляд конвеєра (а), в якому для транспортування сипких матеріалів використовується лопатевий робочий орган (б).



а



б

Рисунок 3. Гвинтовий конвеєр з лопатевим робочим органом



Дослідження величини крутного моменту, який передається гвинтовим конвеєром, здійснюють наступним чином. Запускають програмне забезпечення в персональному комп'ютері 11 для управління процесом і подають сигнал на відповідну частоту обертання двигуна 9. Сипкий матеріал 15 з бункера 12 через відкритий шибер 12 подається у досліджуваний стенд. Далі матеріал переміщається, а дані про величину навантаження на гвинтовий робочий орган фіксуються у персональний комп'ютер 11.

До переваг стенда відноситься розширення технологічних можливостей, зменшення зусилля транспортування, а також можливість проведення досліджень гвинтових конвеєрів в автоматизованому режимі керування і підвищення продуктивності дослідних операцій.

Для визначення впливу параметрів транспортування сипкого матеріалу та конструктивних параметрів конвеєра на величину крутного моменту (параметр оптимізації T), проведено повнофакторний експеримент ПФЕ - 3^3 , тобто визначення залежності крутного моменту від зміни трьох основних факторів: внутрішнього діаметра труби D , м, коефіцієнта заповнення конвеєра ψ та частоти обертання лопатевого робочого органу n , об/хв, тобто $T=f(D, \psi, n)$.

Оскільки, під час проведення експериментів змінні незалежні фактори неоднорідні та мають різні одиниці вимірювання, а числа, що виражають значення цих факторів – різні порядки, то їх приводили до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від дійсних значень до кодованих, що представлено в таблиці 1.

Дослідження крутного моменту на привідній зірочці дали змогу визначити залежність потужності від багатьох чинників, що характеризують процес, а саме:

- внутрішнього діаметра труби D , м, який кодували індексом x_1 ;
- коефіцієнта заповнення ψ який кодували індексом x_2 ;
- частота обертання лопатевого робочого органу, n , об/хв, який кодували індексом x_3 .

Дослідження із визначення крутного моменту конвеєра з лопатевим робочим органом проводились при транспортуванні таких матеріалів з відповідною об'ємною масою: горох – 700 кг/м^3 ; пшениця – 760 кг/м^3 ; кукурудза – 800 кг/м^3 ; висівки – 250 кг/м^3 з вологістю, яка становить $W=12...15\%$, що дозволило побудувати аналітичні регресійні рівняння.

Оброблення отриманих даних експериментального масиву проведено за загальновідомими методиками та методами статистичного оброблення з використанням загальновідомих методик кореляційного та регресійного аналізу для отримання у кінцевому

результаті емпіричних рівнянь регресії [7]. Для отримання регресійної моделі параметра оптимізації, вибирали відповідний план повнофакторного експерименту, реалізацію якого проводили у відомій послідовності.

Таблиця 1

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні крутного моменту

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	Код.	Натур.				
Внутрішній діаметр труби D , м	X_1	x_1	0,02	0,06/-1	0,08/0	0,1/+1
Коефіцієнт заповнення конвеєра, ψ	X_2	x_2	0,2	0,3/-1	0,5/0	0,7/+1
Частота обертання лопатевого робочого органу, n , об/хв	X_3	x_3	250	200/-1	400/0	600/+1

Функцію відгуку (параметр оптимізації), тобто крутний момент $T^i = f(D, \psi, n)$, визначено експериментальним шляхом і представлено у вигляді математичної моделі повного квадратичного полінома [7]:

$$T = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (1)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти відповідних значень x_i ; x_1, x_2, x_3 – відповідні кодовані фактори.

Величини передавання максимального крутного моменту для різних сипких матеріалів на експериментальній установці:

$$T_{\text{горох}} = -9,94 - 67,67\psi - 0,0706n - 0,08\psi n + 41,75\psi^2 + 0,00068n^2 - 462,5D^2 - 0,102Dn + 673D\psi + 71,5D \quad (2)$$

$$T_{\text{пшениця}} = -12,23 - 71,23\psi - 0,057n + 745D\psi - 0,081Dn - 0,068\psi n + 0,000552n^2 - 491D^2 + 44,5\psi^2 + 75,6D \quad (3)$$

$$T_{\text{кукурудза}} = -10,07 - 0,0723n - 65,2\psi + 39,75\psi^2 + 0,00064n^2 - 472,5D^2 - 0,0818\psi n + 726D\psi - 0,101Dn + 71,1D \quad (4)$$

$$T_{\text{комбікорн}} = -9,17 - 68,29\psi - 0,0663n - 0,045\psi n + 0,000576n^2 + 41\psi^2 - 457,5D^2 + 713D\psi - 0,0909Dn + 68,6D \quad (5)$$

На рисунках 4 - 7 зображено графічні залежності крутного моменту гвинтового конвеєра з лопатевим робочим органом від внутрішнього діаметра $D=0,06...0,1$ м, коефіцієнта заповнення ψ

$=0,3...0,7$ при кількості обертів лопатевого робочого органа $n=200...600$ об/хв.

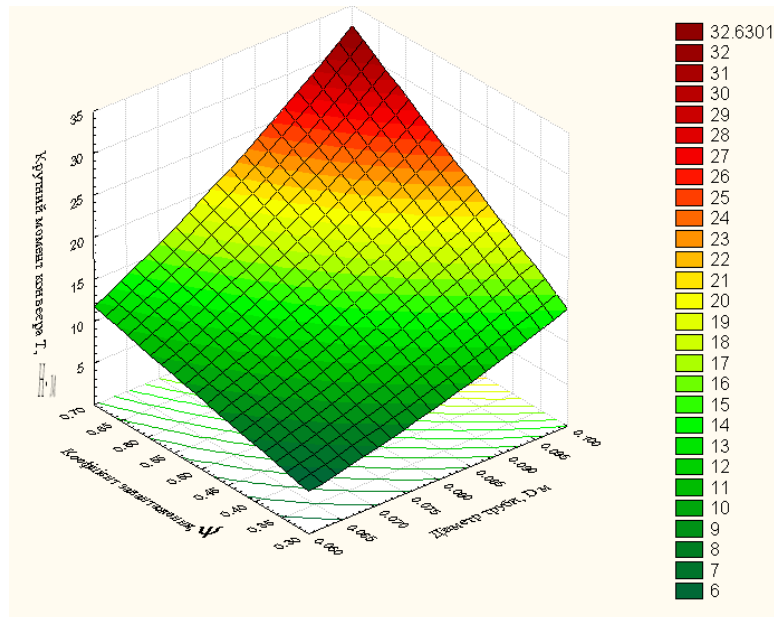


Рисунок 4. Залежність крутного моменту транспортування кукурудзи конвеєром з лопатевим робочим органом $M_{\psi, D}^{Кукурудза}$ від внутрішнього діаметра труби D і коефіцієнта заповнення ψ при частоті обертання лопатевого робочого органа $n=200...600$ об/хв

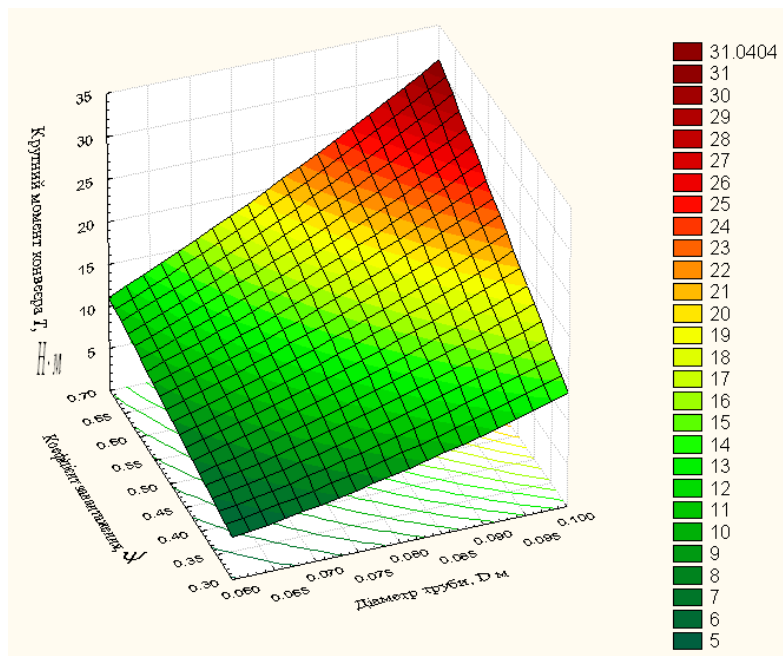


Рисунок 5. Залежність крутного моменту транспортування пшениці конвеєром з лопатевим робочим органом $M_{\psi, D}^{Пшениця}$ від внутрішнього діаметра труби D і коефіцієнта заповнення ψ при частоті обертання лопатевого робочого органа $n=200...600$ об/хв

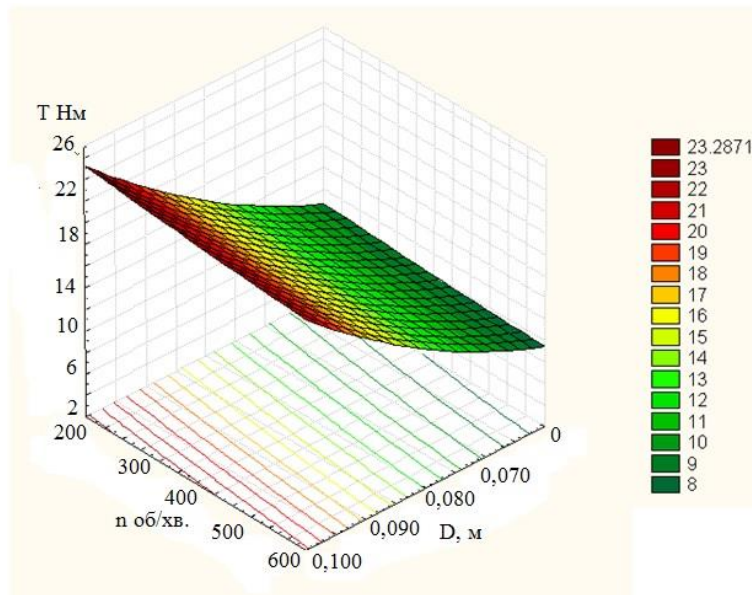


Рисунок 6. Залежність крутного моменту транспортування гороху конвеєром з лопатевим робочим органом $M_{v,D}^{горох}$ від внутрішнього діаметра труби D і частоти обертання лопатевого робочого органу n при коефіцієнті заповнення $\psi=0,5$

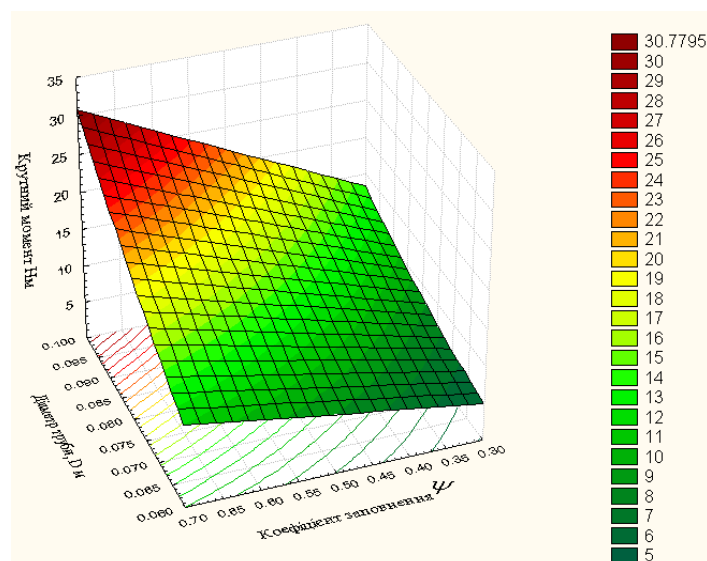


Рисунок 7. Залежність крутного моменту транспортування комбікорму конвеєром з лопатевим робочим органом $M_{D,\psi}^{комбікорм}$ від внутрішнього діаметра труби D і коефіцієнта заповнення ψ при частоті обертання лопатевого робочого органу $n=200...600$ об/хв

Зерна кукурудзи через значні розміри в меншій мірі попадають між поверхнею робочого органу і поверхнею труби ніж при транспортуванні висівки, які попадають в зазор між внутрішньою поверхнею труби і зовнішньою поверхнею робочого органу, що досить гальмує процес транспортування, а при транспортуванні пшениці енерговитрати є найбільшими, оскільки еліпсоподібна форма зерна



утворює так званий ефект заклинювання лопатевого робочого органу, коли частина зерен попадає в зазор між робочим органом і трубою.

З рис. 4 -7 видно, що із збільшенням внутрішнього діаметра труби $D=0,1\text{ м}$ та при кількості обертів робочого органу $n=600\text{ об/хв}$ і коефіцієнті заповнення $\psi=0,5$ крутний момент зменшується для транспортування сипких матеріалів (кукурудза, горох, пшениця, висівки).

Висновки. Розроблено каскадний робочий орган, який може конкурувати з гвинтовим робочим органом у перевантажувальних конвеєрах, завдяки технологічності конструкції і простоти виготовлення. На основі проведеного комплексу експериментальних досліджень транспортно-технологічної сільськогосподарської машини з лопатевим робочим органом виведено регресійні залежності для визначення крутного моменту транспортування сільськогосподарських матеріалів. Встановлено, що найбільший вплив на момент транспортування мають внутрішній діаметр D труби, коефіцієнт заповнення ψ і частота обертання n лопатевого робочого органу.

Список використаних джерел

1. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УАСХН, 1960. 283 с.
2. Заика П. М. Избранные задачи земледельческой механики. Киев: УСХА, 1992. 507 с.
3. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Войтюк Д. Г., Пилипака С. Ф. Дослідження руху частинки по плоскому диску, який обертається навколо перпендикулярної осі, нахиленої до горизонту. *Вісник ЛНАУ: агроінженерні дослідження*. Львів, 2008. № 12 (2). С. 189–197.
4. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Пилипака С. Ф., Франчак Ян. Дослідження відносного руху матеріальної частинки по похилій лопатці відцентрового апарата. *Науковий вісник Луганського національного університету. Сер. Технічні науки*. Луганськ, 2011. № 29. С. 32–56.
5. Клендій М. Б. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів лопатевого транспортера-змішувача. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. Київ, 2005. Вип. 92, ч. 2. С. 533–540.
6. Робочий орган транспортера: пат. 3843 Україна: МПК (2004.01) B65G33/16 / Р. Б. Гевко, М. Б. Клендій. № u 2004032157; заявл. 23.03.2004; опубл. 15.12.2004. Бюл. № 12.
7. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука. 1976. 279 с.



8. Pylypaka S. F., Klendii M. B., Nesvidomin V. M., Trokhaniak V. I. Particle motion over the edge of an inclined plane that performs axial movement in a vertical limiting cylinder. *Acta Polytechnica*. 2019. Vol. 59, № 1. P. 67-76. DOI: 10.14311/AP.2019.59.0067.
9. Pylypaka S., Klendii M., Klendii O. Particle motion on the surface of a concave soil-tilling disk. *Acta Polytechnica*. 2018. Vol. 58, № 3. P. 201-208. DOI: 10.14311/AP.2018.58.0201.
10. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O. The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 671-681. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_67.
11. Loveikin V. S., Romesevych Yu. O. Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode. *Науковий вісник НГУ*. 2017. № 4. С. 55-61.
12. Bulgakov V., Pilipaka S., Adamchuk V., Olt J. Theory of motion of a material point along a plane curve with a constant pressure and velocity. *Agronomy Research*. 2014. № 12(3). P. 937-948.
13. Пилипака С. Ф., Захарова Т. Н., Несвидомин А. В. Форма осі гібкої незшимаємої полосої при її толканні по нахлонній шероховатій площині з постійною швидкістю. *MOTROL*. 2013. Vol. 15, № 4. P. 198-205.
14. External rolling of a polygon on closed curvilinear profile / S. F. Pylypaka et al. *Acta Polytechnica*. 2020. Vol. 60, № 4. P. 313-317. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0313>.
15. Hevko R. B., Zalutskyi S. Z., Tkachenko I. G., Klendiy O. M. Development and investigation of reciprocating screw with flexible helical surface. *INMATEH: Agricultural engineering*. 2015. Vol. 46, № 2. P. 133-138.
16. Hevko R. B., Klendii M. B., Klendii O. M. Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyer. *INMATEH: Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 48, № 1. P. 29-34.

Стаття надійшла до редакції 9.10.2021 р.

S. Pastushenko¹, M. Klendii¹, O. Trokhaniak²

¹Separate subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Brzezany Agrotechnical Institute"

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

RESEARCH OF VANE WORKING BODY SCREW CONVEYOR TORQUE VALUE

Summary

Article investigates influence of powdered material transportation parameters and conveyor vane working body constructive parameters on the torque value. The conveying



body form of flat blades, outlined on an ellipse is considered as an alternative to a helical conveying body. The cascade (paddle-shaped) transporting organ alternately transports a particle from one blade to another, moving it, raising it to the desired height. A full-factor experiment has been carried out in order to determine the dependence of the torque on three main factors: the internal diameter of the pipe D , the conveyor filling factor ψ and the vane working body rotation frequency n , analytical regression equations and the response surfaces have been constructed. Corn grains, due to their large size, get less between the surface of the working body and the surface of the pipe than when transporting bran, which fall into the gap between the inner surface of the pipe and the outer surface of the working body, which slows down the transportation process. The elliptical shape of the grain forms the so-called jamming effect of the blade working body, when part of the grains falls into the gap between the working body and the pipe. It is established that with the increase of the inner diameter of the pipe $D = 0.1\text{ m}$ and at the number of revolutions of the working body $n = 600\text{rpm}$ and the filling factor $\psi = 0.5$ torque decreases for the transportation of bulk materials (corn, peas, wheat, bran).

It has been revealed that the suggested blade working device can compete with the screw working device in unloading conveyors due to its technological effectiveness and simplicity of manufacturing.

Key words: screw conveyor, vane working body, torque, inner diameter of the pipe, conveyor filling factor, rotational frequency of the vane working body, regression equation.

С. И. Пастушенко¹, М. Б. Клендий¹, А. Н. Троханяк²

¹Обособленное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Бережанский агротехнический институт»

²Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ВИНТОВОГО КОНВЕЙЕРА С ЛОПАСТНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

Аннотация

В статье исследовано влияние параметров транспортировки сыпучего материала и конструктивных параметров конвейера с лопастным рабочим органом на величину крутящего момента. В качестве альтернативы винтового транспортирующего органа в виде геликоида рассмотрено каскадный транспортирующий орган в виде плоских лопастей, очерченных по эллипсу. Каскадный (лопастной) рабочий орган поочередно транспортирует частичку из одной лопасти на другую, перемещая ее, поднимая ее на нужную высоту. Проведено полнофакторный эксперимент по определению зависимости крутящего момента от изменения трех основных факторов: внутреннего диаметра трубы D , коэффициента заполнения конвейера ψ и частоты вращения лопастного рабочего органа n , построенные аналитические регрессионные уравнения и поверхности отклика.

Установлено, что предложенный лопастной рабочий орган может конкурировать с винтовым рабочим органом в перегрузочных конвейерах благодаря технологичности конструкции и простоте изготовления.

Ключевые слова: винтовой конвейер, лопастной рабочий орган, крутящий момент, внутренний диаметр трубы, коэффициент заполнения конвейера, частота вращения лопастного рабочего органа, уравнение регрессии.