

КРИВОЛІНІЙНА ВІСЬ СИЛОСОПРОВОДУ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ПОДРІБНЕНОГО МАТЕРІАЛУ**Воліна Тетяна Миколаївна**

кандидат технічних наук, доцент
 Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
 Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
 ORCID: 0000-0001-8610-2208
 t.n.zaharova@ukr.net

Несвідомін Віктор Миколайович

доктор технічних наук, професор
 Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0002-1495-1718
 vnesvidomin@ukr.net

Бабка Віталій Миколайович

кандидат технічних наук, доцент
 Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0003-4971-4285
 babkavitaliy@ukr.net

Грищенко Ірина Юріївна

кандидат технічних наук, доцент
 Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0002-1000-9805
 irgr@yahoo.com

Кремець Ярослав Сергійович

кандидат технічних наук
 Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0003-0675-5757
 kys89@ukr.net

Після подрібнення зеленої маси ріжучим барабаном в кормозбиральних комбайнах її необхідно завантажити у транспортний засіб. Для цього використовується силосопровід, який спрямовує рух подрібненої маси в потрібному напрямі. Отже, силосопровід кормозбиральних комбайнів забезпечує потрібну траєкторію руху подрібненої маси від барабана до транспортного засобу. Траєкторія руху частинок визначається формою плоскої кривої – осі силосопроводу. Форма його осі, яка є плоскою кривою, впливає на процес транспортування. Основною характеристикою, від якої залежить цей процес, є залежність кривини від довжини дуги осі. При сталій кривині віссю є дуга кола. Однак така форма осі може не задовільняти конструктивні вимоги, оскільки при транспортуванні маси на значну відстань висота силосопроводу буде занадто великою. Керувати формою осі можна за допомогою заданої залежності кривини від довжини осі. Кривина повинна змінюватися плавно від мінімального значення до максимального і потім повинна зменшуватися. Це запобігатиме її залипанню при зустрічі із силосопроводом. Крім того, задаючи закон зміни кривини від довжини осі, можна надавати потрібної форми силосопроводу. Для аналітичного опису транспортування технологічного матеріалу, який складається з окремих частинок, використовуються різні підходи. Це пояснюється складністю процесів, що відбуваються при взаємодії частинок між собою. Тому досить часто розглядають транспортування окремої частинки, рух якої можна описати аналітично. Отримані залежності певним чином можуть бути перенесені на технологічний матеріал. У статті аналітично показано важливість закономірності зміни кривини осі силосопроводу або траєкторії руху частинок. Складено диференціальне рівняння руху окремої частинки по поверхні силосопроводу. Показано, що для осі у формі кола диференціальне рівняння має аналітичний розв'язок, для інших випадків потрібно застосовувати чисельні методи. Зроблено порівняльний аналіз процесу транспортування подрібненої маси у силосопроводах із різною формою осі. Розв'язки диференціальних рівнянь супроводжуються відповідними графічними ілюстраціями.

Ключові слова: силосопровід, криволінійна вісь, швидкість руху частинки, диференціальне рівняння, довжина дуги.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.4>

Вступ. Для аналітичного опису транспортування технологічного матеріалу, який складається з окремих частинок, використовуються різні підходи. Це пояснюється складністю процесів, що відбуваються при взаємодії частинок між собою. Тому досить часто розглядають транспортування окремої частинки, рух якої можна описати аналітично. Отримані залежності певним чином можуть бути перенесені на технологічний матеріал. Технологічним матеріалом можуть бути мінеральні добрива (Kobets et al., 2019), різноманітні суміші (Bulgakov et al., 2020a, b) тощо.

Найпростіший рух – це рух частинки по циліндричній поверхні із горизонтальним розташуванням прямолінійних твірних. Якщо частинка рухається перпендикулярно до них, то рух по поверхні можна розглядати як рух по плоскій кривій – поперечному перерізу цієї поверхні. Приклад такого підходу розглянуто в праці (Bulgakov et al., 2014). Рух частинок по гвинтовим поверхням розглядається, наприклад, у (Pylyra et al., 2019), рух зерна по рухомих поверхнях висівних апаратів – у (Shrestha et al., 2017), рух зернового матеріалу в ромбоподібному апараті – в (Lytvynenko et al., 2019).

Можливим також є випадок ототожнення тіл з матеріальною частинкою, якщо силами інерції від їх обертання можна знехтувати в наслідок низьких кутових швидкостей (Loveikin et al., 2020). Рухомий тригранник Френе застосовується для опису складного руху матеріальної точки (Pylyra et al., 2021) і може бути використаний для розв'язання різноманітних задач, наприклад, підвищення надійності та довговічності деталей. Геометричні методи можуть бути застосовані для розв'язання подібних задач на заміну технологічним (Tarel'nik et al., 2017c, d), які на сьогодні пропонують нові методи виготовлення деталей (Tarel'nik et al., 2017a) або вдосконалення поверхонь (Tarel'nik et al., 2017b).

В усіх архітектурних формах, які застосовуються в сучасному будівництві, використовуються геометричні форми. Тому інженер-будівельник має добре володіти

геометрією. У статті (Suvonov et al., 2022) представлений короткий огляд того, як побудувати деякі архітектурні фігури із геометричних фігур. Щоб уникнути обвалення тунелю під час будівництва, необхідно визначити критичний опорний тиск і прикласти його до поверхні тунелю. (Wang et al., 2017) висвітлює розробку нової тривимірної моделі граничної рівноваги, включаючи геометрії нижнього тора та верхнього силосу. Було обговорено вплив геотехнічних і геометричних параметрів на стійкість поверхні круглих тунелів.

Динаміка гранульованого потоку в прямокутному силосі з двома симетрично розташованими вихідними отворами досліджується за допомогою вимірювання швидкості частинок, швидкості потоку та моделювання дискретних елементів (Fullard et al., 2019a). У (Fullard et al., 2019b) представлено результати експериментальних досліджень гравітаційного розсіювання насіння маку надрукованими на 3D-принтері силосами.

Не дивлячись на, здавалося б, просту конструкцію силосопроводу, від форми його осі великою мірою залежить процес транспортування. Він повинен бути спроектований таким чином, щоб не відбувалося надмірного гальмування подрібненої маси або її залипання на поверхні силосопроводу. Кінетичної енергії, яку частинка отримує від подрібнюючого барабана, потрібно вистачити, щоб подолати шлях у силосопроводі і мати певну швидкість руху на виході із нього.

Виходячи з вищевикладеного, метою даного дослідження є розробка математичної моделі руху частинок у силосопроводі з криволінійною віссю та виявлення її впливу на процес транспортування подрібненої маси.

Матеріали і методи досліджень. Процес транспортування подрібненої маси від кормозбирального комбайна у транспортний засіб показано на рис. 1, а. Траєкторією руху частинок є крива лінія, яку будемо вважати віссю силосопровода. При русі окремої частинки по кривій, яка попала на цю криву із початковою швидкістю V_0 (рис. 1, б), діють дві сили: сила ваги $m \cdot g$, де m – маса



Рис. 1. Графічні ілюстрації до руху частинки по кривій лінії – осі силосопроводу:
 а) транспортування подрібненої маси у транспортний засіб;
 б) схема руху окремої частинки і прикладені до неї сили

частинки, $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння, і сила тертя, яка спрямована в протилежну сторону руху. Складова сили тертя може як сприяти руху частинки при її ковзанні вниз по кривій, так і гальмувати цей рух при підйомі частинки. Для силосопровода ми маємо другий випадок, коли складова сили ваги гальмує ковзання частинки і навіть намагається її відірвати від кривої на ділянці AB , яка відповідає осі силосопроводу. Щоб відривання не відбулося, частинка має мати достатню швидкість для створення відцентрової сили, яка б притискала її до стінки силосопроводу.

Рух частинки розглядатимемо в рухомій системі супровідного тригранника кривої, орт τ якої спрямований по дотичній до траєкторії, орт головної нормалі n спрямований до центру кривини і перпендикулярний до орта τ і орт бінормалі b проєкціюється в точку. Диференціальні рівняння руху частинки в проєкціях на орти тригранника у функції довжини дуги кривої s запишуться:

$$mV \frac{dV}{ds} = F_t; \quad mV^2 k = F_n, \quad (1)$$

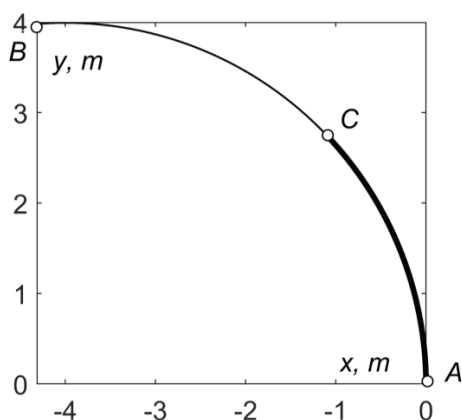
де V – швидкість руху частинки; k – кривина кривої у поточній точці; F_t і F_n – проєкції прикладених до частинки сил.

Сила ваги $m \cdot g$ розкладається на орти тригранника через кут α , який є змінним і є кутом між двома системами: рухомого тригранника і нерухомої системи координат Oxy . Сила реакції N спрямована в напрямі орта n і сила тертя $f \cdot N$, де f – коефіцієнт тертя, спрямована в протилежну сторону орта τ . Отже, $F_n = N - m \cdot g \cdot \cos \alpha$, $F_t = -m \cdot g \cdot \sin \alpha - f \cdot N$. Крім того, кривина k за визначенням є похідна кута α : $k = d\alpha/ds$. Із врахуванням цього рівняння (1) запишуться наступним чином:

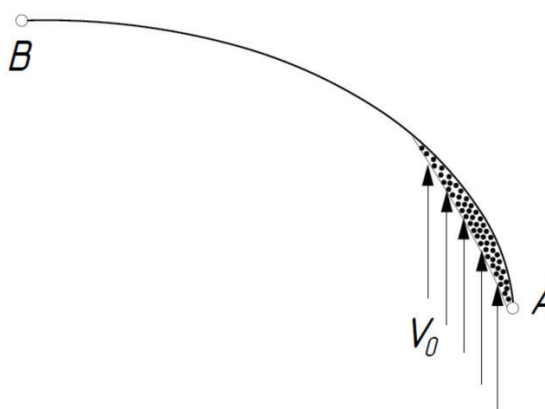
$$mV \frac{dV}{ds} = -mg \sin \alpha - fN; \quad mV^2 \frac{d\alpha}{ds} = N - mg \cos \alpha. \quad (2)$$

Із другого рівняння (2) знаходимо: $N = mV^2 \alpha' + mg \cos \alpha$. Після підстановки цього виразу у перше рівняння і скорочення на масу m остаточно отримаємо:

$$V \frac{dV}{ds} = -g \sin \alpha - f \left(V^2 \frac{d\alpha}{ds} + g \cos \alpha \right). \quad (3)$$



а)



б)

Рис. 2. Можливі осі силосопроводу: а) вісь силосопроводу із сталою кривиною $k=0,25$; б) вісь силосопроводу із змінною кривиною і найбільшим її значенням в початковій точці A

Щоб розв'язати диференціальне рівняння (3), потрібно одну із залежностей: $\alpha=\alpha(s)$, тобто форму кривої або ж закономірність зміни швидкості $V=V(s)$.

Результати досліджень. Нехай віссю силосопроводу буде крива, задана залежністю $\alpha=ks$, де кривина $k=1/r=const$. В такому випадку віссю буде дуга кола радіуса r . Диференціальне рівняння (3) набуває вигляду:

$$\frac{dV}{ds} = -\frac{g}{V} (\sin ks + f \cos ks) - fV/k. \quad (4)$$

Рівняння (4) має наступний розв'язок:

$$V = \sqrt{ce^{-2fks} + 2g \frac{(1-2f^2) \cos ks - 3f \sin ks}{k(1+4f^2)}}. \quad (5)$$

Сталу інтегрування c визначимо за умови, що в початковій точці при $s=s_0$ швидкість руху частинки має значення $V=V_0$. Оскільки $\alpha=ks$ і у початковій точці A (рис. 1, б) $\alpha=\pi/2$, то $s=s_0=\pi/(2k)$. Після врахування цих початкових даних, вираз (5) набуває вигляду:

$$V = \sqrt{kV_0^2 e^{f(\pi-2ks)} + 2g \frac{(1-2f^2) \cos ks - 3f (e^{f(\pi-2ks)} - \sin ks)}{k(1+4f^2)}}. \quad (6)$$

Маючи вираз швидкості (6), можна знайти силу N реакції поверхні:

$$N = m(V^2 k + g \cos ks). \quad (7)$$

Відлік дуги s у обох формулах (6) і (7) починається із $s_0=\pi/(2k)$, оскільки це відповідає куту $\alpha=\pi/2$.

На рис. 2, а побудована дуга кола у ролі осі силосопроводу для $k=0,25$ ($r=4 \text{ м}$), а на рис. 3 – залежності $V=V(s)$ і $N=N(s)$ для різних значень початкової швидкості V_0 . Із рис. 3, а видно, що в обох випадках частинка не зупиняється, однак при $V_0=10 \text{ м/с}$ при значенні $s=9,3 \text{ м}$ сила реакції частинки стає рівною нулю (рис. 3, б), тобто вона відривається від поверхні силосопроводу. Точка відриву від поверхні на рис. 2, а позначена літерою C . В цьому місці частинка продовжує рухатися далі не по верхній обмежувальній поверхні, яка для наочності зображена тонкою лінією, а по нижній, тобто напрям сили реакції помінявся на протилежний.

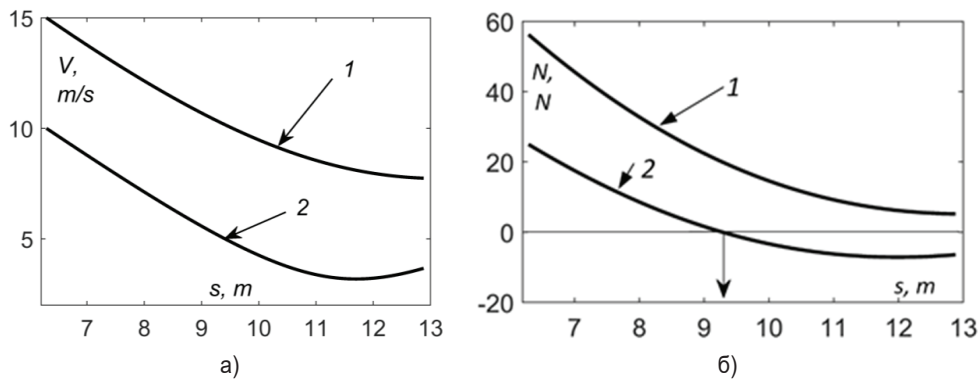


Рис. 3. Графіки зміни швидкості V і сили реакції N згідно формул (6) і (7) при $k=0,25$, $f=0,3$, і різних початкових швидкостях (1 – $V_0=15$ м/с, 2 – $V_0=10$ м/с): а) графік залежності $V=V(s)$; б) графік залежності $N=N(s)$ для частинки масою $m=0,001$ кг

При транспортуванні маси важливо забезпечити мінімальний опір її переміщенню при вступі у силосопровід. Опір створюється силою тертя, яка прямо пропорційна силі реакції N . Згідно формули (7) однією із складових сили реакції є складова сили ваги, однак вона відсутня в момент вступу, оскільки кут $\alpha=\pi/2$. Залишається друга складова, яка залежить від кривини осі і швидкості V . Звідси виходить, що у точці вступу маси у силосопровід його вісь повинна мати мінімальну кривину або ж вона повинна бути рівною нулеві і наростати плавно. Якщо за вісь силосопроводу взяти дугу еліпса, як показано на рис. 1, б, то в початковій точці А кривина буде максимальна, що призведе до різкого гальмування подрібненої маси або до її залипання (рис. 2, б). Залипання маси змінює шлях її руху, що рівносильно зміні форми осі. При цьому кривина осі зменшується і ковзання частинок відбувається по скоригованій осі із меншою кривиною, тобто частинки ковзають по масі, що залипла.

В зв'язку із цим розглянемо ще один приклад із заданим значенням кривини осі в початковій і кінцевій точках силосопроводу. Аналізуючи форму осі силосопроводу, зображеного на рис. 1, а, поставимо умову, щоб її кривина в початковій (при $\alpha=\pi/2$) і кінцевій (при $\alpha=\pi$) була рівною нулеві. Це означає, що під час руху маси напрям її транспортування змінюється на величину прямого кута, а щоб ця зміна відбулася, кривина осі повинна зростати від мінімального k_{min} до максимального значення k_{max} і потім зменшитися до певного значення в кінцевій точці. Таку залежність $k=k(\alpha)$ опишемо найпростішим поліномом: квадратичним. Нехай кривина набуватиме мінімального значення k_{min} на початку і в кінці силосопроводу і максимального значення k_{max} в середній точці силосопроводу, тобто при $\alpha=3\pi/4$. Склавши систему трьох рівнянь для значень кривини у трьох точках осі, знаходимо залежність $k=k(\alpha)$:

$$k = a + b\alpha + c\alpha^2, \quad (8)$$

де $a=9k_{min}-8k_{max}$; $b=24(k_{max}-k_{min})/\pi$; $c=-16(k_{max}-k_{min})/\pi^2$.

Щоб скористатися диференціальним рівнянням (3), потрібно від залежності $k=k(\alpha)$ (8) перейти до залежності $\alpha=\alpha(s)$. Із визначення кривини $k=da/ds$ можна записати: $ds=da/k$. Таким чином, вираз довжини дуги $s=s(\alpha)$ можна

знайти наступним інтегруванням:

$$s = \int \frac{d\alpha}{a + b\alpha + c\alpha^2} = \frac{2}{\sqrt{4ac - b^2}} \operatorname{Arctg} \frac{2c\alpha + b}{\sqrt{4ac - b^2}}. \quad (9)$$

Із залежності (9) $s=s(\alpha)$ можна знайти обернену залежність $\alpha=\alpha(s)$, в яку після підстановки сталих a , b , c остаточно отримуємо:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \left(3 + \frac{k_{max}}{d} \operatorname{Tanh} \frac{4d}{\pi} s \right). \quad (10)$$

де стала $d = \sqrt{k_{max}(k_{max} - k_{min})}$.

Диференціюванням (10) знаходимо вираз кривини $k=da/ds$:

$$k = k_{max} \operatorname{Sech}^2 \left(\frac{4d}{\pi} s \right), \quad (11)$$

Залежностей (10) і (11) достатньо для розв'язування диференціального рівняння (3), яке в даному випадку потребує чисельних методів. Вісь силосопроводу знаходять чисельним інтегруванням відомих рівнянь:

$$x = \int \cos \alpha(s) ds; \quad y = \int \sin \alpha(s) ds, \quad (12)$$

де залежність $\alpha=\alpha(s)$ наведено в (10).

На рис. 4, а побудовано дві осі однакової довжини ($s=6,3$ м): одна вісь є дугою кола радіуса $r=4$ м ($k=0,25=const$) і позначена цифрою 1, друга побудована за рівняннями (10), (12) при $k_{min}=0,1$, $k_{max}=0,4$ і позначена цифрою 2. На рис. 4, б, в відповідними цифрами позначені графіки зміни швидкості V і сили реакції N . Для дуги кола ці графіки близькі до лінійних залежностей.

Обговорення. З графіків видно, що для обох осей при початкових швидкостях $V_0=40$ м/с далі вони змінюються по різному при русі вздовж осі, але кінцеві швидкості теж однакові (рис. 4, б). Це чиста випадковість, тому що при меншій довжині осей хоча б на метр, кінцеві швидкості були б різними. Графіки зміни сили реакції, тобто тиску поверхні на частинку (рис. 4, в) відрізняються кардинально. Якщо для кола тиск на початку руху максимальний і поступово зменшується, то для другої осі він поступово зростає, а потім зменшується. Це запобігає залипання маси на початку руху. Крім того, проектування осі силосопроводу керуванням її кривини дає можливість отримувати різні форми кривих.

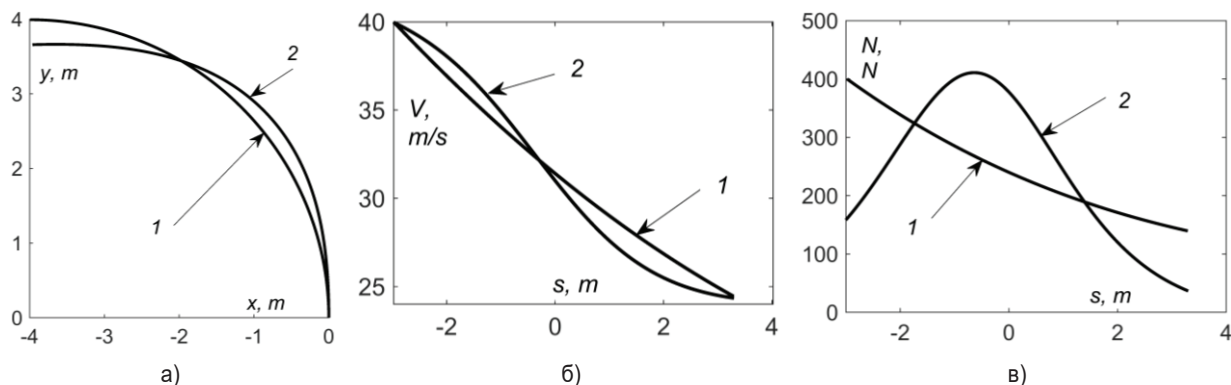


Рис. 4. Криволінійні осі силосопроводу та графіки зміни деяких параметрів руху частинки вздовж цих осей: а) криволінійні осі однакової довжини; б) графіки залежностей $V=V(s)$ для руху частинки вздовж осей; в) графіки залежностей $N=N(s)$ для руху частинки вздовж осей

Висновки. Силосопровід кормозбиральних комбайнів забезпечує потрібну траєкторію руху подрібненої маси від барабана до транспортного засобу. Форма його осі, яка є плоскою кривою, впливає на процес транспортування. Основною характеристикою, від якої залежить цей процес, є залежність кривини від довжини дуги осі. При сталій кривині віссю є дуга кола. Однак така форма осі може не задовільняти конструктивні вимоги, оскільки при транспортуванні маси на

значну відстань висота силосопроводу буде занадто великою.

Керувати формою осі можна за допомогою заданої залежності кривини від довжини осі. Кривина повинна змінюватися плавно від мінімального значення до максимального і потім повинна зменшуватися. Це запобігатиме її залипанням при зустрічі із силосопроводом. Крім того, задаючи закон зміни кривини від довжини осі, можна надавати потрібної форми силосопроводу.

Бібліографічні посилання:

1. 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*. Estonian Agricultural University, 2014. Vol. 12(3). P. 937–948.
2. Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Adamchuk V., Kiurchev S., Ivanovs S., Olt J. Theory of grain mixture particle motion during aspiration separation. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 18 (1). P. 18–37. doi: 10.15159/ar.20.057
3. Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Boris A., Kiurchev S., Ihnatiev Y., Olt J. Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy research*. 2020. Vol. 18(2). P. 1177–1188. doi: 10.15159/AR.20.069
4. Fullard L.A., Breard E.C.P., Davies C.E., Godfrey A.J.R., Fukuoka M., Wade A., Dufek J., Lube G. The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings. *Proc. R. Soc. A*. 2019. Vol. 475. P. 220180462. doi: 10.1098/rspa.2018.0462.
5. Fullard L., Holland D.J., Galvosas P., Davies C., Lagrée P.-Y. et al. Quantifying silo flow using MRI velocimetry for testing granular flow models. *Physical Review Fluids*. hal-02164393. 2019.
6. Kobets A., Ponomarenko N., Kobets O., Tesliuk H., Kharytonov M., Yaropud V. Study of fertilizer spreader centrifugal type under field conditions. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57(1). P. 253–260.
7. Loveikin V., Romasevich Yu., Loveikin O., Spodoba A., Pochka K. Mathematical model of the dynamics change departure of the jib system manipulator with the simultaneous movement of its links. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. Vol. 104. P. 175–190.
8. Lytvynenko A., Yuhymenko M., Pavlenko I., Pitel J., Mizakova J., Lytvynenko P., Ostroha R., Bocko J. Ensuring the Reliability of Pneumatic Classification Process for Granular Material in a Rhomb-Shaped Apparatus. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(8). P. 1604.
9. Pylypaka S., Klendii M., Nesvidomin V., Trokhaniak V. 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
10. Pylypaka S., Volina T., Nesvidomin V., Pavlov A., Dranovska S. The possibility to apply the Frenet trihedron and formulas for the complex movement of a point on a plane with the predefined plane displacement. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2021. Vol. 3(7(111)). P. 45–50.
11. Shrestha K., Parajuli P., Baral B., Shrestha B. Mathematical modeling, simulation and analysis of rice grain movement for design and fabrication of low-cost winnowing machine. *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2017. Vol. 9(1). P. 1–14. doi: 10.5897/JMER2016.0403
12. Suvonov O. Sh. Geometric methods used in the construction of architectural forms. *Journal of Architectural Design*. 2022. Vol. 4. P. 12–20.
13. Tarel'nik V., Martsinkovskii V., Zhukov A. Increase in the reliability and durability of metal impulse seals. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53(5–6). P. 385–389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
14. Tarel'nik V., Martsinkovskii V., Zhukov A. Increase in the reliability and durability of metal impulse end seals. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53(1–2). P. 114–120. doi: 10.1007/s10556-017-0305-y

15. Tarel'nyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko I., Dovzyk M., Tarel'nyk N., Gorovoy S. New sulphiding method for steel and cast iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233. P. 012049. doi: 10.1088/1757-899x/233/1/012049
16. Tarel'nyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko I., Belous A., Gerasimenko V., Zakharov M. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233. P. 012048. doi: 10.1088/1757-899x/233/1/012048
17. Wang C., Hou J., Chen Y.-M., Ye X.-W., Chu W.-J. A 3D rotational silo-torus model for face stability analysis of circular tunnels. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. P. e01736. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01736

Volina T.M., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Nesvidomin V.M., Doctor of Technical Science, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Babka V.M., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Hryshchenko I. Yu., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Kremets Ya. S., PhD, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Curve axis of a silo pipeline for transportation of a crushed material

After crushing the green mass with a cutting drum in forage harvesters, it must be loaded into a vehicle. A silo pipeline of forage harvesters provides the required trajectory of the crushed mass from the drum to the vehicle. The trajectory of particle movement is determined by the shape of a flat curve – the axis of the silo pipeline. The shape of its axis affects the transportation process. The main characteristic on which this process depends is the dependence of the curvature on the length of the arc of the axis. With constant curvature, the axis is the arc of a circle. However, this shape of the axis may not satisfy the design requirements, since the height of the silo pipeline will be too high during transporting mass over a considerable distance.

It is possible to control the shape of the axis using the specified dependence of the curvature on the length of the axis. The curvature should change smoothly from the minimum value to the maximum and then should decrease. It prevents material from sticking when it meets the silo pipeline. In addition, by specifying the law of change of curvature from the length of the axis, it is possible to give the desired shape of the silo pipeline.

Different approaches are used for the analytical description of the transportation of technological material, which consists of individual particles. It can be explained by the complexity of the processes that occur when particles interact with each other. Therefore, the transportation of a single particle is often considered, the movement of which can be described analytically. The resulting dependencies can in a certain way be transferred to the technological material.

This research analytically shows the importance of the regularity of changes in the curvature of the axis of the silo pipeline or the trajectory of particle movement. A differential equation of the movement of a single particle on the surface of the silo pipeline has been formulated. It is shown that for an axis in the form of a circle, the differential equation has an analytical solution, for other cases numerical methods should be used. A comparative analysis of the process of transporting the crushed mass in silo pipelines with different axis shapes was made. Solutions of differential equations are accompanied by corresponding graphical illustrations.

Key words: silo pipeline, curved axis, velocity of particle movement, differential equation, arc length.