

УДК 621.867.84

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.299-307](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.299-307)

В. В. Яцун, проф., канд. техн. наук, **І. О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук,
Г. Д. Портнов, доц., канд. техн. наук, **О. В. Горпинченко**, доц., канд. екон. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: yatsun@i.ua

Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу в зоні завантаження на вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії

Приведені основні результати досліджень з розробки та впровадження в виробництво новітніх технічних засобів та технологій у галузі систем трубопровідного вібропневмотранспорту. Наукова новизна та практична значимість робіт полягає в можливості значно підвищити ефективність технологічних процесів за рахунок використання отриманих результатів. У статті досліджуються характеристики руху сипкого кускового матеріалу на завантажувальній вібраційно-розгінній ділянці транспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії.

Вібраційно-розгінна ділянка, ділянка завантаження, транспортний трубопровід, аеросуміш

Постановка проблеми. Процес трубопровідного транспортування сипких кускових матеріалів стисненим повітрям надзвичайно складний. Закономірності руху сипких кускових матеріалів на розгінній ділянці транспортного трубопроводу визначається багатьма факторами, які залежать від конструкції і режиму роботи пневмотранспортної системи, властивостей матеріалу і особливостей його взаємодії з вантажонесучим транспортним органом. Не дивлячись на значне розширення в останні роки досліджень з механіки руху сипких кускових матеріалів отримані результати не мали помітного впливу на розвиток розрахункових методів вібропневмотранспортування. В ІГТМ НАН України спільно з ЦНТУ розроблено принципово новий тип вібраційно-пневмотранспортної машини з примусовим розгоном матеріалу в зоні завантаження, яка спроможна транспортувати сипкий кусковий матеріал на відстані до 2,5 км по трубопроводу з продуктивністю до 120 м³/год при габаритах машини 1,2 x 0,7 x 2,5 м. Удосконаленню конструкції машини на основі дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу в зоні завантаження на вібраційно-розгінній ділянці присвячена дана робота [2, 12-14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома постановка задачі спільної дії вібрації і повітряного потоку на шар насипного матеріалу. Так, [5, 6] розглядається механіка руху матеріалу у вигляді одиничних частинок на вантажонесучому органі вібраційно-пневмотранспортного пристрою. Одиничні частинки переміщуються під дією аеродинамічної сили і вібраційного впливу у вигляді шару матеріалу з опорами, що викликані статистичним характером руху частинок шару, взаємним тертям між частинками і наявністю повітряного середовища. Процес представлено в неінерціальних системах координат, що обумовлює існування сил інерції. Враховується етап ковзання частинок по вантажонесучому органу. В постановці задачі є ряд допущень, зокрема більш детально враховано вплив вібрації при спрощеній схемі аеродинамічного впливу. Підчас руху одиничних частинок з підкиданням без ковзання, коли останні знаходяться на робочому органі лиш в деякі ізольовані моменти часу,

© В. В. Яцун, І. О. Скриннік, Г. Д. Портнов, О. В. Горпинченко, 2025

зручніше використовувати нерухомі системи відрахунку, в яких траєкторія руху частинки має простий вигляд. В [6, 11] досліджувався рух одиначної частинки в транспортному трубопроводі, але процес відриву і польоту частинки розглядався для горизонтальної ділянки в залежності від швидкості витання частинки, що не зовсім точно пояснює механіку руху частинки в горизонтальному трубопроводі.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження вібраційного впливу на пневмотранспортування сипучого кускового матеріалу в зоні завантаження на вібраційно-розгінній ділянці.

Виклад основного матеріалу. Для визначення закону руху сипучого кускового матеріалу на завантажувальній вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії (ВПМЦ) (рисунок 1), матеріал представлено одиначними частинками та приймалися наступні припущення: швидкість повітряного потоку по довжині трубопроводу на вібраційно-розгінній ділянці постійна, одиначні частинки мають сферичну форму, при падінні частинки на вантажонесучий орган машини відбувається не цілком пружний удар, тривалість удару порівняно однакова з періодом коливань вібралотка.

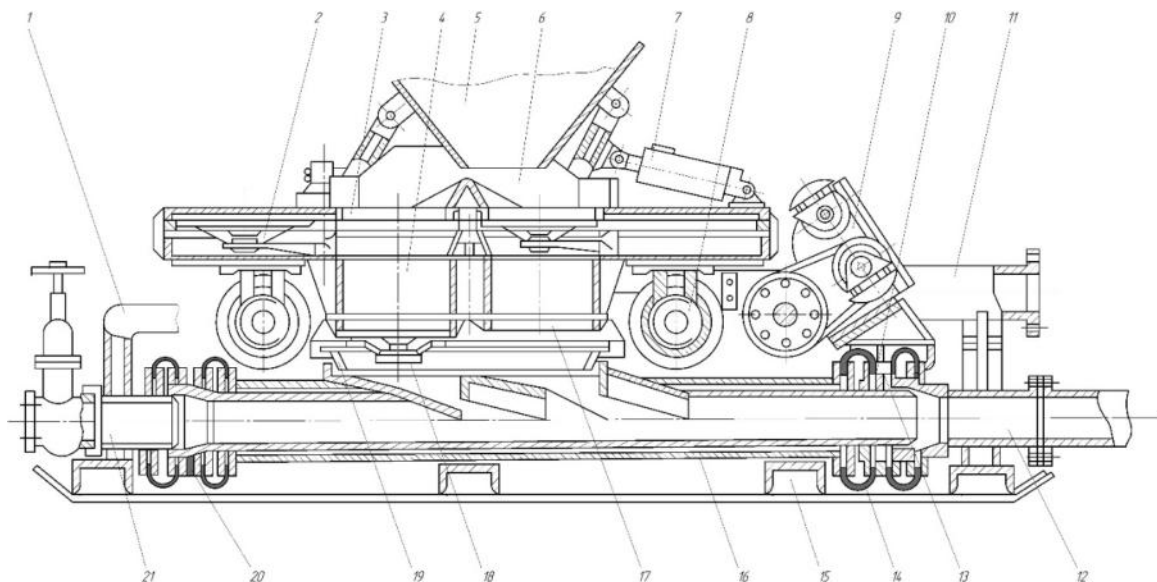


Рисунок 1 – Вібраційно-пневмотранспортна машина циклічної дії:

- 1 – повітряно-подаючий трубопровід; 2, 19 – затвори; 3, 18 – завантажувальні та розвантажувальні вікна;
 4 – камера; 5 – приймально-дозуючий пристрій; 6 – приймальний лоток; 7 – пневмо-циліндр;
 8 – зрівноважувальний клапан; 9 – вібратор; 10 - 13, 21 – ущільнення; 11, 20 – повітряно-відвідний та повітряно-підвідний патрубки; 12, 22 – транспортний трубопровід; 14 – пружні діафрагми;
 15 – основа; 16 – вібралоток;
 17 – герметична порожнина

Джерело: розроблено авторами на підставі [4, 12-14]

Розглядається рух одиначної частинки масою m , діаметром $d = 2 \cdot a$ з потоку стисненого повітря щільністю ρ_1 (рисунок 2). Частинка падає в трубопровід по низхідній траєкторії із завантажувального вікна до зустрічі з горизонтальною поверхнею вібруючого органу. Потім відбувається співудар частинки та робочої поверхні так, що частинка, отримавши додатковий імпульс як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямку, продовжує політ або до зустрічі з верхньою внутрішньою поверхнею трубопроводу, або знов з поверхнею робочого органу, або з нижньою поверхнею транспортного трубопроводу в залежності від протяжності робочого органу

вздовж трубопроводу. Далі розглядається режим з підкиданням в межах робочого органу, які характерні для вібраційно-пневмотранспортних машин з невеликою протяжністю робочого органу при $\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g} > 2$. На частинку діє в горизонтальному напрямку струмінь стисненого повітря з силою [2,7].

$$F_{\mu} = \frac{C_{\mu} \cdot \rho_1 \cdot (V_{1x} - \dot{x})^2 \cdot S_M}{2}$$

де C_{μ} – коефіцієнт динамічного опору;

$$S_M = \frac{\pi \cdot d^2}{4} - \text{площа поперечного перерізу частинки};$$

\dot{x} - миттєва швидкість частинки по осі X;

V_{1x} - швидкість повітряного потоку.

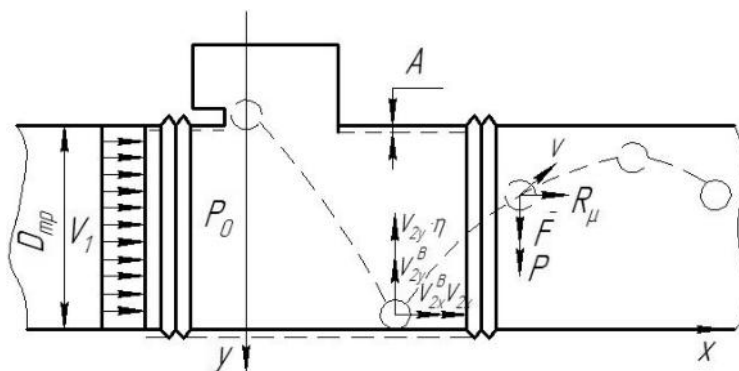


Рисунок 2 - Розрахункова схема дії сил на одиничну частинку матеріалу на вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії

Джерело: розроблене авторами

Вздовж вертикальної осі на частинку діє сила ваги та опору повітря. У зв'язку з тим, що по осі OY відносна швидкість частки та повітря мала, сила опору повітря визначається по закону Стокса [1-3]:

$$R = 3\pi \cdot \mu \cdot d \cdot \dot{y}$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря.

Диференційні рівняння, що описують рух одиничної частинки на вібраційно-розгінній ділянці, записуються у вигляді [3, 5]:

$$\begin{aligned} m \ddot{x} &= \frac{C_{\mu} \cdot \rho_1 \cdot (V_{1x} - \dot{x})^2 \cdot S_M}{2} \\ m \ddot{y} &= m \cdot g - 3\pi \cdot \mu \cdot d \cdot \dot{y} \end{aligned} \tag{1}$$

Система (1) складається з двох незалежних диференційних рівнянь, тому рішення їх проводиться по чергово.

Позначимо $\dot{x} = z$, $N = \frac{C_{\mu} \cdot \rho_1 \cdot S_M}{2m}$, тоді перше рівняння системи (1) прийме вигляд:

$$\frac{dz}{dt} = N \cdot (V_1 - z)^2$$

або

$$\frac{dz}{(V_1 - z)^2} = N \cdot dt \quad (2)$$

Інтегруючи (2), отримаємо:

$$z = V_1 - \frac{1}{N \cdot t + C_1} \quad (3)$$

Постійна інтегрування C_1 визначається з початкових умов: $t = 0$, $x = V_{2x,0} + V_{2x}$, де $V_{2x,0}$ - горизонтальна складова початкової швидкості руху частинки на розгінній ділянці, рівна горизонтальній складовій кінцевої швидкості руху на завантажувальній ділянці ВПМ [3, 5], прийнято, що горизонтальна складова швидкості частинки при ударі об поверхню робочого органу не змінюється;

V_{2x} - горизонтальна складова швидкості руху частинки від вібраційного впливу [2], дорівнює:

$$V_{2x}^B = K_e \cdot A \cdot \varpi \cdot \cos \beta$$

де K_e - коефіцієнт, що визначається експериментально.

$$C_1 = \frac{1}{V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)}$$

Підставляючи C_1 , отримаємо вираз горизонтальної складової швидкості руху одиничної частки на вібраційно-розгінній ділянці:

$$V_{2x} = V_1 - \frac{1}{N \cdot t + \frac{1}{V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)}}$$

Інтегруючи вираз (3), отримаємо:

$$x = V_1 \cdot t - \frac{1}{N} \ln(N \cdot t + C_1) + C_2 \quad (4)$$

Враховуючи початкові умови $t = 0$, $x = 0$ визначаємо C_2 :

$$C_2 = \frac{1}{N} \ln C_1 - \frac{1}{N} \ln \frac{1}{V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)}$$

Підставляючи C_2 у вираз (4) та провівши деякі перетворення, отримаємо вираз горизонтальної проекції шляху частки на вібраційно-розгінній ділянці:

$$x = v_1 \cdot t - \frac{1}{N} \ln(N \cdot t \cdot [V_1 - (V_{2x,0} + V_{2x}^B)] + 1) \quad (5)$$

Визначимо $3\pi \cdot \mu \cdot d = \alpha$, $\frac{\alpha}{m} = K$, тоді друге рівняння (1) записується у вигляді:

$$\ddot{y} = g - K \cdot \dot{y} \quad (6)$$

Вводимо змінну $l = g - K \cdot \dot{y}$, з урахуванням якої рівняння (6) отримає вигляд:

$$\frac{dl}{l} = -K dt$$

Інтегруючи це рівняння отримаємо:

$$\ln(g - K \cdot V_{2y}) = -K \cdot t + C_1 \quad (7)$$

де

$$V_{2y} = \dot{y}$$

На основі фізичних уявлень процесу, що розглядається, приймаються нульові початкові умови: $t = 0$

$$V_{2y,0} = -(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B) \quad (8)$$

де $V_{2y,0}$ – вертикальна складова кінцевої швидкості руху частинки на завантажувальній ділянці, визначається з розгляду механіки руху одиничної частинки при завантаженні транспортного трубопроводу [1, 7];

η – коефіцієнт відновлення при ударі частинки об поверхню робочого органу [1, 7, 9];

V_{2y}^B – вертикальна складова швидкості руху частинки від вібраційного впливу [1, 7, 9]:

$$V_{2y}^B = K_e \cdot A \cdot \varpi \cdot \sin \beta$$

З початкових умов (8) визначаємо:

$$C_1 = \ln[g + K \cdot (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)] \quad (9)$$

Підставляючи у (7) значення C_1 та потенціуючи його, після перетворень отримаємо вираз вертикальної складової швидкості руху одиничної частинки на вібраційно-розгінній ділянці від поверхні вантажонесучого вібраційного органу до верхньої точки траєкторії польоту частинки (y_{\max}):

$$V_{2y}^I = -\frac{1}{K} \left[e^{-Kt} \left[g + K(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B) \right] \right] - g \quad (10)$$

Час руху частинки від поверхні робочого органу до верхньої точки траєкторії польоту визначаємо з рівняння (7) з урахуванням (9):

$$t_I = \frac{1}{K} \ln \frac{g + K(V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)}{g - K \cdot V_{2y,0}} \quad (11)$$

Інтегруючи рівняння (10) знаходимо закон руху частинки у вертикальному напрямку:

$$y_I = \frac{e^{-Kt}}{K^2} \left[g + K \cdot (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B) \right] + \frac{g \cdot t}{K} + C_2$$

Враховуючи початкові умови: $t = 0$, $y = 0$, визначаємо C_2 :

$$C_2 = -\frac{g + K \cdot (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)}{K^2}$$

Для рішення трансцендентного відносно t рівняння, використовуємо розкладання e^{Kt} у вигляді ряду:

$$e^{-Kt} = 1 - K \cdot t + \frac{(K \cdot t)^2}{2!} - \frac{(K \cdot t)^3}{3!} + \dots$$

Для малих значень K приймаємо:

$$e^{-Kt} = 1 - K \cdot t + \frac{(K \cdot t)^2}{2!} \quad (12)$$

Підставляючи вираз (12) в рівняння для y_I та враховуючи значення C_2 , визначаємо:

$$y_I = \frac{g \cdot t_I^2}{2} - (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B) \left(t_I - \frac{K}{2} t_I^2 \right) \quad (13)$$

Тиск одиничної частинки від y_{\max} до поверхні робочого органу або нижньої поверхні трубопроводу, аналогічно руху її на завантажувальній ділянці, де вертикальна складова швидкості частинки визначається відповідно виразу [2, 5, 7]

$$V_{2y}^H = \frac{g}{K} \cdot (1 - e^{-Kt})$$

Час польоту частинки від y_{\max} до поверхні робочого органу або нижньої поверхні транспортного трубопроводу визначається аналогічно завантажувальній ділянці:

$$t = \sqrt{\frac{2[y_{\max}]}{g}} \quad (14)$$

Повний час руху частинки визначається за допомогою виразів (11) та (14):

$$t = t_I + t_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{g + K \cdot (V_{2y,0} \cdot \eta + V_{2y}^B)}{g - K \cdot V_{2y,0}} + \sqrt{\frac{2[y_{\max}]}{g}}$$

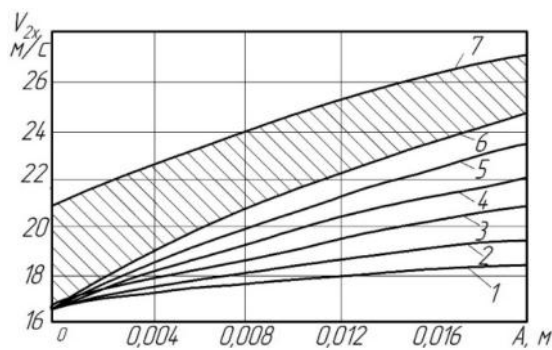
Величина горизонтальної проекції шляху частинки у вібраційно-розгінній ділянці до падіння її на нижню внутрішню поверхню трубопроводу або робочого органу встановлюється шляхом підстановки знайденого значення t в рівняння (5).

Числові розрахунки на основі формул (4), (5), (10), (13), та (15) для вібраційно-пневмотранспортних машин циклічної дії виконувались при наступних значеннях робочих параметрів:

$$\begin{aligned} V_1 &= 30 \div 50 \text{ м/с}; m = 0,00103 \text{ кг}; \\ C_\mu &= 0,1; P_0 = 0,5 \div 0,8 \cdot 10^6 \text{ Па}; \\ \rho_2 &= 2000 \text{ кг/м}^3; \rho_1 = 6 \div 9,6 \text{ кг/м}^3; \\ V_{2y,0} &= 1,86 \text{ м/с}; V_{2x,0} = 13,2 \text{ м/с}; \\ \mu &= 0,000018 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2; \\ A &= 0,002 \div 0,02 \text{ м}; \varpi = 20 \div 120 \text{ с}^{-1}; \\ d &= 0,01 \text{ м}; \eta = 0,2 \div 0,5. \end{aligned}$$

Сукупність наведених вище залежностей дозволяє встановити траєкторію та час руху куска сипкого матеріалу на вібраційно-розгінній ділянці ВПМЦ. Отримані дані свідчать про те, що в робочому діапазоні параметрів таких, як амплітуда, частота та кут вібрації, дальність польоту частки змінюється від 2 до 8 м, горизонтальна швидкість від 16 до 30 м/с. На рис. 3 представлені графічні залежності горизонтальної складової швидкості руху частинки в функції частоти та амплітуди коливань робочого органу.

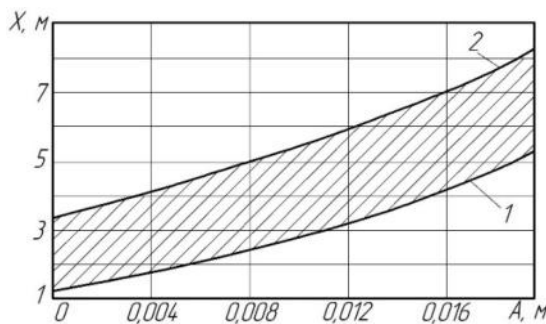
Виходячи з формули для V_{2x} вияснилось, що максимальна горизонтальна швидкість польоту частинки при вібраційному впливі збільшується у 1,5–1,6 рази в порівнянні з горизонтальною швидкістю без вібраційного впливу. На рис. 4 та рис. 5 представлені залежності горизонтального та вертикального шляху частинки. Дальність польоту частинки при вібропневмотранспортуванні на розгінній ділянці збільшується від 3 до 5 разів. На рис. 5 представлені траєкторії польоту частинки в транспортному трубопроводі на вібраційно-розгінній ділянці. Вони дозволяють оцінити характер руху кускового матеріалу в залежності від параметрів, які варіюються.



- 1 – $\omega = 20 \text{ c}^{-1}; \eta = 0,2$; 2 – $\omega = 40 \text{ c}^{-1}; \eta = 0,2$;
- 3 – $\omega = 60 \text{ c}^{-1}; \eta = 0,2$; 4 – $\omega = 80 \text{ c}^{-1}; \eta = 0,2$;
- 5 – $\omega = 100 \text{ c}^{-1}; \eta = 0,2$; 6 – $\omega = 120 \text{ c}^{-1}; \eta = 0,2$;

Рисунок 3 - Залежність горизонтальної складової швидкості руху частинки від частоти та амплітуди коливань робочого органу

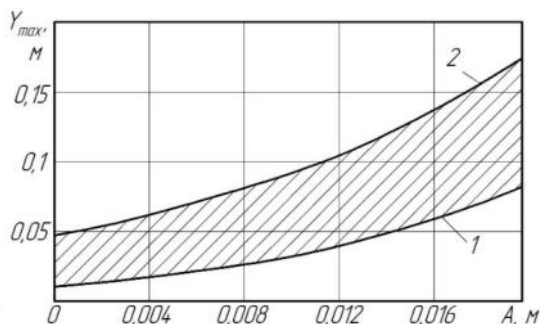
Джерело: розроблене авторами



- 1 – $\eta = 0,2$; 2 – $\eta = 0,5$

Рисунок 4 - Залежність дальності польоту частинки від амплітуди коливань робочого органу

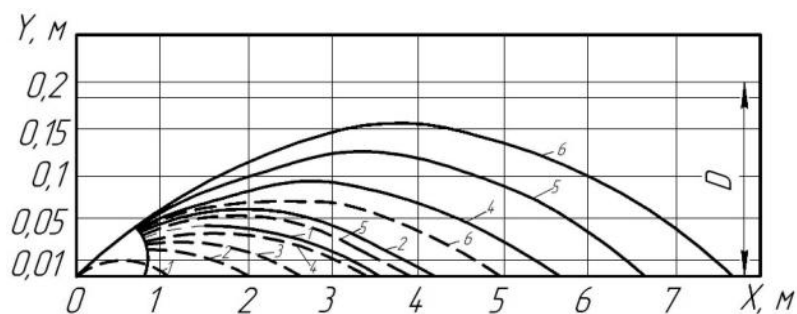
Джерело: розроблене авторами



- 1 – $\eta = 0,2$; 2 – $\eta = 0,5$; $\omega = 20 \text{ c}^{-1}$;

Рисунок 5 - Залежність максимальної висоти польоту частинки від амплітуди коливань робочого органу

Джерело: розроблене авторами



- 1 – $A = 0$; 2 – $A = 0,004 \text{ м}$; 3 – $A = 0,008 \text{ м}$; $\omega = 20 \text{ c}^{-1}$;
- 4 – $A = 0,012 \text{ м}$; 5 – $A = 0,016 \text{ м}$; 6 – $A = 0,02 \text{ м}$.
- $\eta = 0,2$; ————— $\eta = 0,5$

Рисунок 6 - Траєкторія польоту частинки сипкого кускового матеріалу на вібраційно-розгінній ділянці транспортного трубопроводу

Джерело: розроблене авторами

Висновки. Аналіз наведених вище досліджень механіки руху кускових сипучих матеріалів на завантажувальній вібраційно-розгінній ділянці вібраційно-пневмотранспортної машини циклічної дії показує, що:

- 1 - довжина розгінної ділянки зменшується в 3-4 рази і становить 8-10 м;
- 2 - в кінці вібраційно-розгінної ділянки матеріал приймає швидкість 25-30 м/с.;
- 3 - для отримання таких швидкостей в пневмо-транспортних машинах без вібраційного впливу потрібна довжина розгінної ділянки близько 30-40 м.;
- 4 - використання вібраційного впливу на кусковий сипучий матеріал дозволяє наблизити розміщення викривлених елементів транспортного трубопроводу і тим самим розширити можливості компоновочних рішень технологічних схем пневмотранспорту сипучих матеріалів.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку передбачають створення нової конструкції машини задля зменшення енерговитрат на транспортування матеріалу.

Список літератури

1. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Investigation and Design Considerations for Vibrating Pneumatic Units in the Bulk Material Transport Systems / Bulk materials: keeping, loading and unloading operation and transportation. – Pap. 3 rd Int. Conf. Newcastle, Australia, 27 - 29 June 2000.
2. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Vibratory pneumatic machines for transportation of bulk materials / Pap. 4 th Int. Conf. of Pneumatic Conveying. Budapest, Hungary, 2002.
3. Poturayev V.N., Voloshin A.I., Ponomaryov B.V. Periodical regimes of solid particles motion in the gas flow horizontal channel / Pap. The 18 Int. Congr. Theor. and Appl. Mech. (UTAM). Haifa, Israel, 2001.
4. Потураєв В.Н. Волошин О.І., Яцун В.В. Деякі аспекти створення нового класу вібраційно-пневматичних машин для транспортування сипких матеріалів. *Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 1998. Вип. 4. С. 45-52.
5. Яцун В.В., Попов Г.А. Вплив швидкості повітряного потоку на процес пневмотранспортування сипких кускових матеріалів у вібропневмотранспортних системах. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2005. Вип. 16. С. 257-262.
6. Яцун В.В., Скринник І.О., Горпинченко О.В. Дослідження механіки руху сипкого кускового матеріалу на розгінній ділянці пневмотранспортного трубопроводу вібраційно-пневмотранспортної машини. *Збірник наукових праць Центральноукраїнського національного технічного університету. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2024. Вип. 10(41) І. С. 101-110
7. Пономарьов Б. В. Развитие теории вибропневмо-транспортирования складальных материалов: дис. д-ра техн. наук: 05.15.11 / НАН України; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова. Д., 2006.
8. Гуцин В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів / В.М. Гуцин // *Машинознавство*, 2000, №2 (23). С. 39-43.
9. Bredenbruch E. Entstehung und Verhütung von Gruben branden // *Glückauf*. 2004.Н. 15/16.- S.393-404 p.
10. Tsuji Y., Morikawa Y., Tanaka L. Numerical simulation of gas-solid twophase flow in a two-dimensional horizontal channel // *Int. J. Multiphase Flow.* – 2017. – 13, № 5. – P. 671-684.
11. Волошин О.І., Яцун В.В. Деякі питання створення складальних вібраційно-пневматичних машин циклічної дії. *Збірник наукових праць НГА, вип. 2 (34). Сучасні шляхи розвитку гірничого обладнання.* Дніпропетровськ: НГА, 2007. С. 67-73.
12. А. с. 1331174 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Вібраційно-пневматична складальна машина / Г.Ю.Надольний, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 3985706 заяв. 27.11.85 : опуб. 15.04.87, Бюл. 10.
13. А. с. 1643739 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Пневматична камерна складальна машина / В.Н. Потураєв, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 4677481 заяв. 11.04.89 : опуб. 22.12.90, Бюл. 15.
14. А. с. 1654605 СРСР, МКИ Е 21 F 15/10. Камерна складальна машина / І.Ф.Чемерис, О.І. Волошин, В.В. Яцун. № 4702679: заяв. 09.06.89 : опуб. 07.06.91, Бюл. 21.

References

1. Poturayev, V. N., Voloshin, A. I., & Ponomaryov, B. V. (2000). Investigation and design considerations for vibrating pneumatic units in the bulk material transport systems. In *Bulk materials: Keeping, loading and unloading operation and transportation* (Paper presented at the 3rd International Conference, Newcastle, Australia, June 27–29).
2. Poturayev, V. N., Voloshin, A. I., & Ponomaryov, B. V. (2002). Vibratory pneumatic machines for transportation of bulk materials. In *Proceedings of the 4th International Conference of Pneumatic Conveying*, Budapest, Hungary.

3. Poturayev, V. N., Voloshin, A. I., & Ponomaryov, B. V. (2001). Periodical regimes of solid particles motion in the gas flow horizontal channel. In *Proceedings of the 18th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, Haifa, Israel.
4. Poturayev, V. N., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1998). *Some aspects of creating a new class of vibratory-pneumatic machines for bulk material transportation. Collection of Scientific Works of Kirovohrad Institute of Agricultural Engineering. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (4), 45–52 [in Ukrainian].
5. Yatsun, V. V., & Popov, H. A. (2005). *Influence of air flow velocity on the process of pneumatic transportation of bulk lumpy materials in vibratory-pneumatic transport systems. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (16), 257–262 [in Ukrainian].
6. Yatsun, V. V., Skrynnik, I. O., & Horpynchenko, O. V. (2024). *Study of the mechanics of bulk lumpy material movement in the acceleration section of the pneumatic pipeline of a vibratory-pneumatic transport machine. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41/I), 101–110 [in Ukrainian].
7. Ponomarov, B. V. (2006). *Development of the theory of vibratory-pneumatic transportation of backfilling materials* (Doctoral dissertation). Dnipro: Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov, NAS of Ukraine [in Ukrainian].
8. Hushchyn, V. M. (2000). *New concept and its implementation in the development of highly efficient means of pneumatic transportation of bulk materials. Mashynoznavstvo*, 2(23), 39–43 [in Ukrainian].
9. Bredenbruch, E. (2004). Entstehung und Verhütung von Grubenbränden. *Glückauf*, 15/16, 393–404.
10. Tsuji, Y., Morikawa, Y., & Tanaka, L. (2017). Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a two-dimensional horizontal channel. *International Journal of Multiphase Flow*, 13(5), 671–684.
11. Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (2007). *Some issues of creating cyclic vibratory-pneumatic backfilling machines. Collection of Scientific Works of the National Mining Academy. Modern Ways of Mining Equipment Development*, 2(34), 67–73 [in Ukrainian].
12. Nadolnyi, H. Yu., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1987). *Vibratory-pneumatic backfilling machine*. Author's certificate 1331174 USSR, IPC E21F 15/10, No. 3985706; filed 27.11.1985; published 15.04.1987, Bulletin No. 10 [in Russian].
13. Poturayev, V. N., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1990). *Pneumatic chamber backfilling machine*. Author's certificate 1643739 USSR, IPC E21F 15/10, No. 4677481; filed 11.04.1989; published 22.12.1990, Bulletin No. 15 [in Russian].
14. Chemeris, I. F., Voloshyn, O. I., & Yatsun, V. V. (1991). *Chamber backfilling machine*. Author's certificate 1654605 USSR, IPC E21F 15/10, No. 4702679; filed 09.06.1989; published 07.06.1991, Bulletin No. 21 [in Russian].

Volodymyr Yatsun, Prof., PhD tech. sci., **Ivan Skrynnik**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Gennadiy Portnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Horpynchenko Olha**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of the Mechanics of the Movement of Loose Lumpy Material in the Loading Zone on the Vibration-Acceleration Section of the Vibration Pneumatic Transport Machine of Cyclic Action

The purpose of this work is the task of researching the vibration effect on the pneumatic transportation of bulk lumpy material in the loading zone on the vibration-acceleration section of the cyclic-action vibration-pneumatic conveying machine. Acceleration section of pneumo-transportation of bulk lumpy material is the minimum length of the transport pipeline, on which the movement of the material takes a steady state. The vibration-acceleration section, in vibro-pneumotransport devices, takes into account the effect of vibration on the material in the loading zone. The analysis of the processes occurring during loading in the vibration-acceleration section of the VPMC will allow to identify optimal technical solutions for further improvement of the machine design.

The analysis of the above studies of the mechanics of the movement of lumpy bulk materials in the loading vibration-acceleration section of the vibration-pneumotransport machine of cyclic action shows that the length of the acceleration section is reduced by 3-4 times and is 8-10 m. At the end of the vibration-acceleration section, the material reaches a speed of 25-30 m/s. In order to obtain such speeds in pneumo-transport machines without the influence of vibration, the length of the acceleration section is about 30-40 m. The use of the vibration effect on lumpy bulk material allows you to approximate the location of curved elements of the transport pipeline and thereby expand the possibilities of layout solutions for technological schemes of pneumatic transport of bulk materials.

Prospects for further research in this direction include the creation of a new machine design to reduce energy consumption for material transportation.

vibration-accelerating section, loading section, transport pipeline, aeromix

Одержано (Received) 03.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.06.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025