



# Механізація, електрифікація

УДК 631.363.285

© 2015

*В.В. Братішко,*

*кандидат  
технічних наук*

*Національний  
науковий центр  
«Інститут механізації  
та електрифікації  
сільського господарства»*

## **ВПЛИВ СИЛ ТЕРТЯ В КАНАЛІ ГВИНТА ГРАНУЛЯТОРА НА ЗМІНУ ТЕМПЕРАТУРИ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПРОДУКТУ**

**Мета.** Дослідити вплив роботи сил тертя на зміну температури пластифікованої кормосуміші за її руху по каналу гвинта гранулятора.

**Методи.** Механіки суцільних середовищ, термодинаміки та інтегральних обчислень.

**Результати.** Розглянуто питання дисипації механічної енергії за роботи гвинтового гранулятора кормів зі змінними геометричними параметрами гвинта. **Висновки.** У результаті теоретичних досліджень процесу руху пластифікованої кормосуміші в каналі гвинта гранулятора кормів було отримано вираз зміни її температури, зумовленої роботою сил тертя по матеріалу робочих органів гранулятора.

**Ключові слова:** гранулятор, дисипація, кормосуміш, пластифікація, тертя.

Теплова обробка кормових продуктів сприяє підвищенню їх поживної цінності, знезараженню та знищенню цвілевих грибів, зменшенню концентрації нітратів [4]. Водночас давно визначено [1], що оптимальна температура нагрівання комбікорму становить 70–80°C, оскільки за тривалого впливу температури понад 82°C у ньому настають незворотні зміни [3], які погіршують якість білка і призводять до подальшого зниження ефективності дії травних ферментів тварин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значного розвитку теорія обробки матеріалів у гвинтових пристроях набула в роботах, присвячених розробці технологій переробки харчових продуктів [15], полімерних матеріалів [5] і металів [12]. Достатньо вивчені питання оптимізації режимів руху матеріалу у гвинтових робочих органах [14]. При цьому розв'язання задач руху високов'язких середовищ і композицій в каналах технологічного обладнання тісно пов'язане з питаннями дисипації енергії [7].

Проведені нами раніше теоретичні дослідження дали змогу встановити вплив конструкційно-технологічних параметрів робочих органів гвинтових грануляторів кормів і властивостей кормової сировини на зміну температури пластифікованої кормосуміші завдяки роботі сил в'язкості.

Очевидно, що підвищення внутрішньої температури кормосуміші відбуватиметься не лише завдяки роботі сил в'язкості. Однією з основних причин дисипації енергії за руху матеріалу в каналі гвинта гранулятора є також робота сил тертя корму по матеріалах робочих органів — гвинта і робочої камери. Дослідженню впливу роботи сил тертя на зміну температури пластифікованої кормосуміші за її руху по каналу гвинта гранулятора присвячена ця робота. Причому розглянуто загальний варіант конструкційного виконання гвинта, при якому геометричні параметри його каналу (глибина і ширина) лінійно змінюються залежно від довжини гвинта.

**Мета досліджень** — дослідити вплив параметрів робочого процесу на зміну температури гранульованого кормового матеріалу.

**Матеріали та методи досліджень.** За проведення теоретичних досліджень використовували методи механіки суцільних середовищ, кінематики, термодинаміки, диференціальних та інтегральних обчислень. У роботі прийнято такі припущення: пластифікована кормосуміш у процесі руху по каналу гвинта є ізотропною; канал гвинта прямокутного перетину розглядається як розгортка по гвинтовій лінії, утворена обертянням його центра мас.

**Результати досліджень.** Відповідно до теоремі кінетичної енергії [6] зміна останньої дорівнює роботі зовнішніх сил, а в цьому разі — роботі сил тертя:

$$\Delta E_k = A_{\text{тр}} = -F_{\text{тр}} l_s, \quad (1)$$

де  $\Delta E_k$  — зміна кінетичної енергії, Дж;  $A_{\text{тр}}$  — робота сил тертя, Дж;  $F_{\text{тр}}$  — сила тертя, Н;  $l_s$  — довжина розгортки (по гвинтовій лінії) каналу гвинта гранулятора, м.

Відповідно до першого початку термодинаміки [11], зменшення внутрішньої енергії маси постійного об'єму дорівнює кількості виділеної теплоти та є пропорційними зміні температури маси, тобто:

$$\Delta E_k = -\Delta Q = -c_v \rho V \Delta T = -F_{\text{тр}} l_s, \quad (2)$$

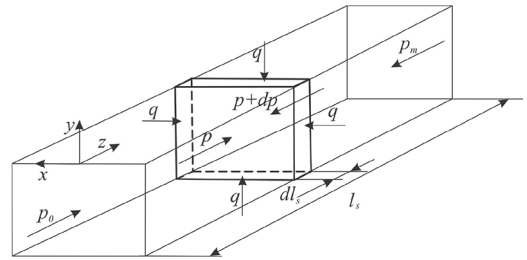
де  $\Delta Q$  — кількість теплоти, Дж;  $c_v$  — питома теплоємність кормосуміші, Дж/(кг·К);  $\rho$  — щільність кормосуміші, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — об'єм, який займає кормосуміш у каналі гвинта гранулятора, м<sup>3</sup>;  $\Delta T$  — зміна температури кормосуміші, К, звідки можна записати:

$$\Delta T = \frac{F_{\text{тр}} l_s}{c_v \rho V}. \quad (3)$$

Як зазначено в [2], найширше застосування серед гвинтових машин знайшли машини з прямокутним і трапецієподібним перерізом витка гвинта. Для визначення сили тертя кормосуміші по поверхнях робочих органів розглянемо поданий на схемі (рис. 1) рух елемента об'єму корму в прямокутному каналі гвинта гранулятора, причому глибина і ширина каналу гвинта змінюються лінійно залежно від його довжини.

У свою чергу, на підставі рис. 1 вираз сили тертя матеріалу по стінках каналу гвинта гранулятора і верхні робочої камери можна записати так:

$$F_{\text{тр}} = \int \mu \rho [(W_0 - k_w l) f_b + (W_0 - k_w l) \times \cos \alpha_H f_s + 2(H_0 - k_H l) \cos \alpha_W f_s] dl_s, \quad (4)$$



**Рис. 1.** Схема руху елемента об'єму матеріалу в каналі гвинта гранулятора зі змінними параметрами гвинта:  $p$  — тиск у каналі гвинта, Па;  $p_0$  — початковий тиск у каналі гвинта (атмосферний за бункерної подачі сировини), Па;  $p_m$  — тиск, що створюється матрицею гранулятора, Па;  $q$  — бічний тиск, Па

де  $f_b$ ,  $f_s$  — коефіцієнти тертя кормосуміші, відповідно, по матеріалу робочої камери та гвинта гранулятора;  $\mu$  — коефіцієнт бічного тиску;  $W_0$  — початкове значення ширини каналу гвинта, м;  $H_0$  — початкове значення глибини каналу гвинта, м;  $k_w$  — коефіцієнт зміни ширини каналу за довжиною гвинта;  $k_H$  — коефіцієнт зміни глибини каналу за довжиною гвинта;  $l$  — довжина гвинта, м;  $\alpha_W$  — кут підйому основи каналу гвинта, рад. (рис. 2);  $\alpha_H$  — кут звуження стінок каналу гвинта, рад. (рис. 3).

З аналізу функції гвинтової лінії, утвореної обертянням центра мас перетину каналу гвинта навколо його осі, можна записати співвідношення між довжиною гвинта і відповідною довжиною гвинтової лінії:

$$a = \frac{dl_s}{dl} = \pi \sqrt{\left( \frac{D - H_0 + k_H l}{W_0 - k_w l + t} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2}}, \quad (5)$$

де  $D$  — зовнішній діаметр гвинта, м;  $t$  — ширина стінки витка гвинта, м.

Аналізуючи рис. 2 і 3, запишемо:

$$\cos \alpha_H = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{k_H dl}{dl_s} \right)^2}}, \quad (6)$$

$$\cos \alpha_W = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{k_w dl}{2dl_s} \right)^2}}.$$

Для визначення тиску в каналі гвинта скористаємося залежністю, запропонованою [8]:

$$p = p_0 e^{\lambda l}, \quad (7)$$

де  $\lambda$  — коефіцієнт, що враховує вплив конструкційно-режимних параметрів гранулятора

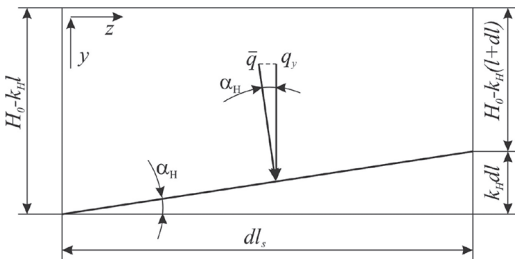


Рис. 2. Схема для визначення кута підйому підстави каналу гвинта

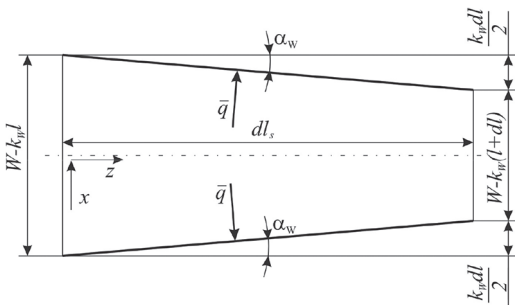


Рис. 3. Схема для визначення кута звуження стінок каналу гвинта

на зміну тиску в каналі гвинта.

З урахуванням залежностей (5–7) вираз (4) набуде вигляду:

$$F_{тр} = \pi \mu r_0 \int e^{\lambda l} \left[ (W_0 - k_W l) f_b + \left. \begin{aligned} &+ \frac{(W_0 - k_W l)}{\sqrt{1 + \left(\frac{k_H}{a}\right)^2}} f_s + \frac{2(H_0 - k_H l)}{\sqrt{1 + \left(\frac{k_W}{2a}\right)^2}} f \right] \times \right. \\ &\left. \times \sqrt{\left(\frac{D - H_0 + k_H l}{W_0 - k_W l + t}\right)^2 + \frac{1}{\pi^2}} dl. \right. \quad (8) \end{aligned}$$

Обчислити значення виразу (8) можна числовими методами. Для знаходження натурального рішення цього інтегралу потрібно прийняти деякі припущення. Так, оскільки матеріалом для виготовлення як гвинта, так і робочої камери гранулятора переважно є сталь, припустимо, що  $f_b = f_s = f$ .

Оскільки значення коефіцієнтів  $k_W$  і  $k_H$  відносно показника  $a$  (5) є величинами, меншими на два порядки, для квадратів співвідношень  $k_H/a$  і  $k_W/2a$  запишемо:  $k_H/a \ll 1$ ,  $k_W/2a \ll 1$ .

Аналізуючи вираз (5) для «типових» (за визначенням [10]) гвинтів, зокрема для гвинтів,

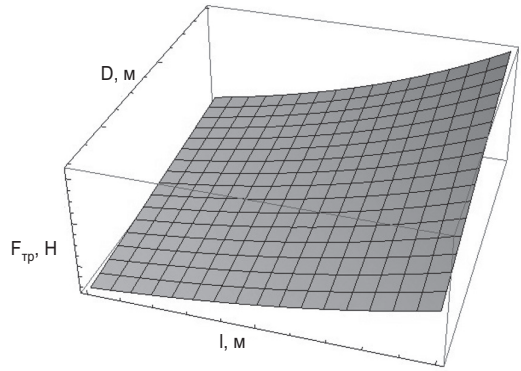


Рис. 4. Вплив діаметра і довжини гвинта на значення сили тертя по поверхнях робочих органів гранулятора

використовуваних нами в подальшому за проведення експериментальних досліджень (наприклад, з параметрами:  $k_H = 0,0375$ ;  $k_W = 0,0488$ ;  $H = 0,01212$  м;  $W = 0,01678$  м;  $t = 0,005$  м;  $D = 0,08$  м), можна стверджувати, що нехтування складовою залежності (5)  $1/\pi^2$  призводить до незначної зміни значення параметра  $a$ . Так, для наведених геометричних параметрів гвинта значення параметра  $a$  без урахування складової  $1/\pi^2$  зміниться на 0,517% ( $a = 9,84098$  і  $a = 9,79004$  відповідно).

Отже, з урахуванням прийнятих припущень вираз (8) набуде вигляду:

$$F_{тр} \approx 2\pi \mu r_0 \int e^{\lambda l} (D - H_0 + k_H l) \times \frac{W_0 - k_W l + H_0 - k_H l}{W_0 - k_W l + t} dl. \quad (9)$$

Інтегрування виразу (9) з урахуванням того, що при  $l=0$   $F_{тр}=0$ , дає змогу записати вираз шуканої сили тертя:

$$F_{тр} \approx \frac{2\pi \mu r_0}{k_W^3 \lambda^2} \left[ e^{\lambda l} k_W \left( (D - H_0) k_W^3 \lambda + k_H k_W \left( (D - 2H_0 + t) \lambda + k_W (l\lambda - 1) \right) + k_H^2 \left( (W_0 + t) \lambda + k_W (l\lambda - 1) \right) \right) + e^{\lambda \frac{W_0 + t}{k_W}} \lambda^2 (D k_W - H_0 k_W + k_H (W_0 + t)) \times \left( t k_W - H_0 k_W + k_H (W_0 + t) \right) \times Ei \left( \frac{\lambda (k_W l - t - W_0)}{k_W} \right) \right], \quad (10)$$

де  $Ei$  — інтегральна показова функція виду

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt.$$

Характер отриманої залежності (10) подано на рис. 4.

За даними ряду дослідників [14, 15, 16], питому теплоємність харчових і кормових продуктів можна визначити за допомогою залежності:

$$c_v = 1,424m_y + 1,549m_n + 1,675m_{ж} + 0,837m_3 + 4,187m_{H_2O}, \quad (11)$$

де  $m_y$  — масова частка вуглеводів у кормосуміші;  $m_n$  — масова частка протеїну в кормосуміші;  $m_{ж}$  — масова частка жиру в кормосуміші;  $m_3$  — масова частка золи в кормосуміші;  $m_{H_2O}$  — масова частка води в кормосуміші.

Коефіцієнти перед членами залежності

(11) є значеннями питомої теплоємності відповідних складових.

Загальний об'єм, який займає кормосуміш у каналі гвинта гранулятора, визначається з виразу:

$$V = \pi \int (H_0 - k_H l)(W_0 - k_W l) \times \sqrt{\frac{(D - H_0 + k_H l)^2}{(W_0 - k_W l + t)^2} + \frac{1}{\pi^2}} dl. \quad (12)$$

Отже, нами було отримано всі складові виразу (3), що дають можливість визначити зміну температури гранульованої кормосуміші, зумовлену роботою сил тертя в каналі гвинта гранулятора.

## **Висновки**

*У результаті теоретичних досліджень процесу руху пластифікованої кормосуміші в каналі гвинта гранулятора кормів було отримано вираз зміни її температури, зумовленої роботою сил тертя кормосуміші*

*по матеріалу робочих органів гранулятора. Ряд прийнятих у процесі роботи припущень свідчить про необхідність емпіричного підтвердження отриманих результатів досліджень.*

## **Бібліографія**

1. *Абрамов А.И.* Гранулирование комбикормов/А.И. Абрамов, Н.И. Полунина, Н.Я. Зицерман. — М.: Колос, 1969. — 103 с.
2. *Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография/А.С. Клинков, О.В. Ефремов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько.* — М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. — 248 с.
3. *Беляевский Ю.И.* Полнорационные брикеты и гранулы для жвачных/Ю.И. Беляевский, Т.Н. Сазонова. — М.: Россельхозиздат, 1977. — 240 с.
4. *Дослідження вмісту важких металів і нітратів у томат-продуктах/С.М. Василенко, Т.О. Ващук, В.В. Шутюк, В.І. Бондар/Наука. праці НУХТ.* — 2009. — Вип. № 29, Розд. II. — С. 88–90.
5. *Дядичев В.В.* Многосекционные червячные винты для переработки вторичных полимеров/В.В. Дядичев//Вісн. Кременчуцького держ. політех. ун-ту: Наук. праці КДПУ. — Кременчук: КДПУ, 2003. — № 2(19). — Т. 3. — С. 66–69.
6. *Журавлев В.Ф.* Основы теоретической механики/В.Ф. Журавлев. — М.: Физматлит, 2001. — С. 70–71. — 319 с.
7. *Лукашова В.В.* Моделирование процессу плавления в одночервячному экструдере/В.В. Лукашова, І.О. Мікульонок, Л.Б. Радченко/Упаковка. — 2005. — № 4. — С. 23–27; № 5. — С. 35–37.
8. *Остриков А.Н.* Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств/А.Н. Остриков, О.В. Абрамов. — СПб.: ГИОРД, 2003. — 352 с.
9. *Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов/К.Дж. Валентас, Э. Ротштейн, Р.П. Сингх (ред.); пер. с англ. под общ. науч. ред. А.Л. Ишевского.* — СПб.: Профессия, 2004. — 848 с.
10. *Раувендааль К.* Экструзия полимеров/К. Раувендааль; пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. — СПб.: Профессия, 2008. — 768 с.
11. *Стромберг А.Г.* Физическая химия: учеб. для хим.-тех. спец. вузов/А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко; под ред. А.Г. Стромберга. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 496 с.
12. *Bauser M.* Extrusion. Second Edition/M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert; translated from German by A.F. Castle. — Materials Park: ASM International, 2006. — 592 p.
13. *Extruders in Food Applications: [edited by Mian N. Riaz].* — Texas A&M University: Crc Press, 2000. — 240 p.
14. *Loveykin V.* Screw feeder: optimization of motion modes considering that the moments of resistance forces change under linear law/V. Loveykin, A. Javors'ka//MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. — Lublin, 2012. — V. 14, № 3. — С. 40–46.
15. *Polyschuk V.* Технології виробництва рослинної олії для використання в енергетичних цілях/V. Polyschuk/MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. — Lublin, 2010. — V. 12B. — С. 177–182.
16. *Singh R.P.* Introduction to Food Engineering/R.P. Singh, D.R. Heldman. — 2nd ed. — San Diego: Academic Press, 1993. — 768 p.

*Надійшла 4.06.2015.*