



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-54-66

УДК 631.363.28

С. П. Тримбач¹, здобувач,

ORCID: 0009-0007-1605-6294

С. П. Степаненко¹, д-р техн. наук,

ORCID: 0000-0002-8331-4632

¹ Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва
Національна академія аграрних наук Україниe-mail: stepanenko_s@ukr.net

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЧАСТИНОК СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ ГРАНУЛЮВАННЯ

Анотація. Проведені теоретичні дослідження були спрямовані на вивчення переміщення частинок сипкого матеріалу у просторі між обертовою поверхнею кільцевої матриці гранулятора та роликом з метою визначення їхньої швидкості руху.

У результаті була запропонована гіпотеза, згідно з якою переміщення частинок сипкого матеріалу може статися лише тоді, коли сила тертя між поверхнею ролика та цими частинками досягає значення, достатнього для подолання сил тертя між самими частинками та поверхнею матриці. На підставі цієї гіпотези були отримані математичні залежності, які дозволили розрахувати значення кутової і лінійної швидкості руху частинок матеріалу в торцевому зазорі між роликом та матрицею.

Виявлено, що кутова швидкість залежить від коефіцієнта тертя матеріалу на ролику та матриці, а також від радіуса ролика. Лінійна швидкість частинок найменша на початку процесу гранулювання і найбільша в кінці даного процесу, зі збільшенням радіуса ролика вона також збільшується.

У результаті проведених теоретичних досліджень були отримані рівняння, які дозволяють визначити значення кутової швидкості ω_{ch} і лінійної швидкості v_{ch} руху частинки матеріалу при її переміщенні в просторі між роликом та матрицею в процесі гранулювання сипких матеріалів.

Ключові слова: сипкий матеріал, лінійна швидкість, процес гранулювання, тертя, переміщення частинок матеріалу, швидкість руху частинок.

Постановка проблеми. Процес гранулювання сипких матеріалів з кільцевою матрицею є досить складним і залежить від багатьох факторів, які впливають на якість виконання цієї операції. Процес гранулювання сипких матеріалів можна здійснювати декількома основними робочими органами, які можна розділити: I-вальцеві; II-шнекові; III-штемпельні; IV-матричні [1-5].

Проте слід відмітити, що в першій, другій та третій групі процес гранулювання відбувається не якісно та зі значними енерговитратами,

що в свою чергу призводить до зниження питомої продуктивності процесу гранулювання [1-3]. Тому нами запропоновано використання технічного засобу для процесу гранулювання з кільцевою матрицею IV група та трироlikовою системою пресування сипкого матеріалу де спостерігається збільшення питомої продуктивності та зменшення питомих витрат енергії [1, 3, 5, 14, 18].

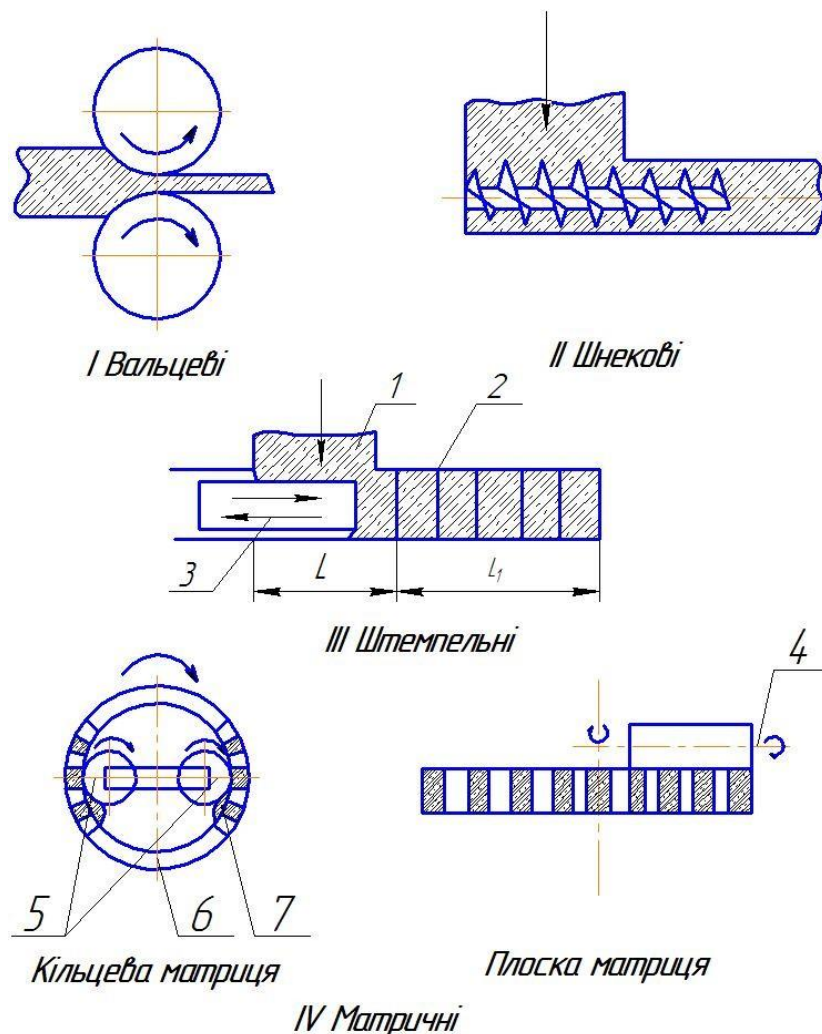


Рис. 1. Робочі органи для гранулювання [1-5]:

- 1 – завантажувальне вікно; 2 – пресувальний канал; 3 – штампель;
4 – упор; 5 – валець; 6 – матриця; 7 – робоча зона

Запропонований технічний засіб розглянуто в наукових працях [10, 11] та принцип його роботи полягає в наступному. Кільцева матриця обертається за годинниковою стрілкою. В середині з внутрішньою частиною матриці встановлені пресувальні ролики, які обертаються в тому ж напрямку що і матриця. В робочу частину матриці потрапляє матеріал який за рахунок обертання матриці подається в зону контакту ролика де починається процес ущільнення з



подальшим запресовуванням його в радіальні отвори матриці. На виході з отворів гранули ламаються при зустрічі з нерухомих ножом.

Слід відмітити, що на даний час відсутня аналітична залежність для визначення значення кутової швидкості і лінійної швидкості руху частинок матеріалу при їх переміщенні в просторі між роликком та матрицею в процесі гранулювання, тому визначення даної взаємозалежності є актуальним завданням для подальшого конструювання грануляторів з кільцевою матрицею.

Аналіз останніх досліджень. Дослідники [4-5] провели аналіз основних досліджень, спрямованих на вивчення роботи шестеренних прес-грануляторів. В ході аналізу ними було встановлено шляхи підвищення продуктивності та надійності таких прес-грануляторів з кільцевою матрицею, зменшення витрат енергії під час процесу гранулювання і скорочення робочого навантаження на обслуговування їх робочих компонентів. Братішко В. В. та Болтянська Н. І. визначили можливості регулювання якості отриманих гранул та виявлено ряд конструктивних і технологічних недоліків. В результаті цього були вирішені окремі завдання щодо структурного синтезу для поліпшення конструкцій прес-грануляторів.

У сучасних умовах важливе значення має вдосконалення складних технологічних процесів, що використовуються в промисловості, з метою забезпечення ресурсозбереження та підвищення енергоефективності [6-9].

В агропромисловому секторі одним із таких процесів є пресове гранулювання у прес-грануляторах типу екструзійного з циліндричними робочими органами. Цей процес використовується для обробки сільськогосподарських сировини при виробництві гранульованих комбікормів і їх окремих компонентів, виготовлення паливних гранул з відходів агропромислового комплексу та отримання гранульованих проміжних продуктів для підвищення ефективності технологічних процесів, як зазначають автори роботи [6-10].

Авторами [8, 9] вказано на доцільні напрямки удосконалення процесу пресового гранулювання. Встановлено, що для всіх існуючих прес-грануляторів з кільцевою матрицею характерно видавлювання продукту у бічному напрямку. Інтенсивність цього бокового видавлювання матеріалу визначається його напруженим станом в клиновидному просторі і значно залежить від ряду факторів, таких як структурно-механічні (реологічні) властивості оброблюваного продукту, конструктивні параметри прес-гранулятора та коефіцієнт контактного тертя, як вказують автори.

Науковими дослідженнями [2, 3, 6-8] обґрунтовано напрямок удосконалення робочого процесу вальцово-матричних прес-



грануляторів з кільцевою матрицею шляхом впровадження торцевого обмеження клиновидного простору додатковими контактними поверхнями. У прес-грануляторах з таким обмеженням клиновидного простору між робочими органами, механічна енергія передається оброблюваному матеріалу через контактні поверхні матриці, пресуючих роликів і обмежувальних кілець. Науковцями [4-9, 14-20] розроблена математична модель процесу пресового гранулювання рослинної сировини в умовах замкненого клиновидного простору між матрицею і кожним з пресуючих роликів.

Формулювання мети статті полягає в аналітичному описі процесу переміщення частинок сипкого матеріалу в просторі між обертовою поверхнею ролика та кільцевою матрицею, а також встановленні математичних залежностей для визначення швидкостей переміщення частинок сипкого матеріалу в даному пристрої.

Основна частина. Згідно з сформульованою гіпотезою про те, що необхідною умовою для переміщення частинок матеріалу є досягнення силою тертя \bar{F}_b між поверхнею ролика та частинками значення, достатнього для подолання сил тертя \bar{F}_d між частинками та обертовою поверхнею матриці. Ми припускаємо, що матеріал складається з рівномірного шару з товщиною h_{cp} , який складається з окремих елементів з шириною l_{cp} , які переміщуються в проміжку (зазорі) між роликом і матрицею, як наведено на (рис.2). Припускаємо, що елемент шару сипкого матеріалу складається з окремих частинок (матеріальних точок).

Отже введемо координатну систему xu , початок якої розташований в центрі O обертового ролика з постійною кутовою швидкістю ω (рис. 2). З певною похибкою можна припустити, що траєкторія руху частинок проходить на однаковій відстані від кола ролика радіусом R_R і матриці, з радіусом R_M , зі зміщеним центром O_1 від центра обертового ролика O зміщеного на відстань k (рис. 3). Радіус кривизни траєкторії частинок обчислюється за допомогою виразу:

$$R = R_M - R_R, \quad (1)$$

де R_M - радіус матриці, вимірюється в метрах (м);

R_R - радіус ролика, також вимірюється в метрах (м).

Цей вираз допомагає визначити радіус кривизни траєкторії руху частинок матеріалу в зазорі, який має зміщений центр O_1 відносно центра обертання ролика.

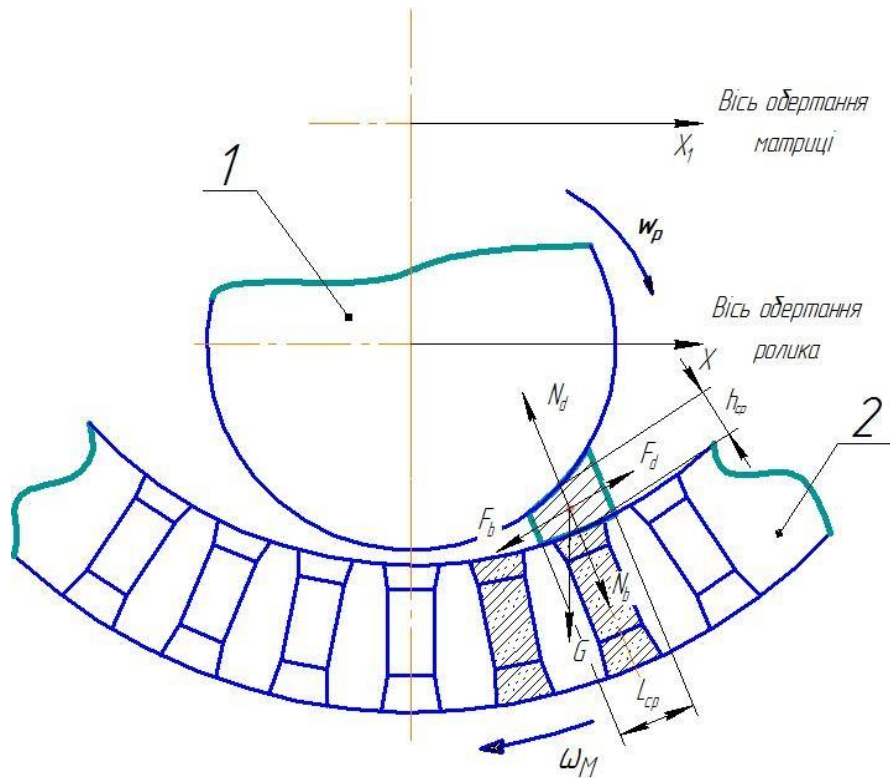


Рис. 2. Схема елемента шару гранульованого сипкого матеріалу:
1 – ролик; 2 – матриця

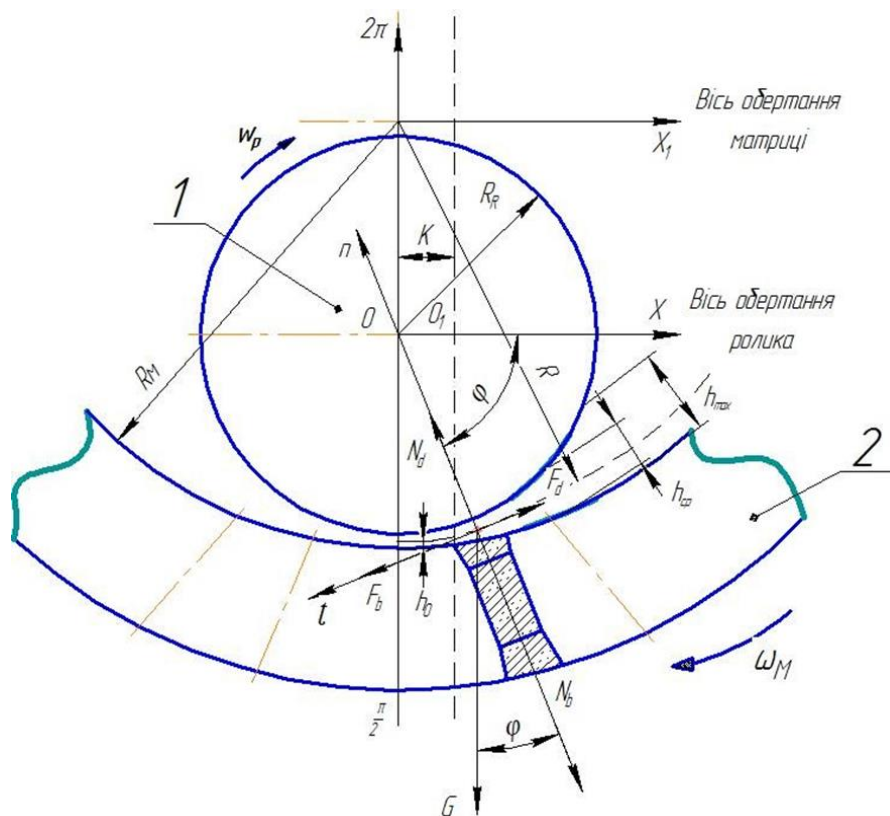


Рис. 3. Схема сил, що діє на елементарну частинку сипкого матеріалу за умов її руху між роликом (1) та кільцевою матрицею (2) в процесі гранулювання



Для початку, радіус R_M матриці можна визначити за допомогою виразу:

$$R_M = R_R + \frac{h_0 + h_{max}}{2} \quad (2)$$

де h_0 – мінімальний зазор сипкого матеріалу, який достатній для початку процесу гранулювання між роликком та матрицею, (м);

h_{max} – максимальний значення зазору сипкого матеріалу, який подається в простір між роликком та матрицею для початку процесу гранулювання, (м).

У натуральній системі координат з осями \bar{t} та \bar{n} , векторне рівняння руху частинки в просторі між роликком і матрицею матиме такий вигляд:

$$m \cdot \frac{d^2 \bar{s}}{dt^2} = \bar{N}_d + \bar{N}_b + \bar{F}_d + \bar{F}_b + \bar{G} \quad (3)$$

де \bar{s} – швидкість частинки у відносному русі;

N_d - сила нормального тиску на частинку від поверхні ролика, (Н);

N_b - сила нормального тиску на частинку з боку матриці, (Н),

$N_d = N_b = K \cdot h_{cp}(\varphi)$;

K - модуль пружності сипкого матеріалу, (Н/м);

$h_{cp}(\varphi)$ - зміна товщини шару сипкого матеріалу в залежності від кута φ та часу t ;

φ - кут, який визначає положення частинки матеріалу в зазорі між роликком та матрицею, рад.;

F_d - сила тертя частинки по поверхні ролика, (Н): $F_d = N_d \cdot f_d$;

f_d - коефіцієнти тертя частинок матеріалу по поверхні ролика;

F_b - сила тертя частинки по поверхню матриці, (Н): $F_b = N_b \cdot f_b$;

f_b - коефіцієнти тертя частинок матеріалу по поверхні матриці;

G - сила тяжіння, яка діє на частинку, (Н): $G = m \cdot g$.

Отже, в результаті цього рівняння руху проекції частинки на вісь \bar{t} та \bar{n} можна виразити наступним чином [2, 12-19]:

$$t: m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} = F_b - F_d + m \cdot g \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

$$n: \begin{cases} m \cdot \frac{dv}{dt} = F_b - F_d + m \cdot g \cdot \cos \varphi; \\ m \cdot \frac{v^2}{R} = N_d - N_b - m \cdot g \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (5)$$

Враховуючи, що $N_d = N_b = K \cdot h_{cp}(\varphi)$; $F_d = N_d \cdot f_d$; $F_b = N_b \cdot f_b$ і з урахуванням певних змін в системі диференціальних рівнянь (4, 5), можна подати рух частинки в наступному вигляді [16-21]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{F_b}{m} - \frac{F_d}{m} + g \cdot \cos \varphi; \\ \frac{v^2}{R} = -g \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (6)$$



$$\begin{cases} \frac{F_d}{m} = K \cdot h_{cp}(\varphi) \cdot f_d; \\ \frac{F_b}{m} = K \cdot h_{cp}(\varphi) \cdot f_b. \end{cases} \quad (7)$$

Припустимо, що товщина шару сипкого матеріалу змінюється залежно від кута φ згідно з наступним виразом:

$$h_{cp}(\varphi) = \chi \cdot \varphi, \quad (8)$$

де χ - коефіцієнт пропорційності, що відображає зміну товщини h_{cp} шару матеріалу залежно від зменшення зазору між роликом і матрицею по мірі руху частинки від ущільнення до гранулювання, (м/рад).

Після вирішення системи рівнянь (6, 7) [2, 4, 7, 9, 16, 21] з урахуванням (8), ми отримуємо вираз:

$$\frac{dv}{dt} = K \cdot \chi \cdot \varphi \cdot f_b - K \cdot \chi \cdot \varphi \cdot f_d + g \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

Для спрощення рівняння (9) вводимо значення ξ , яке визначається за таким виразом:

$$\xi = \frac{(f_b - f_d) \cdot \chi \cdot \varphi}{R} \quad (10)$$

Після цих перетворень рівняння (9) отримуємо:

$$\dot{\varphi} \frac{d\dot{\varphi}}{d\varphi} = \xi \cdot \varphi + \frac{g}{R} \cdot \cos \varphi, \quad (11)$$

$$\dot{\varphi} \cdot d\dot{\varphi} = \xi \cdot \varphi \cdot d\varphi + \frac{g}{R} \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi, \quad (12)$$

$$\int_{\dot{\varphi}_0}^{\dot{\varphi}_k} \dot{\varphi} d\dot{\varphi} = \xi \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \varphi d\varphi + \frac{g}{R} \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \cos \varphi d\varphi, \quad (13)$$

$$\frac{\dot{\varphi}}{2} \Big|_{\dot{\varphi}_0}^{\dot{\varphi}_k} = \xi \cdot \frac{\varphi}{2} \Big|_{\varphi_0}^{\varphi_k} + \frac{g}{R} \cdot \sin \varphi \Big|_{\varphi_0}^{\varphi_k}, \quad (14)$$

де $\dot{\varphi}_0, \dot{\varphi}_k$ - початкове і кінцеве значення кутової швидкості руху частинки, (рад/с).

Після виконаних перетворень рівняння (14) воно набуде наступного вигляду:

$$\frac{(\dot{\varphi}_k)^2 - (\dot{\varphi}_0)^2}{2} = \xi \cdot \frac{(\varphi_k)^2 - (\varphi_0)^2}{2} + \frac{g}{R} \cdot (\sin \varphi_k - \sin \varphi_0). \quad (15)$$

Під час розв'язання рівняння (15) для визначення початкової та кінцевої кутової швидкості руху частинки ми отримали формулу для обчислення кутової швидкості руху частинки:

$$\dot{\varphi}_k = \sqrt{(\dot{\varphi}_0)^2 + 2 \cdot \left[\left(\frac{(f_b - f_d) \cdot \chi \cdot \varphi}{R} \right) \cdot \frac{(\varphi_k)^2 - (\varphi_0)^2}{2} + \frac{g}{R} \cdot (\sin \varphi_k - \sin \varphi_0) \right]} \quad (16)$$

З певними припущеннями, середню кутову швидкість руху ω_{ch} частинки в зазорі між роликом та матрицею можна визначити як середнє значення між початковою та кінцевою швидкістю:

$$\omega_{ch} = \frac{\dot{\varphi}_k + \dot{\varphi}_0}{2} \quad (17)$$



При цьому середня кутова швидкість руху ω_{ch} частинки зменшується зі збільшенням значення f_b , і рух триватиме до того моменту, поки сили тертя не перевищать сили руху в зазорі між роликом та матрицею, тобто доки виконається умова $f_b > f_d$.

На рис. 4 наведено залежності середньої кутової швидкості руху ω_{ch} частинки в зазорі між роликом та матрицею від коефіцієнтів тертя f_b і f_d при різних радіусах ролика та матриці.

Лінії на графіку відповідають різним значенням коефіцієнта тертя f_d по поверхні матриці. З графіку видно, як змінюється середня кутова швидкість руху частинки в залежності від цих параметрів.

Коефіцієнти тертя гранульованого матеріалу щодо поверхні матриці f_d можуть мати значення від 0,2 до 0,4 для тирси з вологістю не більше 14% [10], від 0,3 до 0,45 для корму з вологістю не більше 15% [10]. Середня кутова швидкість руху ω_{ch} частинки збільшується зі збільшенням коефіцієнта тертя f_d матеріалу по поверхні матриці та зменшується зі збільшенням коефіцієнта тертя f_b до поверхні ролика в процесі гранулювання. Зі збільшенням радіуса матриці також зменшується середня кутова швидкість. Наприклад, середня швидкість ω_{ch} може змінюватися від 0 до 20 рад/с при $R_M = 0,240$ м, $f_b = 0,3$ та зі збільшенням f_d до 0,3. При $f_b = 0,4$, $R_M = 0,240$ м та зі збільшенням f_d до 0,4 середня швидкість ω_{ch} може змінюватися від 0 до 20 рад/с. При збільшенні радіуса ролика за однакових умов ($f_b = 0,4$ та $f_d < 0,4$), ω_{ch} може змінюватися від 0 до 20 рад/с.

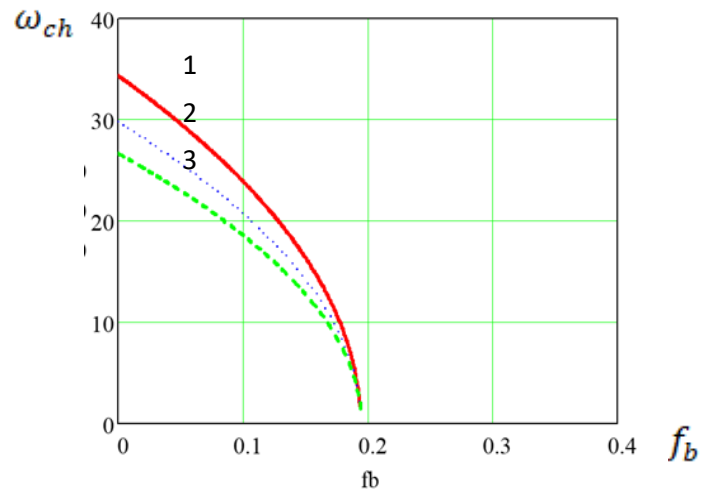
Лінійну швидкість руху v_{ch} частинки можна визначити за формулою:

$$v_{ch} = \omega_{ch} \cdot R \quad (18)$$

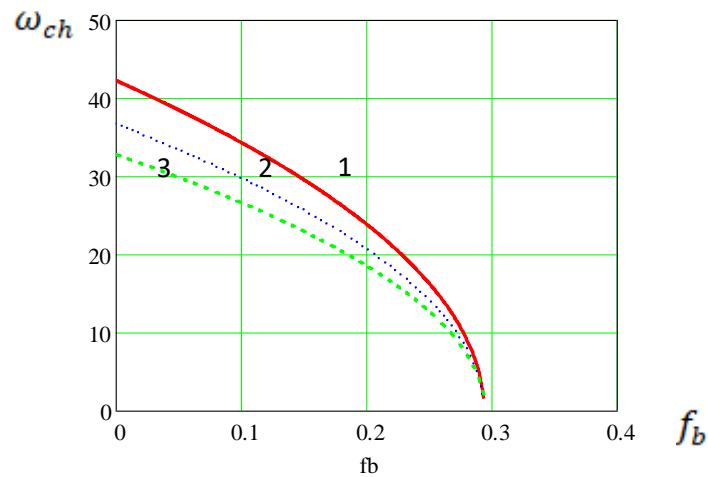
Рівняння (17) і (18) були розв'язані за таких початкових даних: $f_b = 0,4$; $f_d = 0,15$; $\dot{\varphi} = 0$ (рад/с); $\varphi = \frac{\pi}{18} \dots \pi$ (рад) із кроком $\frac{\pi}{20}$. При цьому припускається, що швидкість v_0 введення частинок сипкого матеріалу в простір між роликом та матрицею приблизно дорівнює нулю. Результати обчислень швидкості руху частинки v_{ch} в залежності від кута φ подані наведени на рис. 5.

Ці графіки демонструють, як змінюється лінійна швидкість руху частинки в залежності від впливових параметрів.

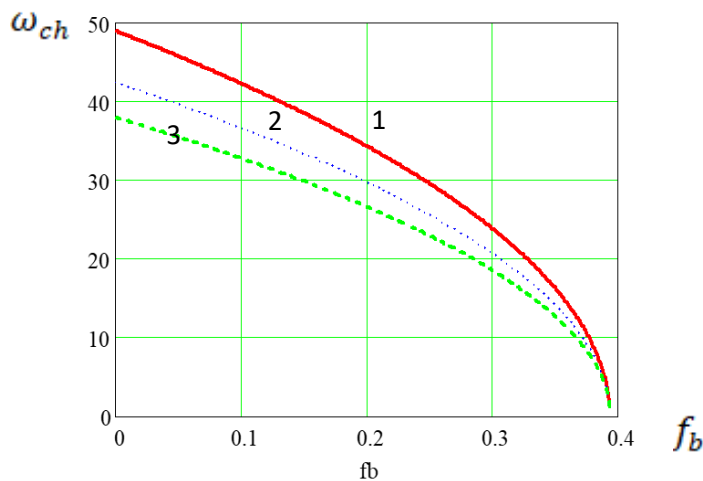
Аналіз залежностей на рис. 5 вказує, що на вході в простір між роликом та матрицею швидкість v_{ch} має мінімальне значення, а максимальне значення досягається при значенні кута φ , рівному 180° , на виході. При цьому швидкість v_{ch} зростає зі збільшенням радіуса ролика.



а - $f_d = 0,2$



б - $f_d = 0,3$



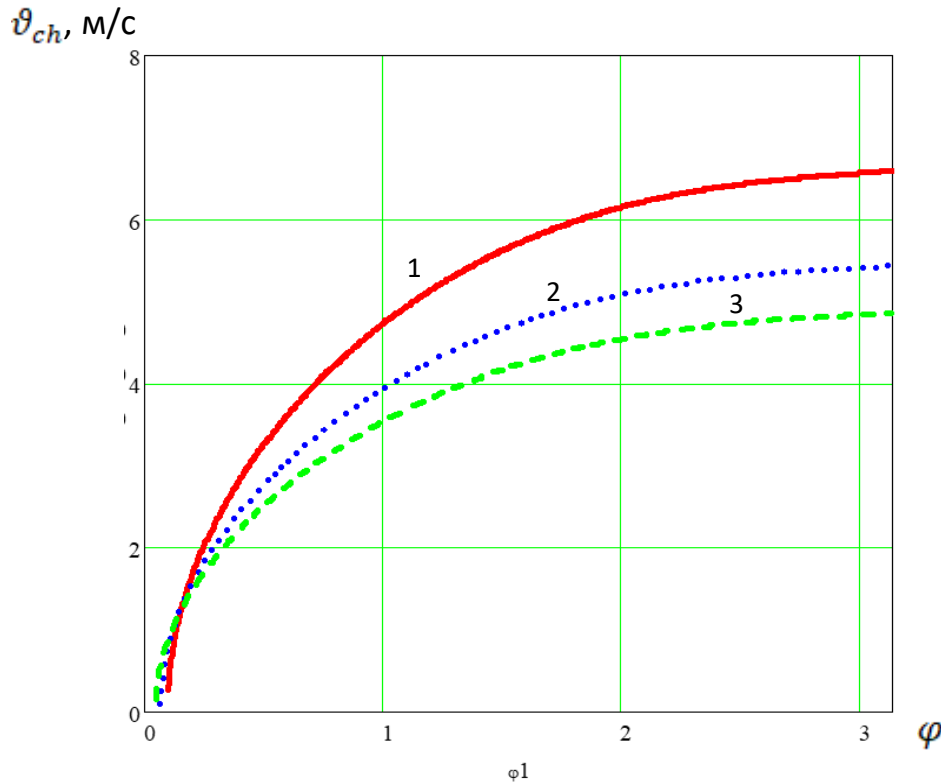
в - $f_d = 0,4$

1 - $R_R = 0,095$ м; 2 - $R_R = 0,097$ м; 3 - $R_R = 0,10$ м;

Рис. 4. Залежність середньої кутової швидкості руху ω_{ch} частинки від коефіцієнта тертя f_d матеріалу по поверхні матриці при різних значеннях радіуса ролика R_R



Наприклад, при радіусі $R_R = 0,095$ м максимальна швидкість $v_{ch} = 3,5$ м/с; при $R_R = 0,097$ м $v_{ch} = 5,7$ м/с; при $R_R = 0,1$ м $v_{ch} = 7,1$ м/с.



1 - $R_R = 0,095$ м; 2 - $R_R = 0,097$ м; 3 - $R_R = 0,1$ м;

Рис. 5. Залежності лінійної швидкості v_{ch} руху частинки від кута φ при значеннях зазорів $h_0 = 0,5$ мм і $h_{max} = 1$ мм для різних значень радіуса ролика R_R

Висновки. У результаті проведених теоретичних досліджень були отримані рівняння, які дозволяють визначити значення кутової швидкості ω_{ch} і лінійної швидкості v_{ch} руху частинки матеріалу при її переміщенні в просторі між роликом та матрицею в процесі гранулювання сипких матеріалів.

Список використаних джерел.

1. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль, 2001. 975 с.
2. Братішко В. В. Механіко-технологічні основи приготування повнораціонних комбикормів гвинтовими грануляторами: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2017. 43с.
3. Братішко В. В. Узгодження конструкційних параметрів матриць гвинтових грануляторів кормів за тиском та пропускнуою



здатністю. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2014. Вип. 27. С. 187-191.

4. Boltianska N. Ways to Improve Structures Gear Pelleting Presses. *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18(2). P. 23- 29.

5. Болтянська Н. І. Шляхи вдосконалення конструкцій шестеренних прес-грануляторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. 10(109). С. 104-110.

6. Болтянська Н. І., Комар А. С. Обґрунтування шляхів вдосконалення процесу гранулювання у прес-грануляторах з кільцевою матрицею. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. Вип. 199. С. 176 – 186.

7. Payne J., Rattink W., Smith T., Winowiski T. Pelleting Handbook. Sarsborg, Vorregaard Lignotech, 2001. 73 p.

8. Болтянська Н. І. Взаємодія пресуючого ролика і матеріалу в пресгрануляторі. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 260-269.

9. Комар А. С. Методика експериментальних досліджень установки для виготовлення пелет з перепелиного посліду. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 2.

10. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Дослідження технологічного процесу гранулювання кормів. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей VIII Міжнар. наук.-техн.конф. 24-25 лютого 2022 р., м. Київ*. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2022. С. 261-266.

11. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Дослідження процесу механічної взаємодії пресуючого механізму гранулятора з матеріалом. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матер. V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 лютого 2023 р.)*. Полтава: ПДАУ, 2023. С.173-177.

12. Sevostyanov M., Osokin A. Methodological Principles and Algorithm for Forming Technogenic Fibrous Materials with Low Bulk Density in a Flat-Matrix Extruder. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_5.

13. Комар А. С., Болтянська Н. І. Гранулювання органічних відходів рослинного походження на прикладі очерету. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-21>

14. Boltianska N. I., Manita I. Y. Justification of the energy saving mechanism in the agricultural sector. *Engineering of nature management*. 2021. Vol. 1(19). P. 7–12.



15. Chłopek M. & Dzik Tomasz & Hryniewicz Marek. Determining the grip angle in a granulator with a flat matrix. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2014. Vol. 16. P. 337–340.

16. Hejft Roman Selected problems in construction of granulators for plant materials. Part 2. Granulating and briquetting matrix. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 64(1). P. 30–35.

17. Shkarpetkin E & Osokin A. Features of fibrous materials agglomeration in flat-matrix granulators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. T. 698. No 066047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/6/066047>.

18. Болтянська Н. І. Взаємодія пресуючого ролика і матеріалу в прес-гранулятор. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 260–269. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-260-269>.

19. Мілько Д. О., Рогач Ю. П., Комар А. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гранулятора з нерухомою матрицею. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія Проблеми надійності машин*. 2018. Вип. 192. С. 202–209.

20. Рогач Ю. П. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гранулятора з нерухомою матрицею. *Вісник ХНТУСГ. Серія Проблеми надійності машин*. 2018. Вип. 192. С. 202–209.

21. Döring S. *Power from Pellets: Technology and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 226 p.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2023 р.

S. Trimbach¹, S. Stepanenko¹

¹**Institute of mechanics and automatics of agroindustrial production of the national academy of agrarian sciences of Ukraine.**

THEORETICAL STUDIES OF THE MOVEMENT VELOCITY OF PARTICLES OF BULK MATERIAL IN THE GRANULATION PROCESS

Summary.

Theoretical research was aimed at studying the movement of particles of bulk material in the space between the rotating surface of a ring die of a granulator and a roller in order to determine their velocity of motion.

As a result, a hypothesis was proposed suggesting that the movement of particles of bulk material can occur only when the frictional force between the roller surface and these particles reaches a value sufficient to overcome the frictional forces between the particles themselves and the surface of the die. Based on this hypothesis, mathematical relationships were derived that allowed for the calculation of the values of angular and linear velocity of particle motion in the end gap between the roller and the die.



It was found that the angular velocity depends on the friction coefficient of the material on the roller and die, as well as the radius of the roller. The linear velocity of particles is lowest at the beginning of the granulation process and highest at the end of the process, and it also increases with the increase in the radius of the roller.

The analysis of the dependencies shown in Figure 5 indicates that at the entrance to the space between the roller and the die, the velocity ϑ_{ch} reaches its minimum value, while the maximum value is achieved when the angle φ is equal to 180 degrees at the exit.

The aim of this article is to analytically describe the process of particle movement within the space between the rotating surface of a roller and a ring die. Additionally, it aims to establish mathematical relationships for determining the velocities of particle displacement within this device.

The average angular velocity of particle motion, ω_{ch} , increases with an increase in the friction coefficient, f_d , of the material against the die surface, and it decreases with an increase in the friction coefficient, f_b , against the roller surface during the granulation process. Additionally, as the radius of the die, R_M , increases, the average angular velocity ω_{ch} decreases. For instance, the average velocity ω_{ch} can vary between 0 and 20 radians per second when R_M is 0.240 meters, f_b is 0.3, and with an increase in f_d up to 0.3.

As a result of the conducted theoretical research, equations were obtained that allow determining the values of angular velocity (ω_{ch}) and linear velocity (ϑ_{ch}) of the movement of material particles as they move in the space between the roller and die during the granulation process of bulk materials.

Keywords: bulk material, linear velocity, granulation process, friction, particle displacement, particle velocity.